

**Т. В. Стецюк\***

**НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ЖИДКОСТИ  
В УСЛОВИЯХ НЕВЕСОМОСТИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ  
ИХ В КОСМИЧЕСКОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ:  
ОБЗОР**

Показаны различия в поведении жидкости в земных условиях при действии силы гравитации и в условиях невесомости, а именно какие силы преобладают в том или ином случае. Рассмотрено смачивание и растекание жидкости, форма капель и кипение жидкости в условиях невесомости. Показаны перспективы использования этих особенностей жидкости в космическом материаловедении.

*Ключевые слова:* жидкость, невесомость, гравитация, космическое материаловедение.

*Введение*

Создание долговременных орбитальных станций и успешное осуществление длительных пилотируемых полетов привели к формированию нового научно-технического направления — космического материаловедения, которое ставит целью получение веществ и материалов в космическом пространстве с использованием состояния невесомости. В настоящее время рассматриваются различные направления материаловедения и технологии, перспективные для реализации в условиях невесомости. Получение новых веществ и материалов и улучшение их свойств в невесомости основаны на особенностях их поведения в жидком и газообразном состояниях. Для успешной разработки этого комплексного направления требуется синтез знаний, накопленных в результате развития космической техники, космических исследований и ряда смежных дисциплин, таких как общее и специальное материаловедение, гидромеханика, тепло- и массообмен. Постановка такой задачи стала возможной благодаря определенному уровню развития упомянутых разделов механики, техники, технологии. В особенности существенна связь с механикой, законы которой лежат в основе космического материаловедения.

Освоение и использование космического пространства поставило новые задачи перед механикой и ее разделом — гидродинамикой, включая процессы тепломассопереноса, многофазные течения, движения со свободными границами и поверхностями фазового перехода. Многие из них были решены еще на этапе прорыва в космос, однако особую актуальность они приобрели в связи с запуском космических станций.

---

\* Т. В. Стецюк — научный сотрудник, Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев.

Появилась не гипотетическая, а реальная возможность использовать такие факторы, как микрогравитация и космический вакуум.

Для получения веществ и материалов на орбитальной станции необходимо учитывать состояние длительной невесомости, которое количественно характеризуется отношением ускорения  $g$  в системе координат станции к ускорению  $g_0$  в поле силы тяжести Земли. Значение  $g$  на орбитальной станции строго не равно нулю ( $g/g_0 = 10^{-3}—10^{-6}$ ), но достаточно мало и может поддерживаться длительное время, что позволяет реализовать предельное состояние вещества, которое ранее не могло быть осуществлено в технологических процессах. Однако специфика состояния невесомости, в отличие от земных условий, связана не только с ослабленным полем массовых сил. При полете на орбитальной станции могут существовать значительно превосходящие средний уровень колебания этих сил с различной частотой при взаимном изменении их проекций.

В основе принципов осуществления технологических процессов в состоянии невесомости лежат классические законы механики. Первый принцип основан на использовании ряда следствий из законов статики и гидростатики в условиях невесомости (уменьшение собственной массы тела, массы гидростатического столба, уменьшение выталкивающей силы Архимеда). Это позволяет осуществлять без значительных энергетических затрат подвеску тел, создавать устойчивые системы из составляющих с различной удельной плотностью.

Второй принцип базируется на законах статики и динамики поверхности раздела. В условиях невесомости преобладающее влияние на формирование поверхности оказывают межмолекулярные силы поверхностного натяжения, которые, как известно, стремятся придать поверхности жидкости сферическую форму. Это дает возможность реализовать в невесомости свободные поверхности сферической формы достаточно больших размеров, что составляет основу предложений по получению образцов совершенной сферической формы, жидкому формованию, специальному литью.

В основе третьего принципа — возможность изменения гравитационных механизмов конвекции (тепловой, концентрационной) в растворах, расплавах, смесях [1].

Существенный прогресс в области исследования эффектов невесомости, обусловленный развитием многих смежных наук, и в первую очередь гидромеханики, тепло- и массообмена, был достигнут в пятидесятые-шестидесятые годы в связи с созданием космических аппаратов и их систем, которые предназначались для работы с жидкостями и газами в условиях невесомости (системы жизнеобеспечения, баки двигательных установок). Процесс освоения космического пространства неизбежно включает технологические операции с использованием текучих сред (сварку и пайку, охлаждение до гелиевых температур чувствительных элементов средств мониторинга Земли, регенерацию отходов жизнедеятельности, системы питания микроорганизмов, вырабатывающих кислород, и т. д.). Это означает, что исследование поведения жидкостей, газов и многофазных систем, а также действия длительной невесомости на человеческий организм, более чем на

две трети состоящий из жидкости, сохраняет актуальность до тех пор, пока человечество не потеряет интерес к Космосу [2].

Систематические исследования по механике и физике жидкостей в условиях микрогравитации начались в конце 60-х годов прошлого столетия [3], а в 1969 г. В. Кубасов на аппаратуре, разработанной в Институте электросварки им. Е. О. Патона, провел первый технологический эксперимент — сварку на борту орбитальной станции "Союз-6". За этим последовала исчисляемая сотнями серия экспериментов на станциях "Союз", "Салют" и "Мир" [4]. Многочисленные опыты проведены также под эгидой НАСА [5] и Европейского космического агентства.

В результате различных экспериментов установлено, что существует аналогия между поведением жидкостей в условиях микрогравитации и в микромасштабах. Она базируется на том, что основные критерии подобия в гидродинамике (такие, как числа Бонда, Фруда, Рэлея) содержат произведение ускорения силы тяжести  $g$  на характерный линейный масштаб  $l$  в некоторой положительной степени. В принципе, нет разницы, стремиться ли  $g$  к нулю при фиксированном  $l$  или наоборот [6—12].

Воздействие длительной невесомости на вещества и материалы в жидком и газообразном состояниях является, однако, весьма сложным и далеко не однозначным: оно может приводить к положительному эффекту по сравнению с земными условиями, давать тот же эффект, что и в земных условиях, а в ряде случаев — и к нежелательным побочным эффектам. Это объясняется в большинстве случаев фундаментальными закономерностями поведения жидкостей и газов в невесомости. Например, устойчивость свободных поверхностей раздела, которые, согласно общим представлениям, можно было бы реализовать в невесомости, зависит от характера действующих возмущений, геометрии жидкой массы, физических свойств. Важное значение приобретают в связи с этим такие явления, как смачиваемость, адгезия. для которых еще нет удовлетворительной теории [1].

Вследствие значительного отличия условий невесомости от земных, в которых создаются и отлаживаются приборы и агрегаты искусственных спутников Земли, космических кораблей и их ракет-носителей, проблема невесомости занимает важное место среди других проблем космонавтики. Это наиболее существенно для систем, имеющих ёмкости, частично заполненные жидкостью. К ним относятся двигательные установки с жидким ракетным топливом, рассчитанные на многократное включение в условиях космического полёта. В условиях невесомости жидкость может занимать произвольное положение в ёмкости, нарушая тем самым нормальное функционирование системы (например, подачу компонентов из топливных баков). Поэтому для обеспечения запуска жидкостных двигательных установок в условиях невесомости необходимо разделять жидкую и газообразную фазы в топливных баках. Использовать специальные приёмы следует и для разделения жидкой и газообразной фаз в условиях невесомости в ряде агрегатов системы жизнеобеспечения, в топливных элементах системы энергопитания.

Невесомость может быть использована для осуществления некоторых технологических процессов, которые трудно или невозможно реализовать

в земных условиях (например, получение композиционных материалов с однородной структурой во всём объёме, получение тел точной сферической формы из расплавленного материала за счёт сил поверхностного натяжения и др.).

Значение исследований поведения жидкости в условиях невесомости не ограничивается перспективами промышленного производства материалов. Большое значение имеет понимание перспективы усовершенствования многих технологических процессов в связи с новым взглядом на влияние гравитации, а также целенаправленный поиск путей исключения нежелательного воздействия гравитации в земных условиях. Эти исследования в конечном итоге направлены на разработку и применение более строгих количественных методов для описания технологических процессов и совершенствование технологии в целом.

### ***Влияние невесомости на жидкость [13]***

При переходе жидкости в состояние невесомости в ней исчезает сила Архимеда, действующая на компоненты разной плотности и приводящая к их разделению, изменяется характер конвекционных течений, возрастает относительная роль межмолекулярных взаимодействий в жидкости и становится возможным ее свободное удержание вне сосуда (явление левитации). Рассмотрим в этой связи подробнее процессы, происходящие в жидкости.

Как и в газе, в жидкости молекулы не сохраняют постоянного положения, а за счет тепловой энергии перемещаются с места на место. Если в каком-либо месте объема жидкости преобладают частицы одного сорта, то за счет более частых столкновений между собой они постепенно переходят в зону, где их концентрация меньше. Этот процесс называется диффузией. Вследствие диффузии за время  $t$  происходит смещение частиц на расстояние  $x = (2Dt)^{1/2}$ , где  $D$  — коэффициент диффузии. Если рассматривать частицы как сферы с радиусом  $r$ , то  $D = W/(\pi\eta r)^{-1}$ . Здесь  $W$  — тепловая энергия частиц;  $\eta$  — вязкость жидкости, которая сильно зависит от ее температуры. Когда жидкость охлаждается, вязкость возрастает и, соответственно, замедляются процессы диффузии. Если изменение концентрации частиц одного сорта на расстоянии  $\Delta x$  внутри жидкости равно  $\Delta c$ , то через единичную площадку в 1 секунду должно проходить число частиц  $I = -D\Delta c/\Delta x$ .

Жидкость может содержать несколько компонентов одновременно. Если содержание одного из компонентов мало, то такой компонент рассматривают как примесь. Если в начальный момент примесь распределена в жидкости неравномерно, то диффузионные процессы в жидкости ведут к установлению однородного распределения (гомогенизация).

В некоторых случаях жидкость может содержать компоненты разной плотности. На Земле под действием силы Архимеда постепенно происходит разделение этих компонентов. В невесомости этого разделения нет и после затвердевания таких жидкостей могут быть получены вещества с уникальными свойствами. Жидкость может также содержать фазы, которые не смешиваются между собой, например

керосин и воду. На Земле между ними образуются четкие границы раздела. В невесомости перемешиванием можно получить устойчивую смесь, состоящую из мелких капель той и другой фаз. После затвердевания из подобных смесей разных фаз можно изготовить однородные композиционные материалы, пенометаллы и т. п.

Возникновение границ раздела между различными фазами в жидкости обусловлено наличием силы поверхностного натяжения, или капиллярной силы, которая возникает из-за взаимодействия между молекулами жидкости.

На борту космического аппарата из-за различного рода малых ускорений состояние невесомости нарушается. Если  $r$  — радиус сферы, форму которой принимает жидкость, то действующая на нее капиллярная сила приблизительно равна  $\sigma r$ , где  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения. Величина инерционных массовых сил, действующих на жидкость, равна  $\rho gr^3$ , где  $\rho$  — плотность жидкости;  $g$  — малое ускорение. Очевидно, эффекты поверхностного натяжения будут играть главную роль, когда  $\sigma(\rho gr^2)^{-1} > 1$ . Этим условием определяется возможность получения в состоянии, близком к невесомости, жидких сфер с радиусом  $r$ . Такие жидкие сферы на борту космических аппаратов могут находиться в свободно плавающем состоянии, когда для их удержания не нужны сосуды. Если это жидкий расплав, то при его затвердевании на Земле со стенок сосуда поступают вредные примеси. В космосе можно обойтись без сосуда и, следовательно, получать более чистые вещества.

Расплав металла под действием поверхностного натяжения принимает шарообразную форму и свободно повисает в пространстве. Как показали американские и советские исследования, расплавленная медь в космосе за 3 с образует шар диаметром 10 см. Металл не загрязняется примесями, которые в земных условиях переходят на него со стенок печи. С помощью электрических и магнитных полей свободно парящему расплаву можно придать нужную форму — так родилась новая технология формования металлических деталей. Разные расплавы, сильно отличающиеся друг от друга по плотности, идеально смешиваются между собой и после этого не расслаиваются — на Земле это неизбежно происходит под действием силы тяжести. Можно даже смешивать расплавы с газами. Материал, содержащий 87% газа и 13% стали, плавает в воде как пробка. Такие вспененные материалы открывают путь для новых конструктивных решений в судостроении и авиации [14].

### ***Поведение жидкости в невесомости Смачивание и растекание [15]***

Смачивание — это явление, возникающее при соприкосновении жидкости с поверхностью твердого тела или другой жидкости. Выражается, в частности, в растекании жидкости по твердой поверхности, находящейся в контакте с газом (паром) или другой жидкостью. Смачивание вызывает образование мениска в капиллярной трубке, определяет форму капли на твердой поверхности или форму газового пузырька на поверхности погруженного в жидкость тела. На Земле жидкость обычно течёт вниз. В космосе вода летает. Происходит это из-за того, что в космосе на

поведение жидкостей доминирующее влияние оказывает сила поверхностного натяжения, благодаря действию которой жидкость в космосе принимает форму с минимальной поверхностью — форму шара. Поверхностным натяжением называется сила, испытываемая молекулами жидкости на поверхности (сильнее всего на границе газ—жидкость) и направленная в глубину объема жидкости. Наличие сил поверхностного натяжения делает поверхность жидкости похожей на упругую растянутую пленку. При малых массах благодаря действию сил поверхностного натяжения жидкость также принимает форму, соответствующую минимальной поверхности. В частности, капля имеет сферическую форму.

С точки зрения физики, граница, по которой капля соприкасается с поверхностью твердого тела, называется поверхностью раздела фаз — жидкой и твердой. Угол между поверхностями капли и твердого тела называется углом смачивания. Если этот угол меньше  $90^\circ$  и капля растекается по поверхности, то жидкость хорошо смачивает поверхность. Если этот угол больше  $90^\circ$ , то капля стягивается в сплюсненный под давлением собственной массы водяной шарик, то есть не смачивает поверхность. На Земле несмачивающие жидкости не смачивают поверхность, тогда как в условиях невесомости достаточно небольшого прикосновения несмачивающей жидкости для того, чтобы смочить поверхность.

### ***Форма капель жидкости***

Жидкости могут образовывать капли благодаря силам поверхностного натяжения. Но что происходит с формой капель в движении? Если свободно подвешенную каплю вращать со все увеличивающейся скоростью, то капля будет расплющиваться и деформироваться. Капля деформируется в соответствии с принципом минимума энергии, то есть она всегда ищет низшее энергетическое состояние для данной частоты вращения, и теоретиками было предсказано, что она образует серию равновесных фигур, показанных в верхней части рис. 1 [16, 17]. Чтобы увидеть полный спектр форм, показанных на рис. 1, требуются определенные условия: во-первых, должна быть исключена сила гравитации; во-вторых, должно быть сведено к минимуму влияние сил вязкого трения; в-третьих, капля должна вращаться с регулируемой скоростью.

Физики из Ноттингемского университета провели ряд экспериментов по определению формы водяных капель, подвешенных в пространстве с помощью диамагнитной левитации [18]. Они наблюдали несколько различных семейств вращающихся капель воды размером около одного сантиметра.

То, что капля жидкости в отсутствие гравитации имеет форму шара, кажется очевидным, но подтвердить этот факт экспериментально смог лишь в 1863 году бельгийский физик Ж. Плато [19]. Он поместил каплю оливкового масла в водно-спиртовую смесь, имевшую такую же плотность, как и масло. Уравновешивая силу тяжести, действующую на каплю, архимедовой (выталкивающей) силой, ученый добивался состояния невесомости капли. В результате таких манипуляций капля

принимала сферическую форму. Бельгийский ученый также провел эксперименты по вращению капли и наблюдению за происходящими с ней

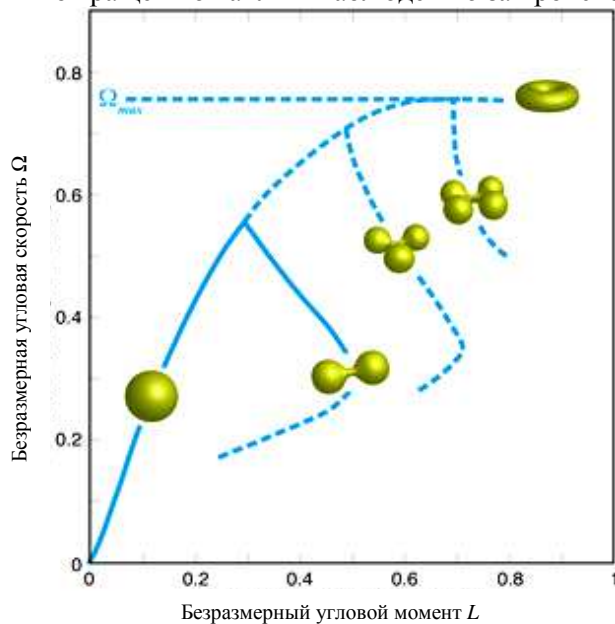


Рис. 1. Диаграмма стабильности форм капель [16, 17]. По оси ординат отложена безразмерная угловая скорость вращения, по оси абсцисс — безразмерный момент импульса вращения жидкости капли. Сплошная линия на диаграмме соответствует устойчивой форме капли, пунктирная — нестабильной структуре

Fig. 1. The diagram of drops forms stability [16, 17]. On ordinate axis the dimensionless angular speed of rotation is deposited, on abscissa axis the dimensionless moment of drop liquid rotation impulse is deposited. The continuous line on the diagram corresponds to the steady form of a drop and dotted line corresponds to nonstable structure

в результате этого метаморфозами. Плато удалось установить, что по мере возрастания скорости вращения оливкового масла капля меняла свою форму с шарообразной на овальную, а далее трансформировалась в двудольную структуру, напоминающую сильно вытянутый овал. И, наконец, при очень большой скорости вращения капля становилась тором. Схематически изменение формы капли с увеличением скорости вращения жидкости в ней изображено на рис. 1. К сожалению, опыты Плато не были совершенными. Среда, которая окружала исследуемый объект в его опытах, за счет сил вязкости оказывала нежелательное дополнительное воздействие на форму капли, а потому результаты исследований бельгийского физика носили лишь качественный характер.

Сравнительно недавно эксперименты Плато были повторены на орбитальной станции с капелькой кремниевого масла [20] и это дало

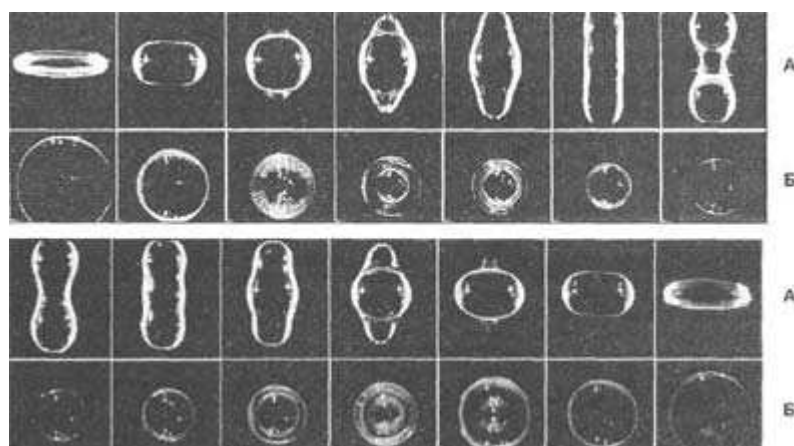


Рис. 2. Снимки капли воды (диаметр 23,3 мм), сделанные двумя фотокамерами: А — вид сбоку; Б — вид снизу

Fig. 2. Water drop Image (diameter 23,3 mm) which has been made by two photocameras: А — view sideways; Б — view from the bottom

возможность увидеть формирование 2-лопастных капель. Кроме того, на борту американского шаттла “Колумбия” по заданию ученых астронавты фотографировали поведение крупной (диаметром 23,3 мм) капли воды, которой они манипулировали сфокусированными пучками звуковых волн [21]. Одна камера снимала каплю сбоку (ряд снимков А), другая — снизу (Б) (рис. 2). На снимках видно, что форма капли колебалась между “блином” и “сигарой”, но постоянно оставалась симметричной.

С помощью изобретенной авторами работы [18] техники удалось наблюдать и фиксировать различные формы капель. В частности, при вращении жидкости внутри таких объектов, согласно теоретическим предположениям, можно видеть их переход из двудольной формы в треугольную (трехдольную), причем последняя структура по той же теории должна быть неустойчивой. На примере водяной капли объемом 1,5 мл (что соответствует диаметру 14 мм), у которой с помощью поверхностно-активного вещества коэффициент поверхностного натяжения уменьшился вдвое, английские ученые впервые показали, что вопреки теоретическим предсказаниям, можно добиться устойчивости треугольной формы. Стабилизация достигалась за счет комбинации вращения капли и генерирования на ней поверхностных волн [22]. Таким образом, поверхностные волны служили своего рода стабилизаторами треугольной формы водяной капли.

Как оказалось, возбуждение на капле поверхностных волн одновременно с ее вращением позволяет получить значительное многообразие форм водяных капель, о которых Плато, возможно, даже и



не догадывался. Эксперименты с каплями воды представляют не только академический интерес. Поскольку стабилизация формы капли происходила вследствие сложного взаимодействия ее при вращении поверхностными волнами на ней, то результаты опытов могут быть использованы в описании схожих физических явлений — как значительно большего (астрономического), так и меньшего (ядерного) масштаба.

### *Кипение жидкости*

Процесс кипения — это фазовый переход жидкости в газ под действием высокой температуры. Пузырьки пара, отрываясь от источника тепла, устремляются вверх, а на их место поступает новая порция жидкости. В результате кипение сопровождается активным перемешиванием жидкости, что многократно увеличивает скорость ее превращения в пар [23—26].

На орбите кипение представляет собой более простой процесс, чем на Земле. Невесомость аннулирует две переменные, воздействующие на кипение, — конвекцию и плавучесть. Именно поэтому кипятильник ведет себя в космосе по-иному. Ключевую роль в этом бурном процессе выполняет сила Архимеда, действующая на пузырек, которая, в свою очередь, существует благодаря силе тяжести. В условиях невесомости нет веса, нет понятия "тяжелее" и "легче" и потому пузырьки нагретого пара не будут никуда всплывать. Вокруг нагревательного элемента образуется прослойка пара, которая препятствует передаче тепла всему объему жидкости. По этой причине кипение жидкостей в невесомости (но при том же давлении, а вовсе не в вакууме!) протекает совершенно иначе, чем на Земле. Детальное понимание этого процесса крайне важно для успешного функционирования космических аппаратов, несущих на борту тонны жидкого топлива.

Нагретая жидкость не поднимается, а остается рядом с нагревающей поверхностью и нагревается дальше. Те области жидкости, которые находятся на некотором расстоянии от источника тепла, остаются относительно холодными. Поскольку нагревается меньший объем воды, процесс происходит быстрее. По мере формирования пузырьков пара они не поднимаются на поверхность, а объединяются в гигантский пузырь, который колеблется в жидкости (рис. 3).

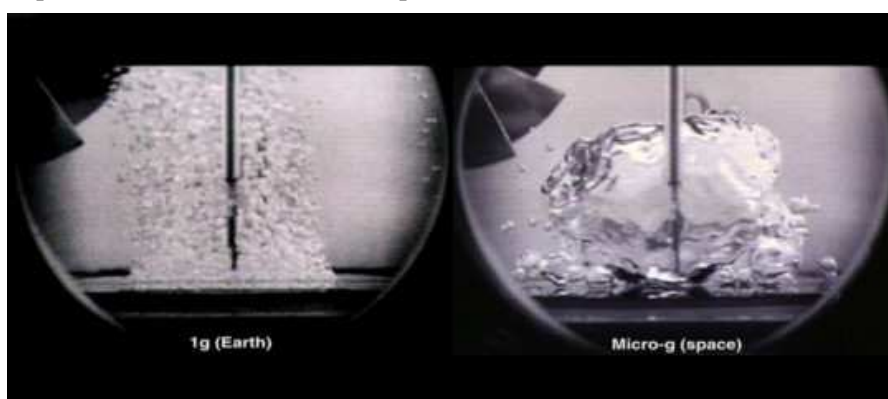


Рис. 3. Кипение воды на Земле и в условиях невесомости [27]

Fig. 3. Water boiling on the Earth and in weightlessness conditions [27]

При кипении жидкости в условиях полной невесомости возбуждаются колебания парового пузыря, обусловленные упругостью пара и инерционностью массы жидкости, оттесняемой паровым пузырьком [28]. В обычных земных условиях подавляющее влияние на формирование течения жидкости имеют силы плавучести, они обеспечивают отвод паровых пузырей от поверхности нагревателя и определяют режим кипения — пузырьковый или плёночный. Упругоинерционные колебания парового пузыря можно наблюдать при пузырьковом кипении в условиях пониженной гравитации.

В условиях полной невесомости (при полном отсутствии сил плавучести) колебания парового пузыря на поверхности нагревателя являются определяющими при формировании структуры течения жидкости в объёме, могут привести к реализации пузырькового режима кипения и даже обеспечить отвод парового пузыря от нагревателя. Период колебания парового пузыря на поверхности нагревателя зависит от формы сосуда, положения свободной поверхности жидкости относительно центра кипения, интенсивности парообразования. При пузырьковом режиме кипения течение жидкости в объёме формируется таким образом, что обеспечивает подток жидкости к центру кипения и отвод парового пузыря от него к свободной поверхности. В земных условиях такая вихревая структура формируется силами плавучести. В условиях невесомости вихрь может быть образован колебаниями растущего на поверхности нагревателя парового пузыря. Характер установившегося режима кипения (пузырьковый или плёночный) зависит от соотношения интенсивности потока жидкости в вихревой структуре и интенсивности парообразования в центре кипения.

В невесомости кипение становится гораздо более медленным процессом. Однако очень важно понять, какие физические явления могут ускорять кипение в невесомости. В работе [29] описываются результаты экспериментального исследования влияния высокочастотных вибраций на скорость кипения. Основным результатом экспериментов состоит в том, что в условиях невесомости вибрация ускоряет превращение жидкости в пар. Под действием вибрации внутри слегка перегретой жидкости появляется "объемная рябь" — сеть мелких, размером доли миллиметра, пузырьков пара в жидкости. Вначале эти пузырьки растут медленно, но спустя 1—2 с от начала воздействия весь процесс резко убыстряется: жидкость в буквальном смысле слова вскипает.

Существуют две причины такого поведения. Во-первых, пока пузырьки пара мелкие, вязкость жидкости как бы "держит" их на месте, не дает им быстро сближаться. Для крупных пузырьков вязкость отходит на второй план, и их слияние и дальнейший рост становятся интенсивнее. Вторая причина — в самой сути математических законов, управляющих движением жидкостей. Эти законы нелинейны, а значит, внешние вибрации не только заставляют жидкость "мелко трястись", но и порождают в ней крупномасштабные течения. Именно эти течения, разогнавшись, эффективно перемешивают рабочий объем и приводят к убыстрению процесса.

Обнаруженное явление имеет не только прикладной, но и научный интерес. В экспериментах сложные гидродинамические течения, сопровождающие эволюцию сети пузырьков, протекают параллельно с самим фазовым переходом. Эти оба процесса поддерживают и усиливают друг друга, приводя к крайней нестабильности жидкости даже в невесомости.

#### ***Использование особенности поведения жидкости в условиях невесомости в космическом материаловедении [30—36]***

Процессы формообразования жидких тел и их затвердевания в условиях, когда на них не действует сила тяжести, имеют свои особенности. Во-первых, в этих условиях жидкость стремится, как известно, принять форму шара. Однако в действительности при затвердевании жидкости возникает ряд эффектов, усложняющих процесс сфероидизации: свободные колебания объема жидкости, различная скорость остывания жидкости на поверхности и в объеме и т. д. Во-вторых, процессы затвердевания и кристаллизации такой жидкости в невесомости также могут протекать по-иному. Прежде всего это относится к конвекции, которая в земных условиях сглаживает колебания температуры в расплаве и способствует устойчивости процесса кристаллизации. В-третьих, в случае многокомпонентных сплавов отсутствие тяжести может повлиять на перераспределение компонентов внутри жидкости и тем самым на однородность образца.

#### ***Космическая металлургия***

Большинство металлургических процессов включает фазовые переходы в жидкое или газообразное состояния, для которых влияние величины массовых сил на состав и структуру конечного материала может быть значительным. Поэтому перенос этих процессов в космос открывает принципиальные возможности производства материалов с улучшенными характеристиками, а также материалов, которые на Земле получить нельзя.

Металлургические процессы в космических условиях могут быть использованы для решения следующих задач.

1. Приготовление сплавов, в которых нет сегрегации, обусловленной силой Архимеда (получение композиционных материалов, сплавов высокой однородности и чистоты, пенометаллов).
2. Приготовление сплавов в отсутствие конвекционных токов (бездефектные монокристаллы, улучшенные эвтектики и магнитные материалы).
3. Безгравитационное литье (приготовление пленок, проволоки, литых изделий сложной формы).
4. Бестигельная плавка металлов и сплавов (очистка металлов и сплавов, их однородное затвердевание).
5. Разработка методов получения неразъемных соединений на космических аппаратах (сварка, пайка и т. д.).

#### ***Бездефектные кристаллы и сплавы***

В невесомости из-за отсутствия разделения фаз можно задавать произвольные комбинации компонентов в любых состояниях. Можно, в частности, осуществить прямой переход из паровой фазы к твердому телу, минуя расплав. Материалы, полученные при испарении и конденсации, обладают более тонкой структурой, которую обычно трудно получить при плавлении и затвердевании (плавку в космических условиях можно рассматривать как способ очистки). При этом в расплаве возможны следующие эффекты: испарение более летучего компонента, разрушение химических соединений (оксидов, нитридов и т. п.).

В космических условиях открываются возможности приготовления однородных смесей, состоящих из компонентов с различными плотностью и температурами плавления. На Земле такие смеси не могут быть устойчивыми из-за силы Архимеда. Особый класс сплавов такого типа — это магнитные материалы, в том числе новые сверхпроводники.

### ***Композиционные материалы***

Композиционными материалами, или композитами, называют искусственно созданные материалы, которые состоят из основного связующего материала и прочного армирующего наполнителя. Например, комбинация алюминия (связующий материал) со сталью, приготовленной в виде нитей (армирующий материал). К ним относятся и пенометаллы, то есть металлы, в объеме которых содержится большое количество равномерно распределенных газовых пузырьков. По сравнению с образующими их компонентами композиционные материалы обладают новыми свойствами — повышенной прочностью при меньшей плотности. Попытка получить в наземных условиях композиты с основой, находящейся в жидком состоянии, приводит к расслоению материала. Приготовление композитов в космических условиях может обеспечить более однородное распределение армирующего наполнителя.

### ***Неразъемные соединения***

В XXI веке нас ожидают большие, чрезвычайной сложности работы в космосе. При этом громадное значение будут иметь сварочные технологии, используемые для создания сложного оборудования и аппаратуры в земных условиях. Частично они уже существуют, но для дальнейшего освоения космоса и гидросферы необходимо разрабатывать новые процессы сварки, резки, пайки и нанесения различных покрытий. В XXI веке появятся новые материалы. Для их обработки и соединения опять-таки понадобятся совершенно новые технологии. К выполнению этих работ сварочная наука и техника достаточно подготовлены.

Иная ситуация складывается с созданием материалов и технологий их обработки непосредственно в космосе, где условия необычайно сложны и принципиально отличаются от земных. Эти технологии объединяет то, что они заведомо должны быть ориентированы на экстремальные условия. Для космоса характерны не только микрогравитация и вакуум, но и термоциклирование, неизбежное при работах на орбите. Условия в космосе, как известно, значительно отличаются от земных. Глубокий вакуум до  $10^{-10}$  Н/м<sup>2</sup> ( $10^{-12}$  мм рт. ст.), большая скорость диффузии газов,

невесомость, перепад температур в широком интервале (от  $-150$  до  $130$  °C), излучения, электрические и магнитные поля Земли и других планет оказывают существенное влияние на характер физико-химических процессов, протекающих при сварке и пайке. Сварка и пайка в космосе смогут получить серьезное распространение только в том случае, если удастся разработать совершенные методы неразрушающего контроля сварных и паяных соединений, методологию технической диагностики неразъемных конструкций.

### *Пайка в невесомости*

Пайка — процесс неразъемного соединения деталей. При пайке происходят расплавление припоя и диффузия его в соединяемый металл. В отличие от термической сварки, при пайке не расплавляется основной соединяемый металл, что позволяет сохранять неизменным и его структуру, химический состав и механические свойства. Ввиду низкой температуры нагрева в изделиях после пайки не возникает больших температурных напряжений, поэтому они сохраняют форму, размеры и шероховатость поверхности [37—41].

Известно, что прочность паяных соединений при соединении встык определяется величиной (высотой) галтели, которая зависит от свойств смачиваемости поверхностей деталей расплавленным припоем. Высота галтели с уменьшением интенсивности гравитационного поля, как известно, увеличивается благодаря возрастанию действия сил поверхностного натяжения в расплаве, что свидетельствует об увеличении технологических возможностей процесса пайки и перспектив ее применения в космосе.

Эксперименты в космосе показали, что при пайке в условиях микрогравитации никаких изменений в металле на атомном уровне (диффузия, поверхностное натяжение, химическая реакция) не происходит. Изменения проявляются на макроскопическом уровне (массо- и теплоперенос, механизмы роста кристаллов и т. п.).

В условиях невесомости установлено, что в противоположность наземным условиям зазоры стыков заполняются жидким припоем равномерно, без провисания. Смачивание паяемого материала жидким припоем и растекание последнего по основному материалу происходят под действием капиллярных сил и межатомных сил сцепления: диспергирующие частицы основного материала в расплаве припоя распределяются равномерно, по объему и в шве отмечается склонность к мелкозернистому строению. Возможно получение пайкой качественных стыковых, нахлесточных соединений и скруток проводников, проведение ремонта отверстий путем припайки заплат. Пайка в космосе отличается от пайки в земных условиях отсутствием плотности у припоя из-за ничтожно малого ускорения, отсутствия конвекции в шве вследствие очень низкого остаточного давления и стремления жидкого припоя к сферической форме.

Источником теплоты при пайке в космосе является солнечная энергия (мощность  $1,7$ — $2$  кВт). На высоте  $100$  км остаточное давление в окружающем пространстве составляет  $1,33 \cdot (10^{-4}—10^{-5})$  Па. В паяных швах отсутствуют гелий, водород, атомарный азот и кислород. Радиус

галтельного участка паяного шва уменьшается: припой принимает форму капли с приплюснутой вершиной. Пайка в космосе требует минимальных зазоров. В паяных соединениях наблюдается меньше дефектов, вызванных усадкой сплавов; швы менее окислены.

Первые в мире работы по пайке в космосе выполнены в Советском Союзе в 1969 г. на корабле "Союз-6". На советской космической станции "Салют-5" космонавты Б. В. Волинов и В. М. Жолобов продолжили исследования в этом направлении, успешно осуществив опыты по пайке металлов с помощью прибора "Реакция". Конструкции прибора "Реакция" и размещаемого в нем экзоконтейнера не были герметичны и поэтому для имитации условий пайки в космическом пространстве из области между муфтой и трубкой был заблаговременно откачан воздух. Трубка и муфта были изготовлены из нержавеющей стали, а для создания между ними капиллярных зазоров на поверхности трубки сделана накатка глубиной 0,25 мм. В качестве припоя выбран высокотемпературный марганец–никелевый припой (температура пайки 1200—1220 °С), который характеризуется высокими механическими свойствами и хорошей коррозионной стойкостью.

Наземные металлографические исследования и испытания швов (на вакуумную плотность, на механическую прочность на разрывной машине с внутренним давлением до 50 МПа) показали, что полученные в космосе паяные соединения по качеству не уступают полученным в земных условиях, а по ряду показателей и превосходят их. В частности, наблюдается равномерное заполнение зазоров припоем, более однородная микроструктура металла.

Результаты испытаний на борту космических аппаратов различных методов сварки и пайки подтверждают, что при выполнении монтажно-сборочных работ эти методы получения неразъемных соединений найдут широкое применение.

### *Сварка в невесомости*

Для сварки в космосе представляется весьма целесообразным использовать именно те способы соединений металлов, которые применяются для сварки в вакууме на Земле. Это в первую очередь электронно-лучевая и диффузионная сварки. В то же время развитие исследовательских работ по космической технологии металлов привело к созданию таких методов, как сварка плазменной дугой низкого давления (плазменно-лучевая), сварка плавящимся электродом при низком давлении, контактная (точечная и роликовая) сварка в вакууме и др. [42—52]. Проведенный анализ показал, что наиболее перспективными для применения в космосе являются электронно-лучевая сварка, сварка сжатой дугой низкого давления и плавящимся электродом, а также контактная точечная сварка.

Первый в мире эксперимент по сварке в космосе выполнен 16 октября 1969 года на корабле "Союз-6" летчиками-космонавтами Г. С. Шониным и В. Н. Кубасовым. Используя установку "Вулкан", сконструированную в Институте электросварки им. Е. О. Патона (Киев, Украина), космонавты

осуществили автоматические процессы сварки электронным лучом, сжатой дугой низкого давления и плавящимся электродом.

В условиях орбитального полета с помощью острофокусного электронного луча были выполнены: автоматическая сварка тонколистовой нержавеющей стали и титанового сплава, разделительная резка сплавов алюминия и титана, исследования поведения ванны расплавленного металла большого объема. Было показано, что процессы плавления, сварки и резки электронным лучом на орбите протекают стабильно, обеспечивая необходимые условия для нормального формирования сварных соединений и поверхностей резцов. Форма и качество швов, полученных этим способом на нержавеющей сталях класса 8—18 и титановых сплавах, были вполне удовлетворительными.

Космические условия чрезвычайно благоприятны для следующих видов сварки (Al- и Ti-сплавов, нержавеющей и жаропрочных сплавов): диффузионной, холодной, электронно-лучевой, контактной и гелио. Вследствие глубокого вакуума и относительно высокой температуры в космических условиях возможна самопроизвольная диффузионная сварка (схватывание) плотно сжатых деталей.

В условиях динамической невесомости можно получать качественные стыковые, отбортованные и нахлесточные сварные соединения. Изменения режимов сварки в пределах 20% практически не влияют на качество сварного соединения. При сварке сжатой дугой металла малой толщины размеры сварочной ванны малы и формирование швов практически не зависит от сил гравитации, а определяется силами поверхностного натяжения. Для условий космоса может быть перспективным способ микроплазменной сварки. Он дает высокую концентрацию энергии, соизмеримую с электронным лучом, и, соответственно, пригоден для сварки и резки тонких деталей.

Одна из важнейших проблем — освоение космического пространства, в решении которой важную роль должна сыграть сварка. Сооружение различных крупногабаритных комплексов на околоземных орбитах, Луне, планетах, а также их ремонт не обойдутся без сварочной техники. Пока наиболее перспективным способом в условиях космического пространства считается электронно-лучевая сварка.

Большой интерес к электронному лучу как возможному источнику нагрева и сварки в условиях космического пространства с естественным вакуумом определяется рядом важных факторов: высоким (до 80%) КПД преобразования электрической энергии в тепловую, расходуемую на нагрев и плавление металла; большой концентрацией энергии в пятне нагрева. Это позволяет при равной толщине металла снизить потребляемую при сварке мощность источника энергии. Этот вид сварки характеризуется малыми размерами зоны термического влияния, высоким отношением глубины к ширине проплавления и, как следствие, хорошими физико-механическими свойствами швов.

При электронно-лучевой сварке в невесомости расплавленный металл удерживается в ванне силой поверхностного натяжения, которая в общем случае уменьшается с повышением температуры металла. Давление пучка и реактивное давление паров металла стремятся вытеснить жидкий металл из зоны плавления. Поэтому при исследованиях было очень важно

установить, удастся ли обеспечить хорошее формирование швов при сварке электронным лучом, отличающимся чрезвычайно высокой концентрацией энергии и, следовательно, вызывающим перегрев расплавленного металла.

Низкое давление среды также создает проблемы: возможно испарение расплавленного металла шва и излишнее рассеяние теплоты, необходим контроль температуры соединения. Однако эти проблемы соединения металлов минимизированы очень высокими тепловыми градиентами и незначительными по размерам зонами плавления, что характерно для электронно-лучевой сварки. Более того, вакуумная окружающая среда облегчает испарение оксидных поверхностных пленок и помогает снизить загрязнение очищенных перед сваркой поверхностей; оба фактора должны способствовать улучшению качества получаемых сварных швов.

В 1984 году в открытом космосе космонавты С. Е. Савицкая и В. А. Джанибеков осуществили электронно-лучевую сварку, резку, пайку и напыление различных металлов. В 1986 году в расширенном виде опыты повторили в открытом космосе космонавты В. А. Соловьев и Л. Д. Кизим. Эксперименты по сварке металлов проводили при постоянных мощности луча (1 кВт — во время опытов в летающей лаборатории; 0,6 кВт — в условиях разгерметизированного орбитального отсека корабля "Союз-6") и скорости перемещения образцов относительно неподвижного луча (соответственно 8,33 и 5 м/с). Осуществлялась сварка по отбортовке нержавеющей стали 1X18H9T, стыковых соединений алюминиевого сплава АМгб, соединений внахлест титановых сплавов ВТ1 и ОТ4.

Металлы толщиной 1,5—2 мм сваривались без образования сквозного кратера в ванне. Благодаря этому в свариваемых кромках стало возможным увеличить допустимые зазоры; были снижены требования к стабильности параметров режима — ускоряющего напряжения, тока пучка, удельной мощности в пятне нагрева, угла сходимости пучка на изделии, скорости сварки, вакуума. Исследования показали, что глубина и ширина проплавлений в условиях невесомости и в наземных лабораториях идентичны. При пребывании расплавленного металла в невесомости установлена идентичность формы шва и величины проплавления с получаемыми в обычных условиях.

При сварке в невесомости наблюдаются некоторые особенности в форме швов. Так, в центральной части соединения внахлест заметно усиление металла. Это объясняется тем, что расплавленный металл панели, имеющей достаточно большую поверхность и объем, в условиях невесомости в результате действия сил поверхностного натяжения стремится принять сферическую форму. У образцов из сплава АМгб при сварке в невесомости отмечена несколько большая пористость. Это можно объяснить затрудненным выделением газов из расплавленного металла при отсутствии силы тяжести. Таким образом, эксперименты подтвердили возможность проведения электронно-лучевой сварки различных материалов в условиях невесомости.

Во время эксперимента на КК "Союз-6" в условиях невесомости удалось надежно осуществить высококачественную сварку плазменной дугой низкого давления стали X18H10T по отбортовке, выполнить стыковые и нахлесточные соединения сплава ВТ1. Тщательно



исследовались макро- и микроструктура сварных соединений, причем каких-либо существенных отклонений, вызванных воздействием невесомости, отмечено не было. Фиксируется незначительное повышение механической прочности соединений титанового сплава, полученных в невесомости.

При дуговой сварке плавящимся электродом в невесомости проблемным было управление плавлением и переносом электродного металла. Как показали исследования, при образовании и переносе капель электродного металла в невесомости основное значение приобретает сила поверхностного натяжения и смачивание металла. При большой длине дуги, когда обеспечен свободный рост капли, последняя может достигать значительных размеров, определяемых дуговым промежутком. При сварке на данном режиме на Земле капля электродного металла в несколько раз меньше. В невесомости форма капель, как правило, непрерывно изменяется, но остается близкой к сферической, что свидетельствует о преимущественном действии силы поверхностного натяжения. При сварке некоторых металлов на кинограммах отмечено интенсивное вращение капель в меридиональном направлении. В силу непрерывного изменения условий локализации активные пятна дуги также непрерывно и беспорядочно перемещаются по поверхности капли и ванны. Процесс сварки при этом неустойчив и не позволяет получить качественный шов.

Исследовались два метода стабилизации дуговой сварки плавящимся электродом в невесомости. При большой длине дуги процесс отлично стабилизировался при наложении импульсов тока. В моменты их действия резко возрастает электродинамическая сила, обеспечивающая отрыв маленькой капли металла от электрода и точное попадание ее в ванну. В случае малой длины дуги сварка происходит с короткими замыканиями дугового промежутка. При этом также гарантируется стабильный мелкокапельный перенос металла. В обоих случаях качество швов высокое. Значительно проще оказался процесс сварки с короткими замыканиями.

Кристаллизация металла и формирование шва в невесомости тоже имеют свои особенности. Отсутствие силы тяжести приводит к тому, что под действием поверхностного натяжения металл стягивается с краев шва к его оси. Тем не менее форма шва остается вполне удовлетворительной.

Диффузионную сварку в космосе можно осуществить следующим образом: детали, подлежащие диффузионной сварке, устанавливаются в контакте друг с другом, и весь этот узел поддерживается в таком положении за счет приложения внешнего давления. Затем узел нагревается до определенной температуры, передается необходимое сварочное давление и выдерживается при этой температуре и давлении в течение заданного времени. После сварки детали охлаждаются в открытом космосе или в технологическом отсеке космической станции в зависимости от свойств соединяемых материалов. Фактические выдержки, температура, давление и скорость охлаждения для различных материалов разные.

В космосе диффузионная сварка может выполняться с использованием в качестве нагревателя концентратора солнечной энергии. Успешно проведены эксперименты по диффузионной сварке в космосе таких

материалов, как бронза с медью, тантал с вольфрамом, графит с титаном. Опыты показали, что металлы с поверхностью, свободной от адсорбированной пленки газов, и находящиеся в глубоком вакууме (1—0,01 мкПа) дают довольно прочное соединение при давлении всего 10 кПа. При этом заметные деформации отсутствуют. Это указывает на возможность использования холодной сварки в космическом пространстве. Перед сваркой в космическом пространстве металл должен зачищаться. В областях с вакуумом  $1,33 \cdot 10^{-6}$  Па годность зачистки будет сохраняться всего 1—2 мин, в областях с вакуумом порядка 0,13 ГПа — много суток. Холодная сварка в космическом пространстве в этом случае будет легко осуществляться при незначительных деформациях, почти не повреждающих изделие. После доставки агрегатов на орбиту сборки они подвергаются небольшой выдержке в глубоком космическом вакууме с целью самоочистки кромок за счет сублимации нанесенного ранее металла. Затем можно приступать непосредственно к процессу соединения агрегатов холодной диффузионной сваркой.

Таким образом, по результатам испытаний на борту космических аппаратов различных методов сварки и пайки можно с уверенностью констатировать, что новые решения по созданию постоянно действующих орбитальных станций уже в ближайшие годы потребуют применения сварочных и паяльных технологий в открытом космосе для проведения строительно-монтажных работ с получением неразъемных соединений.

### *Неметаллические материалы*

Влияние условий, близких к невесомости, на технологию производства стекла может быть различным. Во-первых, в невесомости можно осуществить бесконтейнерное плавление, резко уменьшив таким образом поступление в материал вредных примесей со стенок тигля, в котором варится стекло. Во-вторых, можно обеспечить стабильность жидких смесей, компоненты которых сильно различаются по плотности. В-третьих, отсутствие свободной конвекции уменьшает вероятность появления случайных центров кристаллизации, способствует улучшению однородности. В-четвертых, преобладающую роль капиллярных сил можно использовать для того, чтобы придать жидкому расплаву перед затвердеванием необходимую форму (волокна, пленки и т. п.). Использование перечисленных факторов позволяет рассчитывать на получение в процессе космического производства улучшенных или качественно новых сортов стекол, а также изделий из стекла.

Благодаря отсутствию силы Архимеда и преобладающей роли капиллярных сил в условиях, близких к невесомости, бесконтейнерным методом можно производить изделия из стекла, состоящие из разнородных исходных материалов и обладающие высоким совершенством поверхности. Например, твердые фильтры, которые представляют собой взвесь малых прозрачных частиц внутри прозрачного материала, подобранные таким образом, чтобы показатели преломления этих частиц и материала совпадали лишь для одной длины волны. В результате световое излучение лишь этой длины волны будет про-

ходить сквозь фильтр без потерь, а для всех других длин волн будет происходить сильное рассеивание и поглощение света за счет многократных отражений между частицами. В невесомости можно добиться высокой однородности распределения частиц в основном материале.

Существенного улучшения материала можно ожидать также и в случае производства в космосе волоконных световодов. Такой световод обычно представляет собой стержень из стекла с высоким коэффициентом преломления, окруженный стеклянной оболочкой с более низким коэффициентом преломления. Большое различие между этими коэффициентами обеспечивает малое поглощение и высокий коэффициент пропускания по светопроводу.

Примером перспективных керамических материалов, производство которых в космосе может оказаться выгодным, служат эвтектики, затвердевающие в одном направлении. Этим методом в керамическую основу могут быть внедрены металлические нити.

Также предлагается производство в космосе еще одного типа керамических материалов — композиционных микросхем. Эти керамики состоят из стеклообразной массы, включающей взвешенные частицы, которые определяют электронные характеристики материалов. В условиях невесомости можно рассчитывать на повышение их однородности.

### ***Выводы***

Основные различия в поведении жидкости на Земле и в космосе:

- На Земле: поведение жидкостей определяется силами поверхностного натяжения и действием силы тяжести, причем действие последней значительно преобладает. В космосе: жидкостями управляет только сила поверхностного натяжения.
- На Земле: можно легко разделить капельку жидкости шарообразной формы. В космосе: для этого придется приложить немалые усилия.
- На Земле: несмачиваемые жидкости не смачивают поверхность. В космосе: достаточно небольшого прикосновения несмачиваемой жидкости для того, чтобы смочить поверхность.
- На Земле: если встряхнуть бутылку с какой-либо жидкостью, то она (жидкость) вернется в исходное состояние. В космосе: водяные шарики могут вести себя как "упругие мячики", неоднократно отскакивая от той же жидкости, из которой они изготовлены.

В невесомости отсутствует сила Архимеда, вызывающая в обычных земных условиях расслоение жидких веществ с разной плотностью, ослаблена естественная конвекция, приводящая в земных условиях к перемешиванию слоев жидкостей и газов, имеющих разные температуры. Это открывает принципиальные возможности как для получения в невесомости качественно новых материалов, так и для улучшения свойств существующих материалов.

В невесомости возможно бесконтейнерное удержание в пространстве жидкого металла, благодаря чему удастся избежать его загрязнения за счет попадания примесей со стенок контейнера и получить в результате

сверхчистые вещества. В невесомости поведение жидкостей определяется силами поверхностного натяжения и это необходимо учитывать даже при выполнении таких обычных технологических процессов, как сварка, пайка, плавление и т. д.

Поняв, как кипит жидкость в космосе, можно создать более совершенную систему охлаждения для космического корабля. Эти знания можно применить и для разработки электрогенераторов, использующих солнечный свет для подогрева воды до состояния пара, который затем бы вращал турбину, вырабатывая электричество. Это исследование может найти применение как в космосе, так и на Земле — полученные данные можно использовать для лучшего изучения феномена кипения, что позволит усовершенствовать и земные электростанции.

Освоение космоса открывает перед металлургами новые технологические возможности. В невесомости резко изменяются процессы течения жидкостей и теплопереноса. Благодаря этому в космосе можно использовать совершенно новые способы получения и переработки металлических и неметаллических материалов.

Выполненные к настоящему времени исследования в области физических основ космического производства подтвердили правильность общих представлений об особенностях физических процессов в невесомости и дали непосредственные экспериментальные доказательства возможности получения в космосе материалов с улучшенными характеристиками. Вместе с тем эксперименты показали, что существующие количественные теории только частично описывают эти процессы, и выявили необходимость проведения специальных исследований, направленных на развитие теоретических основ производства в космосе новых материалов.

**РЕЗЮМЕ.** Показано розходження в поведінці рідини в земних умовах при дії сили гравітації та в умовах невагомості, а саме які сили переважають в тому або іншому випадку. Вивчено змочування та розтікання рідини, форма крапель і кипіння рідини в умовах невагомості. Показано перспективи використання цих особливостей рідини в космічному матеріалознавстві.

**Ключові слова:** рідина, невагомість, гравітація, космічне матеріалознавство.

1. *Гидромеханика* и теплообмен в невесомости / Под ред. В. С. Авдеевского, В. И. Полежаева. — М. : Наука, 1982. — 263 с.
2. *Пухначев В. В.* Задачи гидродинамики в условиях микрогравитации и в микромасштабах // *Наука в Сибири*, — 2003. — № 49 (2435). — С. 7.
3. *Попович П. Р.* Сообщение 21 августа 1962 г. на пресс-конференции в Московском государственном университете.
4. “Салют-6” — “Союз”. Материаловедение и технология / Под ред. Ю. А. Осипьян, Л. Л. Регель. — М.: Наука, 1985. — 177 с.
5. *Liu Y.* Contact angle and solid-liquid-vapor equilibrium / *Y. Liu, R. M. German* // *Acta Mater.* — 1996. — **44**, No. 4. — P. 1657—1663.

6. *Good R. J.* Equilibrium behaviour of fluids in containers at zero gravity / R. J. Good, J. T. Neu // *AIAA J.* — 1963. — **1**, No. 4. — P. 814—819.
7. *Haynes J. H.* Capillary phenomena in condition of microgravity (Капиллярные явления в условиях микрогравитации) // *Космическая технология / Под ред. Л. Стега.* — М. : Мир, 1980. — С. 55—63.
8. *Беляева М. А.* Гидростатика в слабых гравитационных полях. Равновесные формы поверхности жидкости / М. А. Беляева, А. Д. Мышкис, А. Д. Тюпцов // *Изв. АН СССР. Механика и машиностроение.* — 1964. — № 5. — С. 40—46.
9. *Найдич Ю. В.* Форма поверхности жидкости и капиллярные явления при пониженном ускорении силы тяжести / [Ю. В. Найдич, И. И. Габ, В. А. Евдокимов и др.] // *Порошковая металлургия.* — 2004. — № 3/4. — С. 72—79.
10. *Найдич Ю. В.* Форма поверхности жидкости и капиллярные явления при пониженной силе тяжести или в невесомости применительно к проблемам космического материаловедения (технологии порошковой металлургии: пропитка, жидкофазное спекание; сварка, пайка) / [Ю. В. Найдич, И. И. Габ, В. А. Евдокимов и др.] // *Космічна наука і технологія.* — 2004. — **10**, № 2/3. — С. 59—67.
11. *Габ И. И.* Исследование смачивания водой поверхностей твердых неорганических и органических материалов в зависимости от объема капель / [И. И. Габ, Т. В. Стецюк, Д. И. Куркова, Е. П. Черниговцев] // *Адгезия расплавов и пайка материалов.* — 2004. — № 37. — С. 31—39.
12. *Найдич Ю. В.* Влияние гравитации на смачивание и капиллярные явления в контактных системах жидкость—твердое тело / [Ю. В. Найдич, И. И. Габ, Т. В. Стецюк, Б. Д. Костюк] // *Космічна наука і технологія.* — 2013. — **19**, № 5. — С. 50—55.
13. *Гришин С. Д.* Космическая технология и производство / С. Д. Гришин, Л. В. Лесков, В. В. Савичев. — М. : Знание, 1978. — 64 с.
14. <http://kosmos.26319zelschool14.edusite.ru/p8aa1.html>
15. [http://projects.edu.yar.ru/physics/12-13/tur2/works/9/13f341\\_v.pdf](http://projects.edu.yar.ru/physics/12-13/tur2/works/9/13f341_v.pdf)
16. *Cardoso V.* The many shapes of spinning drops // *Phys.* — 2008. — **1**, No. 38. — P. 123—132.
17. *Brown R. A.* The shape and stability of rotating liquid drops / R. A. Brown, L. E. Scriven // *Proc. R. Soc. London A.* — 1980. — **371**, No. 1746. — P. 331—357.
18. *Hill R. J. A.* Nonaxisymmetric shapes of a magnetically levitated and spinning water droplet / R. J. A. Hill, L. Eaves // *Phys. Rev. Lett.* — 2008. — **101**, No. 23. — P. 234501—234505.
19. *Plateau J.* Statique expérimentale et théorique des liquides soumis aux seules forces moléculaires. — Paris : Gauthier-Villars, 1873. — 459 p.
20. *Lee C. P.* Equilibrium of liquid drops under the effects of rotation and acoustic flattening: results from USML-2 experiments in Space / [C. P. Lee, A. V. Anilkumar, A. B. Hmelo, T. G. Wang] // *J. Fluid Mech.* — 1998. — **354**. — P. 43—67.
21. *Капля в невесомости* // *Наука и жизнь.* — 1998. — № 1. — 92 с.

22. *Ohsaka K.* Three-lobed shape bifurcation of rotating liquid drops / K. Ohsaka, E. H. Trinh // *Phys. Rev. Lett.* — 2000. — **84**, No. 8. — P. 1700—1703.
23. *Гегузин Я. Е.* Пузыри. — М. : Наука, Глав. редакция физ.-мат. литер., 1985. — 176 с.
24. [http://www.km.ru/nedvizhimost/davydenko\\_lidiruet\\_v\\_tennisnom\\_s](http://www.km.ru/nedvizhimost/davydenko_lidiruet_v_tennisnom_s)
25. <http://elementy.ru/news/164820>
26. *Корольков А. В.* Структура течения жидкости в объеме при кипении в невесомости / А. В. Корольков, А. В. Путинцев, В. Б. Сапожников // Научные чтения памяти К. Э. Циолковского, г. Калуга, Россия, 2011 г.
27. <http://www.nasa.gov>
28. *Корольков А. В.* Исследование механизма отрыва паровой фазы при поверхностном кипении жидкости / [А. В. Корольков, С. К. Коротаев, В. В. Савичев, И. П. Свириденко] // Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2001. — № 9. — С. 90—95.
29. *Beysens D.* High-frequency driven capillary flows speed up the gas-liquid phase transition in zero-gravity conditions / [D. Beysens, D. Chatain, P. Evesque, Y. Garrabos] // *Phys. Rev. Lett.* — 2005. — **95**, No. 3. — P. 034502—034505.
30. *Гришин С. Д.* Путь к заводам на орбитах / С. Д. Гришин, Л. В. Пименов // "Известия", 12 августа 1976.
31. *Авдеевский В. С.* К орбитальным заводам будущего / В. С. Авдеевский, С. Д. Гришин, Л. В. Пименов // "Правда", 20 февраля 1977.
32. *Беляков И. Т.* Технология в космосе / И. Т. Беляков, Ю. Д. Борисов — М. : Машиностроение, 1974. — 291 с.
33. *Невесомость.* Физические явления и биологические эффекты / Ред.-сост. Э. Бенедикт. — М. : Мир 1964. — 276 с.
34. *Хайкин С. Э.* Силы инерции и невесомость. — М. : Наука, 1967. — 312 с.
35. *Processing and Manufacturing in Space: Proc. of a Symposium Held at Frascati, ESRO SP (101), Italy, 25—27 March 1974.* — European Space Research Organisation, 1974. — 342 p.
36. *European Symposium on Material Sciences in Space, 2d, Frascati, Material Sciences in Space: Proc. ESA SP (114), Italy, 6—8 April 1976.* — European Space Agency, 1976. — 493 p.
37. *Патон Б. Е.* Сварка и родственные технологии в освоении космоса и мирового океана. XXI век // Наука и жизнь. — 2000. — № 6. — С. 112—132.
38. *Белякова И. Т.* Основы космической технологи / И. Т. Белякова, Ю. Д. Борисов. — М. : Машиностроение, 1980. — 185 с.
39. [http://metallicheckiy-portal.ru/articles/svarka/paika/osnovnie\\_ponatia\\_paiki/1](http://metallicheckiy-portal.ru/articles/svarka/paika/osnovnie_ponatia_paiki/1)
40. [http://metallicheckiy-portal.ru/articles/svarka/paika/sovmestimost\\_metalla\\_i\\_pripoa/4](http://metallicheckiy-portal.ru/articles/svarka/paika/sovmestimost_metalla_i_pripoa/4)
41. *Гвамичава А. С.* Строительство в космосе / А. С. Гвамичава, В. А. Кошелев. — М. : Знание, 1984. — 64 с.

42. Шалимов М. П. Сварка вчера, сегодня, завтра / М. П. Шалимов, В. И. Панов / Под науч. ред. В. В. Запарий. — Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2006. — 227 с
43. <http://metallurgicheskiy.academic.ru/10295>
44. Патон Б. Е. Проблемы сварки на рубеже веков // Автоматическая сварка. — 1999. — № 1. — С. 4—14.
45. Benfield M. P. S. International joint ventires in space: The internatioanl space welding experiment / M. P. S. Benfield, D. V. Landrum // J. of Technology Transfer. — 1998. — 23, No. 3. — P. 25—33.
46. Саликов В. А. Специальные методы сварки и пайки / [В. А. Саликов, М. Н. Шушпанов, В. В. Пешков, А. Б. Коломенский] — Воронеж : ВГТУ, 2000. — 214 с.
47. Теория сварочных процессов / Под ред. В. В. Фролова. — М. : Высшая школа, 1988. — 559 с.
48. Пешков В. В. Сварка. Введение в специальность / [В. В. Пешков, А. Б. Коломенский, В. А. Фролов, В. А. Казаков]. — Воронеж : ВГТУ, 2002. — 115 с.
49. Загребельный А. А. Сварка в космосе / А. А. Загребельный, О. С. Цыганков // Сварочное производство. — 2002. — № 12. — С. 25—34.
50. Патон Б. Е. Применение сварки для ремонта сварных космических объектов / Б. Е. Патон, Д. А. Дудко, В. Н. Бернадский. — К. : Наук. думка, 1976. — 253 с.
51. Патон Б. Е. Эксперимент по сварке в космосе / Б. Е. Патон, В. Н. Кубасов // Автоматическая сварка. — 1970. — № 5. — С. 7—12.
52. Патон Б. Е. Космические исследования на Украине / [Б. Е. Патон, В. Е. Патон, Д. А. Дудко и др.]. — К. : Наук. думка, 1973.

Поступила 12.09.14

**Stetsyuk T. V.**

**Some features of liquid behavior in weightlessness and their using in space material science**

The article describes the differences in the behavior of the liquid in terrestrial conditions under the action of gravity and those in microgravity, namely, it is shown what forces prevail in a particular case. The wetting and spreading of liquid, droplets form and boiling liquid in weightlessness are considered. The prospects of these liquid features using in space materials science are shown.

**Keywords:** *liquid, microgravity, gravity, space material science.*