

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МЕХАНИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

**ГИДРОМЕХАНИКА И ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В
УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ: ИСТОРИЯ, ЭТАПЫ
РАЗВИТИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

В.И. ПОЛЕЖАЕВ

Препринт № 779

Москва 2005

АННОТАЦИЯ

В данном препринте рассматриваются истоки и становление научного направления по гидромеханике и процессам тепло- и массообмена в фундаментальных и прикладных исследованиях в условиях микрогравитации, основные этапы и результаты исследований под руководством академика В.С. Авдуевского. Дан обзор результатов исследований и научно-координационной деятельности, результатов экспериментов на орбитальной станции "Мир" и работ на переходном этапе от орбитальной станции "Мир" к Международной Космической Станции. Обсуждаются развитие исследований по механике невесомости и гравитационной чувствительности, концепция и направление современных фундаментальных и прикладных исследований и связи данного направления с направлениями исследований по изучению и освоению космического пространства.

Изложенный материал представляет расширенную версию доклада, посвященного памяти В.С. Авдуевского в связи с годовщиной его ухода (*) (см. также: <http://www.ipmnet.ru/~polezh/seminar.htm>).

(*) В.И. Полежаев "Гидромеханика и процессы тепло- и массообмена в условиях микрогравитации: история, этапы развития и современные направления фундаментальных и прикладных исследований". Объединенный семинар "Солнечная система и смежные проблемы физики и механики" (рук. М.Я.Маров, Э.Л.Аким, А.В.Колесниченко), "Механика невесомости и гравитационно-чувствительные системы" (рук. В.И. Полежаев и В.В.Сазонов), "Численное моделирование процессов тепло- и массообмена" (рук. В.И. Полежаев, Г.С.Глушко), 15.04 2004, ИПМ им. М.В. Келдыша.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы фундаментальных и прикладных исследований в условиях невесомости были основным направлением научной школы академика В.С.Авдуевского в последние годы.

Изложенное ниже не может дать представление о всех направлениях многогранной деятельности академика В.С. Авдуевского. Для этого нужна отдельная конференция, которую предполагается провести в недалеком будущем, но некоторое представление может дать сборник, посвященный 60-летию В.С. Авдуевского (*).

Начало интенсивного развития в нашей стране упомянутого научного направления относится к концу 60-х годов, когда в НИИТП были начаты систематические исследования рабочих процессов в двигательных установках ракет на жидком топливе. Направления деятельности этого института изложены в специальном томе, посвященном 70-летию РНИИ [1]. Лаборатория № 4, в которой широким фронтом велись работы по аэродинамике и теплообмену в ракетно-космической технике, была создана академиком Г.И. Петровым (см. сборник, посвященный воспоминаниям о Г.И. Петрове [2]). Но по мере развития космических проектов все больше внимания стало уделяться двигательным установкам, в том числе вопросам хранения, запуска двигателей в невесомости. Для решения этих задач в лаборатории №4, которой в то время руководил профессор, д.т.н. Д.А.Мельников, был создан отдел, руководимый к.т.н. В.С. Мироновым. Основу этого отдела составили сотрудники отдела № 3,

(*) Проблемы механики и теплообмена в космической технике. Сб. статей под ред. О.М. Белоцерковского. М., Машиностроение, 1982, 272 с.

которым прежде руководил В.С.Авдуевский (*).

В отчете [3] дан обзор состояния исследований, а также постановки задач, связанных с системами обеспечения запуска, хранением топлива в космическом полете, которые имеют непосредственное отношение к рассматриваемым ниже задачам. Этот отчет открыл новый этап работ по данному направлению.

С тех пор прошло немало времени, и сегодня исследования в условиях невесомости, в организации которых значительная роль принадлежит В.С.Авдуевскому, как руководителю отечественных программ по фундаментальным и прикладным исследованиям в условиях микрогравитации (**), сформировались в самостоятельное направление, отличающееся значительной спецификой, в связи с тем, что эти условия, реализующиеся в космическом полете, являются весьма сложным механическим состоянием, а процессы в гравитационно-чувствительных системах тесно связаны со многими другими сложными и все еще мало изученными процессами как в земных условиях, так и в поле тяжести других небесных тел. Так как под действием силы тяжести Земли происходила, как известно, длительная эволюция животного и растительного мира, в котором мы обитаем, то важным является вопрос о различных формах жизни на других небесных телах во Вселенной в

(*). К упомянутому времени В.С. Авдуевский уже занимал пост заместителя директора НИИТП, а начальником отдела №3 был назначен д.т.н.

Н.А.Анфимов (в настоящее время академик и директор ЦНИИМаш).

(**) Этот термин, ставший к настоящему времени международным, делает акцент на малые (но не нулевые) силы, действующие в реальном космическом полете.

зависимости от их полей тяготения.

Значительное внимание всему этому кругу вопросов уделял К.Э.Циолковский. В своей известной работе «Свободное пространство» (1883 г.) он обсуждал ряд актуальных и сегодня эффектов невесомости и впоследствии неоднократно возвращался к осмыслению и поиску путей их использования.

Однако К.И. Циолковский в качестве основной цели космических исследований выдвигал завоевание человеком космического пространства. Вопрос о практическом использовании состояния невесомости, как ресурса космического аппарата в коммерческих целях, тогда еще не стоял, хотя обсуждались проблемы и пути индустриализации космоса. По инициативе В.С. Авдуевского, как председателя комиссии АН СССР по разработке научного наследия К.Э.Циолковского, его работы, относящиеся к этому кругу вопросов были выпущены отдельным сборником (*).

Чтобы подойти вплотную к задаче практического освоения и использования невесомости, должна быть разработана космическая техника, а также технические системы, в первую очередь системы обеспечения тепловых режимов, запуска, системы жизнедеятельности, работающие в условиях невесомости. Работы в этих направлениях начали проводиться в нашей стране еще в 50-60-х годах, когда были созданы первые установки для наземного моделирования эффектов невесомости, в том числе башни сбрасывания, а также специальные самолеты-лаборатории. Некоторые результаты, относящиеся к обеспечению

(*) К.Э. Циолковский. Промышленное освоение космоса. Сборник научных статей. М., Машиностроение, 1989, 279 с.

жизнедеятельности, динамики и хранению топлива в баках, отражены в монографиях, вышедших в разные годы этого периода времени [4-9]. Вслед за этапом создания долговременных орбитальных станций и освоения длительных пилотируемых полетов, в которых на первом месте стояли вопросы космической медицины и космической биологии (главные составляющие общей программы исследований в условиях невесомости), были созданы предпосылки и для проведения специальных исследований, связанных с практическим использованием состояния невесомости.

Первая серия научных и научно-демонстрационных экспериментов, открывшая новую страницу исследований в невесомости, выполнена в 1968г. в полете космического корабля “Аполлон”. В 1972-73 г. эта программа была значительно расширена применительно к экспериментам на станции Скайлэб, результаты которых вызвали большой интерес и широко обсуждались в научной литературе тех лет. Наши читатели получили возможность ознакомиться с этими результатами благодаря переводу одного из первых американских сборников [10]. Следует отметить, что в отечественной научной литературе, когда эти исследования стали активно развиваться и в СССР, этот этап исследований не был достаточно объективно освещен. Советским ученым в тот период пришлось наверстывать упущенное, но следует отметить, забегая вперед, что в некоторых разделах этого направления, нам это удалось (*).

(*). Вклад советской науки и вклад К.Э. Циолковского был особо отмечен, спустя много лет, после того, как это направление в СССР получило значительное развитие, на международной конференции, проведенной совместно с Европейским Космическим Агентством в 1997 г. в России под председательством В.С. Авдеевского [11].

1. Исследования конвективных процессов в элементах КА в условиях космического полета. Общие закономерности теплообмена и температурного расслоения в замкнутых объемах

Для исследований конвективного теплообмена в элементах двигательных установок на жидком топливе в длительном космическом полете нужны были модели, методы, и именно к этому времени они появились в лаборатории №4 НИИТП. Разработка и применение численных методов в задачах гидро- и аэродинамики в это время велась интенсивно под руководством Г.И. Петрова, который руководил межотраслевым семинаром в ВЦ МГУ. Активное участие в работе этого семинара принимал профессор Г.Ф.Теленин (см. сборник, посвященный воспоминаниям о Г.И. Петрове [2]). Эта работа отражена в серии сборников «Методы сеток в задачах газовой динамики» издательства МГУ, которые выпущены в 1971-1973 г.г. под редакцией Л.А. Чудова, Г.С.Рослякова и общим руководством Г.И. Петрова. Задачи свободной конвекции, рассматривавшиеся среди многих других, требовавших применения новых методов, были одним из направлений, разрабатывавшихся автором под руководством В.Я.Лихушина и В.С.Авдуевского в отделе №3 Лаборатории №4 НИИТП.

Тепловые режимы космических аппаратов были в ведении отдела №3, и по их практическому решению был накоплен значительный опыт, о чем дает некоторое представление известная учебная монография, составленная под руководством и значительным влиянием В.С.Авдуевского [9]. Вклад естественной конвективной составляющей, в связи с отсутствием достаточно полных моделей, учитывался в то время

весьма приближенно, так как представления о конвекции в невесомости были весьма ограниченными. Вместе с тем оценки на основе “диффузионного приближения” в большинстве случаев давали некоторый “запас” в обеспечение теплового режима. Это достаточно хорошо понималось, но на повестке дня были более “горячие задачи”.

Тем не менее, проблема уже “витала в воздухе”. Поэтому именно в те годы в отделе №3 были поставлены и решены, по-видимому, впервые в мировой практике, задачи конвекции и теплообмена на основе полных уравнений Навье-Стокса сжимаемого газа, а впоследствии разработаны модификации этих методов для уравнений в приближении Буссинеска [12, 13], что дало начало разработке иерархии моделей тепловой гравитационной конвекции.

В качестве первой модельной задачи рассматривалась тепловая гравитационная конвекция воздуха в прямоугольной области при заданной разности температур на двух боковых поверхностях и двух других теплоизолированных стенках. В результате численных исследований была получена формула для расчета теплопередачи в виде зависимости безразмерного числа Нуссельта от числа Грасгофа, геометрии ячейки, числа Прандтля, которые участвуют в модели Буссинеска, и даны поправки к этой формуле за счет так называемых «небуссинесковских эффектов» (температурный перепад, отношение теплоемкостей, параметр гидростатической сжимаемости). Результаты решения этой задачи, в которой число Грасгофа (сила тяжести) изменялось в широких пределах, применялись при анализе тепловых режимов в отсеках космических аппаратов и уже тогда привели к идее использования механизма тепловой гравитационной конвекции, высоко чувствительного к силе тяжести, для

оценок величины микроускорения, что реализовано позднее в проекте датчика конвекции.

В.С.Авдеевский в это время уделял значительное внимание новым задачам, связанным с анализом космических экспериментов, для чего использовались самые передовые модели и методы, например, при интерпретации измерений параметров атмосферы Венеры [14]. Вскоре были решены и первые задачи конвекции в проницаемой пористой теплоизоляции при высоких температурах и давлениях [15], связанные с обеспечением теплового режима космического аппарата, спускаемого на поверхность Венеры.

Вместе с тем, в это же время были поставлены задачи расчета температурного расслоения в баках двигательных установок ракет на жидком топливе в условиях хранения на стоянке, в период запуска и выведения, а также при длительном космическом полете, в первую очередь при полете к Луне, что представляло наиболее трудную проблему. Эта задача теперь вновь становится актуальной в связи с необходимостью еще более длительного хранения больших количеств жидкого топлива в баках для полета к Марсу.

При хранении топлива наиболее важными характеристиками являются рост давления в баке и температуры на входе в двигатель, допустимой из условия появления кавитации. Поэтому представляет интерес не только теплопередача, но и температура на межфазной поверхности раздела, для расчета которой необходимо привлекать более полную модель перемешивания жидкости в баке с учетом положения межфазной границы в объеме бака. Определение последней в условиях невесомости представляет самостоятельную задачу. Расчеты без учета

конвекции, проводившиеся на начальном этапе, давали значительные отличия от реальных режимов, в которых, как было выяснено позднее, значительную роль играет не только тепловая конвекция, обусловленная малыми массовыми силами, которая сама по себе может быть достаточно интенсивной, но и конвекция, обусловленная градиентами сил поверхностного натяжения (конвекция Марангони). В то время для космической техники это понятие было еще совершенно новым. В предельном случае при полете частично заполненного топливом бака в режиме теоретической невесомости ($g = 0$) межфазная поверхность, в случае топлива, смачивающего стенки, сворачивается в пузырь, который может в зависимости от возмущений располагаться в различных частях бака. Одним из возможных и наиболее простых расчетных случаев является его расположение внутри, в центре бака. При этом единственным механизмом перемешивания в режиме теоретической невесомости является термокапиллярная конвекция, которая, как и тепловая гравитационная конвекция, проявляется при потере устойчивости механического равновесия или при его отсутствии. Второй механизм встречается чаще, но и первый представляет большой интерес. Если создать возмущение в закритической области, то в первом случае оно развивается, и, в итоге, при не слишком большой надкритичности, реализуется стационарное течение, которое показано на рис. 1b. Проводя расчеты последовательно при уменьшении числа Марангони, по аналогии с выполненными ранее расчетами для тепловой гравитационной конвекции, можно получить оценки критического числа Марангони. Если температура стенки неоднородна и зависит от угловой координаты, как показано на рис.1a, то механического равновесия на межфазной

поверхности нет, что приводит к циркуляционному течению, направленному от холодной части поверхности к нагретой, в связи с обычным для большинства жидкостей уменьшением поверхностного натяжения от температуры.

Позднее, когда возникла задача использования эффектов невесомости в целях космического материаловедения, для роста кристаллов была поставлена задача реализации диффузионного режима при полном отсутствии макроскопического движения, которое в этом случае могло быть вредным. Но при хранении топлива этот тип конвекции приводит к достаточно хорошему перемешиванию. Если при этом учесть совместное действие термокапиллярной и слабой тепловой гравитационной конвекции, то, как показано на рис. 2, температура межфазной поверхности может приближаться к среднемассовой. Эти представления, впервые полученные теоретически в работе [16], в дальнейшем были подтверждены при прямых испытаниях разгонного блока в начале 70-х годов.

Таким образом, наличие достаточно интенсивных конвективных течений в топливных баках позволяет реализовать схему хранения, при которой расчетной является среднемассовая температура межфазной поверхности. Ее можно достигнуть либо в естественных условиях, либо при внесении возмущающих воздействий, создающих угловое ускорение, например, с помощью микродвигателей. Однако, идеализированная схема, в которой паровой пузырь находится внутри бака, недостаточна, так как эта конфигурация может быть удержана лишь специальными средствами. В действительности паровая подушка может примыкать к стенке бака, причем в невесомости она может занимать место либо вверху, либо внизу

бака, и в этом случае, если принять во внимание влияние тепловой гравитационной конвекции, рост температур поверхности будет различным, но в обоих случаях, как показано на рис. 3, при достаточно больших временах средняя температура поверхности может быть выше среднемассовой [17], что связано с существенным влиянием конвекции.

В такой достаточно сложной ситуации оказывается полезным прием, типичный для построения инженерных методик расчета, которые получили развитие в работах В.С.Авдеевского, относящихся к внешнему теплообмену, и широко применялись в конструкторских расчетах. Применяя этот прием в данном конкретном случае, среднюю температуру межфазной поверхности, которая реализуется вследствие сложных конвективных течений, можно представить в виде суммы

$$\theta_s = \theta_{so} + \Delta\theta_k, \quad (*)$$

где θ_s - средняя температура межфазной поверхности, θ_{so} - средняя температура межфазной поверхности при отсутствии конвекции (перенос тепла только теплопроводностью), $\Delta\theta_k$ – конвективный добавок. При обобщении характеристик температурного расслоения в зависимости от числа Грасгофа, было показано, что величина $\Delta\theta$ в зависимости от числа Грасгофа имеет максимум для замкнутых объемов разной геометрии (см. сводку результатов особенностей ослабленной конвекции на рис. 4). Физический смысл этих максимумов заключается в том, что в диффузионном режиме конвективная составляющая $\Delta\theta_k$ равна нулю, в связи с отсутствием течения. При больших числах Грасгофа, соответствующих земным условиям, эта величина также стремится к нулю в результате сильного перемешивания. Но в промежуточном режиме, когда пограничные слои еще не сформированы, конвекция приводит к

расслоению [13]. Наличие таких максимумов лежит в основе исследований гравитационной чувствительности и позволяет, в частности, определить, может ли быть получен качественно лучший результат на Земле, например, по однородности распределения примеси по сравнению с условиями микрогравитации. Следует обратить внимание и на другие особенности ослабленной конвекции, впервые установленные в [12-15] (рис. 4). К ним относится уменьшение локального потока тепла по сравнению со случаем переноса тепла теплопроводностью (теоретическая невесомость). Этот эффект связан с локальным перегревом и отсутствует при развитой конвекции. На рис. 4а показано уменьшение длины зоны локального перегрева при увеличении силы тяжести. Отметим, что существенную роль играет характер тепловых граничных условий, например, в случае с заданными температурами боковых поверхностей и теплоизолированными в режиме развитой конвекции устанавливается вертикальный градиент температур, мало зависящий от силы тяжести в отличие от случая с заданным потоком тепла (рис. 4b). Области ухудшения теплообмена и максимальные температурные расслоения были найдены в нестационарных режимах развития конвекции во времени, а также при наличии других воздействий, приводящих к ослаблению конвекции (градиент гравитационного поля, введение пористого наполнителя, наличие устойчивой стратификации и др.). В трехмерной модели конвекции на нагретой (и соответственно холодной) стенке имеются зоны локального перегрева (переохлаждения), уменьшающиеся при увеличении числа Грасгофа [18]. В дальнейшем, уточняя приближенный прием, связанный с применением формулы (*) в работе [19], была решена сопряженная задача конвективного теплообмена и температурного

расслоения в двухслойной системе, содержащей жидкость и паровую подушку, с учетом переноса тепла по оболочке (рис. 5), которая сегодня вновь стала актуальной.

Таким образом, к моменту начала развития работ по космическому материаловедению у российских ученых был достаточно большой задел исследования конвективных процессов в невесомости, что позволило придать микрогравитационным наукам, первоначально имевшим за рубежом сугубо эмпирическую основу, строго количественный характер.

2. Развитие работ по космическому материаловедению

Начатые в 70-х годах исследования по космическому материаловедению, направленные вначале на получение материалов более высокого качества, чем на Земле, в коммерческих целях, для разработчиков космической техники, по своей постановке, были неожиданными. Забегая вперед, отметим, что эта задача оказалась крайне трудной в связи с открытием чрезвычайно высокой гравитационной чувствительности, следствием которой являются разнообразные побочные эффекты в реальных условиях космического полета, отличающихся от теоретического условия невесомости, а также ввиду конкуренции с земными технологиями, альтернативными невесомости.

Тем не менее, первые результаты были весьма обнадеживающими. На рис. 6 приведен результат кристаллизации монокристалла антимонида индия на ракете-зонде, а слева – результат этой же кристаллизации на участке выведения при наличии большой перегрузки, показавшей наличие полос роста, то-есть полосчатой микронеоднородности, которая

отсутствовала в условиях микрогравитации. Аналогичные результаты были также получены на станции Скайлэб и совместном полете кораблей “Союз-Аполлон”, а в дальнейшем многими другими авторами, в том числе в СССР (см., например, [11, 21, 22]). Качественное объяснение улучшения однородности связано с устранением колебаний температуры на фронте кристаллизации за счет конвективной неустойчивости и подавлением этих колебаний в диффузионном режиме в условиях космического полета. Необходимость устранения микронеоднородности распределения легирующей примеси и ее теоретическое предсказание привело к развертыванию интенсивных исследований конвективных неустойчивостей в различных методах выращивания монокристаллов. Однако в то время теоретические методы конвективной устойчивости еще не были достаточно развиты для предсказания такого рода эффектов, тем более для моделей роста кристаллов.

К середине 80-х годов было выполнено значительное количество экспериментов на космических станциях, в которых были получены и побочные эффекты, в частности, показавшие наличие повышенных макронеоднородностей в космических экспериментах по кристаллизации легированных полупроводников. Здесь не ставится цель дать их обзор. Отметим лишь некоторые положения, характеризующие подход к этому новому научно–техническому направлению, который вырабатывался в это время и был сформулирован в предисловии к сборнику трудов Первого из серии Всесоюзных семинаров по гидромеханике, тепло- и массообмену в невесомости [21], которые, начиная с 1979 г., проводились систематически под руководством В.С.Авдуевского в течение более 20 лет, а в 90-х годах вышли на международный уровень.

В задачах космического материаловедения, исследующихся с помощью гидродинамических моделей, должны быть прежде всего сформулированы искомые характеристики, улучшение которых следует достичь в условиях невесомости. Оказалось, что здесь даже специалисты не всегда знают, что следует искать. В этом случае были сформулированы так называемые “гидродинамические критерии качества” к которым относятся макро- и микронеоднородности материалов или, например, уровень термоупругих напряжений или напряжений, возникающих под действием собственного веса, которые могут вызывать дислокации. В последнем случае нужно углубляться в теорию дефектов кристаллов. Следующей задачей является разработка моделей, адекватно описывающих данные характеристики материалов. Это весьма сложная задача, если использовать так называемые «глобальные» или сопряженные модели, которые в последнее время получили развитие в технологической практике.

Поясним такой подход, давший начало развитию научных основ рабочих процессов в условиях невесомости (см. также [21-24]) на примере анализа и интерпретации макронеоднородности распределения примеси в легированных полупроводниках. Ожидалось, что поперечная неоднородность распределения легирующей примеси в ампуле при направленной кристаллизации будет меньше, чем в земных условиях. Однако в эксперименте МА-150, по кристаллизации германия, легированного кремнием и сурьмой, выполненном по программе “Универсальная печь” при совместном полете космических кораблей “Союз-Аполлон” после их стыковки, поперечная макронеоднородность не только не устранилась, но оказалась больше, чем на Земле [25]. Это было

непонятно, так как считалось, что наличие конвекции всегда уменьшает макронеоднородность ввиду перемешивания. Ситуация несколько прояснилась после решения задач о поперечной концентрационной неоднородности, вызываемой тепловой гравитационной конвекцией в модели, показанной на рис.7, где, следуя [24], приведен результат расчета поперечной концентрационной неоднородности при фиксированных значениях $\frac{H}{L} = 4$, $Pr = 0,04$, $Sc = 10$, но при различных числах Грасгофа Gr , и ориентации вектора силы тяжести. Если, например, фиксировать начальную точку на рис. 7 по концентрационной неоднородности в земных условиях, и она будет вблизи максимума справа, то в невесомости может быть получен лучший результат, но если точка 1 находится в земных условиях далеко справа, а точка 2 в условиях микрогравитации находится вблизи максимума макронеоднородности, то в условиях микрогравитации может быть получен заведомо худший результат, что и было показано в дальнейшем. Ниже на рис.7 показан интересный в практическом плане результат, связанный с параметрическим исследованием максимума неоднородности в зависимости от скорости движения фронта кристаллизации. В упоминавшемся эксперименте число Грасгофа на Земле было справа от максимума, а в полете из-за недостаточного контроля микрогравитационной среды и наличия дополнительных возмущений (плавка шла в процессе «рукопожатия на орбите»), микроускорения, по-видимому, могли достигать величин 10^{-2} , 10^{-3} , при которых число Релея близко от точки максимума макронеоднородности, обусловленной слабой конвекцией. В монографии [24] дана более полная библиография работ по моделированию этого класса задач, первые из которых были выполнены в конце 70-х годов.

Дано систематическое изложение разработанных к этому времени в Институте проблем механики РАН моделей общего назначения и специализированных, с учетом условий микрогравитации, а также первых трехмерных расчетов. В последующем подобные зависимости стали известными и на Западе благодаря работам Р. Брауна (см. более полную библиографию в [24]). На рис. 8 дан фрагмент из наиболее цитируемой на Западе по этому поводу работы [26], где эффект, обусловленный слабой конвекцией при малых числах Релея, а также наличие второго максимума, обусловленного появлением колебаний, не являются следствием моделирования, а в полном смысле “нарисованы”. Во второй половине 90-х годов, выполнены трехмерные расчеты и в области колебательных режимов конвекции, показавшие, в частности, появление колебаний и наличие второго максимума. Некоторое представление о достигнутом к этому времени уровне анализа трехмерных эффектов дает рис. 9, где показано, что двумерная модель достаточно хорошо предсказывает поперечную концентрационную неоднородность, но не дает описания колебательных эффектов, имеющих существенно трехмерный характер [27]. Дальнейшие исследования показали, что свойствами достигать максимума в зависимости от параметра, характеризующего интенсивность конвекции (Ra , Re , Mn), обладают все типы гравитационной и негравитационной конвекции, и максимум скалярной компоненты, например, концентрации примеси, достигается в определенном диапазоне указанных гидродинамических критериев подобия, причем некоторые виды динамического воздействия позволяют их существенно

уменьшить (*). Развитие вычислительной техники и численных методов в дальнейшем позволило проводить прямые расчеты переходных и турбулентных режимов, которые имеют место в земных условиях, что имеет решающее значение для судьбы космического материаловедения.

В рамках упомянутых семинаров рассматривались результаты, полученные в условиях невесомости и с помощью других методов (метод жидкостной эпитаксии, газотранспортный метод, метод бестигельной зонной плавки, аналоги метода вытягивания кристалла из расплава (метод Чохральского), из которых наиболее перспективным для условий невесомости считался метод плавающей зоны, позволяющий избежать контакта со стенками тигля. Однако, и в этом методе выявились побочные эффекты - неустойчивость свободной поверхности жидкости и термокапиллярные эффекты, включая термокапиллярную неустойчивость. Практически во всех упомянутых методах роста из расплава, за исключением жидкостной эпитаксии, ввиду малого геометрического размера (толщины эпитаксиального слоя) возникает задача конвективной неустойчивости, решение которой должно определить условия появления колебаний, вызывающих полосчатую неоднородность. Для теории конвективной устойчивости это трудные задачи, однако, по инициативе академика Г.И.Петрова, многие постановки такого рода задач стали рассматриваться на семинаре по нелинейным задачам теории гидродинамической устойчивости, и были предприняты усилия, которые

(*) Вместе с тем следует отметить, что подобные параметрические расчеты дают предельные значения, реализация которых зависит от конкретных условий полета КА, и в последние годы в этом отношении выполнена большая работа.

стали приносить плоды лишь в конце 90-х годов, когда были получены критические числа появления колебаний на основе решения задачи об устойчивости основного течения относительно трехмерных возмущений в гидродинамических моделях роста кристаллов в сочетании с прямым численным моделированием [11] (*). Вместе с тем, результаты экспериментов по кристаллизации полупроводников демонстрируют весьма высокую чувствительность процесса кристаллизации к внешним пространственным возмущениям. Это свидетельствует о том, что здесь еще многое не понято, но сегодня здесь имеются значительно большие возможности, чем на начальном этапе развития работ по космическому материаловедению.

Однако, получение материалов электронной техники - далеко не единственное направление космического материаловедения. Большие надежды возлагались на биотехнологию, в особенности на разделение биологических и лекарственных веществ, обещавших миллиардные прибыли. В России и за рубежом были проведены космические эксперименты в этом направлении. Наиболее распространенным было разделение веществ в свободном потоке (ЭФСП) так называемого буферного раствора в электрофоретической камере с использованием явления электрофореза, состоящего в смещении частиц в электрическом поле. Главной задачей улучшения качества разделения веществ в этом случае было устранение искажений, обусловленных тепловой гравитационной конвекцией, которая возникает в результате джоулева

(*) См. современное состояние этого направления исследований в обзоре Никитин Н.В., Никитин С.А., Полежаев В.И. Конвективные неустойчивости в гидродинамической модели Чохральского. Успехи механики, 2003, 4, 1-45.

тепловыделения (см. описание моделей разделения путем электрофореза в монографии [24]). При моделировании, в предположении электронейтральности потока жидкости, получены вторичные структуры, искажающие картину плоского параллельного течения, и показаны возможности их устранения в зависимости от перепада температур между потоком буферного раствора и “образца”, а также других факторов. На рис.10 показан один из результатов моделирования вторичных структур, возникающих на входном участке электрофоретической камеры. Оказалось, что длина участка искажения в зависимости от перепада температур достигает минимума при определенном числе Грасгофа, как показано на рис. 11, то есть условия невесомости в этом отношении позволяют оптимизировать процесс разделения. Однако, в условиях космического полета проявились и другие, негравитационные, явления, искажающие процесс фокусировки при разделении, которые обусловлены, в частности, электромагнитной неустойчивостью. Последняя не принималась во внимание при проектировании экспериментов этого класса. Результаты многих полетных экспериментов так и не были до конца проанализированы, и эта тематика угасла. Однако, следует отметить, что, хотя коммерческий эффект оказался явно не в пользу электрофореза в свободном потоке в условиях невесомости в сравнении с земным, этот метод в силу своей высокой производительности все же может оказаться конкурентноспособным в будущем. Космические эксперименты оказались весьма важными в совершенствовании ЭФСР, так как появился ряд патентов, идеи которых были стимулированы упоминавшимися работами.

Таким образом, этап развития космического материаловедения 70-х – 80-х годов многое дал для понимания роли процессов тепло- и массообмена в технологиях получения материалов и их характеристик, требуемых для улучшения качества материалов и веществ, роли гравитационных эффектов и важности моделирования технологических процессов. Внутренняя логика развития этого направления привела в конце 80-х годов к формулировке концепции “технологической гидромеханики”, которая была сформулирована в совместном докладе академиков В.С. Авдуевского, А.Ю.Ишлинского и автора на заседании Президиума АН СССР [29]. Было выпущено постановление Президиума АН СССР о развитии этого направления, которому не суждено было в полной форме реализоваться ввиду происшедших изменений политической системы СССР и связанных с этим событий. Работы по “технологической гидромеханике” в развернутой форме представлены в сборнике статей по материалам секции на Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике (*). При этом изучаются гидро- и газодинамические процессы в технологиях получения материалов и разделения веществ, а условия микрогравитации рассматриваются, как один из видов различного рода управляющих воздействий (тепловых, динамических, магнитных и др.). Отметим еще, что в 80-х годах на факультете повышения квалификации Московского авиационного института был организован первый этап обучения специалистов в области технологии основам космического материаловедения, выпущено

(*) Гидромеханика и тепломассобмен при получении материалов. Под ред.

В.С. Авдуевского, В.И. Полежаева. М.: Наука, 1990 г.

первое учебное пособие, в котором изложен накопленный к тому времени опыт преподавания основ этого нового научно-технического направления (*).

3. Развитие фундаментальных исследований в невесомости. Итоги исследований на орбитальном комплексе Мир и VII Российский симпозиум

В конце 80-х годов появились тенденции по использованию микрогравитации среды для изучения физических основ рабочих процессов и фундаментальных задач теоретической физики. В этом ключе написаны известные коллективные монографии, выпущенные под эгидой ESA [20] и NASA [30]. Вместе с тем была осознана необходимость более точного учета особенностей космического полета для количественного определения микрогравитационной среды. Эти мысли высказывались в отечественных монографиях и статьях еще в начале 80-х годов [21-24], причем при значительно более полном акценте на применение методов моделирования. Под руководством В.С. Авдуевского в Российском Космическом Агентстве был создан Совет по исследованиям в области микрогравитации. Отделение механики и процессов управления по инициативе академика Г.Г.Черного провело специальную сессию “Задачи механики в условиях микрогравитации”, материалы которой, в том числе выступление В.С.Авдуевского в дискуссии круглого стола, опубликованы

(*) В.И. Полежаев. Механика невесомости и технологические эксперименты.

Учебное пособие. МАИ им. С.Орджоникидзе, 1983, с. 47.

в специальном выпуске журнала “Механика жидкости и газа” [31]. Дальнейшее развитие исследований в 90-х годах показало усиление этих тенденций, при этом существенную роль сыграли экспериментальные исследования, проводившиеся представителями многих стран, в том числе американскими исследователями, на станции МИР.

Для полного освоения микрогравитационной среды необходимо развитие связанных задач гидромеханики и теоретической механики, в которых знание микроускорений играет принципиальную роль. Это лежит в основе нового направления российских фундаментальных исследований, относящихся к конвективным процессам вблизи критических параметров состояния. Это направление работ находится на стыке теплофизики и механики, причем для российской теплофизики этот класс задач интересен, в частности, тем, что еще в 60-е годы в СССР выполнены основополагающие исследования в области гравитационных эффектов околокритических сред, хотя предложения по исследованию в невесомости по разным причинам не выдвигались.

Благодаря международной кооперации российским исследователям удалось занять свое место в этой группе работ и присоединиться к группе исследователей из Франции и Германии, которые к этому времени уже накопили достаточно большой опыт исследований околокритических сред на станции Мир. Сформулированы предложения по систематическому исследованию свободной конвекции вблизи критической точки, где экспериментальные исследования на станции Мир сочетаются с теоретическими исследованиями на основе моделей с использованием уравнений Навье-Стокса сжимаемых сред с уравнением состояния несовершенного газа. Вплотную к этим работам примыкают работы по

датчику конвекции Дакон, по исследованию свободной конвекции в совершенных газах на борту космических аппаратов. Идея прибора предложена в ИПМ РАН, а сам прибор разработан на кафедре общей физики Пермского университета [32-34].

Следует отметить первоклассную работу космонавтов-исследователей С.В.Авдеева, Г.И.Падалка, А.Ю.Калери в орбитальных условиях. На рис.12 показано фото установки Алис-2, являющейся модификацией установки Алис-1, наверху которой смонтирован прибор Дакон. Эти два прибора работали совместно в последних экспедициях на станции Мир. Возвращение уникальной французской установки Алис-1 по исследованию околокритических сред со станции Мир на Землю в рамках соглашения, которое было достигнуто между РКК «Энергия» и NASA, позволило сохранить ее для наземных исследований.

В исследованиях по космическому материаловедению и фундаментальным исследованиям в невесомости получено много новых знаний, которые можно применить для дальнейшего развития космической техники и длительных пилотируемых полетов человека в космическом пространстве. Новые знания особенно актуальны при разработке новых поколений космической техники, так как многие технические решения были приняты достаточно давно. Такие соображения лежали в основе последнего при жизни В.С.Авдуевского VII Российского симпозиума по фундаментальным и прикладным исследованиям в условиях невесомости, который был проведен под его руководством и при активном участии в Институте проблем механики РАН в апреле 2000 года.

В.С. Авдеевский уделил большое внимание формированию программы VII Российского симпозиума, на котором удалось собрать оставшихся в России специалистов, ученых и рассмотреть состояние отечественных исследований на орбитальном комплексе Мир в преддверии завершения его работы. В трудах VII Симпозиума изложены основные доклады, дана концептуальная оценка ведущихся работ, приведены материалы дискуссий, состоявшиеся на заседаниях, даны заключения экспертов по отдельным секциям, приведены итоги общей заключительной дискуссии круглого стола. Таким образом, сформулирована программа российских исследований, представленная ведущими научными школами Москвы, Санкт-Петербурга, Перми, Новосибирска, Ростова и др. [33].

На первое место в этой программе выдвигаются исследования физических основ гравитационной чувствительности для поддержки большого числа разнообразных приложений в науке, технике, технологии. За ними следуют исследования гравитационной чувствительности в медико-биологических процессах. Далее следует раздел по космическому материаловедению, который назван, как «Обоснование и перспективы космического материаловедения». По предложению В. С. Авдеевского этот раздел сформулирован таким образом ввиду того, что обстановка в области космического материаловедения крайне сложна. С одной стороны были получены материалы, которые можно назвать эталонными, с другой стороны получены материалы с дефектами. Ведутся работы по поиску и устранению побочных эффектов в невесомости. Но, как правило, это зависит от тех или иных финансовых вложений в научную разработку высоких наземных технологий, а также сроков разработки этих

технологий в земных условиях. Поэтому продолжают попытки использовать условия невесомости для улучшения характеристик конкретных материалов (*). Однако, в современных условиях в этом отношении нужна довольно узкая специализация. Побочные эффекты, о которых шла речь выше, говорят о том, что в невесомости есть фундаментальные причины, связанные с процессами тепломассообмена, которые могут приводить к ухудшению материалов.

Хотя стоимость космического производства необычайно высока, и несмотря на трудности получения материалов высокого качества, легенда об опытно-промышленном производстве в космосе оказалась весьма стойкой, и у нас она порой используется конструкторами для обоснования перспектив разработки того или иного космического комплекса. Вместе с тем нужно серьезное научное обоснование космического производства с учетом текущего состояния наземной технологии.

В работах Симпозиума рассмотрены многопараметрические модели, например гидродинамическая модель метода Чохральского, в которой имеется несколько управляющих параметров: геометрические – относительная высота расплава и относительный диаметр кристалла, динамические – Re_s и Re_c , число Грасгофа, число Марангони, определяющие естественную конвекцию и число Прандтля, определяющее физические свойства, к которым добавляются тепловые граничные условия на тигле и поверхности расплава. И, если даже число Грасгофа положить равным нулю, то окажется по крайней мере семь параметров,

(*) см. например, программу исследований космического туриста Г. Олсона.

Известия, 22.05.2004 г., стр.13.

которые существенно влияют на упомянутые технологические характеристики. Поэтому, планируя эксперимент в невесомости, нужно убедиться в том, что выбраны оптимальные земные условия. Главным выводом упомянутых исследований является то, что для подавления колебаний в наземных промышленных методах требуется довольно “грубая” невесомость порядка $g/g_0 = 10^{-2} - 10^{-3}$. Эти соображения должны быть основой для оценок экономической эффективности космического производства некоторых видов материалов электронной техники и оптоэлектроники, качество которых можно улучшить. Но на начальных этапах развития космического материаловедения сведений о рабочих процессах было недостаточно, а их получение требует длительных наземных исследований. Поэтому, если фактор времени может быть резко сокращен в космическом производстве, то это может быть решающим аргументом при получении коммерческого результата в конкурентной борьбе на рынке высокотехнологичной продукции. Рассмотрению таких вопросов, относящихся к наземным альтернативам космического материаловедения и стратегии будущих исследований, посвящена одна из последних работ В.С.Авдуевского [34].

Под руководством В.С.Авдуевского выпущен специальный номер журнала “Космические Исследования”, в котором опубликованы результаты экспериментов на станции МИР [35]. Этот номер имеет особую важность в связи с тем, что анализу и интерпретации экспериментов на станции МИР в России уделено меньше внимания, чем, например, во Франции, где проведен специальный Симпозиум, посвященный результатам экспериментов на станции МИР.

4. Координация исследований в области микрогравитации на Международной космической станции. Концепция механики невесомости

Так как на МКС международный фактор приобрел более существенное значение, чем в работах на станции «Мир», важно не только следить за тем, что и как делают наши партнеры, но и принимать активное участие в кооперации. В этом отношении существенно участие России в деятельности Международной Стратегической Планирующей Группы (IMSPG), которая включает представительство всех космических агентств и является международным органом, рассматривающим вопросы постановки экспериментов на МКС. Однако, лишь около 4-х лет тому назад российской стороной была подписана хартия, хотя нет уверенности в том, что имеется достаточное понимание того, что нужно в принципе делать внутри этой группы.

Одним из важных вопросов, имеющих отношение ко всем партнерам по МКС, является вопрос об обеспечении необходимых условий по микроускорениям и данными по микроускорениям (насколько эта задача важна, было сказано выше). Отметим, что в NASA к этому отнеслись, как к сертификации любого продаваемого продукта, а таковым в данном случае является микрогравитационный ресурс. На американском сегменте МКС имеется низкочастотный (MAMS) и высокочастотный (SAMS) акселерометры. Кроме того, на американском сегменте поставлена и испытана виброзащитная платформа. До последнего времени проводились ежегодные конференции по обучению пользователей (MEIT), на которых

представители группы PIMS рассказывали, какими данными могут располагать руководители проектов [36].

Начиная с 1997 г., в Институте проблем механики РАН работает постоянно действующий семинар «Механика невесомости и гравитационно-чувствительные системы», который ставит перед собой такую же цель. Аннотации выполненных докладов помещены на сайтах Интернет и выпущены в виде препринтов [37]. На этом семинаре состоялись выступления представителей США, Канады, Китая. Эта стратегия исследований продолжается в работах по околокритическим средам в рамках отечественного проекта Крит [38]. Таким образом, здесь есть предмет для дальнейшей работы, которая должна делаться совместно механиками и представителями других дисциплин в международном научном сообществе.

Такая задача была сформулирована и в программе подсекции Международного съезда по теоретической и прикладной механике в 2000 году в Чикаго, которая называлась «Microgravity Mechanics». Одной из ведущих тем этой подсекции была связь микроускорений с гравитационно-чувствительными системами, в том числе с помощью конвективного датчика, который был представлен в брошюре с кратким содержанием этой подсекции [39].

Одной из актуальных задач механики невесомости является изучение требований к микрогравитационной среде. На рис. 13 показана стандартная амплитудно-частотная кривая, принятая в настоящее время на МКС [40], и вызывающая дискуссию, так как она недостаточно обоснована. Например, не учитывается движение с угловым ускорением, так как ее квазистатическая часть постоянна и универсальна для всех

случаев. Основная амплитудно-частотная часть имеет линейный характер, причем влияние осредненных конвективных течений, например на концентрационную неоднородность, такая кривая не учитывает, так как это понятие при ее построении не использовалось. Поэтому сегодня эта кривая, не являющаяся универсальной, должна быть подвергнута проверке с помощью математических моделей.

Сравнительно недавно стали возможны расчеты распределения примеси на основе полной модели трехмерной конвекции в расплаве полупроводника в условиях космического полета при параметрах, которые реализованы в космических экспериментах [41]. Как показано на рис. 14, при моделировании на основе трехмерных уравнений получены концентрационные неоднородности, вызываемые осредненными течениями в условиях вибраций. Нахождение максимума неоднородностей дает понятие о предельном влиянии осредненных течений.

Однако, если имеется свободная поверхность, то в этих же условиях может проявиться эффект концентрационной неоднородности, обусловленный термокапиллярной конвекцией в зависимости от числа Марангони, который оказывает большее влияние, чем вибрационная конвекция в условиях естественного микрогравитационного фона.

Современные требования к микрогравитационной среде и возможности моделирования позволяют сформулировать и реализовать на МКС предложения о проведении так называемого глобального теста, суть которого состоит в обеспечении всей цепочки исследований от измерений и расчетов микроускорений до моделирования гидродинамических процессов, которые необходимо сочетать с экспериментальным

исследованием той или иной высокочувствительной среды (см. например, [38]).

5. Проблемы реструктуризации исследований в условиях микрогравитации

В заключение остановимся на современных тенденциях реструктуризации, которые стали весьма актуальными в связи с сокращениями исследований в условиях микрогравитации в США, где эти исследования велись с большим размахом более 30 лет. На рис.15 представлена реструктуризованная программа исследований, содержащаяся в докладе директора отдела NASA по исследованиям в условиях микрогравитации [43] с некоторыми нашими комментариями и добавлениями. Здесь имеется три больших раздела. Первый составляет фундаментальные исследования, которые в достаточной степени детализированы, например, исследования фазовых переходов, структур, самоорганизации. Эти вопросы рассматривались на нашем семинаре, в частности, в последнее время. В физике конденсированных сред можно отметить исследования околокритических явлений, которые интенсивно ведутся в нашем институте, гидродинамики квантовых жидкостей, обладающих самой высокой гравитационной чувствительностью.

Отдельным разделом представлены измерения констант в фундаментальных законах физики, которые требуются с очень высокой точностью, а также теплофизических свойств, например, коэффициентов диффузии, которые интенсивно ведутся за рубежом, а у нас этим мало занимались, и набирающее силу направление по изучению биофизических

свойств живой материи. Центральный раздел этой программы связан с дальнейшим исследованием космической техники и систем жизнеобеспечения пилотируемых полетов. Здесь есть, например, раздел по пожаро- и взрывобезопасности космических полетов, которым занимались в ИПМех РАН совместно с Центром им. М.В.Келдыша [35]. В этом разделе большую роль играют вопросы температурного расслоения при длительном хранении топлив в баках, а также вопросы кипения, конденсации, тепловых труб, то есть всех тех процессов, которые связаны с работой технических систем в условиях невесомости. Отметим, что сегодня наблюдается повышенная активность в изучении этих вопросов. Наконец, третий раздел всей этой большой программы называется так: что дают исследования в условиях невесомости для улучшения земной технологии, повышения уровня жизни на земле?

Ответы на эти вопросы не являются простыми, так как исследования невесомости, являясь колоссальным катализатором всех земных исследований, воздействуют косвенно, и те огромные сдвиги, которые произошли в технологии, обязаны в значительной степени исследованиям в невесомости. И здесь важны и упоминавшиеся наземные альтернативы. Такого рода программу можно было бы дополнить вопросами, связанными с условиями в околоземном космическом пространстве, включая планеты солнечной системы, малые космические тела, такие как астероиды, которые могут быть рассмотрены с новых позиций более полно. Астероиды представляют огромный интерес потому, что они играли громадную роль в эволюции жизни на земле. Их падение приводило к нескольким этапам исчезновения значительной части населявших ее живых существ и их повторной эволюции. Условия невесомости на малых

телах в космическом полете представляют значительный интерес и с позиции пансермии, то есть переноса жизни из одной части мирового пространства в другую.

Следует добавить к этому образовательные программы, которые особенно актуальны в области наук о микрогравитации, хотя эти программы по сравнению с другими направлениями космических исследований идут с некоторым запозданием. Система образования с применением современных компьютерных средств для фундаментальных исследований гидродинамики, теории тепломассообмена, а также для моделирования в условиях микрогравитации и практикумов для целей наземной технологии достигла сегодня определенной степени развития [42, 44, 45] и может быть эффективно применена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенное выше свидетельствует, что в СССР и затем в России направлению в науках о микрогравитации был придан количественный характер, и методы моделирования на основе общих уравнений гидродинамики еще на самом раннем периоде, как упоминалось, в 60-х годах начали применяться последовательно, начиная от классических задач теплообмена в замкнутых плоских областях с учетом небуссинесковских эффектов и т.д. Значительную роль в этом играла кооперация, которая сложилась в период развития ракетно-космической техники между отраслевыми Институтами НИИТП, ЦНИИМАШ, академическими институтами ИПМех РАН, ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, ИМЕТ РАН и др.

На основе опыта работы последних 7-8 лет, можно высказать следующее добавление к упомянутой программе работ в области микрогравитации: они должны начинаться с серьезной теоретической базы по исследованию механики невесомости и гравитационно-чувствительных систем, физических основ гравитационной чувствительности, что позволяло бы предсказать многие явления, направить многие исследования на выбор более эффективных путей проведения экспериментов непосредственно на борту космических комплексов типа МКС с учетом реальных данных о микрогравитационной среде и с учетом потребностей быстроразвивающихся высокотехнологичных научных направлений. Происходящая реструктуризация имеет несколько объективных и субъективных причин. Первая связана с многочисленными, не до конца выполненными обещаниями, которые давались в начале развития этого направления,

необычайной дороговизной исследований, как правило, требующих участия человека в космическом полете, крайне быстрым развитием исследований в земных условиях, особенно в области моделирования, в связи с чем сугубо эмпирический подход, который преобладал в прежние годы, заменяется более рациональным подходом с использованием математических моделей, а также объединением различных направлений исследований в условиях микрогравитации. Но главную роль, по крайней мере в США, сыграли внешние факторы – трагедия с Колумбией и связанная с ней задержка пилотируемых полетов, политический курс президента Буша и предпочтение других направлений космических исследований, связанных с полетами беспилотных КА и др.

Сложившаяся ситуация, связанная с программам по микрогравитации, не типична для США и западных партнеров, которые, задолго и тщательно готовили, хотя и с задержками, но неуклонно выполняли планы своих исследований. В настоящее время довольно быстрый старт, связанный с подготовкой и запуском американского модуля, работами по его сертификации и планами по “утилизации МКС” сменились резким торможением, которое сказывается, как на состоянии исследований в области наук о микрогравитации в США, так и на японских и европейских партнерах и с которым, естественно, многие заинтересованные лица и организации не согласны.

Но, несмотря на различные обстоятельства, завоевание и практическое использование микрогравитационной среды является важнейшим направлением космической техники и космических исследований, представляющее особую важность для развития новых поколений эффективной космической техники. В России в этом

отношении имеются некоторые особенности, использование которых Федеральным Космическим Агентством может дать ему определенные преимущества.

Во-первых, еще существует созданный усилиями В.С.Авдеевского и других наших выдающихся ученых коллектив российских исследователей. Во-вторых - имеется значительный опыт проведения работ по микрогравитационным программам и в-третьих, в ближайшее время Россия имеет планы пуска в эксплуатацию лабораторного модуля и технические возможности его эксплуатации на МКС.

Поэтому, если будет обеспечен достаточно продвинутый менеджмент, направленный на поиски инвестиций и имеющий эффективные структуры управления, то можно ожидать не только экономического эффекта, но и развития ряда научных направлений, которые могут быть отброшены далеко назад, если отраслевые организации и КБ, а что еще хуже – отдельные группы или даже лица будут предлагать только свои, как правило, лишь узковедомственные или даже частно-собственнические услуги. Давно назрела и организация Центра Полезных Нагрузок МКС, наподобие того, как он был организован в последние годы на станции МИР. В России нужна и ассоциация научных исследователей, такая например, как в Европе (LGRA) и, во всяком случае рассмотрение этой проблемы и принятие соответствующих решений на достаточно высоком уровне.

В заключение автор выражает благодарность С.А.Никитину за обсуждение и замечания и А.О Руденко за помощь в подготовке работы к печати. Работа частично поддержана грантами РФФИ 03-01-00862, а также РФФИ-ГФЕН 04-01-3921.

Литература

1. Исследовательский Центр имени М.В. Келдыша. 70 лет на передовых рубежах ракетно-космической техники. М.: Машиностроение, 2003, 439 с.
2. Сб. Воспоминания об академике Г.И. Петрове (Ред.) А.Ю.Ишлинский. М.: Наука, 1993, 109-115.
3. Обзор состояния научно-исследовательских работ по системам хранения и подачи горючего на ракетах с ЖРД (применительно к созданию блоков Р и С для изделия ЛЗВ). Научно-технический отчет, НИИТП, 1970.
4. Невесомость Физические явления и биологические эффекты. Под. ред. Э.Бенедикта, Мир, 1964.
5. Двигательные установки ракет на жидком топливе. Под. ред. Э.Ринга, И.Л., 1963.
6. Моисеев Н.В., Румянцев В.В. Динамика тел с полостями, содержащими жидкость. Физматгиз, 1965.
7. Повицкий А.С., Любин Л.Я. Основы динамики и тепломассообмена в жидкостях и газах в условиях невесомости. М.: Машиностроение, 1972.
8. Гидромеханика невесомости. Под ред. Мышкиса А.Д., М.: Физматлит, 1975.
9. Авдудевский В.С., Галицейский Б.М., Глебов Г.А. и др. Основы теплопередачи в авиационной и ракетной технике. М.: Машиностроение, 1975, с. 624.

10. Materials sciences in Space with application to space processing (Ed.)
L.Steg, Progress in Astronautics and Aeronautics, V.52, Princeton, 1977
(русский перевод: Космическая технология, изд."Мир", 1977).
11. Proceedings of the Joint Xth European and VIth Russian Symposium on
Physical Sciences in Microgravity (St.-Petersburg, Russia, 15-21 June
1997). Ed. by V.S. Avduyevsky and V.I. Polezhaev. Moscow, 1997. In two
volumes. См. также: В.С. Авдудевский, В.И. Полежаев. Совместный X
Европейский и VI Всероссийский симпозиум по физическим наукам в
условиях микрогравитации (15-21 июня 1997, Санкт-Петербург) // *МЖГ*, 1999, с. 188-192.
12. Полежаев В.И. Численное исследование естественной конвекции
жидкостей и газов. Сб. Некоторые применения метода сеток в газовой
динамике, под общей ред. Г.И.Петрова, Вып. IV. М.: Изд. МГУ, 1971,
с. 86-180.
13. Полежаев В.И. Эффект максимума температурного расслоения и его
приложения. ДАН СССР, 1974, т. 218, № 4, с. 783-786.
14. Авдудевский В.С., Завелевич Ф.С., Маров М.Я., Нойкина А.И.,
Полежаев В.И. Численное моделирование лучисто-конвективного
теплообмена в атмосфере Венеры Космические исследования, т.9, №2,
1972, 280-291.
15. Авдудевский В.С., Полежаев В.И. Некоторые особенности естественной
конвекции жидкостей и газов. Сб. Избранные проблемы прикладной
механики. М.: ВИНТИ, 11-20, 1974, 11-20.

16. Кускова Т.В., Полежаев В.И. Численное исследование движения неизотермической вязкой жидкости, содержащей пузырь в условиях пониженной гравитации. Вычислительные методы и программирование. М.: Изд. МГУ, 1974, Вып. 23, с. 54-75.
17. Никитин С.А., Полежаев В.И. Конвекция и перенос тепла в сферическом сосуде, частично заполненном жидкостью в условиях пониженной гравитации. Изв. АН СССР, МЖГ, №2, 1976, с.154-159.
18. Бессонов О.А., Брайловская В.А., Полежаев В.И. Тест для численного решения трехмерной задачи о естественной конвекции в кубической полости. Математическое моделирование, 1999, № 6.
19. Вальциферов Ю.В., Полежаев В.И. Конвективный теплообмен в замкнутом осесимметричном сосуде с криволинейной образующей при наличии поверхности раздела фаз и фазовых переходов. Известия АН СССР, МЖГ, № 6, 1975, с. 126-134.
20. Fluid Science and Material Science in Space (Ed.) H.U. Walter, Springer-Verlag, Berlin, 1987, p.743.
21. Гидродинамика и тепломассообмен в невесомости. Под ред. В.С.Авдуевского и В.И. Полежаева. М.: Наука, 1982, с.263.
22. Avduevsky V.S., Grishin S.D., Leskov L.V., Polezhaev V.I., Savitchev V.V. Scientific Foundation of Space Manufacturing. Mir Publishers. М.: 1984, с.173.
23. Авдуевский В.С., Полежаев В.И. Невесомость: теория-модель эксперименты в космосе. Сб. “Наука и человечество”, Изд. Знание, М.: 1985 г., с. 211-221.
24. Полежаев В.И., Белло М.С., Вerezуб Н.А. и др. Конвективные процессы в невесомости. М.: Наука, 1991, 271 с.

25. Л.В.Иванов, В.С., Земсков и др. Плавление, кристаллизация и формообразование в невесомости (эксперимент “Универсальная печь” по программе “Союз- Аполлон“ М., Наука, 1979
26. Brown R. A., Theory of transport processes in single crystal growth from the melt, AIChE Journal, 1988, 34, 881
27. Бессонов О.А., Брайловская В.А., Полежаев В.И. Пространственные эффекты конвекции в расплавах: концентрационные неоднородности, возникновение несимметрии и колебаний // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 1997. № 3. С. 74-82.
28. Земсков В.С. Новые научные представления о процессах, сопровождающих направленную кристаллизацию расплавов, - итог экспериментов по выращиванию кристаллов полупроводников на космических аппаратах. Сборник Трудов VII Российского симпозиума ”Механика невесомости. Итоги и перспективы фундаментальных исследований гравитационно-чувствительных систем” (11-14 апреля 2000 г.). М.: ИПМ РАН, 2001, с. 34.
29. Авдучевский В.С., Ишлинский А.И, Полежаев В.И. Гидромеханика и теплообмен при получении материалов. Вестник АН СССР, 1987, № 6, с. 3 – 17.
30. Opportunities for Academic Research in low-gravity environment. (Eds.) G.A.Hazellig, J.M.Reynolds. Progress in Astronautics and Aeronautics, V.108, AIAA, 1986, p. 273.
31. Спец. выпуск МЖГ, 1994, № 5.
32. Горбунов А.А., Емельянов В.М., Полежаев В.И. Конвективные течения в околокритических жидкостях в условиях микрогравитации: концепция и результаты моделирования. Препринт ИПМ РАН, № 631,

1998, с.36.

33. Сборник Трудов VII Российского симпозиума "Механика невесомости. Итоги и перспективы фундаментальных исследований гравитационно-чувствительных систем" (11-14 апреля 2000 г.). М.: ИПМ РАН, 2001, 559 с.
34. Авдудевский В.С., Полежаев В.И. От станции "МИР" к Международной космической станции: исследования гравитационной чувствительности и альтернатив микрогравитации. В сб.: Современные проблемы механики и физики космоса. М.: Физматлит, 2003, с. 514-519.
35. Космические Исследования. т.39, №2, 2001, с.240 (специальный выпуск, под ред. В.С.Авдудевского, В.И.Полежаева, В.В.Сазонова).
36. Polezhaev V.I., Ermakov M.K., Nikitin N.V., Nikitin S.A., Yaremchuk V.P. The use of microaccelerations data for convection modeling & analysis of the microaccelerations limits. In: 7th Annual Microgravity Environment Interpretation Tutorial, V.2, Section 24, 2004.
37. Полежаев В.И., Сазонов В.В. Механика невесомости и гравитационно-чувствительные системы. Аннотации докладов на научно-исследовательском семинаре. ИПМ РАН, Препринты № 622, 1998, 36с.; № 653, 1999, 40 с.; № 677, 2001, 58 с.; № 708, 2002, 47 с.; № 751, 2004, 54 с.
38. Polezhaev V.I., Gorbunov A.A., Emelianov V.M., Lednev A.K., Soboleva E.B., Babushkin I.A., Glukhov A.F., Zilberman E.A., Putin G.F., Zyuzgin A.V., Sazonov V.V., Levto V.L., Romanov V.V., Ivanov A.I. Convection and heat transfer in near-critical fluid: study on MIR and project of the experiment CRIT on ISS. 41st Aerospace Meeting & Exhibit, January 6-9, Reno, NV, 2003.

39. Overview of Mechanics, 20th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics Illinois at Urbana-Champaign Urbana, Illinois, USA, 2000.
40. Karchmer A., Schafer C.P. International Space Stations, Microgravity Research Requirements // AIAA – 99 – 0571. Reno, NV, 1999, 10 p.
41. Никитин Н.В., Полежаев В.И., Яремчук В.П. Трехмерные конвективные течения, тепло и массообмен в цилиндрической области в условиях микрогравитации // Труды Третьей Российской национальной конференции по теплообмену. Т. 3. Свободная конвекция. Теплообмен при химических превращениях. М.: Издательство МЭИ, 2002, с. 124-127.
42. В.П. Яремчук. Численное моделирование пространственных конвективных процессов в реальных условиях космического полета. Автореферат дисс. к.ф. – м.н., М.: 2004, с. 16.
43. Trinh E., King M. NASA Physical Science Division Restructured Earth and Space –based Program. 41st AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, January 6-9, 2003, Reno, NV, 2003-047.
44. Ermakov M.K., Nikitin S.A., Polezhaev V.I. and Yaremchuk V.P. Education and Tutorial in Modeling of Elementary Flows, Heat and Mass Transfer During Crystal Growth in Ground-based and Microgravity Environment. J. of Crystal Growth, 2004, V. 266, p. 388-395.
45. Yaremchuk V.P., Ermakov M.K., Nikitin S.A., Polezhaev V.I. Education and Tutorial in Fluid Mechanics on the Basis of Computer Laboratory. ICTAM04, Abstract Book and CD ROM Proceedings, p. 418.

ПРИЛОЖЕНИЕ

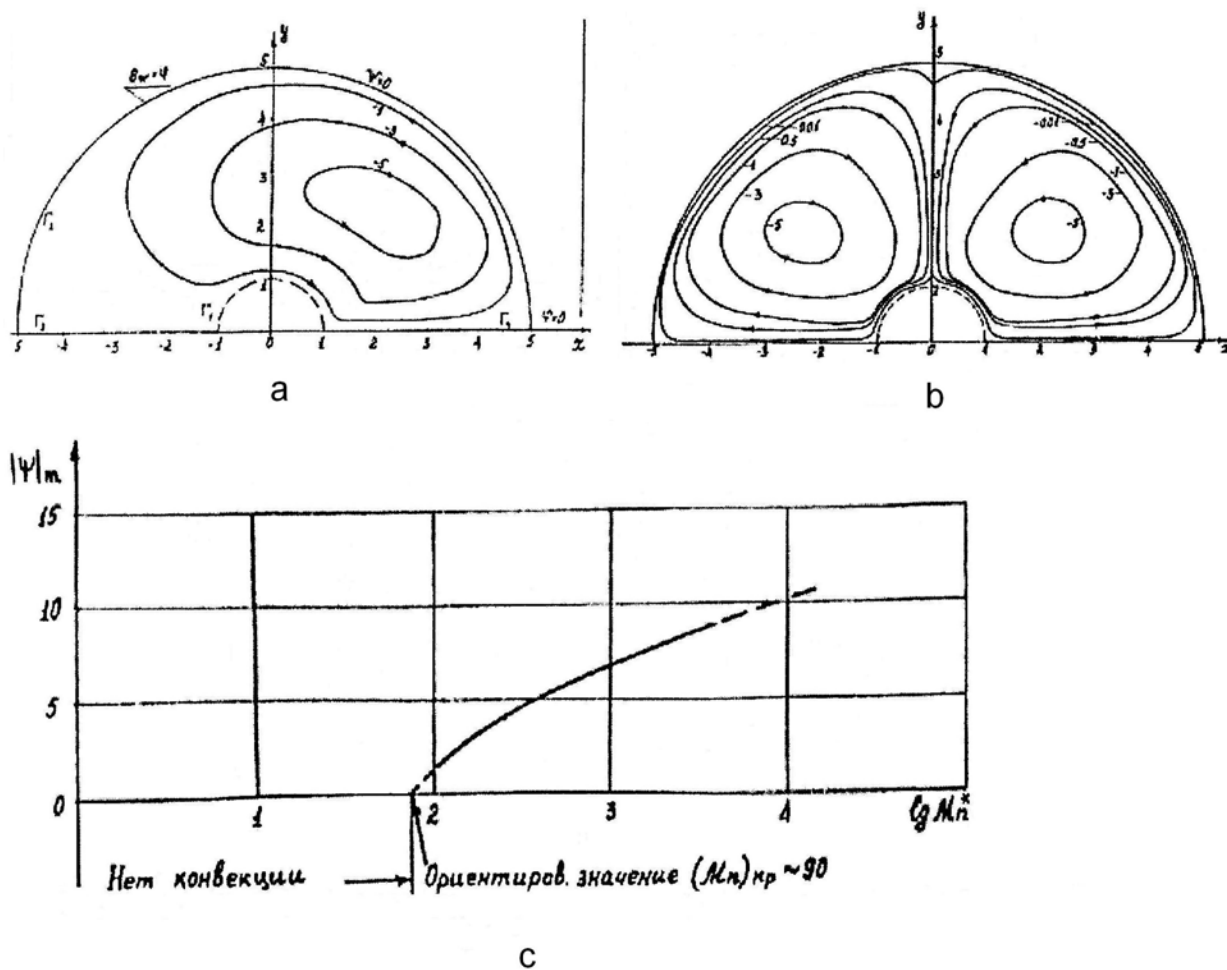


Рис. 1. Термокапиллярная конвекция в невесомости в сферическом баке, содержащем газовый пузырь [16]

- а) Структура течения в случае переменной температуры вдоль стенки
- б) Структура течения в случае равномерного подвода тепла к стенке (неустойчивость Марангони), $Mn^* = 1000$, $F_0 = 0.24$
- в) Максимальная функция тока в случае б) и критическое число Марангони

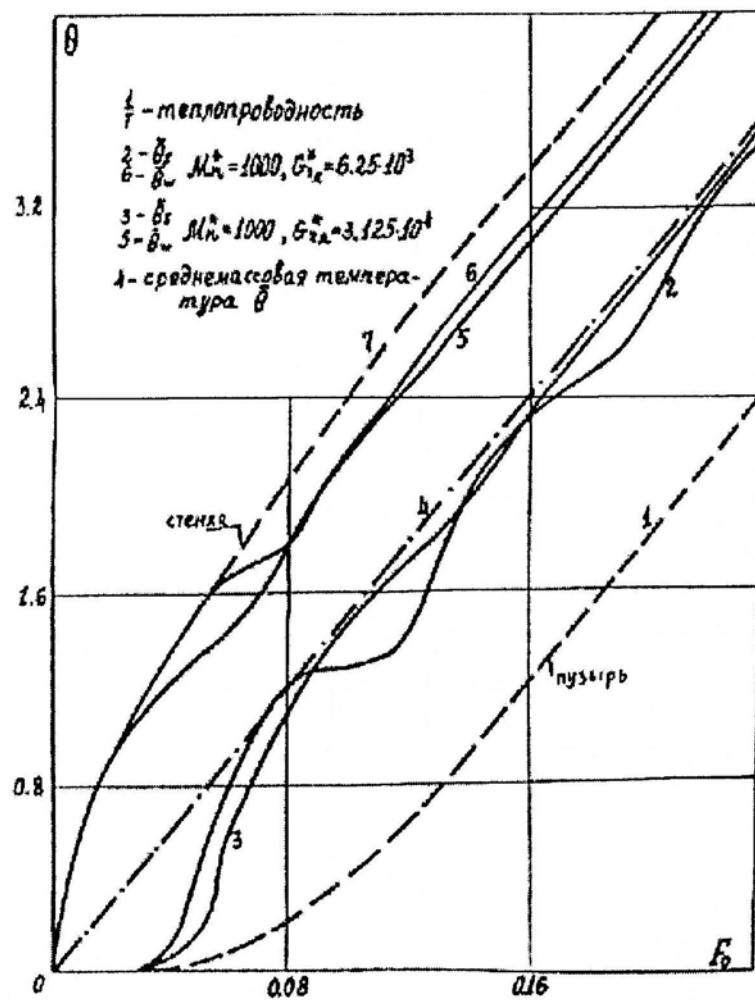


Рис. 2. Рост во времени в невесомости температур стенки (7), межфазной поверхности (1) и среднemasовой температуры в сосуде (4), содержащем газовый пузырь [16]

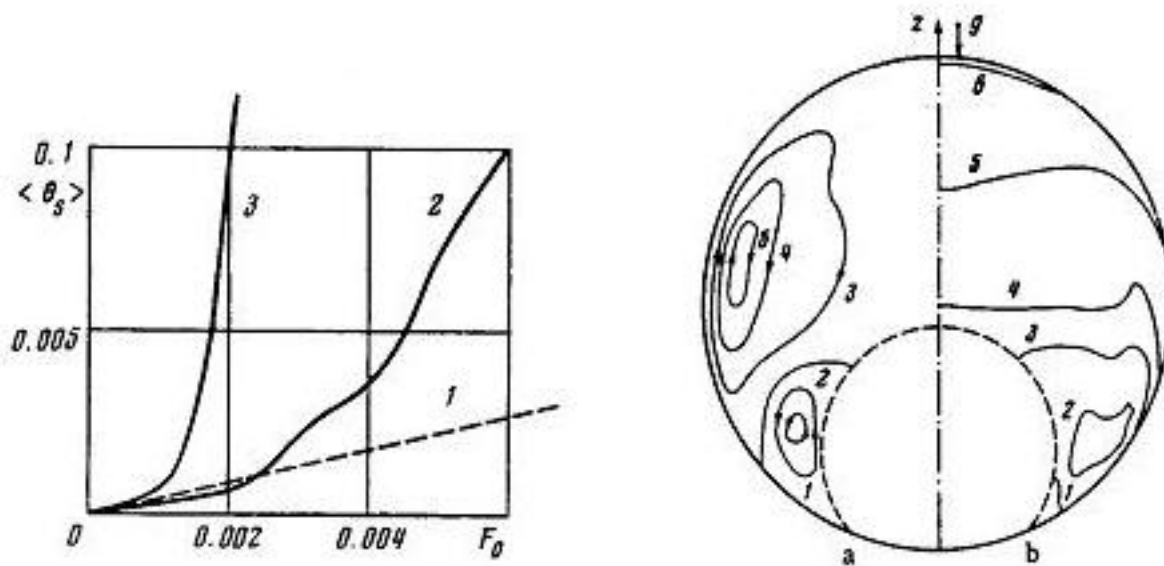


Рис 3. Рост во времени среднемассовой температуры (1), средней температуры межфазной границы при ее расположении у дна (2) и наверху (3) и структура полей течения и температур в случае (2) в сферической емкости в условиях микрогравитации [17]

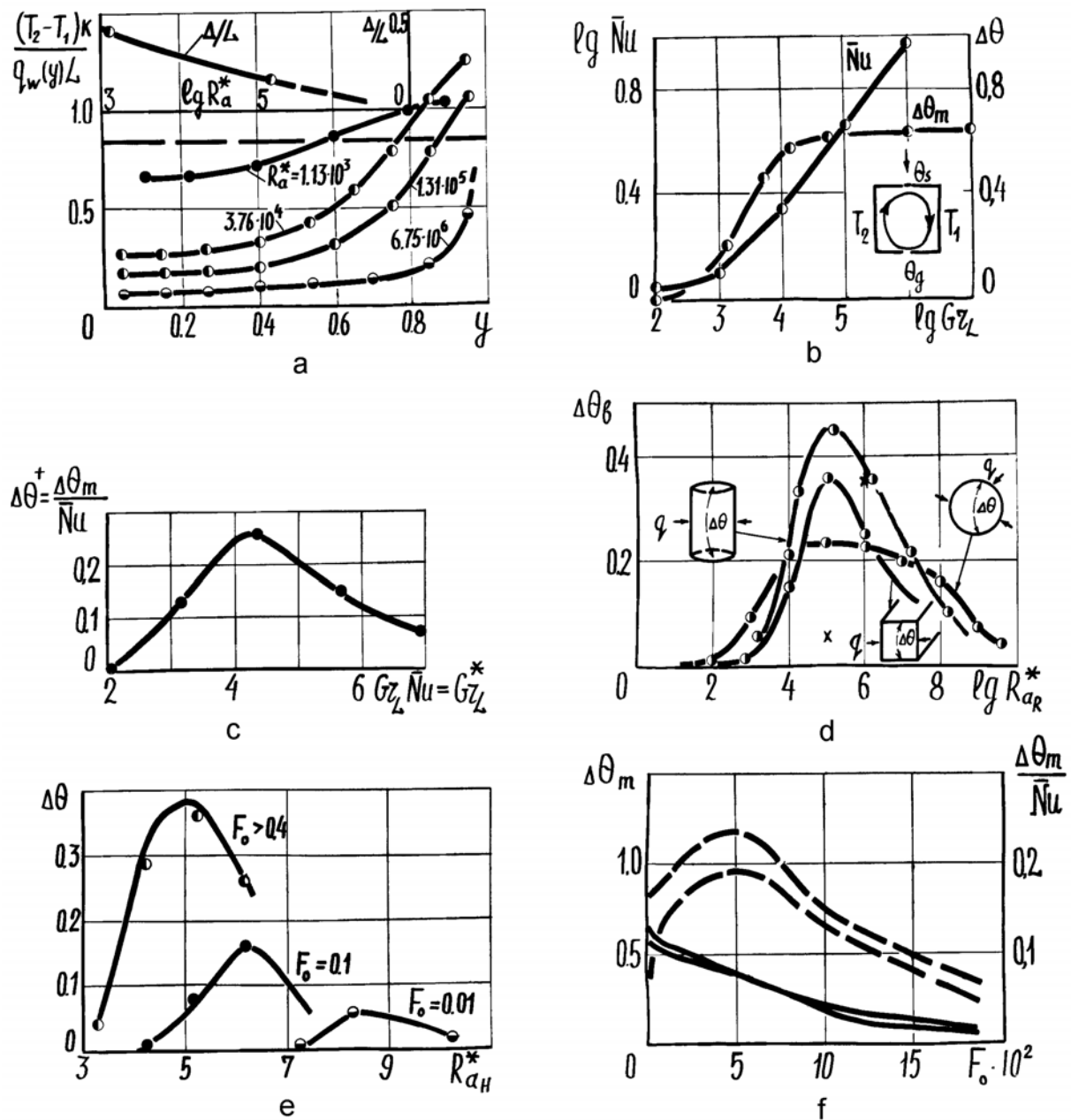


Рис. 4. Некоторые общие закономерности теплообмена и температурного расслоения в замкнутых объемах, полученные в 60 — 70 гг. [12-14]

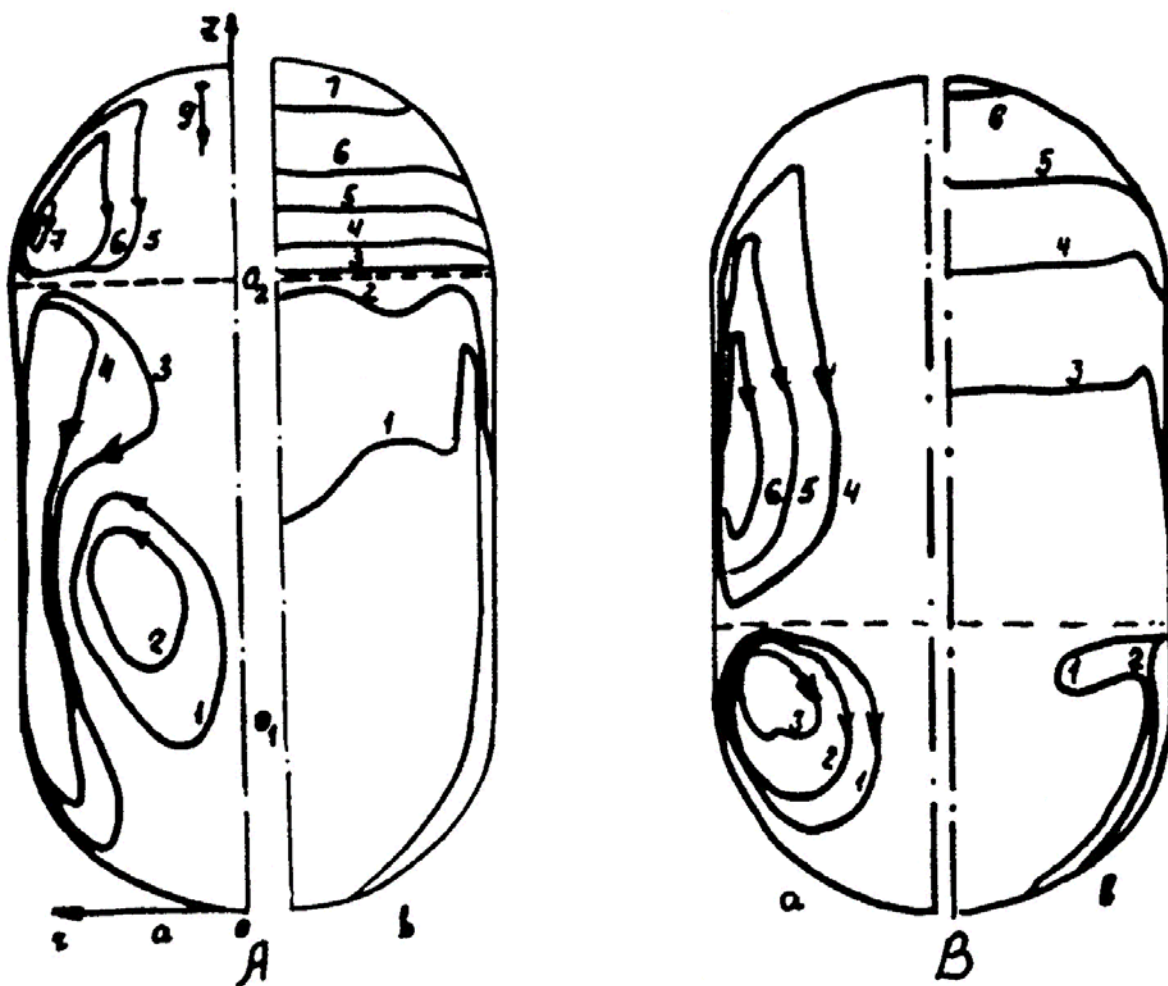


Рис. 5. Сопряженная модель теплообмена, температурного расслоения и роста давления в баке с учетом процессов в паровой подушке, жидкости и перетоков тепла по оболочке [19].

- А) Степень заполнения $m = 0,8$, а – структура течения,
 б – изотермы.
- В) Степень заполнения $m = 0,29$, а – структура течения,
 б – изотермы.

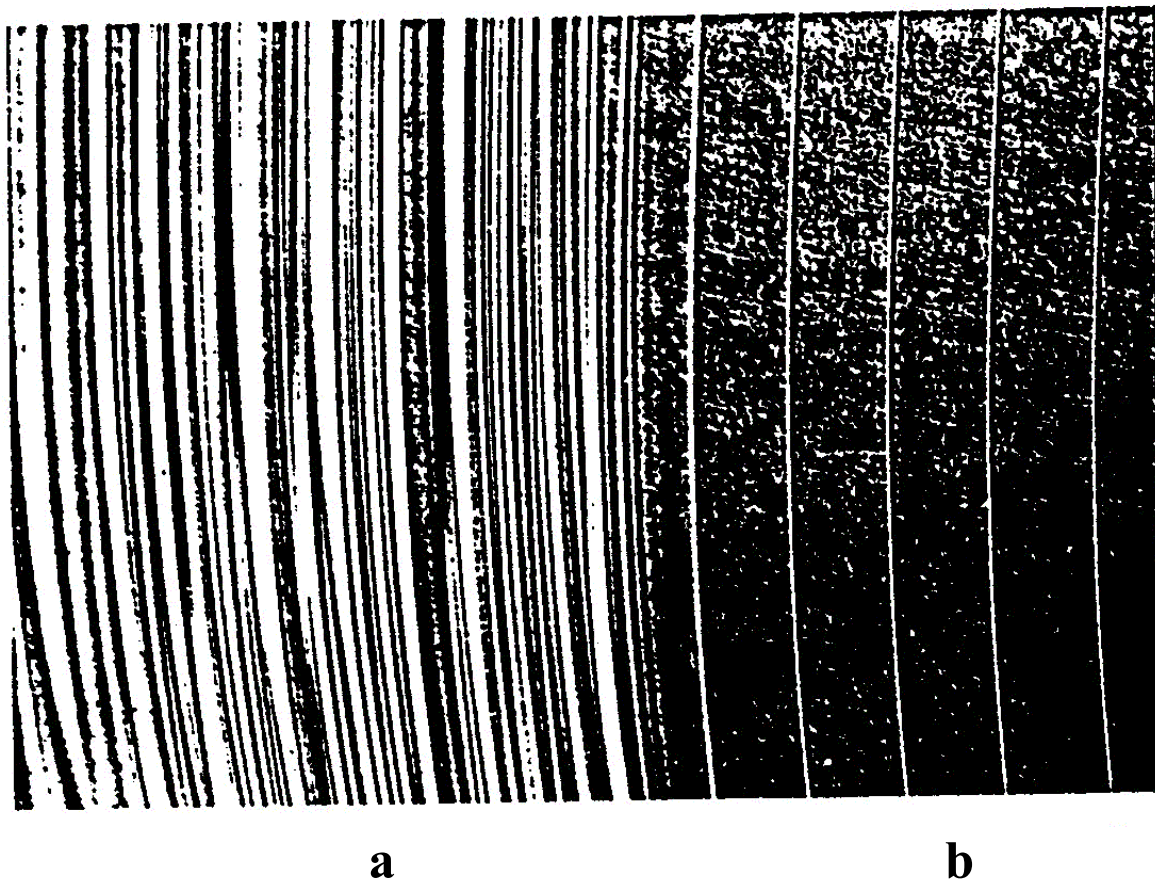


Рис. 6. Возможности устранения полосчатой неоднородности в невесомости. Поперечное сечение кристалла германия, легированного галлием [20].
а – полосчатая неоднородность в земных условиях или в полете с перегрузкой,
б – однородная структура кристалла при полете ракеты-зонда в условиях микрогравитации

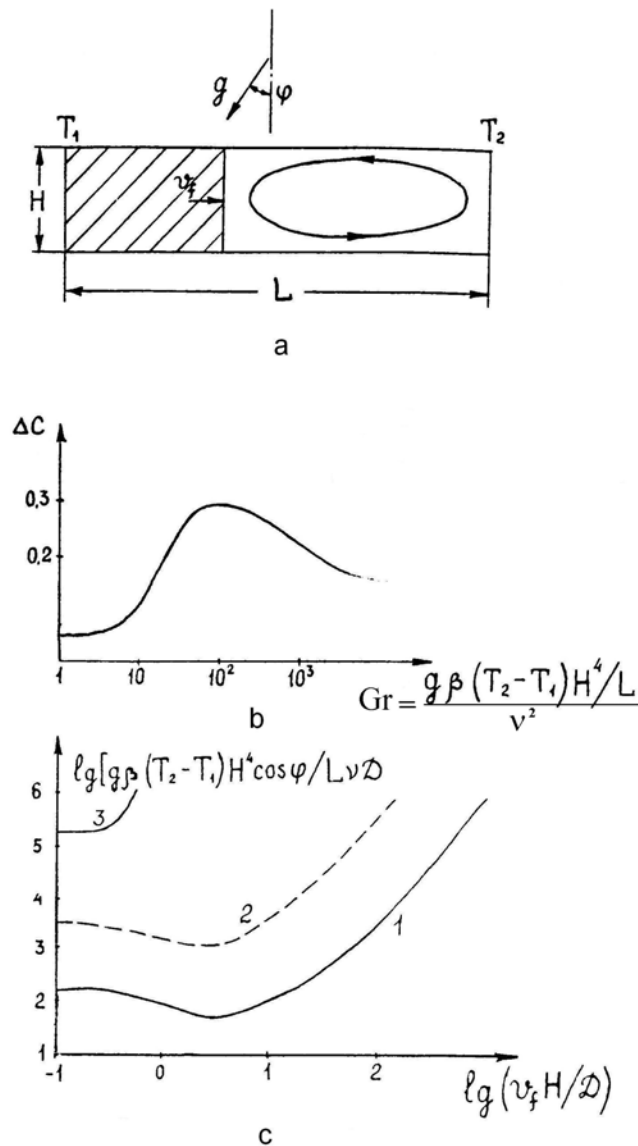


Рис. 7. Концентрационная макронеоднородность, полученная в параметрических расчетах на диаграмме микроускорение – скорость движения фронта кристаллизации ([25]).
 а – расчетная схема, б – поперечная неоднородность в зависимости от числа Грасгофа при вертикальном направлении массовой силы ($\varphi = 0$) и фиксированном положении фронта, с – карта поперечной концентрационной неоднородности при наличии движения фронта кристаллизации и наклона массовой силы. 1, 3 – зоны, в которых поперечная концентрационная неоднородность менее 20% ($\Delta C < 0.2$), 2 – пунктирная линия – линия максимума концентрационной неоднородности.

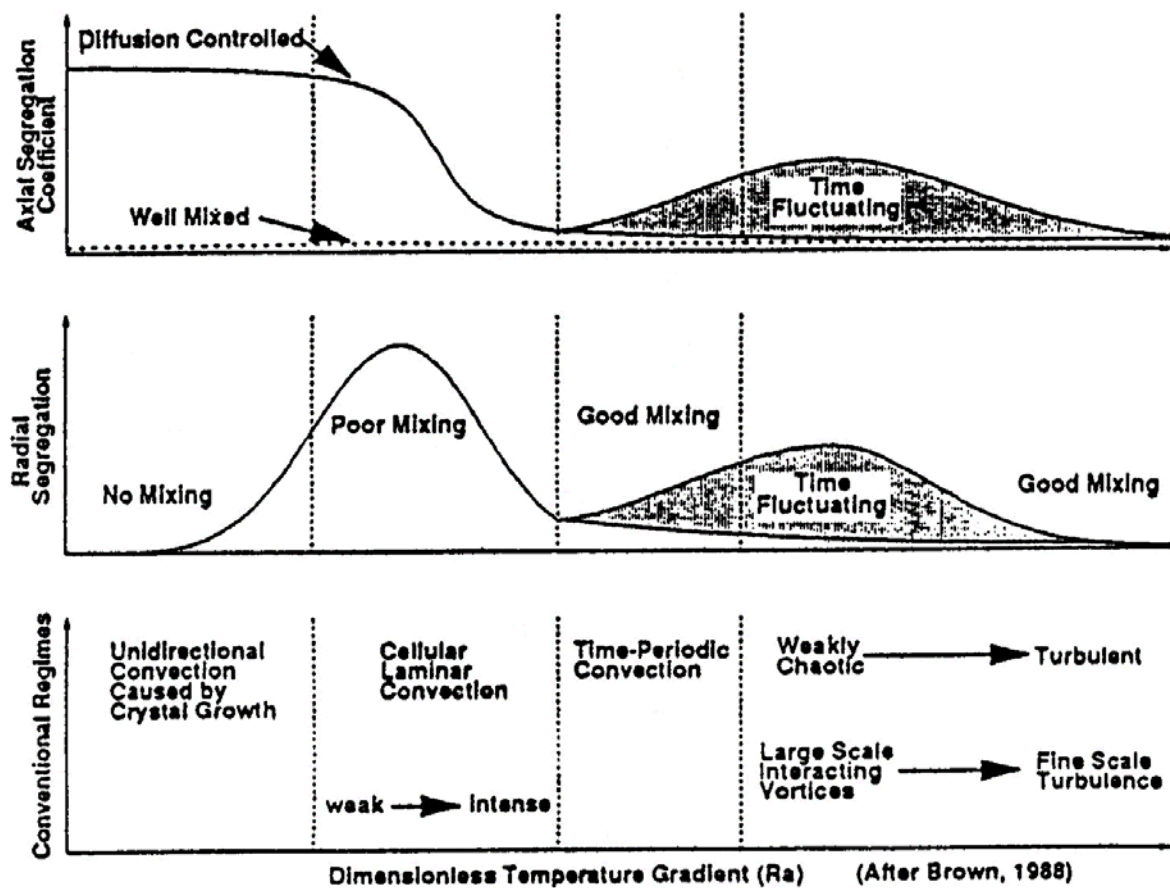


Рис. 8. Качественное представление концентрационных неоднородностей при различных числах Рэлея (Р. Браун, [26])

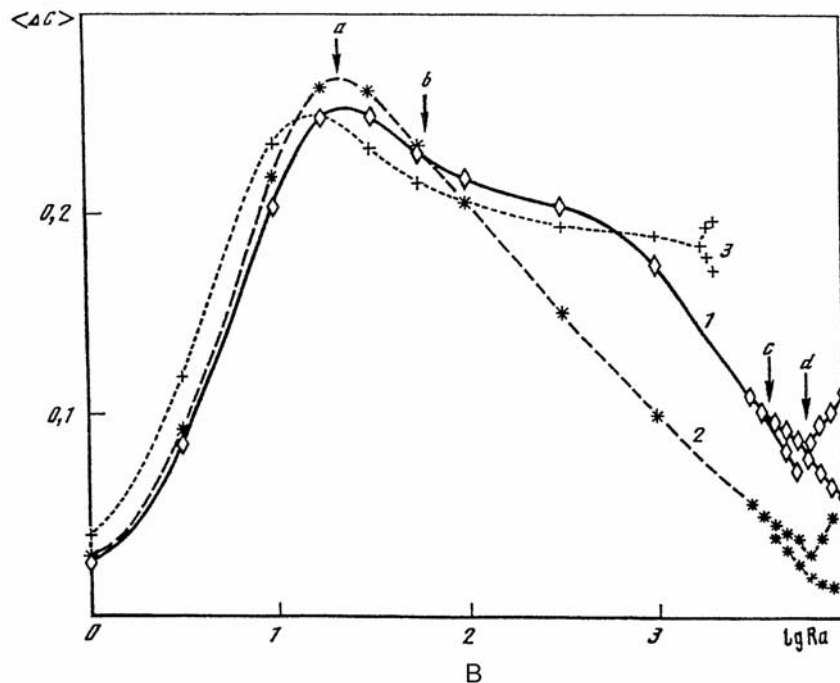
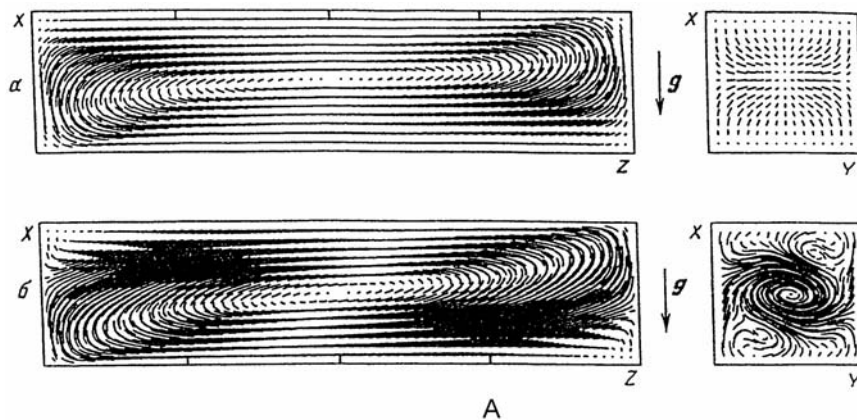


Рис. 9. Результаты двумерных и трехмерных концентрационных макроеднородностей и порог возникновения колебаний по данным математического моделирования [27].

А – картина течения для симметричного (а) ($Ra = 10^3$) и несимметричного (б) ($Ra = 10^{3.75}$) режимов: слева – центральное продольное сечение $Y = 0,5$; справа – центральное поперечное сечение $Z = 2$. В – средняя разность концентрации на верхней и нижней границах. Зависимость от числа Рэлея: 1 - $\langle \Delta C \rangle$ (осреднение по площади грани), 2 - $\langle \Delta C_l \rangle$ (осреднение по центральной продольной линии), 3 – двумерный случай

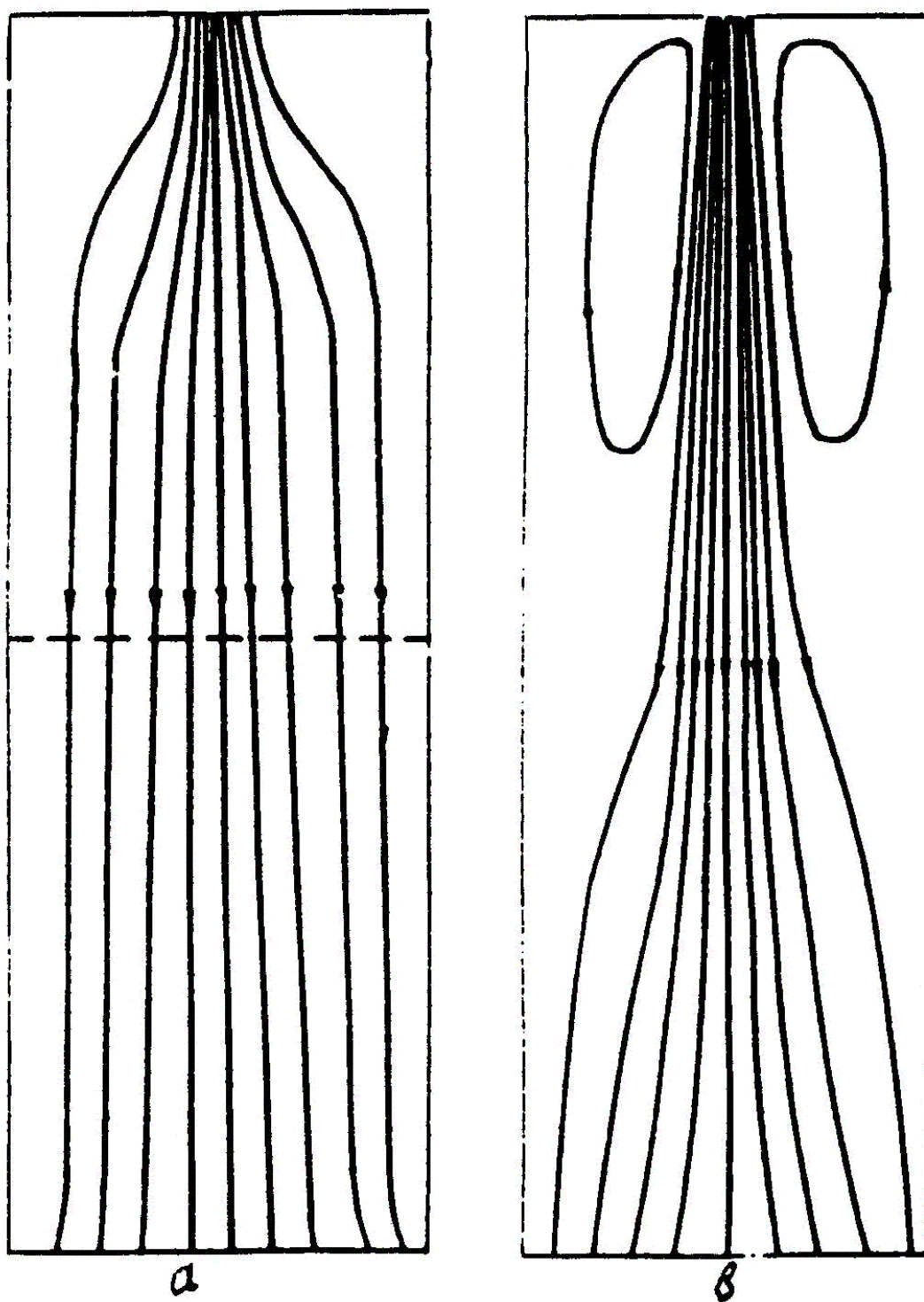


Рис. 10. Вторичные структуры в камере сепаратора на входном участке при электрофорезе в свободном потоке в условиях невесомости $G = 0$, $Re = 200$ [24]

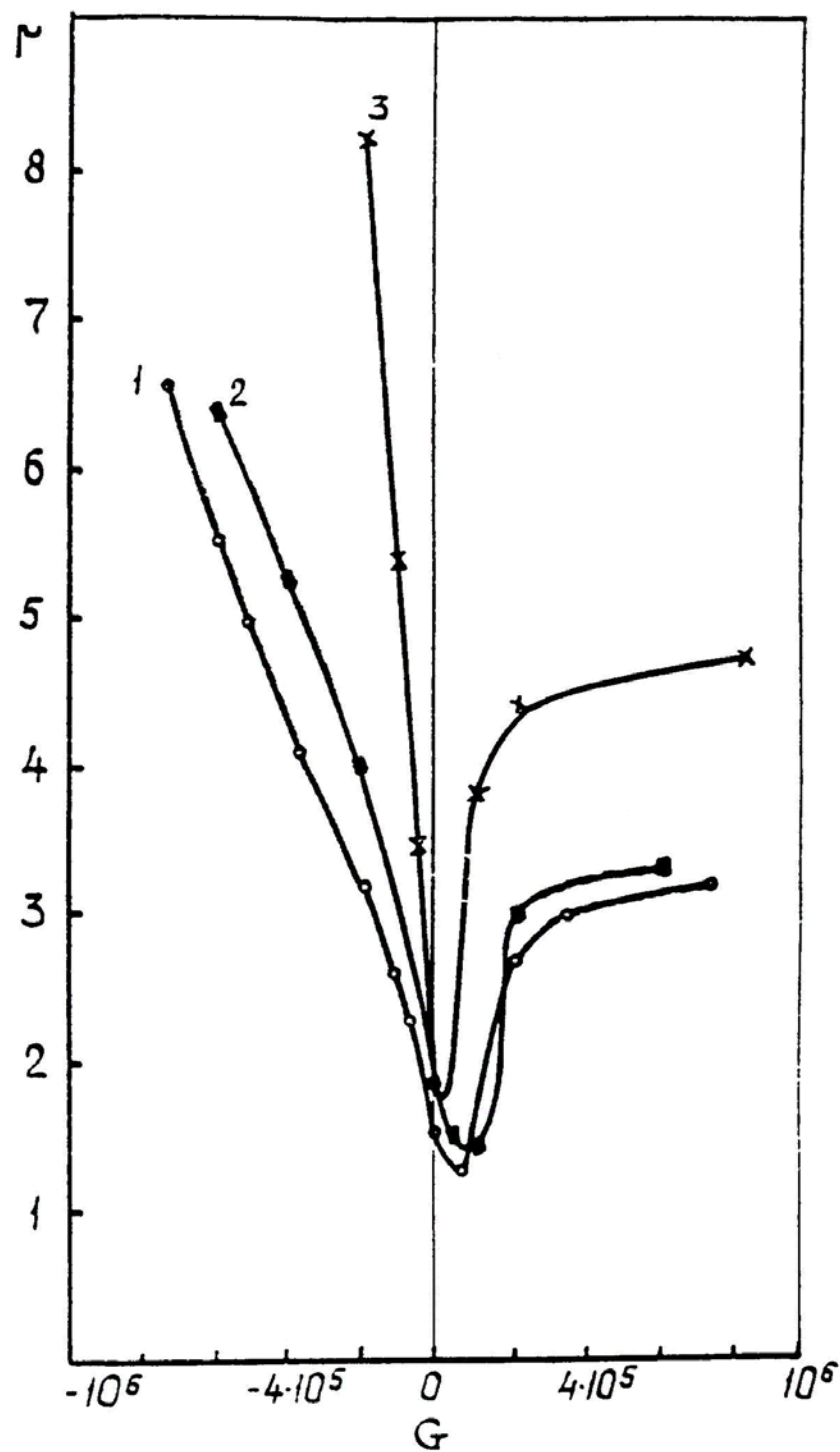


Рис. 11. Изменение масштаба вторичных структур в камере сепаратора в зависимости от величины микроускорения (числа Грасгофа G) при $h/l = 6.4$, $Re = 60$ и различных параметрах камеры
 1 – $l/d = 15$, $s/l = 0.5$; 2 – $l/d = 10$, $s/l = 0.5$; 3 – $l/d = 15$, $s/l = 0.2$ [24].



а

б

Рис. 12. Эксперименты с околокритическими средами с использованием установки АЛИС на станции «МИР».

а – прибор АЛИС-2 и конвективный датчик ДАКОН (вверху) на борту станции «МИР». Космонавт С.В. Авдеев осуществляет колебания прибора.

б – пример распространения тепла от точечного источника в около-сверхкритической жидкости, расположенного в центре рабочей полости.

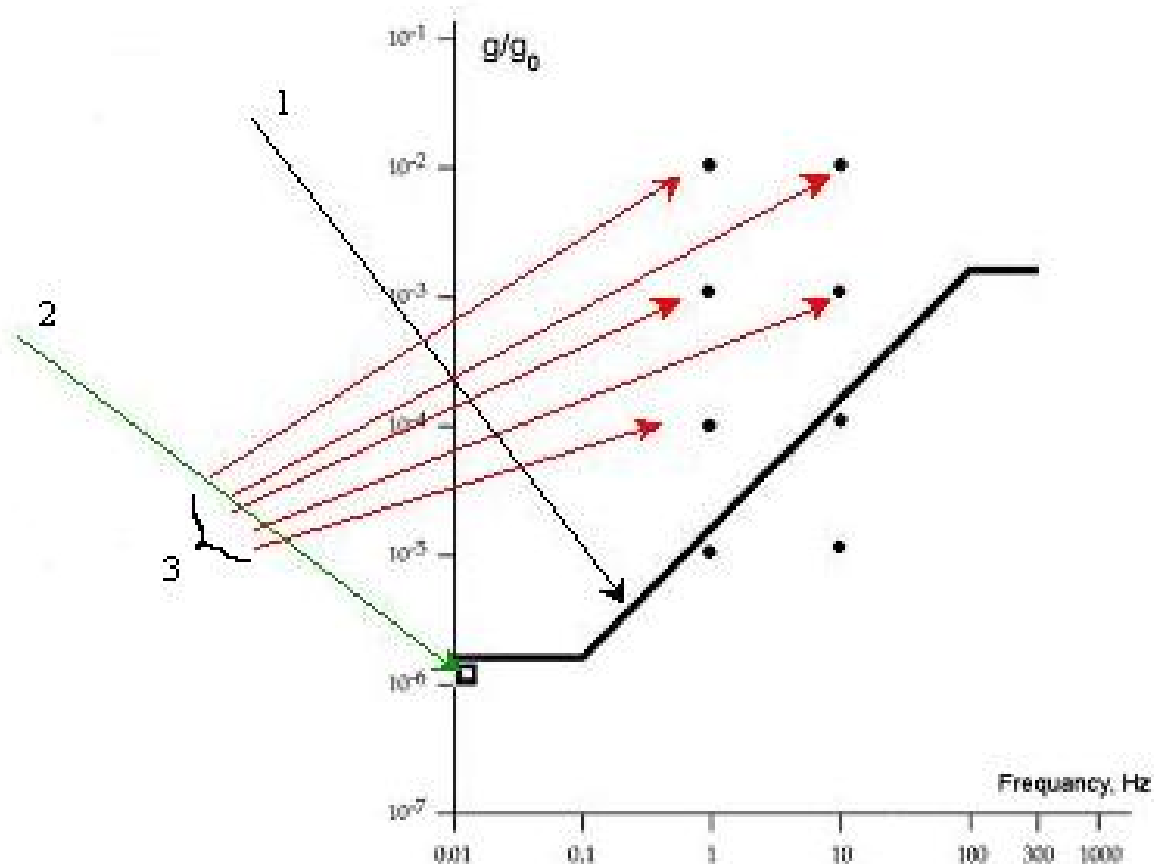


Рис. 13. Параметры моделирования на амплитудно-частотной диаграмме требований к микроускорениям для экспериментов по выращиванию полупроводниковых кристаллов [42]
 1 – кривая предельных микроускорений для МКС,
 2 – параметры квазистатической составляющей микроускорений,
 3 – параметры для моделирования вибраций

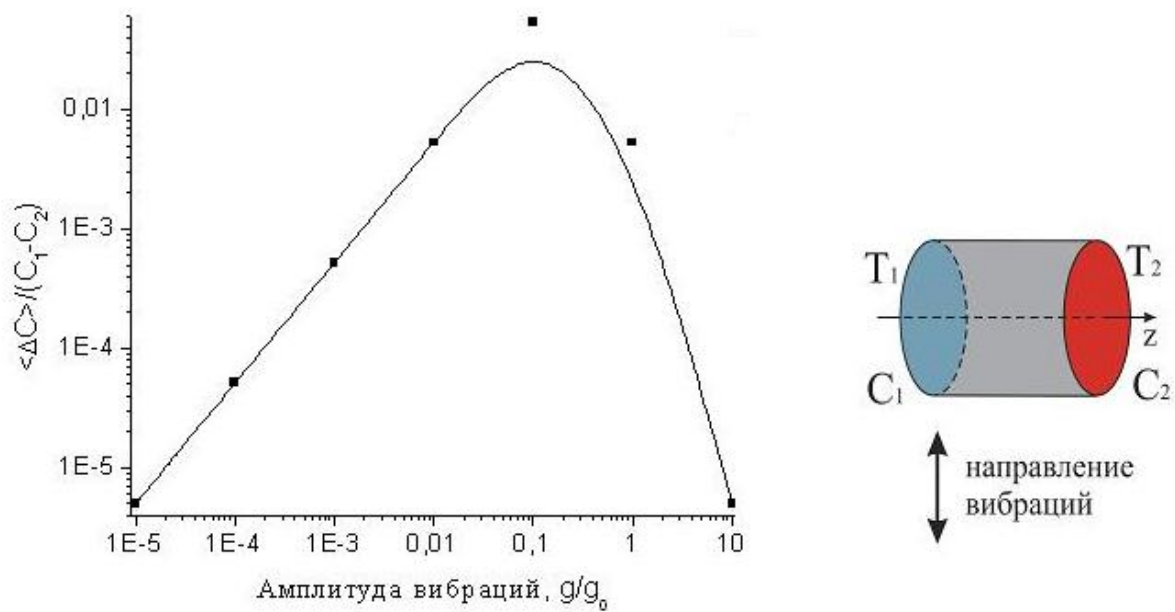


Рис. 14. Концентрационные макронеоднородности, обусловленные осредненными высокочастотными вибрациями в невесомости в зависимости от амплитуды вибраций [42]

*Механика невесомости, гравитационная чувствительность,
обоснование требований к условиям микрогравитации*

Фундаментальные и прикладные исследования в условиях микрогравитации

Фазовые переходы Формирование структур Самоорганизация Кинетика Структуры Процессы переноса	Околокритические и квантовые явления в конденсированных средах Гидродинамическая устойчивость Динамика Реология	Эталонные данные для фундаментальных законов физики Теплофизические, Физико-химические и Биофизические свойства веществ
--	--	--

Дальнейшее совершенствование техники и жизнеобеспечения
длительных космических полетов

СТР, СОЗ, СЖО, другие технические системы, пожаробезопасность Радиационная безопасность	Энергетические системы и технологии Ресурсы экспедиции, Производство и Робототехника	Биомолекулярные системы Технология Сенсоры
--	---	--

Исследования в условиях микрогравитации в целях совершенствования
земных и космических систем

Физические эффекты при изучении клеток Синтез и производство материалов с улучшенными свойствами	Структурная биология Био- и микрожидкостные технологии	Преобразование энергии и Химические производства Моделирование полей тяготения космических тел
---	---	---

*Исследование, освоение и разработка ресурсов планет,
Образование, обучение, практикумы*

Рис. 15. Пути реструктуризации современных исследований в условиях невесомости

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Аннотация.....	2
Введение.....	3
1. Исследования конвективных процессов в элементах КА в условиях космического полета. Общие закономерности теплообмена и температурного расслоения в замкнутых объемах.....	7
2. Развитие работ по космическому материаловедению.....	14
3. Развитие фундаментальных исследований в невесомости. Итоги исследований на орбитальном комплексе Мир и VII Российский симпозиум.....	23
4. Координация исследований в области микрогравитации на Международной космической станции. Концепция механики невесомости.....	29
5. Проблемы реструктуризации исследований в условиях микрогравитации.....	32
Заключение.....	35
Литература.....	38
Приложение.....	45

**ГИДРОМЕХАНИКА И ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОМАССООБМЕНА
В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ: ИСТОРИЯ, ЭТАПЫ
РАЗВИТИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

В.И. ПОЛЕЖАЕВ

Подписано к печати 19. 07. 2005, Заказ № 14-2005 Тираж - 150 экз.

Отпечатано на ризографе
Института проблем механики Российской академии наук
119526, Москва, пр-т Вернадского 101, к.1