

КООПЕРАЦИЯ В КОСМИЧЕСКИХ МАСШТАБАХ

ОТ МАРСЕЛЯ ДО МЕЖДУНАРОДНОЙ СТАНЦИИ

В качестве преамбулы выскажем три утверждения, которые давно являются бесспорными для коллег и учеников профессора Т.П. Любимовой, но не стали от этого менее содержательными.

Первое. Имя Татьяны Петровны хорошо известно далеко за пределами Перми по многочисленным исследованиям в области физической гидродинамики. В частности, по решению задач о конвективном движении.

Второе. В перечислении профессиональных качеств этого исследователя (увы, нормы языка не предполагают употребления существительного «исследователь» в женском роде, что, конечно, несправедливо) никак не обойтись без таких, как увлеченность наукой, энергичность, работоспособность – вплоть до самозабвения.

Средняя для Т.П. Любимовой продолжительность рабочего дня – двенадцать часов. Обычная продолжительность ее трудовой недели – семь дней. И даже каждый очередной отпуск проводит она в трудах праведных – за расчетами, построением графиков, обсуждением найденных решений, написанием отчетов и статей.

Стоит дополнить: все это – характеристики семейные. Потому что такой распорядок жизни разделяет с Татьяной Петровной ее муж и соавтор, заведующий кафедрой теоретической физики Пермского университета профессор Д.В. Любимов.

И третье. Постоянная занятость не сделала ее, как это нередко бывает с другими, человеком замкнутым и нелюдимым. Т.П. Любимова неизменно жизнерадостна и общительна. Стоит перешагнуть порог ее кабинета – и она с готовностью отложит хотя бы на несколько минут свои текущие дела и переключится на разговор с вами.

Так, собственно, произошло и в этот раз. Татьяна Петровна была как всегда приветлива, забот у нее в этот день было чуть меньше обычного, и она увлеченно и с видимым удовольствием рассказывала о самых новых результатах, полученных во время ее летнего пребывания в Марселе. Пермских гидродинамиков связывает с французскими коллегами многолетнее сотрудничество.



Татьяна Петровна Любимова

От конкретных задач разговор постепенно перешел к теме более широкой – международному сотрудничеству в науке.

– А знаете, – с улыбкой сказала в какой-то момент Татьяна Петровна, – могу рассказать вам о кооперации в космическом, можно сказать, масштабе. Очень свежий пример, во многом показательный. Задача интересная: тонкие эффекты, хорошие результаты...

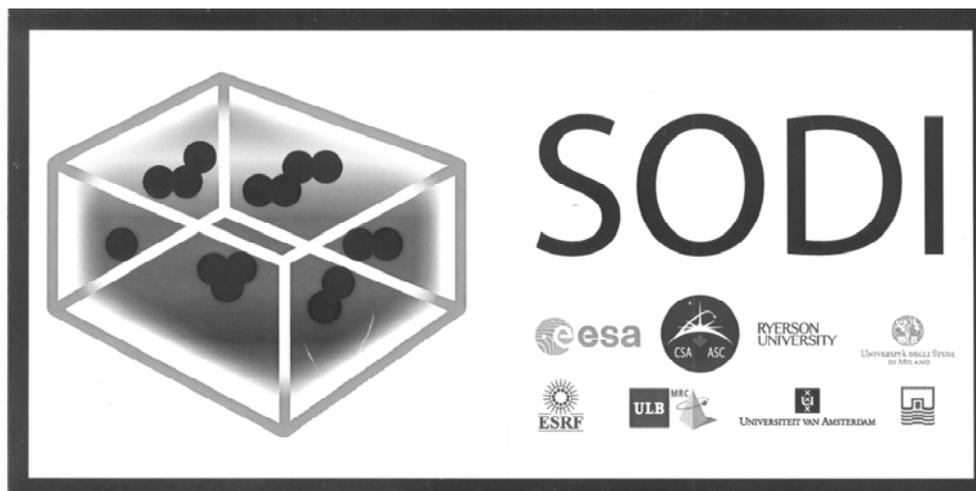
Так мы и перешли к интернационализму космического размаха.

ИЗ РАССКАЗА Т.П. ЛЮБИМОВОЙ (НАЧАЛО)

Около полугода назад на Международной космической станции (МКС) завершилось проведение натурного эксперимента с названием «IVIDIL», одного из тех, что составляют научную программу «Физика жидкостей». Аббревиатура IVIDIL расшифровывается как Influence of Vibration on Diffusion in Liquids – влияние вибраций на диффузию в жидкостях.

Она сегодня в Центре исследований микрогравитации Свободного университета Брюсселя. Кроме нее в бельгийскую группу входили еще несколько ученых: экспериментатор, теоретик, специалисты по численным расчетам.

Россию в этом проекте представляли заведующая лабораторией вычислительной гидродинамики Института механики



Эмблема эксперимента «IVIDIL»

Эксперимент продолжался долго, почти четыре месяца. Он представлял собой последовательность десятков сложных лабораторных испытаний, результаты которых обрабатывались и анализировались на Земле.

И опытная часть, и весь проект в целом потребовали от всех участников чрезвычайной скрупулезности, изобретательности, высокого профессионализма. И показали в итоге возможности сотрудничества ученых разных стран.

Подготовка и реализация проекта стали результатом в полном смысле интернациональных усилий.

В нем участвовали два космических агентства: Европейское и Канадское.

Экспериментальная установка была спроектирована и сделана в Европе, после чего ее доставили в космос и установили на европейском исследовательском модуле Коламбус, находящемся в американском сегменте станции.

Координацией научного раздела проекта занималась наша бывшая соотечественница Валентина Шевцова, работаю-

сплошных сред УрО РАН Т.П. Любимова и аспирант Г.А. Седельников. Они занимались численным моделированием процессов, происходивших в экспериментальной установке.

В течение ста двадцати дней исследователи, находившиеся в разных странах и даже в космосе, занимались изучением различных аспектов единой проблемы.

Главные цели проекта «IVIDIL» можно сформулировать в виде трех пунктов. Первый – прецизионные измерения коэффициентов диффузии и термодиффузии для двухкомпонентных смесей, с нормальным и аномальным термодиффузионными эффектами. Второй – определение предельного уровня вибраций, ниже которого их воздействием на диффузию в условиях невесомости можно пренебречь. Третий – исследование конвекции, тепло- и массопереноса в вибрационном поле.

Проще поставленную проблему не сформулировать, но и эта формулировка нуждается хотя бы в некоторых комментариях и пояснениях.

КОММЕНТАРИИ И ПОЯСНЕНИЯ: ДИФФУЗИЯ И КОНВЕКЦИЯ

Напомним, что диффузией (лат. *diffusio* – распространение, растекание) называется процесс взаимного проникновения соприкасающихся веществ вследствие теплового движения их частиц. Диффузия происходит на молекулярном уровне и определяется характером движения отдельных молекул, поэтому ее скорость пропорциональна средней скорости молекул.

Диффузия происходит в направлении уменьшения концентрации вещества, ведет к его равномерному распределению по занимаемому объему. Из областей высокой концентрации уходит больше частиц, чем из областей концентрации низкой. Диффузионный поток, проходящий в неоднородной среде через единичную площадку за единицу времени, равен разности между количеством частиц, пересекающих площадку в одном и другом направлениях. В отсутствие внешних воздействий он пропорционален градиенту концентрации.

Величина этого потока выражается законом Фика, аналогичным уравнению теплопроводности Фурье. В основе этих соотношений лежит единый механизм молекулярного переноса: в законе Фика – перенос массы, в уравнении теплопроводности – энергии.

Коэффициент пропорциональности в законе Фика называется коэффициентом диффузии. Он определяет количество вещества, проходящего в единицу времени через участок единичной площади при градиенте концентрации, равном единице. Коэффициент диффузии отражает ее скорость и определяется свойствами среды и типом диффундирующих частиц, он является функцией температуры – возрастает с ее увеличением.

Диффузия имеет огромное значение в природе. Ее можно встретить в буквальном смысле повсеместно. Она, например, составляет основу процессов питания и дыхания животных и растительных организмов. Кроме того, диффузия определяет характер протекания многих технологических процессов.

Диффузия возникает не только при существовании в среде градиента концентрации. Она появляется при наличии раз-

ности температур – в неравномерно нагретой среде (термодиффузия), под действием внешнего электрического поля (электродиффузия), полей тяжести или давления (бародиффузия).

Разные диффузионные механизмы накладываются друг на друга. Рассмотрим для примера процессы, происходящие при наличии градиента температуры. Если разность температур поддерживается постоянной, термодиффузионный механизм приводит к возникновению в объеме вещества градиента концентрации, что вызывает также и обычную диффузию. В стационарных условиях при отсутствии потока вещества термодиффузия уравнивается обычной диффузией и в объеме возникает разность концентраций (что используется, например, для разделения изотопов).

А теперь несколько замечаний еще об одном явлении, имеющем непосредственное отношение к теме нашей публикации – о конвекции (лат. *convectio* – доставка).

Конвективный механизм ярко проявляется в газах и жидкостях. Так же, как и диффузия, конвекция играет ключевую роль во многих природных и технологических процессах.

В гидродинамике конвекцией называют явление переноса массы и тепла в жидкостях, находящихся в полях разной природы. В земных условиях проявляется так называемая свободная, или естественная, конвекция. Она возникает при неравномерном нагреве жидкостей, находящихся в поле тяжести. Более нагретые элементы жидкости имеют меньшую плотность, под воздействием архимедовой силы они всплывают. Элементы с меньшей температурой – тяжелее, они опускаются вниз. При условии подогрева снизу процесс повторяется снова и снова.

Именно естественной конвекцией вызваны все атмосферные движения, например ветер. Благодаря тому же явлению существуют движения в мантии Земли, увлекающие за собой тектонические плиты, что проявляется на поверхности как движение материков. Характерные конвективные масштабы больше диффузионных, которые, как уже говорилось, опре-

деляются движением молекул вещества.

При нагревании жидкости в ней возникают конвективные потоки, переносящие теплоту от более нагретых слоев к относительно холодным. Конвективное движение жидкости приводит к ее пере-

мешиванию и выравниванию температуры во всей полости.

В условиях невесомости естественная конвекция невозможна. Однако здесь конвективный тепло- и массоперенос может возникнуть под влиянием других механизмов, например вибрационного.

ТВК И ПЕРМСКАЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ ШКОЛА

ТВК – «самодельная» аббревиатура, ее надо понимать так: термовибрационная конвекция. Приоритет открытия многих эффектов этой самой ТВК принадлежит ученым пермской гидродинамической школы. Профессора Г.З. Гершуни и Е.М. Жуховицкий, на протяжении нескольких десятилетий координировавшие работу коллектива пермских гидродинамиков, доказали саму возможность существования термовибрационной конвекции в отсутствии поля тяжести. Экспериментальное подтверждение описанных ими вибрационных явлений в условиях невесомости и пониженной гравитации дано в работах профессора Г.Ф. Путина и его сотрудников.

Целый ряд важных теоретических результатов в этой области получены профессором Д.В. Любимовым. Он, в частности, доказал, что приближение Буссинеска, которое обычно используется при изучении естественной тепловой конвекции, неприменимо при вибрациях общего вида. Д.В. Любимов предложил новый подход, в соответствии с которым разработал общую теорию осредненных течений и теплообмена в неоднородных средах под действием высокочастотных вибраций. Полученная им замкнутая система уравнений для осредненных и пульсационных компонент гидродинамических и тепловых полей стала, по существу, классической. В рамках разработанной концепции был решен большой цикл задач. Результаты этих исследований вошли в монографию «Thermal Vibrational Convection»

(Wiley, 1998), написанную двумя авторами: Г.З. Гершуни и Д.В. Любимовым.

На протяжении длительного периода времени изучением проблем гидродинамики и тепло- массообмена в условиях микрогравитации активно занимается и Т.П. Любимова. Ей удастся найти важные для практического применения решения задач о термогравитационной и концентрационно-гравитационной конвекции, о термодиффузионном разделении жидких смесей в условиях пониженной гравитации.

Показательно само название ее докторской диссертации: «Некоторые задачи гидродинамики и теплообмена в условиях микрогравитации». ВАК отметил эту работу в числе наиболее интересных докторских диссертаций по специальности «Механика жидкости, газа и плазмы», представленной на экспертизу в 1995-м году.

Много раз обращались Д.В. Любимов и Т.П. Любимова и к рассмотрению поведения поверхностей раздела в вибрационных полях. Полученные аналитические и численные результаты были обобщены в монографии «Динамика поверхностей раздела в вибрационных полях» (М.: Физматлит, 2003), созданной ими в соавторстве с коллегой и другом профессором А.А. Черепановым.

Понятно, поэтому, что участие пермских исследователей в международном проекте по изучению эффектов взаимодействия термодиффузионного и вибрационного механизмов в невесомости является неслучайным, это следствие многих причин и обстоятельств.

ИЗ РАССКАЗА Т.П. ЛЮБИМОВОЙ (ПРОДОЛЖЕНИЕ)

– В земных условиях, – рассказывает Татьяна Петровна, – коэффициент термодиффузии измерять очень сложно. Меша-

ет естественная конвекция. В космосе, в невесомости, – совсем другое дело, но там возникают новые трудности.

– Конечно, – поясняет моя собеседница, – нет тяжести – нет и обычного для земных условий тепломассопереноса в неравномерно нагретой жидкости. Но взамен появляется термовибрационная конвекция, вызванная остаточными вибрационными ускорениями – из-за движений станции и ее экипажа...

Из дальнейшего рассказа я узнаю, что в качестве рабочей жидкости в эксперименте использовалась смесь изопропанола и воды в двух вариантах концентраций: 1:1 и 1:9 соответственно. Изопропанол – это вещество из класса спиртов, говоря по-другому – изопропиловый спирт. Химическая формула – $\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$. Используется для получения ацетона и перекиси водорода. Входит в состав косметики, бытовой химии, репеллентов, зимних стеклоомывателей, дезинфекционных средств. Хорошо смешивается с водой в любых соотношениях.

Сильно отличающиеся варианты концентраций – понятно почему. Коэффициент термодиффузии – функция концентрации. У смесей с концентрациями 1:1 и 1:9 даже знак термодиффузионного эффекта разный. Другие свойства смесей тоже значительно различаются: величины коэффициентов диффузии и теплопроводности, значения безразмерных параметров Прандтля и Шмидта, другие параметры.

Жидкость помещалась в прозрачную кювету. Всего в эксперименте использовались четыре полости, точнее, две их пары, к этому мы еще вернемся. Каждая кювета представляла собой кубическую полость со стороной в 1 сантиметр. Миниатюрный размер – еще одно свидетельство прецизионной точности эксперимента в целом. Жидкость в полости подогревалась так, чтобы градиент температуры был ортогонален вибрационному ускорению. Рассматривались линейно-поляризованные поступательные вибрации.

Кажется, именно в этом месте рассказа Т.П. Любимовой концентрация внимания у меня немного снизилась – из-за обилия подробностей. Поэтому мне пришлось уточнять потом у нее некоторые важные детали.

Итак, на станции астронавт-исследователь, руководствуясь подготовленными инструкциями, проделывал необходимые манипуляции, изменяя параметры экспе-

римента. В результате удалось произвести множество испытаний, различавшихся по амплитуде и частоте вибраций, по градиенту температуры и, как уже говорилось, по свойствам рабочей жидкости.

В качестве справки – короткий реестр значений параметров. Частота вибраций в эксперименте задавалась в диапазоне от 0 до 2,8 Гц: 0; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 2,8. Амплитуда изменялась от 0 до 68 мм. Разность температур – 5; 10; 15 градусов.

Вернемся к кюветам. Для проведения эксперимента были подготовлены два сменных блока с двумя кюветами в каждом. Жидкость в обеих кюветах блока одинакова, с той лишь разницей, что в одной из полостей находились еще и твердые светорассеивающие частицы – для визуализации конвективного течения. В первой серии опытов использовался блок кювет, содержащих жидкость с соотношением концентраций 1:9, во второй – блок ячеек с другой смесью.

Для регистрации экспериментальных результатов использовались оптические методы. Фиксировалось поле показателя преломления, который зависит от температуры и концентрации.

Тепловые времена – небольшие, невелико и значение числа Прандтля. Напротив, значение числа Шмидта – большое. Другими словами, величина коэффициента диффузии мала, она много меньше величины коэффициента температуропроводности, поэтому характерные времена изменения концентрации много больше характерных времен изменения температуры.

Температура в полости устанавливается быстро, в дальнейшем коэффициент преломления жидкости изменяется по мере изменения поля концентраций, что зависит от вибраций.

Нет вибраций – нет и движения в жидкости, все в ней происходит в чисто диффузионном режиме. Однородная смесь, однородный градиент температуры – компоненты разделяются за счет термодиффузионного эффекта...

Появляется вибрационное ускорение – картина происходящего становится другой. Измеряемая величина коэффициента термодиффузии изменяется – за счет «включения», введения в действие конвективного механизма.



Канадский астронавт Роберт Тирск, член экспедиции 20/21, осуществлявшей эксперимент SODI-IVIDL в лаборатории Коламбус Международной космической станции, готовит блок экспериментальных ячеек к установке в герметичный контейнер с перчатками

ЧТО ЖЕ В ИТОГЕ?

– Численные расчеты, – говорит Т.П. Любимова и уточняет, – в отношении их технологии, были довольно сложными. Это и понятно, сама задача сложная. Большое различие характерных времен разных процессов, шесть полей физических величин. Движение в кювете имеет существенно трехмерный характер, значит, для вычислений необходима трехмерная сетка. Изучаемые эффекты – достаточно тонкие, отсюда следуют высокие требования к точности вычислений. Это означает, в частности, что коммерческие вычислительные пакеты не годятся. Так что все комплексы программ разрабатывались специально для этого проекта.

– Что говорить, – улыбается Татьяна Петровна, – пришлось столкнуться и с принципиальными сложностями, и с множеством рутинных моментов. Впрочем, это известно каждому, кто всерьез занимается современным численным счетом. Понятно, что в обработке экспериментальных данных и численном моделировании использовались многопроцессорные компьютеры, применялись алгоритмы параллельных вычислений. Но и при всем этом расчеты требовали очень больших объемов машинного времени. По-

этому применялись специальные технологии, удалось разработать ряд приемов, значительно ускоряющих вычисления.

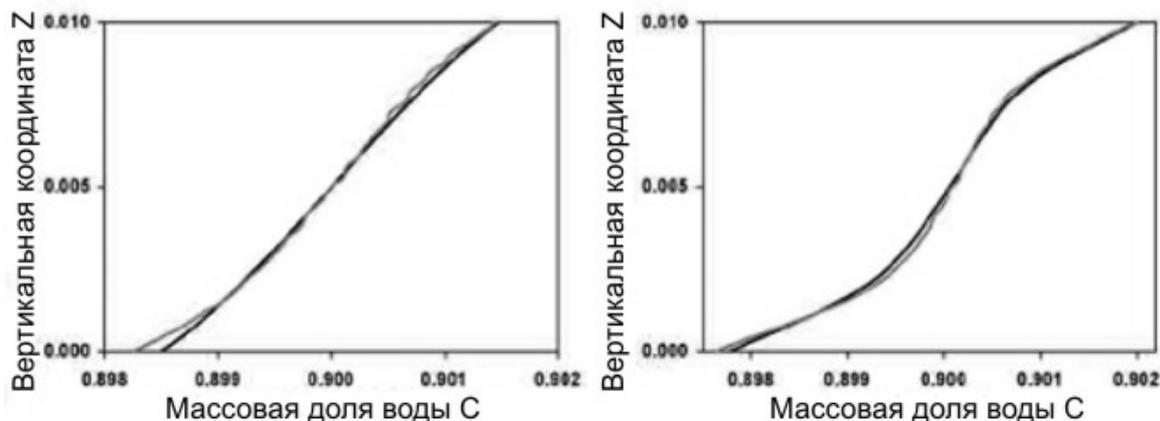
– Главный итог, – Татьяна Петровна на минуту задумывается и продолжает, – о нем можно судить с разных точек зрения. На мой взгляд, он заключается в следующем. Результаты численных экспериментов хорошо согласуются с результатами натуральных испытаний. Это означает, что и аналитическая модель, и вычислительная достоверно описывают реальность. Конечно, уверенность в этом была у нас и раньше, мы давно уже занимаемся конвекцией в невесомости и вибрациями. Но уверенность – одно, а ее подтверждение – другое.

Незначительные расхождения численных и натуральных результатов, как показал тщательный анализ, объясняются некоторыми специфическими особенностями экспериментальной установки.

– Второй очень важный момент, – подчеркивает Т.П. Любимова, – состоит в следующем. Каждую неделю во время проведения эксперимента в космосе все участники проекта встречались на телеконференциях. Обсуждали ход работы, результаты, полученные по космической связи. Вносили необходимые дополнения

и изменения. Такое оперативное сотрудничество теоретиков и экспериментаторов оказалось очень плодотворным. Оно позволило, с одной стороны, полнее по-

нять наблюдаемые явления, а с другой стороны – оптимально скоординировать реализацию проекта.



Полученные в космическом эксперименте (серые линии) и в численных расчетах (черные линии) профили концентрации в середине ячейки для смеси вода (90 %) – изопропанол (10 %); время от начала эксперимента 12 часов, левый рисунок – в отсутствие вибраций, правый – при наличии вибраций с частотой 2 Гц и амплитудой 44 мм. В отсутствие вибраций профиль концентрации линейен, это свидетельствует о том, что случайные микроускорения не влияют на диффузионный процесс. При наличии слабых вибраций профиль отклоняется от линейного из-за слабого течения. Экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами численного моделирования

ЛИРИЧЕСКОЕ ОТСТУПЛЕНИЕ И ПРОФЕССОР ЛЮБИМОВ

Небольшое лирическое отступление от автора. Каждая реализация эксперимента для одного набора параметров называлась в проекте емким английским словом «run». Русских вариантов перевода – множество. Кроме очевидного «бег», это еще и пробег, работа, ход, прогон, срок, тираж, течение, действие, отрезок пути, тропа. И еще множество, даже «полет» и «ручей». Наверное, эти слова, каждое в отдельности и все в совокупности, могут служить средством понимания и обозначения той работы, которая была проделана учеными разных стран в рамках проекта «IVIDIL».

И еще одна, интересная, на мой взгляд, деталь. Один натурный run продолжался восемнадцать часов. Всего их на космической станции было около 50. А численное моделирование каждого run'a занимало от нескольких часов до нескольких суток.

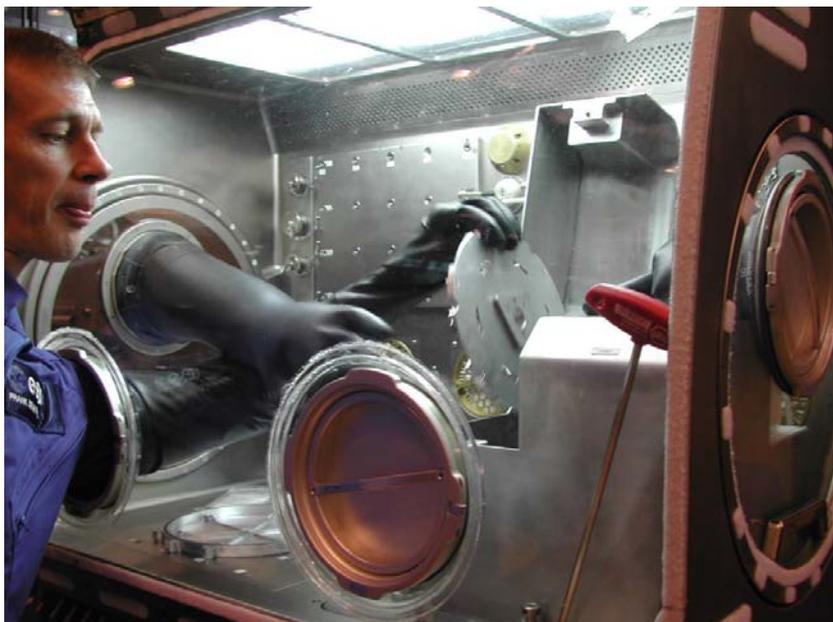
К нашей компании присоединяется вернувшийся с лекции Д.В. Любимов. В ответ на мою просьбу высказать свое мнение о проекте и его результатах,

улыбнувшись, говорит:

– Но я ведь не знаю, что вы успели уже обсудить, – и тут же, проявляя удивительную пронизательность, находит лучшее продолжение разговора, дополняя сказанное:

– Понимаете, условия моделирования невесомости в земных условиях давно установлены и хорошо описаны. Кажется, можно обойтись без экспериментов в реальном космосе. Но лучше все-таки проверить знания опытным путем. Понятно, что научиться хорошо измерять коэффициент термодиффузии – очень важно. Не только в чисто научном аспекте. Точное определение свойств и параметров разных материалов и веществ – серьезная практическая проблема. С ней связаны многие приложения. И ее решение открывает новые технологические перспективы в таких направлениях, как, например, биология, физиология, фармакология.

– В свое время, – задумчиво говорит Дмитрий Викторович, – термодиффузионный эффект применяли для разделения изотопов. Сейчас используются другие



Астронавт-исследователь у герметичного контейнера с перчатками

методы. Но стали актуальными другие цели, ранее недоступные. В общем, того же класса, я имею в виду разделение компонент в смесях. Вот, скажем, разделение белков – сегодня над этой задачей работает множество лабораторий и центров во всем мире. Целая индустрия с колоссальными средствами... Да и вообще, как вы знаете, диффузия встречается в жизни на каждом шагу.

Наша молчаливая реакция на последнее утверждение придает ему характер заключительного аккорда.

Игорь Муратов

Справка

Для проведения космического эксперимента IVIDIL использовался прибор SODI (Selectable Optical Diagnostics Instrument – инструмент для выборочной оптической диагностики). Он был разработан по заказу Европейского космического агентства компанией VERHAERT SPACE для проведения экспериментов с жидкостями, в которых требуется соблюдение за-

данных тепловых условий и выполнение высококачественной оптической диагностики.

Прибор SODI установлен на модуле Коламбус в герметичном контейнере с перчатками. В состав прибора входят различные инструменты оптической диагностики: интерферометр Маха–Цандера, устройство для оптического измерения поля скоростей и аппаратура для ближнеполевой оптической микроскопии.

В эксперименте IVIDIL использовался метод цифровой оптической интерферометрии. Поля температуры и концентрации приводят к пространственному распределению показателя преломления пучка лазерных лучей, проходящих через жидкость. Полученные интерференционные картины подвергаются цифровой обработке для восстановления исходных полей температуры и концентрации. Оптические методы не возмущают протекание процессов диффузии и термодиффузии. Необходимым условием корректности измерений является отсутствие конвективного переноса.