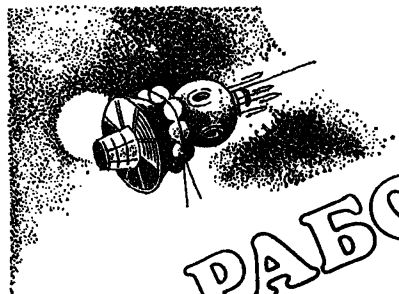


В. С. АВДИЕВСКИЙ,
Л. В. ЛЕСКОВ
**РАБОТАЕТ
НЕВЕСОМОСТЬ**

В.С. АВДУЕВСКИЙ, Л.В. ЛЕСКОВ



РАБОТАЕТ НЕВЕСОМОСТЬ НЕВЕСОМОСТЬ НЕВЕСОМОСТЬ



МОСКВА
«МОЛОДАЯ ГВАРДИЯ»
1988

ББК 30.6
А 18

Художник СЕРГЕЙ АСТРАХАНЦЕВ

Пояснительные рисунки в тексте
Л. В. ЛЕСКОВА

А $\frac{3607000000-118}{078(02)-88}$ 057-88

ISBN 5-235-00019-6

**© Издательство
«Молодая гвардия»,
1988 г.**



О ЧЕМ ЭТА КНИГА

На космических аппаратах, совершающих орбитальный полет вокруг Земли, тела не обладают весом, а в жидкостях нет явления плавучести — не действует закон Архимеда. За тонкой переборкой космического корабля нет воздуха — там космический вакуум. И ничто не защищает космический аппарат от солнечного излучения во всем его спектральном диапазоне.

Нельзя ли использовать столь необычное сочетание условий для решения каких-либо полезных задач? Правда, эти условия, за исключением одного, инженеры научились воспроизводить на Земле. Это исключение — длительное состояние невесомости. На Земле невесомость можно воспроизвести, но только на считанные секунды.

Между тем в невесомости многие физические процессы, которые хорошо изучены на Земле, приобретают необычные свойства. С исчезновением плавучести по-новому развиваются явления переноса массы и тепла в жидкостях и газах, жидкости легко отрываются от стенок сосуда, иначе происходит кристаллизация. Нельзя ли, проводя опыты в невесомости, дополнить и развить научные дисциплины, которые изучают эти физические явления? Ученые и инженеры дали ответ на эти вопросы: да, можно. И изучает все эти необычные явления новое научное направление — физика невесомости.

Здесь возникает следующий вопрос: нельзя ли, пользуясь тем новым знанием, которое дает физика невесомости, усовершенствовать технологические процессы производства материалов на Земле? И другой, еще более смелый вопрос: если производить некоторые материалы в космосе, не станут ли их показатели совершенства суще-

ственно лучше? Это очень важные вопросы: материалы, которые использует цивилизация, во все эпохи определили не только ее технические возможности, но во многом и весь ее облик. В наше время эффективность народного хозяйства в значительной степени зависит от того, какие применяются материалы, каково их качество, какие технологии используются для их производства.

О том, что эти задачи можно решить, еще сто лет назад впервые писал наш великий соотечественник, основоположник космонавтики К. Э. Циолковский. Реальным стало их решение после создания долговременных орбитальных станций и автоматических космических аппаратов. Это позволило перейти к экспериментам в космосе.

В результате возникло новое направление космонавтики — космическое материаловедение. Конечная цель этого направления состоит в том, чтобы, используя невесомость и другие факторы, разработать технологию производства в космосе уникальных материалов. При этом речь идет о материалах самых разных классов — полупроводниковые монокристаллы, сплавы, оптическое стекло, медико-биологические препараты...

Ученые считают: в ближайшие годы космическая технология превратится в эффективную отрасль народного хозяйства. В космосе выгодно производить уникальные материалы. Космические эксперименты помогут также организовать производство новых материалов и на Земле — например, новых лекарств от опасных болезней. Каковы реальные перспективы этих работ? Ограничимся только одной цитатой.

Вот что писала американская газета «Юс Ньюс энд Уорлд Репорт» 4 марта 1984 года: «Согласно прогнозу консультативной фирмы «Центр космической политики» объем промышленного производства в космосе к 2000 году достигнет 65 миллиардов долларов, в том числе:

<i>медикаменты</i>	<i>27 миллиардов;</i>
<i>оптическое стекло</i>	<i>11,5 миллиарда;</i>
<i>кристаллы</i>	
<i>для электронной</i>	
<i>промышленности</i>	<i>3,1 миллиарда».</i>

Какие пути ведут сегодня в это Эльдorado космического производства? Чтобы ответить на этот вопрос, авторы и написали книгу, которая сейчас перед вами.



ФИЗИКА В КОСМОСЕ

КОГДА ИСЧЕЗАЕТ ВЕС

«Невесомость — это явление для всех жителей Земли странное. Я оторвался от кресла, насколько это позволили привязные ремни, и как бы повис между потолком и полом кабины, испытывая исключительную легкость во

всех членах. Все вдруг стало делать легче. И руки, и ноги, и все тело стали будто не моими. Они ничего не весили. Не сидишь, не лежишь, а как бы висишь в кабине. Все незакрепленные предметы тоже парят, и наблюдаешь их, словно во сне. И планшет, и карандаш, и блокнот... А капли жидкости, пролившиеся из планга, приняли форму шариков; они свободно перемещались в пространстве и, коснувшись стенки кабины, прилипли к ней, будто роса на цветке».

Так вспоминал о своих необычных ощущениях Ю. А. Гагарин, который 12 апреля 1961 года первым из людей испытал в космическом полете это удивительное состояние — невесомость.

Со времени исторического полета Ю. А. Гагарина прошло четверть века. И теперь невесомостью никого не удивишь — много раз все видели на экране телевизора или в кино, как свободно плывут в кабине космического корабля утратившие свой вес космонавты...

Но так было не всегда. В IV веке до нашей эры крупнейший ученый античности Аристотель, проанализировав и обобщив имевшиеся к тому времени научные знания, пришел к выводу: невесомость — а также пустота — неестественны, а потому невозможны. Существует абсолютный центр Вселенной, и в этом центре находится Земля. Поэтому естественны лишь движения, направленные к Земле; все прочие движения происходят только под действием внешних сил.

Эти взгляды оставались общепринятыми в науке в течение двух тысяч лет. В средние века католическая церковь освятила их своим авторитетом и строго карала всякое отступление от них.

Был запрещен гениальный труд Коперника «Об обращениях небесных сфер», который нанес первый могучий удар по обветшавшей системе мира. Поднялся на костер Джордано Бруно, мужественно отстаивавший идеи Коперника.

22 июня 1633 года в церкви доминиканского монастыря святой Марии в Риме, стоя на коленях перед судом святой инквизиции, 70-летний Галилео Галилей прочитал заготовленный заранее текст отречения от учения Коперника о том, что Земля не является центром Вселенной, а вращается вокруг Солнца.

Существуют две легенды о том, как повел себя престарелый ученый после позорного судилища. Согласно

одной из них он был сломлен пытками и издевательствами в застенках инквизиции и умер, до конца дней оставаясь ее пленником. По другой, более известной легенде, поднявшись с колен, ученый гордо бросил в лицо своим облеченным в пурпур мучителям: «*Erriug si muove!*» — «А все-таки она движется!»

Неверны обе легенды. Верно другое: направляемый Ватиканом суд вынудил великого ученого подписать формальное отречение, но не смог сломить его духа. До кон-



Невесомость в падающем лифте.

ца его дней инквизиция держала Галилея в заключении. Одно за другим следовали несчастья: смерть любимой дочери, слепота.

Но, несмотря на все беды, ученый работает. Работает интенсивно и удивительно быстро — всего за три года после приговора он создает свой наиболее важный труд, итог всей жизни — «Беседы и математические доказательства о двух новых науках». Именно в этой книге Галилея опровергается одна из ошибок Аристотеля о невозможности состояния невесомости.

Вот что пишет об этом Галилей: «Мы ощущаем груз на наших плечах, когда стараемся мешать его падению..

Но если станем двигаться вниз с такой же скоростью, как и груз, лежащий на нашей спине, то как же может он давить и обременять нас? Это подобно тому, как если бы мы захотели поразить копьем кого-нибудь, кто бежит впереди нас с такою же скоростью, с какой движемся и мы».

Не правда ли, как просто? Вес тела — это сила, с которой оно давит на опору. Поместим и тело, и опору в кабину лифта, которая начала свободно падать по направлению к Земле. Очевидно, тело перестает давить на опору, иными словами, его вес исчезает. В кабине лифта наступает состояние невесомости.

Это в кабине падающего лифта. А в кабине космического корабля?

СПОР С ДЖ. Т. МАСТОНОМ

«— Ну как, Николь, летим?

Николь и Ардан переглянулись.

— В самом деле, где мы? — спросил Ардан. — Летим мы или нет?

— Может быть, мы преспокойно лежим на флоридской земле? — спросил Николь.

— Или на дне Мексиканского залива? — добавил Ардан.

— Что вы! — воскликнул Барбикен».

Наши читатели, конечно, вспомнили этот разговор, который ведут герои знаменитого романа Жюль Верна «Вокруг Луны». Оказавшись по воле автора на борту космического снаряда, который только что вылетел за пределы земной атмосферы, они долго не могут решить, где находятся.

В конце концов самым догадливым из путешественников оказался президент Пушечного клуба Барбикен, который посмотрел на термометр и понял, что атмосфера осталась позади. А про невесомость ни один из них так и не вспомнил — и это два века спустя после работы Галилея!

Может быть, и в самом деле вопрос с космическим кораблем не так прост, как с падающим лифтом? Что ж, пока наши незадачливые путешественники летят в своем комфортабельном снаряде к Луне, давайте побеседуем с достопочтенным Дж. Т. Мастоном — непременно секретарем и теоретиком знаменитого Пушечного клуба.

— Дорогой сэр, а что вы думаете о невесомости?

— Мои друзья обязательно испытают это удивительное состояние, — назидательно заметил Мэстон. — Это случится в той точке траектории их снаряда, где силы притяжения Земли и Луны взаимно уравновесят друг друга.

— Ну а что наблюдали бы ваши друзья, если бы их снаряд, вылетев за пределы земной атмосферы, начал падать обратно на Землю?

— Мы все знакомы с трудами великого Галилея, — не без раздражения произнес Мэстон. — Разумеется, в этом случае в кабине снаряда наступило бы состояние невесомости...

Зная пылкий темперамент нашего собеседника, мы постарались придать следующему вопросу как можно более деликатную форму.

— Благодарим вас, сэр. Но представьте на минуту, что наш друг Барбикен воспользовался в этот момент ракетами, которые он предусмотрительно захватил с собой, и сообщил снаряду скорость поперек направления падения на Землю...

Мэстон подозрительно посмотрел на нас и молча пожал плечами.

— Допустим далее, что скорость, которую таким путем приобрел снаряд в направлении по касательной к окружности Земли, равна 7,8 километра в секунду. Как вы думаете, насколько изменится через одну секунду расстояние снаряда от поверхности Земли?

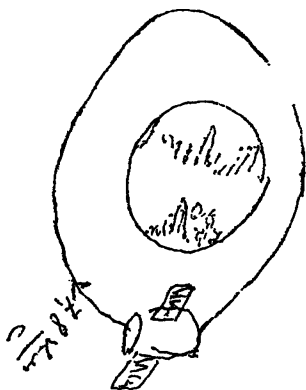
— Вы принимаете меня за школьника, — возмущенно вскинулся Мэстон. — Тривиальная задачка из тригонометрии! Берем синус угла, образованного двумя радиусами Земли, и расстоянием, которое по касательной за секунду пролетит снаряд... Сколько вы сказали, 7,8 километра?.. Значит, снаряд будет приблизительно на 5 метров дальше!

— Дальше... Но простите, сэр, ведь Земля продолжает притягивать снаряд. Значит, он все это время продолжает падать вниз...

— Совершенно верно, — подхватил Мэстон, — и в одну секунду снаряд пролетит по направлению к Земле без малого 5 метров!

— Стойте-ка, — на минуту замолчал он и посмотрел на нас, — получается, что если снаряду сообщить по касательной к окружности Земли скорость около 8 километров в секунду, то он всегда будет находиться от ее поверхности на одном и том же расстоянии? Иными сло-

вами, вращаясь по круговой орбите с этой скоростью вокруг Земли, снаряд будет как бы постоянно падать, но никогда не сможет упасть на нее?! Но ведь это и будет означать состояние невесомости... Как же это я раньше не догадался! — воскликнул почтенный секретарь Пушечного клуба и в огорчении что было силы хлопнул себя рукой по лбу, забыв, что рука у него кончается ме-



Невесомость на космическом корабле.

таллическим крюком. К счастью, удар пришелся по мягкой гуттаперчевой заплате, которая украшала череп нашего уважаемого собеседника...

СЛОВО ЦИОЛКОВСКОМУ

Жюль Верн — автор превосходных фантастических романов, в которых содержится немало удивительно точных инженерных прогнозов. А вот в вопросе с невесомостью, которая должна наступать на борту космического корабля, он не разобрался.

Однако, побеседовав с одним из его героев, мы выяснили, что на борту космического корабля, который вращается вокруг Земли, все тела теряют вес — наступает состояние невесомости. Иногда это состояние называют еще динамической невесомостью, чтобы подчеркнуть тот факт, что обязательным условием ее возникновения является свободный полет корабля по космической траектории.

В этих вопросах хорошо разобрался младший современник Жюль Верна великий русский ученый К. Э. Циолковский. И не только разобрался, но в отличие от руководителей Пушечного клуба предложил реальное средство вывода кораблей на космические трассы — ракету.

И с невесомостью Циолковскому тоже все было совершенно ясно. Откроем его повесть «Грезы о Земле и небе», которую ученый опубликовал в 1895 году.

«Я путешествовал по воздуху во все углы комнаты, с потолка на пол и обратно, переворачивался в пространстве, как клоун... Желая достать разные вещи, одеться, мы все сдвинули — все полетело, закружилось, застучало и о нас, и о стены, и друг о друга... Вода из графина от толчка вылилась и летала сначала в виде колебавшегося шара, а потом разбилась при ударах на капли и, наконец, прилипла и расплзлась по стенам».

Это написано за семь десятилетий до полета Ю. А. Гагарина. А как похоже!

ПОЧЕМУ НА КОСМИЧЕСКОМ АППАРАТЕ НЕТ ПОЛНОЙ НЕВЕСОМОСТИ

Итак, мы разобрались, что на борту космического аппарата возникает состояние невесомости, когда он движется вокруг Земли с достаточно большой скоростью. Эта скорость называется первой космической скоростью, и ее величину вычисляют по очень простой формуле, которую можно найти в любом учебнике физики:

$$V = \sqrt{g_0 R},$$

где g_0 — ускорение свободного падения на поверхности Земли ($g_0 = 9,8 \text{ м/с}^2$), R — расстояние космического аппарата от центра Земли.

Возникает другой вопрос: насколько полной бывает невесомость, какие силы продолжают еще действовать на борту космического корабля, нарушая это состояние?

Такие силы есть. Прежде всего это ускорение, обусловленное торможением космического аппарата в верхних слоях атмосферы. Правда, величина этих сил очень невелика: при полете на высоте 350—400 километров космический аппарат получает ускорение всего 10^{-7} м/с^2 , иными словами, порядка $10^{-6} g_0$. Давление солнечного света на космический корабль также сообщает ему ускорение, но его величина меньше еще на несколько порядков.

Космический корабль может быть по-разному ориентирован в направлении полета. На его борту находятся двигатели, которые включаются, чтобы скорректировать его положение на орбите, развернуть в ту или иную сторону и т. п. Корабль может вращаться вокруг одной из осей, проходящих через его центр массы, или даже вокруг всех трех осей одновременно (надо, разумеется, помнить, что это условные оси, никаких реальных осей у космического корабля нет).

Центробежная сила, возникающая при вращении корабля вокруг оси, ведет к появлению на его борту ускорения

$$a = (2\pi n)^2 r,$$

где r — расстояние от оси вращения, n — число оборотов в секунду.

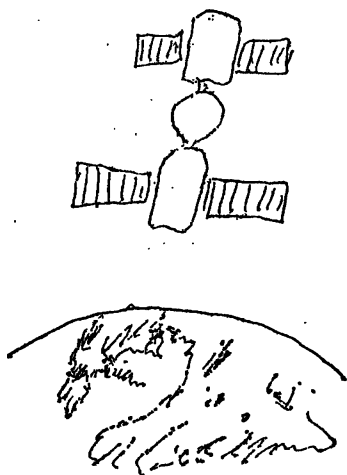
Если, например, один оборот вокруг этой оси происходит за 10 минут, то на расстоянии 2 метров от нее будет действовать ускорение, равное $2 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}^2$, то есть $2 \cdot 10^{-3} g_0$. Полной невесомости в этом случае, очевидно, не будет.

Чтобы снизить уровень микроускорений, обусловленных собственным вращением космического корабля, его иногда переводят в режим гравитационной стабилизации. Космическая станция типа «Салют» вместе с пристыкованными транспортными кораблями имеет длину до 29 метров. Основная масса сосредоточена в рабочем отсеке станции. Поэтому она находится в устойчивом положении, когда ее ось направлена к центру Земли. Примерно так же ведет себя поплавок на поверхности воды. Это и есть режим гравитационной стабилизации.

Из-за изменения лобового сопротивления атмосферы и несимметричности корпуса станции в направлении полета по орбите ось станции совершает медленные колебания вокруг положения равновесия. Амплитуда этих колебаний достигает 20° .

Существуют и другие причины, приводящие к отклонению от состояния полной невесомости на борту орбитальной станции. Известно, например, что космонавты по несколько часов в день выполняют физические упражнения — без этого длительное пребывание в космосе может нанести непоправимый вред их здоровью. Так вот, космонавт во время бега сообщает космической станции ускорение порядка $10^{-3} g_0$. Это ускорение является переменным по времени и носит характер вибраций с частотой в диапазоне нескольких герц.

На борту орбитальной станции есть и другие источники вибраций. К этому приводит работа вентиляторов системы терморегулирования и жизнеобеспечения, другой аппаратуры. По наблюдениям космонавтов, в результате корпус станции все время ощущимо вибрирует.



Космическая станция в режиме гравитационной стабилизации.

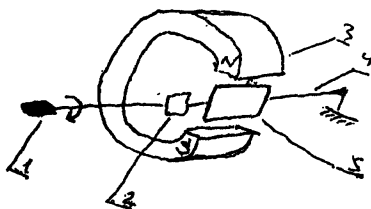
КАК ИЗМЕРИТЬ НЕВЕСОМОСТЬ

Когда на космическом корабле выполняются технологические эксперименты, то необходимо достаточно хорошо знать условия, в которых они проводятся. Для того чтобы правильно вести эксперимент и грамотно объяснить его результаты, следует, в частности, знать, насколько эти условия отклоняются от состояния полной невесомости, каков реальный характер микроускорений, действующих на корабле.

Грубую оценку уровня микроускорений, обусловленных торможением космического аппарата в верхних слоях атмосферы, производят с помощью траекторных измерений. Угловые ускорения вращения вокруг базовых

осей космического аппарата рассчитывают на основании измерений, выполненных с помощью датчиков угловых скоростей. Однако для задач космической технологии обычно нужны более точные данные.

С этой целью были созданы специальные приборы — акселерометры, или измерители малых ускорений. Принцип действия одного из таких приборов показан на рисунке. На коромысле, которое жестко связано с токовой рамкой, укреплены зеркальце и грузик, на который действует ускорение. Источник света освещает зеркальце,



Измерение малых ускорений:

- 1 — грузик, 2 — зеркальце, 3 — постоянный магнит,
4 — ось, 5 — рамка с током.

отраженный от которого зайчик попадает на фотоприемник. Когда под действием ускорения грузик начинает смещаться, он разворачивает зеркальце, и величина светового сигнала, падающего на фотоприемник, изменяется. А это, в свою очередь, вызывает изменение — уменьшение или увеличение — тока в цепи катушки, питающей электромагнит.

Если сила тока через электромагнит, например, возросла, то возрастает и сила, с которой электромагнит действует на токовую катушку, которая расположена между его полюсами. В результате катушка поворачивает ось, на которой укреплены грузик и зеркальце, в таком направлении, чтобы компенсировать ускорение, действующее на грузик. Остается провести калибровку, и измеритель малых ускорений готов к работе.

Если описание работы прибора показалось читателям простым, то хочется предостеречь их от вывода, что и сам прибор прост. Напротив, измеритель малых ускорений, или сокращенно ИМУ, представляет собой сложный электромеханический прибор, предназначенный для вы-

полнения высокоточных прецизионных измерений. Чувствительность действующих образцов ИМУ достигает $10^{-8}g_0$.

Разработаны и используются акселерометры, в основу которых положены другие физические принципы. Например, на станциях типа «Салют» используются также бортовые сейсмоприемники БСП, в которых применены пьезоэлектрические датчики ускорений. Их преимущество — широкий диапазон исследуемых частот (до 500 килогерц). Во Франции разработан акселерометр «Кактус», снабженный датчиками электростатического типа. Этот прибор обладает рекордно высокой чувствительностью — до $10^{-11}g_0$.

Что же показали измерения на борту космических станций и аппаратов? Первые измерения были выполнены с помощью прибора ИМУ на станции «Салют-6» в 1980 году. В последующие годы систематические исследования действующего «поля микроускорений» были выполнены на станциях «Салют-6» и «Салют-7».

Исследования позволили установить, что существует несколько характерных режимов работы станций типа «Салют».

1. *Беспилотный режим полета.* В этом режиме уровень микроускорений минимален — порядка $10^{-5}g_0$.

2. *Пилотируемый режим полета.* Работают штатные системы жизнеобеспечения и терморегулирования, научная и техническая аппаратура. В этом режиме ускорения лежат в диапазоне 10^{-3} — $10^{-4}g_0$ в зависимости от того, какие действия выполняет экипаж. Например, при выполнении упражнений на бегущей дорожке амплитуда ускорений, которые испытывает станция, достигает $10^{-3}g_0$, а их частота составляет несколько герц.

3. *Режим динамических операций.* При сближении станции с транспортным кораблем, при корректировке ее орбиты и выполнении других операций действующие ускорения могут существенно превышать $10^{-3}g_0$.

Колебания станции имеют сложный характер. Так, частота, с которой колеблется станция, зависит от частоты воздействий, вызывающих эти колебания. Например, при одиночном прыжке космонавта наблюдаются затухающие колебания станции с частотой около 1,8 герца. Если космонавт бежит по дорожке, делая 150 шагов в минуту, 2,5 герца. Замечено также, что колебания станции в направлении одной из осей с небольшим сдвигом по

времени приводят к возникновению колебаний в перпендикулярном направлении; это означает, что вектор микроускорений вращается в некоторой выделенной плоскости.

КАК УМЕНЬШИТЬ МАЛЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРИБОР

Исследования показали, что полной невесомости на космических аппаратах нет. Есть микроускорения, переменные и по величине, и по направлению. Между тем для проведения многих технологических экспериментов требуется ограничить влияние этих микроускорений. Как это сделать?

Можно установить технологические приборы на упругих подвесках, тогда часть колебаний будет подавлена. Можно выбирать для проведения экспериментов такое время, когда экипаж отдыхает.

Но можно принять и более решительные меры. Представим, что для проведения технологических экспериментов разработана специальная платформа, на которой размещается все необходимое оборудование и которая предназначена для самостоятельного полета. Экипаж доставляет эту платформу в космос на космическом корабле, запускает приборы и оставляет платформу на орбите. После завершения программы автономного полета космонавты снова посещают платформу, снимают образцы, производят необходимый ремонт и подготавливают следующую серию опытов. На такой платформе можно обеспечить уровень ускорений не более 10^{-5} — $10^{-6}g_0$.

Еще более низкие ускорения можно в случае необходимости получить на платформах, размещаемых на высоких орбитах — 1000 и более километров. Но существует принципиальная возможность ограничить ускорения в центре масс космического аппарата предельно низкой величиной — 10^{-12} — $10^{-13}g_0$. С этой целью предполагается создать космический объект нового типа, так называемый спутник, свободный от сноса.

Спутник представляет собой полую сферу, в центре масс которой размещен исследовательский прибор. На внешней поверхности спутника установлены микродвигатели, которые включаются, чтобы компенсировать торможение спутника разреженными слоями атмосферы, давлением излучения Солнца, другими внешними факто-

рами. В результате прибор, размещенный в центре спутника, находится в состоянии, приближающемся к полной невесомости.

Спутник, свободный от сноса, должен быть оснащен сверхчувствительными акселерометрами, сигналы с которых будут передаваться в блок управления. Этот блок будет автоматически выдавать команды на включение двигателей, чтобы постоянно компенсировать внешние возмущения, действующие на спутник. Однако в настоящее время нет ясности, потребуются ли в действительности спутники такого типа для решения задач космической технологии.

МОЖНО ЛИ ПОЛУЧИТЬ НЕВЕСОМОСТЬ НА ЗЕМЛЕ

Ответим на этот вопрос сразу: да, можно, но только на короткое время. Мы уже говорили об опытах с падающими телами. Такие опыты проводят на специальных башнях или шахтах сбрасывания.

Если контейнер с исследовательской аппаратурой сбрасывается с башни высотой 20 метров, то состояние невесомости длится около 2 секунд. Это время можно удвоить, если контейнер сначала подбрасывается вверх с такой скоростью, чтобы он долетел до вершины башни, а затем начал падать вниз. Сложность этих опытов в том, что при подбрасывании и при ударе о дно башни контейнер испытывает значительные перегрузки — до 100 g.

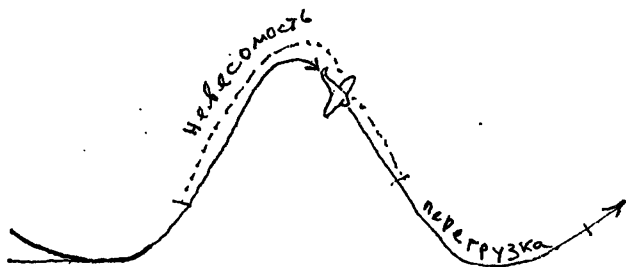
Опыты на башнях сбрасывания проводят главным образом для того, чтобы изучить особенности поведения жидкостей в невесомости. Первым начал подобные опыты около ста лет назад Дж. Рэлей, который изучал поведение падающих капель.

Возникает вопрос, достаточно ли столь малого времени — 2—3 секунд — для проведения исследований. Анализ показал, что во многих случаях этого времени хватает. Например, свободно падающая деформированная капля воды с диаметром около сантиметра принимает сферическую форму всего за доли секунды.

Менее известно, что возможность создавать на несколько секунд состояние невесомости, сбрасывая тела с башен, нашла практическое применение еще в XVIII веке. В 1782 году в Англии был выдан патент У. Уоттсу на способ производства круглой дроби путем сбрасывания с башни капель расплавленного свинца. Жидкие капли в невесомости принимают сферическую

форму, а перед падением успевают затвердеть. Со дна башни остается только собрать круглые дробинки.

Состояние невесомости можно создать также на борту летающей лаборатории-самолета, который совершает полет по специальной траектории, так называемой параболе Кеплера. Эта траектория показана на рисунке. Примерно по такой траектории летит, например, камень, если его бросить под углом к горизонту. Набрав скорость, самолет пикирует под небольшим углом, а затем переходит на восходящую ветвь траектории. При этом двига-



Полет по параболе Кеплера.

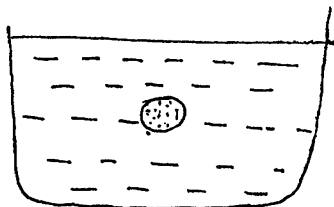
тель выключается либо работает с малой тягой, достаточной только для того, чтобы компенсировать сопротивление атмосферы. Продолжая полет по параболе, самолет поднимается на «горку», затем планирует вниз. Пока продолжается полет самолета по параболе, на его борту сохраняется состояние невесомости. Обычно длительность этого состояния составляет 15—20 секунд, а уровень остаточных ускорений составляет 10^{-3} — $10^{-2}g_0$.

В Советском Союзе опыты на борту летающей лаборатории были начаты еще в 1939 году. В настоящее время для таких опытов используется самолет Ил-76.

Наиболее длительное в земных условиях состояние невесомости можно получить, запуская на большую высоту ракеты-зонды. После того как двигатели ракеты прекращают работу, зонд продолжает некоторое время по инерции лететь вверх, а затем падает на Землю. Все время, пока за пределами плотных слоев атмосферы продолжается полет зонда по инерции, на его борту сохраняется состояние невесомости. Чтобы снизить скорость падения и сохранить аппаратуру, при входе зонда в плотные слои атмосферы над ним раскрывается парашют.

В Советском Союзе, начиная с 1976 года, технологические эксперименты проводились при запуске высотных ракет «Мир-2». Состояние невесомости продолжалось в этих опытах до 10 минут, а уровень микроускорений был невелик — 10^{-6} — $10^{-5}g_0$.

Подобные опыты выполнялись также в США, в Западной Европе и в Японии. Ракеты, используемые за рубежом, поднимаются на меньшую высоту и обеспечивают продолжительность состояния невесомости не более 5 минут.



Опыт Плато.

Таким образом, на очень небольшие промежутки времени состояние невесомости можно воспроизвести и на Земле. Для исследования физических эффектов используют и другой метод — имитацию состояния невесомости. При этом воспроизводятся не все физические явления, характерные для этого состояния, а лишь некоторые.

Первые исследования по имитации невесомости провел в 1843 году бельгийский физик Жозеф Плато. В прозрачный сосуд он наливал раствор спирта с водой, а затем с помощью пипетки вводил в него каплю масла. Подбирая концентрацию раствора, можно было обеспечить такие условия, при которых его плотность оказывалась равной плотности масла. В результате сила веса капли полностью уравнивалась выталкивающей силой Архимеда и капля оставалась неподвижной. Такие условия называют состоянием гидронеувесомости. Отличие этого состояния от динамической невесомости в том, что на жидкость внутри капли сила веса продолжает действовать.

Гидронеувесомость в настоящее время широко используется при подготовке космонавтов. Надев скафандры, они отрабатывают в специальном бассейне те операции, которые им предстоит выполнять в открытом космосе, на борту орбитальной станции. В бассейне с этой целью раз-

мещают полноразмерный макет станции со всем необходимым оборудованием. По словам самих космонавтов, такая тренировка очень полезна.

КАК ОТКРЫЛИ ПУСТОТУ

Удивительное свойство познания: то, что сегодня воспринимается как очевидное каждым школьником, в свое время постигалось путем драматических поисков. Так было с открытием невесомости. Так было и с вакуумом — пустотой.

В знаменитой трагедии Гёте есть такое место. Обращаясь к Фаусту, Мефистофель спрашивает:

«— Достаточно ль знаком ты с пустотой?»

И слышит в ответ:

«— Вот новости! Такой вопрос излишен.

В нем отголосок «кухни ведьмы» слышен».

Реплика характерная: понятие пустоты в глазах Фауста связано каким-то образом с нечистой силой. И это неудивительно: средневековая наука, следуя учению Аристотеля, признавала пустоту невозможной. *Nullus in vacuo* — природе свойственна боязнь пустоты.

Впервые попытался по-новому подойти к проблеме вакуума Галилей. В своем главном научном труде — «Беседах» — ученый критикует концепцию Аристотеля и вводит понятие о микроскопических пустотах, которые должны содержаться в веществе. Но он не ограничивается этим и дает поручение своему ученику Эванджелисте Торричелли разобраться в проблеме, которая возникла у строителей фонтанов во Флоренции. Им по неизвестной причине никак не удавалось вытянуть насосом воду из колодца выше, чем на 10 метров.

«Природа боится пустоты, но только до определенного предела», — предположил Галилей. Вряд ли такое объяснение удовлетворило его, но сделать следующий шаг он уже не мог: последние силы покидали старого ученого. В 1642 году на вилле Арчетри под Флоренцией, где до конца дней продолжала держать его инквизиция, Галилей скончался на руках своих учеников Торричелли и Вивiani.

Торричелли с честью справился с поручением своего учителя. Он предположил, что вода в колодце поднимается давлением воздушного океана, величина которого как раз и равна весу десятиметрового столба воды. Если взять запаянную с одного конца трубку и наполнить ее

ртутью, которая в 13,5 раза тяжелее воды, а затем свободный конец трубки опустить в сосуд, содержащий ртуть, то высота столба ртути в трубке над уровнем жидкости будет 760 миллиметров. А над этим столбом образуется «торричеллиева пустота» — вакуум, так как давление паров ртути очень мало.

В 1643 году, всего год спустя после кончины Галилея, другой его ученик, Винченцо Вивiani, прямыми опытами подтвердил справедливость рассуждений своего старшего товарища.

КОСМИЧЕСКИЙ ВАКУУМ

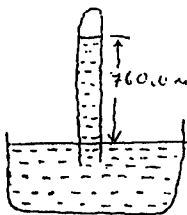
Следующий логический шаг сделал еще через четыре года, в 1647 году, французский ученый Блез Паскаль. Он доказал, что атмосферное давление падает с высотой. По просьбе Паскаля несколько его друзей взяли трубку Торричелли и поднялись с ней на гору Пюи де Дом высотой 1,5 километра. При восхождении высота подъема ртути в трубке — и, следовательно, атмосферное давление — постепенно падали.

После этих опытов нетрудно было подсчитать, каким должно быть атмосферное давление на еще более значительных высотах. На высоте 200 километров оно составляет 10^{-6} миллиметров ртутного столба, а на 300 километрах — 10^{-7} миллиметров ртутного столба. Так был открыт космический вакуум — после невесомости второй по важности фактор, на использовании которого основаны методы космической технологии. На более значительных высотах степень разрежения еще более высокая — 10^{-9} — 10^{-12} миллиметров ртутного столба.

Здесь любопытно сделать одно отступление. Мы привыкли говорить, что в наше время новые физические открытия намного быстрее находят дорогу в инженерную практику, чем в прошлые эпохи. История открытия невесомости как будто подтверждает эту мысль: между опытами Галилея на знаменитой Пизанской башне, которые привели его к открытию невесомости, и выдачей У. Уоттсу первого патента на практическое использование этого открытия, — промежуток времени без малого в 200 лет. Но вот судьба открытия Торричелли совершенно иная.

Сразу после опытов Вивiani и Торричелли в Германии, Англии, Франции появляются усовершенствованные конструкции барометров. Роберт Бойль в Англии и Отто

Герике в Германии изобретают первые воздушные насосы. В 1665 году Эдуард Сомерсет пишет работу «Вск изобретений», в которой описывается паровой насос для приведения в действие фонтанов. Возникает идея паровой машины, которая была не чем иным, как пароатмосферным насосом... Инженеры XVII века не хуже наших современников умели оценить практическую силу новых физических идей.



Опыт Торричелли.

Для того чтобы читатели могли более живо почувствовать, как современники этих изобретений восприняли идею о вакууме (или «пустом пространстве», как с уважением писал Герике), хочется привести выдержку из одной книги, в которой описываются соответствующие опыты. «Я ничего более чудесного, — пишет автор, — никогда не видел, не слышал, не читал и даже не предполагал, а также не думаю, что после создания мира когда-нибудь что-либо подобное, не говоря уже о более удивительном, видело свет солнца. Таково же суждение великих князей и ученейших мужей, которым я сообщил об этих опытах».

В наше время вакуум давно никого не удивляет и прочно взят на вооружение металлургией, электронной промышленностью, радиотехникой, другими отраслями промышленности. Но получение вакуума на Земле — непростое дело. Приходится разрабатывать мощные вакуумные насосы, создавать большие вакуумные камеры.

Иное дело космос. Вакуум там, что называется, под рукой, причем возможности откачки почти не ограничены. Кажется заманчивым перенести в космос некоторые технологические процессы — прибавка в стоимости продукции может окупиться тем, что не потребуется сложное и дорогостоящее вакуумное оборудование.

Увы, это только первое впечатление. Вокруг космического аппарата создается собственная атмосфера. Происходит утечка воздуха из внутренних частей аппарата. Его обшивка подвергается мощному воздействию жестких и коротковолновых излучений Солнца. Постепенно разрушаясь, она тоже дает вклад в эту атмосферу. Наконец, для выполнения динамических операций время от времени включаются двигательные установки — недоокисленные продукты их выброса тоже частично окутывают космический аппарат газовой оболочкой. В большинстве случаев давление газов в этой оболочке невелико — например, порядка 10^{-6} миллиметров ртутного столба. Но она может содержать химически активные вещества, сильные окислители, свободные радикалы, некоторое количество ионизированных частиц. Проведение в такой среде металлургических процессов — не очень-то надежное дело.

КАК ПОЛУЧИТЬ ВЫСОКИЙ ВАКУУМ НА НЕВЫСОКОЙ ОРБИТЕ

В принципе существует возможность обойти все эти трудности и создать установку, которая обеспечит получение на космическом корабле, совершающем полет вблизи Земли, весьма глубокого вакуума — до 10^{-14} миллиметров ртутного столба. Принцип действия такой установки ясен из приводимого рисунка. Для решения задачи используется молекулярный экран, соединенный с космическим кораблем длинным тросом. Диаметр экрана 3 метра, длина троса 100 метров.

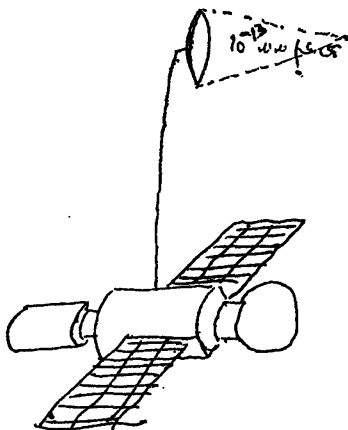
Экран движется по круговой орбите с той же скоростью, что и космический корабль — около 8 километров в секунду. Тепловая скорость атомов и молекул окружающей атмосферы не превосходит эту величину. Поэтому за экраном создается своеобразная аэродинамическая тень — область глубокого разрежения. Если на задней поверхности экрана разместить технологическое оборудование, то этот сверхвысокий вакуум можно использовать для проведения экспериментов.

В наземных вакуумных установках при глубокой степени разрежения трудно обеспечить откачку больших количеств газообразных продуктов. При использовании на космических аппаратах молекулярного экрана этой трудности не существует — скорость откачки велика при самых низких давлениях.

СОЛНЕЧНАЯ РАДИАЦИЯ

Третий космический фактор, который вслед за невесомостью и глубоким вакуумом можно использовать в интересах космической технологии, — это излучение Солнца. Разумеется, для того, чтобы использовать солнечную радиацию, нет необходимости подниматься на космические орбиты, и люди делают это ровно столько времени, сколько существует человеческое общество.

Дело в другом: использование энергии излучения



Молекулярный экран.

Солнца в космосе дает преимущества, которых нет на Земле. Во-первых, на один квадратный метр суши и океана приходится в среднем 0,16 киловатта солнечной радиации. Происходит чередование дня и ночи, часть энергии отражается атмосферой. Есть и другие источники потерь. В космосе вблизи Земли эта величина достигает 1,4 киловатта — в 9 раз больше. Можно располагать космические аппараты на таких орбитах, где Земля практически не заслоняет потока солнечных лучей, — это геосинхронные, околополярные солнечно-синхронные и другие орбиты.

Во-вторых, существует возможность использовать жесткую компоненту излучения Солнца, которая на Земле

практически полностью поглощается атмосферой. В-третьих — и это тоже важно, — можно одновременно использовать в технологических процессах все три космических фактора: невесомость, глубокий вакуум и солнечную радиацию.

В интересах космической технологии солнечная радиация может играть двойную роль. На современных космических аппаратах и орбитальных станциях Солнце — основной поставщик электроэнергии. Для этого используются солнечные батареи, панели которых размещаются на борту космических станций и которые преобразуют энергию излучения Солнца в электричество.

Но можно пойти и другим путем — использовать большие зеркала, концентраторы солнечного света. Если сфокусировать солнечное излучение на поверхности технологических образцов, их можно нагреть до температуры в несколько тысяч градусов. При таких температурах плавятся самые термостойкие материалы. Солнечные печи позволяют вести плавку особо чистых материалов. Но здесь имеются и свои трудности: нужна точная система ориентации зеркал, которая будет поддерживать солнечный «зайчик» на одном и том же месте во время космического полета по околоземной орбите, когда постоянно меняется угол падения солнечных лучей на зеркала.

СУДЬБА ОТКРЫТИЯ НЕВЕСОМОСТИ

Погода была совсем скверной. В дилижансе отчаянно дуло из всех щелей. Уильям Уоттс старательно кутался в плащ и надвигал шляпу на самые брови, но все это не помогало. Подхватываемые порывами ледяного ветра, в окно дилижанса стучали тяжелые градины, круглые и крупные, как грецкие орехи. Только в харчевне, устроившись поближе к ярко пылавшему камину и заказав какую-то дрянь по карте кушаний, которую принес ему стюард, он немного отогрелся.

Никуда бы он не поехал в такую погоду из родного Бристоля, если бы не крайняя нужда. Дела шли из рук вон плохо. Если он ничего не придумает, то скоро останется без куска хлеба. Скромное его дело — механическая мельница по обкатке дробы — совсем разваливается. Жуткий грохот. Свинцовая пыль. Вечно больные рабочие. Даже лошадей, которые вращают мельницу, приходится то и дело покупать новых.

В Бирмингеме, он слышал, на фабрике Мэтью Болтона работает механик Джеймс Уатт. В прошлом году он построил паровую машину, которая годится, чтобы вращать мельничное колесо. Может, если купить у него патент, удастся поправить пошатнувшиеся дела? Ради этого и отправился купец из Бристоля Уильям Уоттс в свою поездку.

От неприятных мыслей его отвлекает звук капель воды, которые одна за другой падают из рукомойника, стоящего в углу. Уоттс поднимает голову и смотрит, как на конце стержня медленно собирается круглая капля, принимает грушевидную форму, отрывается и шлепается на пол.

Круглая капля... круглые градины... расплавленный свинец. Капли жидкого свинца выплескиваются из тигля и тяжело катятся по каменному полу мастерской.

— Законы природы — пустой набор слов, лишенный всякого смысла, — говорит с раздражением какой-то джентльмен за соседним столом. — Я не знаю ни одного такого закона, из которого можно было бы вывести что-нибудь полезное!

— Сударь, — возражает ему собеседник, по виду священник, — да вы, я вижу, не верите в божественную красоту благодати!

«Что за вздор, — думает Уоттс. — Какая польза тратить время на пустую болтовню?»

Он подзывает стюарда и спрашивает его, когда будет дилижанс на Бристоль.

— Но ведь вы едете в Бирмингем? — удивляется тот.

— Я возвращаюсь в Бристоль! — твердо говорит Уильям Уоттс.

Признаемся, мы выдумали эту поездку (а в деталях нам помог Генри Филдинг). Но она могла быть. Потому что, как мы уже упоминали, в 1782 году купец из Бристоля Уильям Уоттс взял патент на производство свинцовой дроби путем сбрасывания капель расплавленного свинца с высокой башни. Падая, капли будут, подобно градинам, становиться круглыми и застывать. Рабочим надо будет только подбирать с пола твердую дробь. Через три года, в 1785 году он построил башню высотой 27 метров, где открыл новую мастерскую. Дела Уоттса пошли хорошо, и он разбогател. А его изобретение до сих пор используют для производства круглых шариков.

Уильям Уоттс первым придумал, как можно использовать в практических целях невесомость. Между его

изобретением и открытием невесомости, которое опубликовал великий Галилей, огромный промежуток времени — полтора века! Вспомним: Блезю Паскалю потребовалось всего четыре года, чтобы изобрести барометр — прибор, основанный на другом открытии Галилея и его учеников. Почему так разительно непохожи судьбы обоих открытий?

Может быть, не существовало практической потребности в том, чтобы заставить работать невесомость? Нет, конечно же, нет! В XVII и XVIII веках трудно назвать такой год, когда где-нибудь на старом континенте Европы не случались войны. Инженеры постоянно совершенствовали огнестрельное оружие. Баллистические расчеты выполнял, например, Торричелли еще до того, как открыл вакуум. Так что с потребностями все ясно: они были.

Может, дело в том, что на невесомость не обратил внимания человек масштаба Паскаля? Но ведь для того, чтобы сделать первое изобретение, основанное на использовании состояния невесомости, вполне хватило интеллекта провинциального английского купца Уоттса — человека, в науке совершенно неизвестного. Нет, тут дело явно в чем-то другом. В чем же именно?

Попробуем разобраться в этой загадке. С этой целью взглянем на проблему с несколько более общих позиций: чтобы невесомость прочно заняла свое место в системе научного знания, надо было в этом вопросе опираться на достаточно надежную теорию тяготения. Что думали об этом ученые в XVII и XVIII веках? В науке о тяготении существовало три основных методологических направления. Согласно учению перипатетиков — последователей Аристотеля, вес тел — это их естественное стремление к центру мира, то есть к Земле. Ни о какой невесомости тут нет даже и речи. Картезианцы — последователи Декарта учили: тяготение возникает как результат вихревого движения материи. По этому учению в мире нет ни невесомости, ни пустоты. Третью концепцию сформулировал Исаак Ньютон: тяготение действует на расстоянии, передается мгновенно, причем без участия какой-либо промежуточной среды. Открытый Ньютоном закон всемирного тяготения был безусловно справедлив, но о причине его действия великий основоположник небесной механики предпочел высказаться кратко: *hypotheses non fingo* — гипотез не измышляю. Невесомость была одним из простых следствий теории Ньюто-

на. У него впервые можно даже прочесть об «искусственных спутниках Земли».

Однако последователи Ньютона невесомостью не занимались — им предстояло, создавая классическую механику, решить ряд значительно более сложных математических проблем. С этой задачей прекрасно справилась плеяда блестящих корифеев механики XVIII века — Эйлер, Лагранж, Лаплас. Но полной ясности с тяготением XVIII век не принес. Ученые ставили новые вопросы, но не находили ответов. Пьер Лаплас пытался определить скорость распространения тяготения, решить, нельзя ли материальные тела экранировать от сил тяготения. Ответов он не получил.

Много думал о тяготении великий русский ученый М. В. Ломоносов. Он выдвинул свою концепцию тяготения, которая отличалась от взглядов и Ньютона, и Декарта. Ломоносов предположил, что существует очень тонкая «тяготительная материя», которая всегда движется к центру Земли и «обрушивается на отдельные частицы с одинаковым натиском», прижимая материальные тела к Земле. Возникающая при этом сила давления и воспринимается как вес. Невесомости тут тоже не получалось.

Словом, вопросы тяготения не казались ясными ученым XVIII века. Сложность положения подметил Вольтер, который с присущим ему остроумием так охарактеризовал сложившееся положение: «Когда француз приезжает в Лондон, то находит здесь большую разницу как в философии, так и во многом другом. В Париже, из которого он приехал, думают, что мир наполнен материей, здесь же ему говорят, что он совершенно пуст... Картезианцы говорят, что все совершается вследствие давления, и этого мы не понимаем; здесь же ньютонианцы говорят, что все совершается вследствие притяжения, которое мы понимаем не лучше».

Сознаемся: рассказывая выше об открытии невесомости, мы немного «спрямили» путь развития науки. На самом деле, как мог сейчас убедиться читатель, на этом пути было еще много неясностей, неожиданных поворотов и даже тупиков. И не могли, видимо, ученые XVIII века подумать о практическом использовании такого все еще малопонятного состояния, как невесомость. Другое дело далекий от забот науки купец из провинциального Бристоля Уильям Уоттс: помогли, видимо, природная наблюдательность, деловая хватка и нужда.

И тут мы подошли к самому важному выводу: на таком пути к изобретению потребовалось 150 долгих лет. На этом примере хорошо видно, как был прав кто-то из великих, сказав: «Нет ничего практичнее хорошей теории».

КОСМОС — НОВАЯ ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ СРЕДА

Сделаем правильные выводы из истории науки и не будем заставлять наших потомков работать завтра над тем, что мы можем сделать для них сегодня.

Тридцать лет развития космонавтики вывели человечество на важный рубеж его истории: производственная деятельность цивилизации перестала быть привязанной к поверхности планеты, она распространилась на новую среду — космическое пространство. Это принципиально важный шаг в истории цивилизации, потому что новая производственная среда — космос, к освоению которого приступило человечество, резко отличается от тех условий, на которые ориентирована вся современная земная технология.

Еще раз повторим, в чем состоят отличительные особенности этой качественно новой производственной среды: невесомость, космический вакуум, солнечная радиация. Как использовать эти факторы, чтобы обогатить науку новыми сведениями, а технологию — новыми полезными приемами? Как, опираясь на эти факторы, организовать на борту космических аппаратов новые технологические процессы? Эти процессы должны дать материалы улучшенного качества — более однородные, с меньшим количеством дефектов структуры, сверхвысокой чистоты. А может быть, и такие материалы, которые получить на Земле вообще нельзя.

Ответ на эти вопросы содержится в следующих главах. И дает его новая наука — физика невесомости.





ГИДРОМЕХАНИКА НЕВЕСОМОСТИ

ЧТО ТАКОЕ ФИЗИКА НЕВЕСОМОСТИ

В одной из книжек известного специалиста по физике жидкости профессора Я. Е. Гегузина приводится шуточное высказывание: «В условиях невесомости все выглядит так же, как и в условиях весомости, за исключением

отсутствия веса, в связи с чем в условиях невесомости все выглядит не так, как в условиях весомости». Это остроумное замечание верно отражает первую особенность того круга явлений, который изучает физика невесомости: с одной стороны, для их объяснения не потребовалось формулировать каких-либо принципиально новых физических закономерностей. Но с другой — эти закономерности нередко выступают в необычной форме, необычной оказывается и взаимосвязь физических эффектов различной природы.

В условиях невесомости явления гидромеханики и тепломассообмена, кристаллизации, капиллярные процессы, взаимодействуя между собой, приводят нередко к возникновению новых эффектов, которые не наблюдаются на Земле. Необходимость проведения исследований на стыках различных научных дисциплин — вторая отличительная особенность физики невесомости.

Впервые о возможности использовать необычный ход физических процессов в невесомости, чтобы организовать в космосе производство различных материалов, задумался основоположник космонавтики К. Э. Циолковский. В 1883 году он написал работу «Свободное пространство», в которой систематически рассмотрел особенности этих процессов. К сожалению, эта работа Циолковского долгое время оставалась неизвестной, так как была опубликована только после смерти ученого, в 1954 году. Однако к идеям, сформулированным в этой работе, Циолковский неоднократно возвращался впоследствии и развивал их в ряде своих известных статей («Исследование мировых пространств реактивными приборами», «Цели звездоплавания» и другие).

Центральное место среди явлений, с которыми имеет дело на борту космического аппарата физика невесомости, занимают процессы, происходящие в жидкости и газе. Это неудивительно: на вещество в твердом состоянии невесомость оказывает значительно меньшее влияние. Поэтому ведущую роль в физике невесомости играют методы исследований, разработанные в гидромеханике и теории тепло- и массопереноса.

Какие же методы конкретно используются для решения задач физики невесомости? Во-первых, это методы численного решения задач гидромеханики сплошной среды. В настоящее время решение таких задач выполняется с помощью электронно-вычислительных машин. С этой це-

лю разработывают специальные программы, позволяющие решать задачи высокой сложности: учитывающие эффекты на границах раздела жидкость, газ — твердое тело, кристаллизацию и другие особенности.

Второе направление исследований — эксперименты на космических аппаратах, в которых используются модельные — главным образом прозрачные — рабочие вещества. Полученные в этих экспериментах результаты можно затем распространить на вещества, имеющие практическое значение для космической технологии, используя критерии подобия физических процессов в невесомости или расчетно-теоретические модели. В Советском Союзе для этих целей создана аппаратура «Пион» (начальные буквы слов «приборы для исследования особенностей невесомости»). Начиная с 1981 года, эта аппаратура регулярно используется для проведения экспериментов на станциях «Салют-6», «Салют-7» и «Мир».

Третье направление также, по существу, основано на моделировании будущих технологических процессов космического производства. Для этого используются натурные рабочие вещества — образцы перспективных полупроводниковых материалов, сплавов, оптического стекла, но размеры этих образцов относительно невелики. В Советском Союзе для этих целей разработаны установки «Сплав», «Кристалл», «Магма-Ф», которые работали на станциях типа «Салют», аппаратура СКАТ и СПРИНТ, размещавшаяся на борту высотных ракет.

Сопоставляя образцы, выращенные в невесомости, с их наземными прототипами, которые получали на такой же аппаратуре в лабораторных условиях, можно было судить о возможностях производства в космосе улучшенных материалов. Эти опыты проводились с целью сформировать научный фундамент технологии космического производства.

НА КАКИХ ЭФФЕКТАХ ОСНОВАНЫ МЕТОДЫ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

В состоянии динамической невесомости на борту космических аппаратов существенно изменяется соотношение сил веса и сил другой физической природы, действующих на вещество. По этой причине в невесомости проявляется ряд физических эффектов, которые в обычных условиях на Земле подавлены или замаскированы из-за наличия у тел веса. Именно на использовании этих эф-

эффектов и основаны методы космической технологии. Вот основные из этих эффектов невесомости:

1. *Резкое возрастание роли поверхностных эффектов.* Кто из читателей не выдувал в детстве мыльных пузырей? Под действием сил поверхностного натяжения пузырь стремится принять правильную сферическую форму. А поскольку мыльная пленка весит очень мало, размеры таких пузырей получаются большими.

В невесомости можно получать устойчивые жидкие зоны больших размеров, используя расплавы полупроводников, металлов, стекла, в том числе устойчивые жидкие сферы, цилиндры, пленки, зеркальные поверхности... Если затем охладить расплав до температуры затвердевания, то можно получить изделия таких размеров или такого качества, приготовить которые на Земле нельзя.

2. *Исчезновение явления плавучести.* Научное объяснение плавучести тел дал величайший физик античности Архимед, который сформулировал основной закон гидростатики, названный его именем.

Вот как сам Архимед формулирует этот закон в сочинении «О плавающих телах»: «Тела, более легкие, чем жидкость, опущенные в эту жидкость насильственно, будут выталкиваться вверх с силой, равной тому весу, на который жидкость, имеющая равный объем с телом, будет тяжелее этого тела». Удивительная по ясности формулировка!

Римский архитектор и историк науки Витрувий рассказывает, что Архимед открыл этот закон, выполняя просьбу царя определить, из чистого ли золота сделана корона, которую тот заказал мастеру. Погруженный в думы, Архимед принимал ванну и, наблюдая, как вытекает из нее вода, внезапно понял, как можно решить поставленную перед ним трудную задачу.

Но представим на минуту, что Архимед жил бы не в городе Сиракузы, а на маленькой планетке, вращающейся вокруг Земли. Появился бы у него тогда повод кричать свое знаменитое «Эврика!» по случаю сделанного открытия? Если планетка достаточно мала, то условия на ней должны быть близки к невесомости, и, следовательно, закон Архимеда там не будет действовать.

Скорее всего Архимед, бывший к тому же первоклассным инженером, придумал бы на этой планетке нечто иное: он научился бы получать, например, материалы, насыщенные пузырьками с воздухом. Такой материал обладал бы прочностью стали, но был бы легким, как дерево.

И на рынке земного города Сиракузы за такой материал дали бы хорошую цену.

3. Значительное снижение роли тепловой конвекции. Конвекция хорошо знакома каждому из повседневных бытовых наблюдений — она проявляется при кипении супа, при движении нагретых потоков воздуха над костром.

В простейшем случае конвективное течение в жидкости возникает, если ее нагревают снизу. С повышением температуры плотность нижних слоев жидкости падает, и в соответствии с законом Архимеда эти слои начинают подниматься вверх. Течение струй жидкости носит хаотический характер, и это сильно затрудняет исследование конвекции.

В невесомости тепловую конвекцию можно подавить полностью. Вследствие этого существенно изменяются процессы тепло- и массообмена, которые играют важную роль практически во всех технологических маршрутах производства материалов.

4. Изменение процессов кристаллизации и затвердевания образцов. Если образцы обладают сложным химическим составом, то условия кристаллизации зависят от того, как сконцентрированы компоненты в расплаве и в особенности вблизи границы раздела фаз: твердой, газообразной и жидкой. Не меньшее влияние может оказывать распределение температуры в расплаве. Но распределение концентрации и температуры определяется процессами тепло- и массообмена, интенсивность которых в невесомости изменяется.

Все эти взаимозависимости носят сложный характер. Их результатом будет изменение свойств образцов, приготовленных в невесомости, по сравнению с их земными аналогами.

5. Возможна левитация расплавов, иными словами, их тепловая обработка без контакта со стенками контейнера.

Слово «левитация» означает подъем, воспарение. Трюки с левитацией показывали индийские факиры. Вот как один из очевидцев описывает этот трюк: «Мы увидели факира парящим в воздухе примерно в трех футах над землей. Некоторые скептически настроенные английские офицеры, присутствовавшие на представлении, длинными палками ощупывали пространство вокруг факира. Но он действительно парил в воздухе».

Факир, разумеется, показывал ловкий фокус. А вот в невесомости жидкая капля значительных размеров действительно может оторваться от стенок тигля. Правда, для этого придется с помощью дополнительных мер компенсировать действие малых остаточных ускорений. Эту задачу решают в специальных установках — левитаторах. В этих установках можно получать особо чистые тугоплавкие материалы, например, образцы стекол.

6. Высокая эффективность управляющих воздействий на вещество. Помещая расплавы в электромагнитные по-



Левитация.

ля, направляя на них ультразвуковые колебания или используя другие приемы, можно управлять химическим составом этих расплавов — делать их однородными или, наоборот, задавать нужное чередование слоев разного состава. На Земле такие воздействия сильно затруднены силой веса.

ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ

На границе раздела жидкости с другой средой, например, с ее собственным паром возникают особые условия: молекулы пограничного слоя жидкости в отличие от молекул, находящихся в объеме, окружены молекулами той же жидкости не со всех сторон. Поэтому силы, которые действуют на молекулы в этом слое, оказываются

неуравновешенными, и возникает равнодействующая сила, которая стремится изменить поверхность этой жидкости. Обычно жидкость ведет себя так, как будто по касательной к ее поверхности действуют силы, которые стремятся сократить ее площадь. Эти силы называются силами поверхностного натяжения.

Под действием этих сил свободная жидкость стремится принять сферическую форму. На Земле этому препятствует сила веса. Поэтому наблюдать капли почти сферической формы удастся только в двух случаях — когда размер капелек очень мал или когда очень мала их плотность (например, мыльные пузыри).

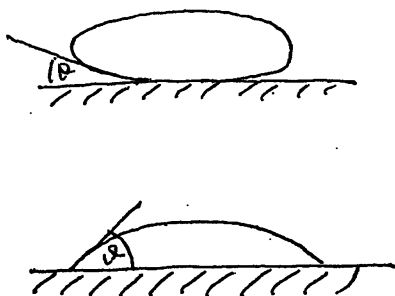
При каких условиях это происходит? Чтобы ответить на этот вопрос, надо сравнить два давления — то, которое обусловлено силой веса и стремится расплющить каплю жидкости, и то, которое обусловлено поверхностным натяжением и стремится придать ей форму правильной сферы. Давление, которое создает в капле поверхностное натяжение, называется капиллярным. Безразмерную величину, равную отношению этих двух сил, называют числом Бонда. Очевидно, влиянием силы веса на форму капли можно пренебречь в тех случаях, когда число Бонда много меньше единицы. На Земле процессы сферообразования жидкости обычно изучают, используя специальные приемы.

Первый из этих приемов использовал Плато в своих знаменитых опытах с гидроневесомостью. В этих опытах, как мы уже писали, на каплю масла, окруженную раствором спирта той же плотности, действовали только силы поверхностного натяжения, остальные силы уравновешивали друг друга. В результате капля принимала форму сферы.

Другой прием — проведение опытов на башнях сбрасывания, на которых можно на 2—3 секунды создать состояние невесомости. Одна из задач, для решения которой проводились эти опыты, состояла в том, чтобы определить, как ведет себя жидкое топливо в баках двигателей космических кораблей. Как вылить воду из бака на Земле, знает каждый: достаточно открыть кран в нижней части бака, и вода потечет сама. А как это сделать на космическом корабле, где отсутствует сила веса, зато большую роль играют силы поверхностного натяжения? Чтобы разобраться в этом вопросе, и проводились опыты с жидкостями на башнях сбрасывания.

ЖИДКОСТЬ НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

На границе, где капля жидкости соприкасается с твердой плоскостью, встречаются вода, воздух и твердое тело. Поэтому эту границу называют линией раздела трех фаз. Угол между поверхностью капли и твердой поверхностью называют углом смачивания θ . Если этот угол меньше 90° и капля частично растекается по поверхности, то говорят, что жидкость смачивает поверхность. Если $\theta > 90^\circ$, то капля стягивается в шарик и не смачивает поверхность.

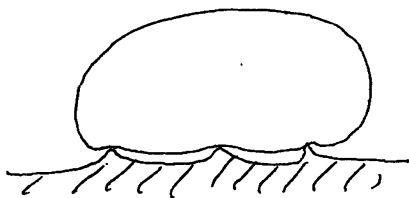


Жидкость на несмачиваемой и на смачиваемой поверхности.

Первым начал изучать эти процессы более 150 лет назад английский физик Томас Юнг. Он предположил, что величина краевого угла смачивания устанавливается такой, чтобы были уравновешены три силы поверхностного натяжения, которые действуют на линии раздела трех фаз. Если эта линия находится в равновесии, то суммарная горизонтальная сила, действующая на этой линии, должна быть равна нулю. Разумеется, все это справедливо при одном обязательном условии: размеры капли достаточно малы, чтобы можно было пренебречь влиянием на ее форму силы веса.

Рассуждения Юнга просты, и их можно найти в любом учебнике физики. Но справедлива ли теория Юнга? Поставим простой опыт. Капнем каплю воды на горизонтальное стекло. Согласно теории угол смачивания должен иметь определенное значение. Возьмем теперь шприц и добавим в каплю немного воды. Что произойдет? Размер капли увеличится, но линия раздела останется на прежнем месте.

Ясно, что угол смачивания при этом увеличится. А это противоречит теории Юнга. Можно поступить иначе: отсосать шприцем часть воды из капли. В результате линия раздела останется на прежнем месте, а краевой угол уменьшится. Это опять противоречит теории. Получается, что капля жидкости может оставаться в равновесии на плоской поверхности не при одном каком-то значении краевого угла, а при разных его значениях. Этот эффект называют гистерезисом смачивания (по-гречески «гистерезис» означает «запаздывание»).



Капля жидкости на шероховатой поверхности.

В чем причина этого явления, почему не срабатывает теория? Один из факторов — это шероховатость поверхности, на которой находится капля. Если посмотреть на нее в микроскоп, то можно увидеть, что поверхность стекла вовсе не гладкая. Могут влиять и крохотные неоднородности состава стекла.

Итак, шероховатость заметно влияет на поведение жидкости на твердой поверхности даже в обычных земных условиях. А в невесомости, когда роль поверхностного натяжения значительно возрастает?

Подождем минуту с ответом на этот вопрос и спросим о другом: почему гусь выходит сухим из воды? Большинство читателей, вероятно, ответит: потому, что перья у него покрыты жиром. Но у жира угол θ всего 100° ! И еще один вопрос: вам не приходилось наблюдать, как в сверкающие капельки собирается вода на поверхности листьев лотоса, плавающих в реке? Разве листья лотоса тоже покрыты жиром?

Сорвите такой лист и присмотритесь к нему более внимательно: его поверхность покрыта тонкими ворсинками. Такие ворсинки покрывают и гусиные перья.

Именно в этих ворсинках основной секрет: угол смачивания на шероховатой поверхности оказывается больше, чем на поверхности из того же материала, но гладкой.

Происходит это потому, что, прижимаясь силой веса к ворсинкам, жидкость искривляется. А на искривленной поверхности жидкости возникает капиллярное давление.

Можно сделать простые расчеты и показать, что если, например, для гладкой поверхности угол $\theta = 109^\circ$ (вода на парафине), то для шероховатой $\theta = 180^\circ$ — полная несмачиваемость! Вот какой интересный урок может преподать нам гусь, выходящий сухим из воды.

Но, оказывается, это еще не все, чему могут научить нас гуси. Известный австрийский натуралист К. Лоренц поставил давным-давно такой опыт: он брал гусят, которые только что вылупились из яиц в инкубаторе, и начинал ходить с ними вместо гусыни. Разумеется, ученый решал свои задачи — исследовал поведение птиц в таких необычных условиях. Но попутно выяснил кое-что интересное и для нас: оказалось, что перышки гусят, оставшихся без матери, намокают в воде! Лоренц попробовал смазывать их жиром, но это плохо помогло. Тогда он подумал, что дело, быть может, в том, что гусыня, когда заботливо чистит своим отпрыскам перышки, еще и электризует их. Лоренц стал натирать своих питомцев куском ткани — и перья стали сухими! Значит, дело не только в шероховатости. Важна еще и электризация поверхности.

А что будет в невесомости? В этих условиях влияние шероховатости стенок контейнера и, возможно, электрических зарядов на смачиваемость будет еще более сильным, ведь жидкость прижимается к стенкам уже не силой веса, а силами другой физической природы, значительно более малыми по величине.

В рамках советско-американской программы «Союз» — «Аполлон» в 1975 году был поставлен эксперимент по выращиванию кристаллов германия. Руководил экспериментом профессор Массачусетского технологического института в США Г. Гейтос. Кристаллы выращивались в кварцевых ампулах, которые устанавливались в специальную электронагревную печь. Стенки ампул изнутри были покрыты тонким слоем графита. На таком же оборудовании контрольные опыты проводились на Земле.

Результаты оказались удивительно несхожими. «Земные» образцы германия накрепко соединялись со стенками ампулы — чтобы их освободить, стенки приходилось растворять плавиковой кислотой. «Космические» образцы свободно вываливались из ампулы. А их поверхность была гладкой, с отдельными бороздами — как будто при

плавке они контактировали со стенками ампулы только в этих малых по площади зонах.

Эти результаты удивили Гейтоса и его сотрудников. В отчете о своих опытах они написали, что наблюдали «инверсию смачиваемости» — казалось, что расплавленный германий в космосе перестал смачивать графитизированную поверхность ампул.

Согласиться с таким объяснением было нельзя: смачивание определяется межмолекулярными взаимодействиями на границе раздела твердого тела и жидкости и не зависит от силы веса. В чем же дело?

Надо было проверить, нет ли ошибки в самих экспериментах. Проверку осуществили в 1976 году в Советском Союзе, поставив эксперименты по кристаллизации германия на борту высотных ракет «Мир-2». Эксперименты подтвердили: американские ученые правы, в невесомости образцы действительно отрываются от стенок ампулы.

А вот объяснение пришлось искать другое. И оно было найдено: именно шероховатость стенок ампул приводит к тому, что расплав по-разному ведет себя в космосе и на Земле. В невесомости работает «эффект гуся» — самой слабой шероховатости достаточно, чтобы расплав почти полностью оторвался от стенок.

Была исследована поверхность графитизированных стенок кварцевых ампул, в которых размещались образцы. Оказалось, что высота микрошероховатостей на этих стенках в среднем составляет около 15 микрон, их ширина — 10 микрон, а среднее расстояние между ними — 200 микрон. Очевидно, на этих микрошероховатостях и «зависал» в невесомости расплав.

Правда, «зависание» наблюдалось только в случае малой величины остаточных ускорений; если они возрастали до 10^{-4} — $10^{-3}g_0$, то контакт со стенками обычно восстанавливался. На Земле в таких же ампулах явление отрыва расплава от стенок не наблюдается вообще — сила веса прижимает его к стенкам.

В ЛАБОРАТОРИИ РЭЛЕЯ

Как зависит поверхностное натяжение от химических примесей, присутствующих в жидкости? Первым заинтересовался этим вопросом в конце XIX века великий английский физик Дж. Рэлей. Он начал с того, что на чистую поверхность воды последовательно бросал немного порошка камфоры или капал оливкового масла.

Частички камфоры сразу начинали «плясать» на поверхности воды. Почему? Когда камфора растворяется в воде, ее поверхностное натяжение снижается. Но форма частичек камфоры неправильная, поэтому и граница раздела камфора — вода имеет сложную форму. Следовательно, на этой границе возникают перепады поверхностного натяжения. И камфора начинает свою «пляску»...

Иначе вела себя капля оливкового масла: оно не растворяется в воде, а растекается по ее поверхности тонкой пленкой. В предельном случае эта пленка имеет тол-



Мономолекулярный слой ПАВ на поверхности воды.

щину всего в одну молекулу масла. Но как проверить, что этот тонкий слой сплошной и в нем нигде нет разрывов?

Рэлей убедился в этом, поставив следующий простой и красивый опыт. Он бросал кусочки камфоры на поверхность воды, покрытую разным количеством масла. Пока масла было недостаточно и пленка на поверхности воды не была сплошной, кусочки камфоры привычно начинали «плясать». Но как только Рэлей капал чуть больше масла и на поверхности воды образовывался сплошной мономолекулярный слой, «пляска» камфоры немедленно прекращалась.

Вещества, которые легко адсорбируются на поверхности жидкости и меняют ее поверхностное натяжение, называются поверхностно-активными веществами (ПАВ). Наиболее известный пример такого вещества — это мыло. Пленка мыла уменьшает поверхностное натяжение воды в два с половиной раза. Возникновение этой пленки определяет свойства мыльных пузырей, которые так нравятся детям.

Проводя свои опыты, Рэлей сделал следующие простые подсчеты. Он знал площадь поверхности воды, плотность оливкового масла и его массу, которой было достаточно для образования сплошной пленки толщиной в одну молекулу. Отсюда нетрудно было подсчитать тол-

щину слоя: она оказалась равно $1,7 \cdot 10^{-7}$ сантиметров, что примерно на порядок больше среднего расстояния между атомами в молекуле масла. Отсюда Рэлей сделал вывод, что молекула ПАВ представляет собой цепочку атомов, расположенных друг за другом. Эта цепочка ориентируется на поверхности воды вертикально, одним концом вниз, подобно градуснику, которым меряют температуру в ванне при купании детей. Такая ориентация объясняется, очевидно, электрическими свойствами молекул ПАВ.

Продолжая свои опыты, Рэлей поставил следующий вопрос: сколько времени потребуется растворенным в воде молекулам мыла, чтобы образовать на ее поверхности пленку ПАВ? Чтобы ответить на этот вопрос, он исследовал поведение струи мыльной воды, которая вытекала из отверстия, сделанного в дне сосуда. Этому отверстию Рэлей придал эллиптическую форму; эллиптическим сечением обладала в начальный момент и вылетающая из него струя воды. Но такая форма струи неустойчива, под действием сил поверхностного натяжения струя будет стремиться стать круглой. В результате в струе возникнут колебания, ее сечение будет попеременно превращаться то в круг, то снова в эллипс. Из расчетов Рэрея выходило, что период этих колебаний должен быть обратно пропорционален корню квадратному из величины поверхностного натяжения.

Но этот период нетрудно было определить, зная скорость струи и измеряя расстояние между ее соседними поджатиями. Измерения показали, что этот период вначале возрастал, а потом его величина стала постоянной. Это произошло примерно через одну сотую секунды после вылета струи мыльной воды из отверстия. Рэлей совершенно правильно решил, что именно к этому моменту на поверхности струи завершилось формирование пленки ПАВ.

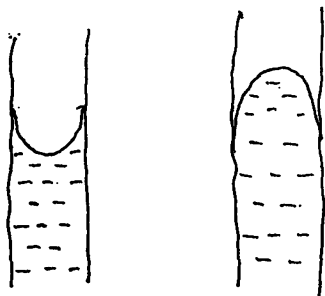
Классические опыты Рэрея с пленками ПАВ имеют важное значение для управления технологическими процессами в невесомости, и мы еще вернемся к этим вопросам.

ГИДРОСТАТИКА

Гидростатика — это раздел гидромеханики, в котором изучается равновесие жидкости и распределение в ней давления. Как изменяются законы гидростатики с переходом к невесомости?

О первом из этих законов — законе Архимеда мы уже говорили: в невесомости он не работает. Зато второй закон — закон Паскаля — сохраняет свое действие полностью. Согласно этому закону давление на поверхности жидкости, создаваемое внешними силами, передается этой жидкостью равномерно во все стороны.

Но какие силы воздействуют на жидкость в невесомости? Прежде всего это силы поверхностного натяжения; если жидкость заполняет цилиндрическую трубку, то на ее свободной поверхности эти силы создают капил-



Жидкость в капиллярах со смачиваемыми и несмачиваемыми стенками.

лярное давление. Если жидкость смачивает стенки трубки, то капиллярное давление направлено внутрь жидкости. Для несмачиваемых стенок капиллярное давление направлено наружу.

Рассмотрим в качестве примера образец германия, который помещен в цилиндрическую ампулу диаметром 1 сантиметр. Ампула устанавливается в электронагревную печь, и в невесомости производится плавка образца, за исключением небольшого участка, служащего затравкой при кристаллизации, которая начинается при последующем охлаждении печи. Если расплав не смачивает стенок, то создаваемое на его свободном конце капиллярное давление по закону Паскаля передается по направлению к стенкам ампулы.

На этих стенках, как уже указывалось, расплав свободно «зависает» на микронеровностях поверхности. Внутреннее давление в жидкости уравнивается капиллярным давлением, которое создается на этих выступах. Чтобы в этих условиях удержать расплав гер-

мания, достаточно, чтобы высота выступов на стенках составляла всего около 10 микронетров, а расстояние между ними — порядка 0,2 миллиметра.

Зависая на этих микронеровностях, расплав почти не касается стенок ампулы. Практически вся его поверхность остается свободной.

Нечто подобное происходит в контейнерах, диаметр которых превосходит диаметр образца, принимающего в невесомости круглую форму. Такие опыты проводились с образцами меди и серебра при запуске высотных ракет



Жидкая перемычка между двумя твердыми стержнями (опыт Рэлея).

«Мир-2». Капиллярные силы удерживали каплю жидкого металла на микронеровностях стенок контейнера. Полученные в невесомости образцы имели сферическую форму с отклонением от круглости около одного процента.

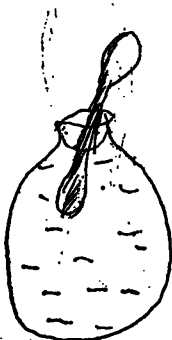
Конфигурация кристалл — жидкая перемычка расплава — исходное сырье характерна для целого ряда современных методов производства многих полупроводниковых материалов. К числу таких методов относится, например, метод зонной плавки, который позволяет получать монокристаллы многих материалов с высокими показателями совершенства.

Что может дать перенос этих методов в условия невесомости? Около 100 лет назад этот вопрос исследовал Рэлей. Он показал, что в невесомости могут быть устойчивыми жидкие перемычки с диаметром значительно

больше, чем на Земле. И длина таких перемычек тоже может быть сделана больше: перемычка не теряет устойчивости до тех пор, пока отношение ее длины к диаметру примерно не превосходит трех крат. Все это означает, что в космосе теми же методами можно выращивать образцы значительно более крупных размеров.

РАССКАЗ КОСМОНАВТА

Чтобы читатели смогли более полно почувствовать всю необычность поведения жидкости в условиях невесомости, предоставим слово летчику-космонавту СССР, кандидату технических наук А. А. Сереброву, который является специалистом в области тепло- и массопереноса.



Способ Сереброва.

«Представьте задачу: налить жидкость в сосуд без потерь. На космическом корабле вода подается из крана порциями по 25 кубических миллиметров. Предоставленные сами себе, эти порции собираются в шаровидные капли, как и положено в невесомости; эти капли потом в результате случайных воздействий дробятся на меньшие. Если действовать, как на Земле, и наливать воду из крана в горлышко сосуда, то она станет выталкивать из сосуда воздух, в котором взвешены капли разного размера, — иными словами, будет сама же выталкивать себя.

Если же струю с малой скоростью направить на стенку сосуда, то вода, смачивая стенку, прилипает к ней. Тогда взвешенных капель не будет — по крайней мере, до тех пор, пока сосуд не встряхивают. Таким способом можно без потерь налить жидкость в сосуд.

И тут же возникает второй вопрос: а как можно взять жидкость из сосуда? Ведь из-за невесомости жидкость «плавает» в сосуде в виде шаровых капель разного диаметра.

Конечно, если есть центрифуга, то задача решается просто: при вращении сосуда жидкость будет прижиматься к стенке, а оттуда ее можно забирать с помощью шприца. Если нет центрифуги, можно прижать жидкость к стенке, двигая сосуд с небольшим линейным ускорением. Именно так обычно и делают.

Я предложил другой способ: поместить внутрь сосуда длинный и узкий предмет, например, черенок ложки, к которому капли прилипают. За счет сил поверхностного натяжения жидкость «расползается» по черенку и подходит к краю горловины сосуда. Слегка помешивая черенком, легко добиться того, чтобы жидкость постоянно падалась на черенке вблизи выходного отверстия сосуда. Задача, стало быть, решена».

КОНВЕКТИВНЫЕ ДВИЖЕНИЯ

«Волновая толчея в бухте металась под ветром, как стадо овец под кнутом пьяного пастуха, то есть в самые разные стороны, и бежала не только под ветер, но и, отражаясь от противоположного берега, возвращалась обратно и била нас о причал».

В таких весьма красочных выражениях описывает штормовую погоду на море, — а если говорить по-научному, то турбулентную конвекцию, — советский писатель-маририст В. Конечный. Нетрудно представить, каким вырастет кристалл, если в расплаве, из которого его вытягивают, развиваются в чем-то сходные процессы...

Чем интересен переход к невесомости? Иногда говорят, что раз закон Архимеда не проявляется в невесомости, то и конвекция в этих условиях должна отсутствовать. Однако в такой крайней форме это утверждение неверно.

Во-первых, на космических аппаратах нет полной невесомости, а потому нет оснований утверждать, что конвекцией можно полностью пренебрегать во всех экспериментах, проводимых в космосе.

Во-вторых, и это более существенно, конвективные движения разделяются на два больших класса, которые принципиально различаются между собой. Первый класс образуют конвективные движения, обусловленные дейст-

вием массовых сил, например, силы веса. Ко второму классу относятся конвективные движения, вызванные другими причинами, например, действием электрических и магнитных полей или зависимостью поверхностного натяжения от температуры.

Эксперименты показали, что конвекция второго типа в условиях невесомости иногда может быть не менее, а даже более интенсивной в опытах, проводимых в космосе. Рассмотрим поэтому оба класса конвективных течений.

ЕСТЕСТВЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ

Естественная, или свободная, конвекция развивается под действием сил веса, действующих внутри самой жидкости. Естественную конвекцию отличают от вынужденной, которая возникает, когда используется какой-то внешний источник, например, мешалка или насос.

Этот тип конвективных движений начали изучать еще в XVIII веке. Однако существенный прогресс в ее изучении достигнут лишь в последние десятилетия. Причина этого состоит в высокой сложности задачи. В простейшем случае подогрева жидкости снизу величина силы плавучести определяется разностью температур по высоте слоя. Но, с другой стороны, и само распределение температуры зависит от интенсивности конвективного течения, возникающего в жидкости.

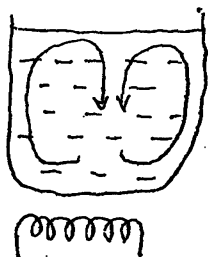
Исходной точкой всех теорий естественной конвекции послужила работа Рэлея, опубликованная в 1916 году. Рэлей рассмотрел идеализированную схему, когда тонкий слой жидкости находится между двумя горизонтальными пластинами бесконечной протяженности. Свободная поверхность жидкости отсутствует. Обе пластины поддерживаются при постоянной температуре, причем температура нижней пластины выше.

Рэлей исходил из того, что в жидкости между пластинами температура меняется по линейному закону так же, как и ее плотность. Вблизи нижней горячей пластины плотность слоев жидкости поэтому меньше. Пока этот слой остается неподвижным и окружен жидкостью той же плотности, он остается в равновесии.

Положение меняется, когда вследствие тепловой флуктуации некоторый малый объем жидкости поднимается вверх. Теперь он попадает в окружение более

холодной и соответственно более плотной жидкости. По закону Архимеда возникает сила, выталкивающая этот микрообъем вверх. Однако задержать или замедлить всплытие этого микрообъема могут вязкие силы сопротивления среды. А пока этот элемент почти остается на месте, окруженный более холодными слоями жидкости, перенос тепла, обусловленный теплопроводностью, стремится выровнять разницу температур.

То же самое происходит, если микрообъем более холодной жидкости случайно смещается немного вниз. Ко-



Естественная конвекция в жидкости при подогреве снизу.

нечный результат будет зависеть от соотношения между скоростью всех трех процессов — всплывания элементов жидкости, вязкого трения и размывания градиентов температуры. Пока преобладают два последних процесса, жидкость остается в устойчивом состоянии, конвекция не возникает.

Однако с ростом перепада температур между пластинами положение в конце концов изменится, причем произойдет это скачком. Начиная с этого момента, в жидкости возникнет конвективное течение, и с дальнейшим ростом температуры его интенсивность будет возрастать.

Очевидно, условия, при которых совершается этот переход, зависят от перепада температур, характерного размера, величины ускорения, а также от теплофизических свойств жидкости — ее плотности, вязкости, теплопроводности, коэффициента объемного расширения жидкости. Комбинация этих величин позволяет построить безразмерное число — так называемый критерий Рэлея Ra .

Естественная конвекция в жидкости возникает, когда число Рэлея достигает необходимой критической величин-

ны. При более низких значениях Ra конвекция отсутствует.

Теория Рэлея позволила произвести для конкретных случаев оценки этого критического числа Ra_c . Однако предсказать, как при $Ra > Ra_c$ будет развиваться конвекция, эта теория не смогла. Получалось, что со временем скорость конвективных течений должна нарастать неограниченно, — результат явно абсурдный.

Как показали эксперименты, при $Ra > Ra_c$ в жидкости образуется правильная система замкнутых вихрей, которые переносят тепло сверху вниз. Это режим так называемой ламинарной конвекции (по-латыни *lamina* значит полоска; течение действительно напоминает систему вертикальных полос).

При дальнейшем росте числа Рэлея характер течения становится более сложным: система правильных ячеек утрачивает свою регулярность, возникает большое число запутанных вихрей. Такое течение называется турбулентным (по-латыни *turbineus* значит вихреобразный).

Поскольку определяющую роль в схеме возникновения конвекции, рассмотренной Рэлеем, играет сила веса, то в выражение для критерия Рэлея входит ускорение свободного падения g , иными словами, Ra прямо пропорционально g . Поэтому в условиях невесомости, когда величина Ra оказывается на несколько порядков меньше, чем на Земле, значение этого вида конвекции часто оказывается небольшим. И в этом состоит одно из важных преимуществ методов космической технологии.

В настоящее время разработаны достаточно эффективные методы теоретического расчета процессов конвективного тепло- и массообмена. Большинство из них основано на приближенном подходе, который в 1903 году использовал французский гидродинамик Жозеф Буссинеск. В основе этого приближения лежат два допущения: предполагается, что разность плотностей различных слоев жидкости зависит только от температуры, а в уравнении непрерывности можно пренебречь изменением плотности.

Практически удобным для расчетов естественной конвекции оказалось и другое приближение, которое основано на представлении о пограничном слое. Понятие пограничного слоя ввел в 1904 году немецкий гидродинамик Людвиг Прандтль. Он учел, что слой жидкости, непосредственно примыкающий к стенке, неподвижен относи-

тельно нее (условие «прилипания») и имеет одинаковую с ней температуру.

В Советском Союзе важные теоретические исследования процессов конвективного тепло- и массопереноса для задач космической технологии выполнили Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицкий, В. И. Полежаев, В. В. Пухначев, А. И. Феоничев.

КТО ОТКРЫЛ ЭФФЕКТ МАРАНГОНИ

Величина поверхностного натяжения пленки на свободной поверхности жидкости зависит от концентрации примесей и от температуры. Если вдоль этой поверхности существует перепад температуры или если примесь распределена по ней неоднородно, то на этой поверхности возникнет и перепад поверхностного натяжения. А это, в свою очередь, означает, что увлекаемый силами трения слой жидкости на ее поверхности неизбежно придет в движение. Течения жидкости, обусловленные местными изменениями поверхностного натяжения, в XIX веке исследовал итальянский физик Карло Марангони. Поэтому значительно позже исследованные им явления получили названия эффектов Марангони.

Однако впервые эти эффекты были исследованы и получили правильное объяснение в работах других ученых. В 1855 году старший брат известного впоследствии английского физика У. Томсона — лорда Кельвина — Джеймс Томсон опубликовал работу, посвященную исследованию необычных движений, наблюдаемых на поверхности жидкости. Томсон исследовал, как происходит растекание на поверхности воды капель спирта, и объяснил эти движения как индуцированные поверхностным натяжением. В 1869 году бельгийский физик Жозеф Плато наблюдал колебания иголки, положенной на свободную поверхность воды, и объяснил их «поверхностной вязкостью», то есть перепадом поверхностного натяжения.

Марангони опубликовал результаты своих исследований позже — в 1871—1873 годах, не сославшись на работу своего предшественника Дж. Томсона. Видимо, по этой причине возникновение течений на свободной поверхности жидкости, обусловленных перепадами концентрации или температуры, стали называть эффектами Марангони.

Марангони продолжил также исследования колебаний

иголки на поверхности жидкости, начатые Плато. Он установил, что существенную роль при этом играют отклонения от равновесия в натяжении вследствие расширения или сжатия поверхности, иными словами, ее деформации. Перепад поверхностного натяжения при движении иголки вдоль поверхности жидкости может быть также связан с различием концентрации примеси в пленке перед иголкой и позади нее.

Возникающий при этом перепад поверхностного натяжения заставит иголку, лежащую на поверхности жидкости, совершать характерные скачки. Правильное теоретическое объяснение этому явлению дал в 1878 году известный американский физик Дж. Гиббс. Поэтому его иногда называют эффектом Плато — Марангони — Гиббса.

ТЕРМОКАПИЛЛЯРНАЯ КОНВЕКЦИЯ

В 1901 году французский физик Анри Бенар опубликовал интересную экспериментальную работу по исследованию конвекции. В своих опытах он исходил из схемы Рэлея, объяснявшей возникновение конвективных течений в жидкости за счет различия плотности в слоях жидкости, которую подогревают снизу. Однако было одно отличие, которое первоначально показалось несущественным: в опытах Бенара верхняя, менее нагретая поверхность жидкости оставалась свободной.

И оказалось, что результаты эксперимента резко разошлись с предсказаниями теории. Свободная поверхность жидкости, в которой возникло конвективное течение, напоминала страницу школьной тетради «в клеточку». Это образовались так называемые ячейки Бенара. В чем же причина этого различия? Объяснил его в 1958 году Дж. Пирсон.

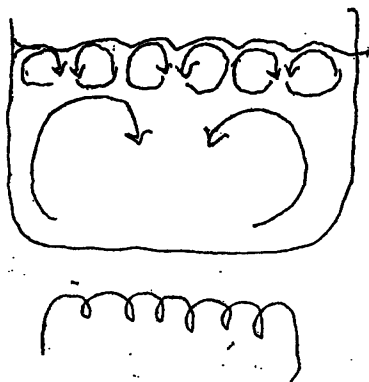
Дело в том, что теория Рэлея не учитывает одного важного физического эффекта — зависимости коэффициента поверхностного натяжения от температуры. Для большинства жидкостей этот коэффициент с ростом температуры уменьшается.

В опытах Бенара из-за возникновения естественной конвекции в объеме жидкости распределение температуры вдоль ее свободной поверхности переставало быть однородным. Следовательно, на этой поверхности возникли движения из-за градиентов поверхностного натяжения.

А это, в свою очередь, привело к появлению у поверхности течения жидкости за счет сил вязкости.

Однако, как и в случае с естественной конвекцией, существования градиентов поверхностного натяжения еще недостаточно для возникновения течения внутри жидкости. Этот градиент должен быть достаточно велик, чтобы перекрыть влияние диссипативных эффектов вязкости и теплопроводности. Равновесие этих эффектов в пограничном слое на свободной поверхности жидкости определяется с помощью уже одного безразмерного критерия, названного в честь уже известного нам К. Марангони.

Критерий Марангони Ma представляет собой отноше-



Ячейки Бепара в поверхностном слое жидкости, подогреваемой снизу.

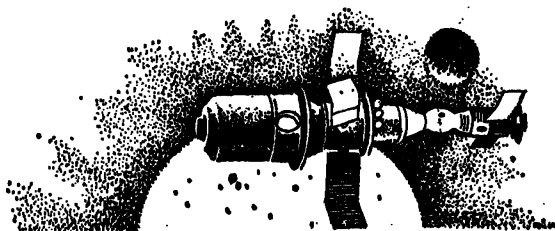
ние градиента поверхностного натяжения к произведению вязкости и теплопроводности. Когда число Марангони достигает критической величины, на поверхности жидкости возникает, а затем распространяется и на ее объем конвективное течение, индуцированное градиентами поверхностного натяжения — *термокапиллярная конвекция*.

Образующийся в этих условиях на свободной поверхности жидкости пограничный слой Марангони принципиальным образом отличается от вязкого пограничного слоя Прандтля, возникающего на стенке при течении жидкости в трубе. Если в пограничном слое Прандтля в силу условия прилипания скорость течения жидкости

равна нулю, то в слое Марангони она, напротив, имеет максимальное значение.

Другая важная отличительная особенность термокапиллярной конвекции состоит в том, что в области не слишком больших значений числа Ra ее интенсивность не зависит от величины микроускорений, действующих на борту космического аппарата. В невесомости поверхность жидкости может оставаться практически свободной даже в тех случаях, когда опыты проводятся в контейнерах. В этих условиях развитие термокапиллярной конвекции, очевидно, облегчается.

Поэтому в космических условиях технологические процессы производства материалов следует организовать таким образом, чтобы избежать вредных последствий термокапиллярной конвекции. Первые экспериментальные исследования термокапиллярных конвективных течений в космосе были выполнены на советской орбитальной станции «Салют-6» в мае 1981 года с помощью установки «Пион». К этим экспериментам мы еще вернемся в следующих главах.





КРИСТАЛЛЫ БЕЗ ВЕСА

АГРЕГАТНЫЕ И ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

При рассмотрении вопросов космической технологии часто используются такие понятия, как агрегатное и фазовое состояния, фаза и компоненты. Начнем с определения этих понятий.

Агрегатные состояния вещества различаются по характеру теплового движения молекул или атомов. Говорят о трех агрегатных состояниях — газообразном, жидком и твердом. В газах молекулы почти не связаны силами притяжения и движутся свободно, заполняя весь сосуд.

Главные отличительные особенности вещества в жидком агрегатном состоянии — это его способность сохранять свой объем и наличие свободной поверхности. Эти свойства объясняются тем, что в отличие от газов между молекулами жидкости существует достаточно сильное притяжение, в результате чего в ней возникает ближний порядок в расположениях соседних атомов.

Структура кристаллических твердых тел отличается высокой упорядоченностью — атомы расположены в узлах кристаллической решетки, возле которых они совершают лишь небольшие колебания. В результате кристаллические твердые тела сохраняют не только свой объем, но и форму, а при попытке каким-то образом изменить ее возникают значительные упругие силы, противодействующие этому изменению.

Наряду с кристаллами известна и другая разновидность твердых тел — аморфные тела. Они также сохраняют свой объем и форму, но в отличие от кристаллов их структура лишена полной упорядоченности: порядок сохраняется только в расположении соседних атомов, а на более значительных расстояниях он сменяется хаотическим расположением. В этом отношении аморфные тела больше похожи на жидкости. Наиболее важный пример аморфного состояния — это стекло.

Постоянство и красота форм кристаллов привлекали поэтов. Вот что писал Гёте в стихотворении «Колыбельная песня внуку»:

Для тебя я достал
Что-то спокойное. Это кристалл..
Гладкие столбики. Кто их гранил,
Блеск наводил, на концах заострил?

В отличие от Гёте мы знаем ответы на эти вопросы. И научились выращивать весьма необычные кристаллы, которых нет в природе и которые обладают удивительными свойствами. А переход к условиям невесомости открывает в этом отношении принципиально новые возможности.

Но сначала вернемся к определениям исходных понятий. Если вещество состоит из нескольких компонентов (химических элементов или их соединений), то его свойства зависят от относительной концентрации этих компонентов, а также от температуры, давления и других параметров. Поэтому возможны два случая: либо свойства вещества всюду в его объеме однородны, либо нет. Чтобы учесть это различие, вводят понятие фазы.

Если рассматриваемое вещество состоит из граничащих друг с другом однородных частей, физические или химические свойства которых различны, то такие части называют фазами. Например, смесь воды со льдом представляет собой двухфазную систему, потому что физические свойства воды и льда различны, а вода, в которой растворен воздух, — однофазную, потому что в ней отсутствует граница раздела между компонентами.

Фазовое состояние — понятие, основанное на структурном представлении фазы. Это состояние определяется только характером взаимного расположения атомов и молекул, а не их относительным движением. Наличие дальнего порядка в расположении атомов (полная упорядоченность) соответствует кристаллическому фазовому состоянию, ближнего порядка — аморфному фазовому состоянию, полное отсутствие порядка — газообразному состоянию.

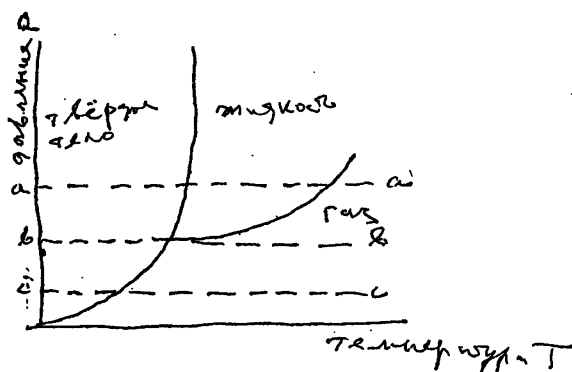
Фазовое состояние не обязательно совпадает с агрегатным. Например, аморфному фазовому состоянию соответствует обычное жидкое агрегатное состояние и твердое стеклообразное состояние. Твердому агрегатному состоянию соответствуют два фазовых — кристаллическое и аморфное (стеклообразное).

Переход вещества из одного фазового состояния в другое называется фазовым переходом, или превращением. Если две или больше различных фаз вещества при данных температуре и давлении существуют одновременно, соприкасаясь друг с другом, то говорят о фазовом равновесии.

На рисунке в качестве примера приведена диаграмма фазового равновесия однокомпонентной системы, построенная в координатах давление (P) — температура (T). Изобара (прямая постоянного давления) $a-a$ соответствует фазовым переходам твердое тело — жидкость (плавление — затвердевание). Изобара $c-c$ соответствует переходу твердое тело — газ (сублимация — конденсация),

а изобара в—в — существованию всех трех фаз в так называемой тройной точке при определенных значениях P и T .

Вдоль границ раздела фаз существуют зоны неустойчивых (метастабильных) фазовых состояний. Пример такого состояния — переохлажденная вода, которую при определенных условиях можно охладить значительно ниже нуля градусов по Цельсию. Достаточно бросить в такую воду камешек или просто стукнуть по сосуду, и она немедленно превращается в лед.



Фазовая диаграмма равновесия однокомпонентной системы.

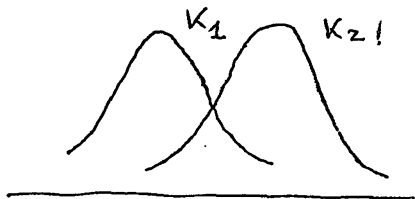
Как и почему возникают такие состояния и каким образом их можно использовать в космической технологии — об этом пойдет речь в следующем разделе.

КАК ПРОИСХОДИТ ПЛАВЛЕНИЕ И КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

Фазовые диаграммы систем, состоящих из двух или более компонентов, выглядят более сложно, чем это показано на рисунке. Состав твердых фаз зависит от температуры и от соотношения между компонентами в жидком состоянии. Процессы массообмена, происходящие в условиях невесомости, могут вести к изменению химического состава на фронте кристаллизации, а следовательно, и к перераспределению компонентов в твердом образце.

Но может измениться и положение самого фронта кристаллизации: температура плавления (кристаллизации) сплава может значительно отличаться от температур плавления его компонентов. Например, температуры плавления меди и серебра составляют 1083° и 961° С соответственно, а при их взаимном растворении эта температура понижается, достигая минимального значения 779° С в так называемой эвтектической точке (28% меди по весу).

Сходным образом происходит процесс затвердевания стеклообразных систем. Однако для того, чтобы при ох-



Зависимость от температуры скоростей образования зародышей (K_1) и их роста (K_2).

лаждении в жидкой стеклообразной массе началось образование кристаллов, необходимо выполнение некоторых дополнительных условий. Главное из этих условий — наличие в расплавленном стекле границ фазового раздела (стенки тигля, в котором варят стекло, включения примесей и т. п.).

Характер затвердевания расплавленного стекла определяется соотношением между скоростями двух процессов — скоростью образования новых центров кристаллизации (зародышей) и скоростью линейного роста уже возникших кристаллов. Обозначим эти две скорости K_1 и K_2 соответственно. Оба эти коэффициента по-разному зависят от температуры, и в зависимости от этого по-разному идет процесс затвердевания стекла.

Допустим, что максимальные значения K_2 приходятся на область более высоких температур, чем максимальные значения K_1 . В этом случае, очевидно, вновь возникающие центры кристаллизации не смогут увеличиваться в размерах. В результате становится возможным переохлаждение расплава — образуется стекло с аморфной, а

не с кристаллической структурой. Такое стекло можно рассматривать как застывшую сильно переохлажденную жидкость.

В невесомости возможна плавка стекла в условиях его левитации, то есть без контактов со стенками тигля. А это значительно облегчает условия его переохлаждения и, следовательно, расширяет возможный сортамент стекол, имеющих аморфную структуру. Кроме того, отсутствие контактов расплавленной массы со стенками тигля, с которых в расплав легко поступают различные примеси, ухудшающие качество стекла, позволяет рассчитывать на получение значительно более чистых материалов.

То же самое можно сказать о потенциальных преимуществах производства в невесомости металлов и сплавов. Использование явления переохлаждения и в этом случае в состоянии обеспечить улучшение структуры этих материалов — повышение однородности, уменьшение размера зерен и т. д. В принципе может быть поставлен также вопрос о производстве нового класса материалов — аморфных металлов.

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ И ПРОЦЕССЫ ТЕПЛООБМЕНА

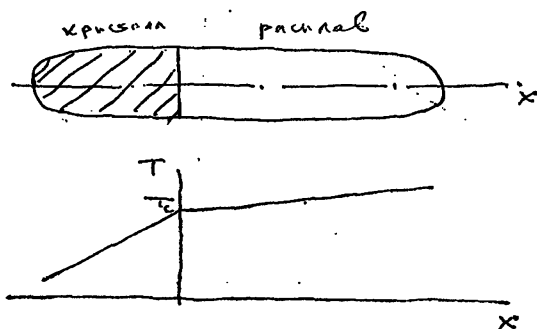
Граница раздела жидкой и твердой фаз в расплаве — это фронт кристаллизации. Если температура расплава повышается, то фронт кристаллизации приходит в движение. Чем определяется скорость кристаллизации?

Рассмотрим простейший случай, когда температура в системе жидкость — кристалл меняется только в одном направлении, а фронт кристаллизации плоский. При затвердевании очередной порции жидкости на этом фронте выделяется энергия — теплота плавления (кристаллизации). А это немалая величина; например, при кристаллизации одного грамма серебра выделяется 105 джоулей энергии, а при кристаллизации одного грамма меди — 214 джоулей. Поскольку из расплава к фронту кристаллизации при охлаждении поступает тепло, то отвести эту дополнительную энергию от фронта можно только в противоположную сторону, то есть через кристалл.

Скорость отвода тепла через кристалл определяется его теплопроводностью и градиентом температуры. Величина теплопроводности зависит от того, с каким веществом мы имеем дело, а градиент температуры можно менять, интенсивно охлаждая торец кристалла.

Величина теплового потока к фронту кристаллизации со стороны жидкой фазы зависит от механизма теплопередачи в расплаве. Здесь возможны два различных случая: перенос тепла в расплаве осуществляется вследствие чисто диффузионного механизма, то есть теплопроводностью, либо включается значительно более сильный механизм — конвекция.

Скорость фронта кристаллизации пропорциональна разности скоростей отвода тепла от фронта кристаллизации через твердую фазу и подвода к нему тепла из рас-



Распределение температуры вдоль слитка при его направленной кристаллизации (T_c — температура кристаллизации).

плава и обратно пропорциональна теплоте плавления. Может ли измениться скорость кристаллизации с переходом к условиям невесомости?

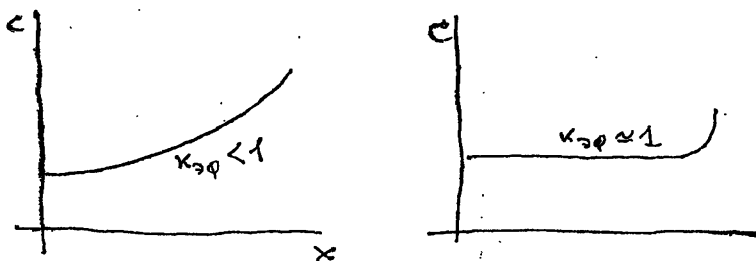
Может и скорее всего изменится, потому что в невесомости вероятна смена механизма переноса тепла в расплаве. Если условия эксперимента были таковы, что на Земле основной вклад в процессы теплопереноса в расплаве давала естественная конвекция, то можно ожидать, что в невесомости основную роль будет играть теплопроводность. Скорость кристаллизации в этом случае заметно возрастет.

Но возможно и другое: вследствие отрыва расплава от стенок ампулы, находящейся в зоне с градиентом температуры (идет охлаждение!), на свободной поверхности расплава в условиях невесомости возникнет конвекция термокапиллярного типа. Начавшись на поверхности, конвективное течение постепенно распространится на весь

объем расплава. В результате скорость кристаллизации снова уменьшится по сравнению с режимом чистой теплопроводности.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ В ОБРАЗЦАХ

Во многих случаях электрофизические, оптические и другие свойства полупроводников определяются примесными атомами, концентрация которых очень невелика, но которые ответственны за проводимость материала. Поэто-



Неоднородное и однородное распределение примеси вдоль слитка.

му для таких примесных полупроводниковых материалов однородность электрофизических характеристик определяется в первую очередь именно однородностью распределения примесей.

В современной технологии производства полупроводниковых материалов известен ряд факторов, которые ведут к различным нарушениям однородности распределения примесей в макро- или микромасштабе. Многие из этих факторов в той или иной степени связаны с явлениями конвекции в жидкой или газообразной фазах. Поэтому возникает вопрос: существуют ли основания считать, что перенос технологических процессов в условия невесомости обеспечивает более однородное распределение примесей?

Такие основания имеются. Рассмотрим, как поступают примеси в образец из расплава при его кристаллизации. Границу раздела твердой и жидкой фаз можно рассматривать как своеобразный потенциальный барьер, через который при фазовом переходе одни примеси диффундируют легко, а другие нет. В результате равновесная концентрация примесей в твердой и жидкой фазах оказывается различной.

Отношение концентрации примеси в кристалле к ее средней величине в расплаве называется эффективным коэффициентом распределения $K_{эфф}$. Для многих случаев этот коэффициент можно рассчитать теоретически, а зная его, можно определить и распределение примеси в кристалле.

Результаты расчетов сильно зависят от того, какие механизмы определяют массообмен в расплаве. Если роль конвективных эффектов переноса в расплаве невелика, а процесс массообмена носит диффузионный характер, то величина $K_{эфф} < 1$ и примесь распределяется вдоль основной части слитка равномерно.

Если массообмен носит конвективный характер, то $K_{эфф} \cong 1$ и распределение примеси резко неоднородно. Оба случая показаны на рисунках. Явление неоднородного распределения примеси вдоль слитка в случае конвективного массообмена называется макроликвацией, или макросегрегацией.

Космические эксперименты подтвердили эти представления. Например, в экспериментах по выращиванию кристаллов германия, легированных галлием, которые были выполнены на станции «Салют-6» с помощью аппаратуры «Кристалл», распределение галлия вдоль слитков соответствовало случаю макроликвации. Причина состояла в том, что продолжительность каждого эксперимента была значительной (около часа), и за это время в объеме расплава успевала развиваться конвекция, индуцированная термокапиллярным эффектом на его свободной поверхности.

Совсем другой результат был получен при проведении кристаллизации слитков германия на борту высотных ракет «Мир-2». Из-за кратковременности пребывания зонда с аппаратурой в невесомости (10 минут) термокапиллярная конвекция не успевала охватить объем расплава. В итоге распределение примесей вдоль космических образцов германия было однородным, то есть соответствовало режиму диффузионного роста.

ДИСЛОКАЦИИ

Еще один важный показатель совершенства полупроводниковых и других материалов — это плотность дислокаций. Чем меньше плотность дислокаций на каждом квадратном сантиметре площади поперечного сечения таких материалов, тем выше их качество.

Дислокации — это линейные дефекты структуры

кристаллической решетки. Они образуются при деформации сдвига в результате скольжения друг относительно друга атомных плоскостей решетки. Такое скольжение передко происходит только на части атомной плоскости, в результате чего образуется характерное искажение решетки. Это и есть линейная дислокация.

Вблизи дислокации решетка упруго деформирована, в ней имеются области сжатия и разрежения. Подобно примесным атомам, дислокации оказывают значительное влияние на электрофизические и другие свойства кристаллов.

Рассмотрим простейший процесс направленной кристаллизации слитков. В этом случае дислокации в перекристаллизованной части образца могут появляться вследствие одного из трех возможных механизмов (или всех трех сразу). Во-первых, они могут «прорасти» из затравочной части кристалла. Во-вторых, дислокации могут возникать в охлаждаемой части образца из-за термических напряжений, которые, в свою очередь, появляются потому, что разные части образца находятся при разных температурах. В-третьих, охлаждаемый образец может хорошо контактировать со стенками ампулы («зацепляться» за них). Но материал этих стенок, например, кварц и сам образец имеют, как правило, разные коэффициенты линейного расширения, в результате возникновения дислокаций становится неизбежным.

От первого источника возникновения дислокаций можно избавиться, если скорость кристаллизации больше скорости прорастания дислокаций, — они просто не смогут «догнать» фронт кристаллизации. Можно избавиться и от третьего источника — мы уже не раз отмечали, что в невесомости образец легко отрывается от стенок ампулы, «повисая» на мелких шероховатостях.

Сложнее избавиться от второго источника дислокаций, связанного с термическими напряжениями в самом кристалле. Для этого надо ограничить величину градиента температуры в образце. Оценки показывают, что для кристаллов германия, например, при градиенте температуры 10 градусов на сантиметр этот механизм будет давать плотность дислокаций не более 10^3 см^{-2} .

Эксперименты на станциях типа «Салют» и при запуске высотных ракет подтвердили эти предсказания. Плотность дислокаций в образцах германия, выращенных на станции «Салют-6» с помощью аппаратуры «Кристалл», не превосходила $2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$, а образцы, получен-

ные на высотных ракетах, имели еще более низкую плотность дислокаций. В контрольных образцах, выращенных на Земле, когда контакт со стенками был значительным, плотность дислокаций достигала $2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$.

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МНОГОФАЗНЫХ СИСТЕМ

Один из самых простых примеров многофазных систем — пеноматериалы, которые в твердом состоянии содержат в качестве включений большое количество пузырей. Производство таких материалов в космосе давно заинтересовало исследователей, поскольку в невесомости отсутствует сила Архимеда и пузырьки, насыщающие расплав, не должны всплывать вверх.

Картина процессов в многофазных системах довольно сложна. Во-первых, на границах раздела фаз пар — жидкость действуют силы поверхностного натяжения, причем величина этих сил зависит от температуры жидкости: обычно коэффициент поверхностного натяжения уменьшается с увеличением температуры. Поэтому, если распределение температуры в объеме жидкости неоднородно, то под действием сил поверхностного натяжения пузырьки приходят в движение. Обычно они начинают двигаться в ту сторону, где температура выше.

Во-вторых, при движении пузырьков они сталкиваются между собой и слипаются в более крупные (явлению коагуляции). В-третьих, чтобы пузырьки не схлопывались внешним давлением жидкости, давление пара внутри них не должно быть меньше давления в жидкости.

В ряде экспериментов возможности приготовления пеноматериалов в космосе были подтверждены (например, получены образцы сплава селен — теллур).

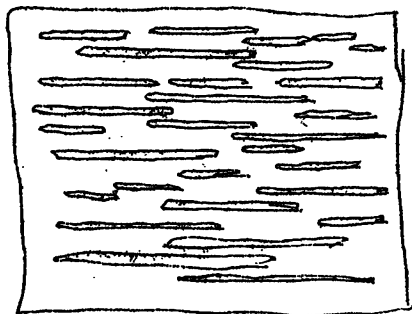
На тех же принципах основано получение в космосе другого класса многофазных материалов — так называемых композитов. Композиционные материалы представляют собой системы, состоящие из основного, или матричного, материала, который упрочнен специальными армирующими присадками в виде нитей, шариков и т. п. Примером такого материала является серебро, упрочненное нитями карбида хрома.

Поскольку матричный и упрочняющий материалы обладают разной плотностью, на Земле происходит их разделение. Этой трудности можно избежать, используя методы порошковой металлургии, однако в этом случае распределение нитей оказывается неоднородным — в

особенности, если используются нити с большим отношением длины к диаметру.

Как показали эксперименты, эффекты поверхностного натяжения и в этом случае могут приводить к расслоению материалов. Для преодоления этого нежелательного эффекта можно использовать специальные барьерные покрытия армирующей фазы, которые меняют свойства ее поверхности.

Проверка этого способа была осуществлена при запуске высотных ракет «Мир-2» на примере композиционного



Композиционный материал, упрочненный волокнами.

материала алюминий — волокна углерода. При использовании барьерного покрытия был получен композиционный материал с равномерным распределением нитей.

Эффекты поверхностного натяжения оказали решающее влияние в экспериментах еще с одним классом многофазных систем — сплавами, имеющими область несмешиваемости. Эти сплавы представляют собой смесь фаз с ограниченной взаимной растворимостью.

Ожидали, что в условиях невесомости такие сплавы удастся получить, используя тот факт, что при достаточно высоких температурах, превышающих зону несмешиваемости, их взаимная растворимость возрастает и они образуют однородную однофазную жидкость.

Подобные материалы могут обладать уникальными характеристиками: высокой прочностью, износоустойчивостью, сверхпроводящими свойствами и т. д. Известно около 500 двойных металлических систем такого рода, как сплавы свинец — цинк, алюминий — свинец, медь — свинец и большое число аналогичных стеклообразных си-

стем. Не все материалы этого типа удается получать в земных условиях.

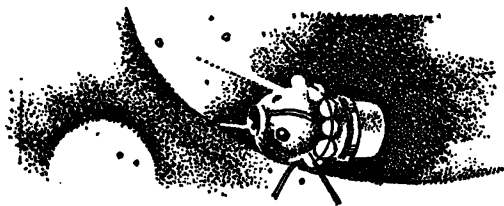
Возможности получения одной из подобных систем — сплава свинец — цинк — исследовались в 1975 году в рамках советско-американской программы «Союз» — «Аполлон». Руководил экспериментом американский исследователь Л. Лэйси.

Граница взаимной растворимости свинца и цинка лежит при 795°C . В целях взаимного перемешивания системы путем диффузии она поддерживалась в расплавленном состоянии при более высокой температуре около часа.

Вопреки ожиданиям доставленные из космоса образцы оказались резко неоднородными по составу. Постановщики эксперимента, чтобы объяснить свою неудачу, предположили, что температура растворимости системы должна быть значительно выше, чем считалось ранее, а коэффициент диффузии — на один-два порядка меньше.

Однако последующий анализ показал, что в этих предположениях нет необходимости. Действительная причина разделения компонентов в опыте американских исследователей состояла во взаимном термокапиллярном дрейфе микрообъемов сплава, содержавших разные концентрации свинца и цинка. Происходило это, когда в процессе охлаждения температура расплава оказывалась ниже порога растворимости. Словом, и здесь решающую роль сыграли эффекты поверхностного натяжения...

В Советском Союзе обстоятельные исследования особенностей кристаллизации многофазных систем выполнены в Институте металлургии АН СССР Л. И. Ивановым, В. Н. Пименовым и их сотрудниками. В серии экспериментов, проведенных на борту орбитальных станций «Салют-6» и «Салют-7», они установили целый ряд важных физических особенностей этих процессов.





ТАЙНЫ КАПЛИ

УСТОЙЧИВОСТЬ ЖИДКИХ ПЕРЕМЫЧЕК

Одно из важных преимуществ, которое дает космическая технология, состоит в возможности получения больших жидких перемычек между твердыми стержнями. Получение таких перемычек составляет основу ряда мето-

дов производства перспективных полупроводниковых материалов и сплавов — это методы зонной плавки, движущегося растворителя и некоторые другие. Не станем сейчас останавливаться на особенностях каждого из этих методов. Поставим другой вопрос: если в невесомости можно получать более крупные, чем на Земле, жидкие перемиčky — и соответственно выращивать более крупногабаритные слитки, — то где пределы размеров этих перемиček? Каковы области их устойчивости? Практически это наиболее важные вопросы.

Исследовать их можно теоретически. О том, как это делается, уже говорилось в разделе «Гидромеханика невесомости». Но, разумеется, теоретические рекомендации нуждались в экспериментальной проверке.

Сначала эксперименты проводились с использованием метода гидроневесомости, когда столб одной прозрачной жидкости находится внутри другой, имеющей одинаковую с ней плотность. В этих опытах было показано, что цилиндрический столб жидкости остается устойчивым до тех пор, пока отношение его длины к диаметру не превосходило критической величины. Такой результат находился в соответствии с предсказанием Рэлея, сделанным для условий невесомости.

Затем исследовали влияние на устойчивость вращения зоны. Вращать жидкую перемиčku в реальных установках необходимо, чтобы исключить возможное влияние несимметричности системы ее нагрева. Оказалось, что вращение немного уменьшает максимально возможную длину устойчивой зоны. Во всех случаях зона оставалась осесимметричной.

Следующий шаг предприняли американские исследователи во главе с Дж. Карузерсом. В 1974 году они провели опыты по определению устойчивости жидких перемиček из мыльного раствора на американской станции «Скайлаб». Изучалось влияние на устойчивость перемиček разных факторов: вращения дисков, на которых удерживались зоны, изменения расстояния между ними, осесимметричных и неосесимметричных деформаций перемиček.

Чтобы повысить точность наблюдений и расширить диапазон исследуемых условий, европейскими исследователями для решения тех же задач был разработан специальный модуль по физике жидкостей (головной разработчик — итальянская фирма ФИАТ).

Модуль по физике жидкости впервые был испытан на борту орбитального блока «Спейслэб» в 1983 году. Программа экспериментов включала в себя изучение затухания колебаний в жидкости, кинетики ее растекания по поверхности твердого тела, свободной конвекции, капиллярных сил, взаимосвязанных движений жидких и твердых систем, устойчивости жидкой перемычки в зависимости от условий эксперимента.

Из-за ошибки, допущенной разработчиками аппаратуры, первое испытание модуля для исследований по физике жидкостей на борту «Спейслэб» закончилось неудачей. Исследуемая жидкость (кремнийорганическое масло) не была помещена в контейнер с оптическими стеклами, а находилась в рабочей камере, которая свободно сообщалась с рабочим отсеком орбитальной лаборатории. В результате масло вытекло из установки, и операторам пришлось потратить много времени, чтобы собрать его.

К этому остается добавить только то, что никогда не ошибается только тот, кто ничего не делает. Несомненно, практически важные исследования по устойчивости жидких зон будут продолжены.

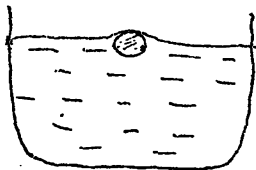
ПУЗЫРИ И КАПЛИ

Лет 15 назад в академическом журнале «Доклады АН СССР» была опубликована статья с поэтическим названием «Явление капиллярной игры в мяч в условиях невесомости». Авторы статьи рижские физики И. М. Кирко, Ю. П. Добычин и В. И. Попов поставили красивый эксперимент: сосуд, в котором находилась капля ртути массой 20 граммов, залитая раствором соляной кислоты, падал в башне сбрасывания. Сосуд размещался в контейнере, где находилась кинокамера, с помощью которой велась регистрация процессов, происходивших в условиях невесомости.

Эти процессы были очень интересны. Капля ртути, лежавшая в начале опыта неподвижно на стеклянной пластинке и имевшая форму чечевицы, в невесомости подпрыгивала и летела вверх. При этом форма ее все время менялась, становясь постепенно сферической. Можно было оценить, какая при этом энергия, обусловленная работой сил поверхностного натяжения, поступает в окружающую жидкость. Скорость полета капли в начале

движения составляла 8,7 сантиметра в секунду. Преодолевая сопротивление жидкости, капля пульсировала, но ее форма не стала сферической.

Долетев до верхней границы соляная кислота — воздух, капля ударилась о нее. Граница изогнулась и... заставила каплю двигаться в обратном направлении! Силы поверхностного натяжения на границах раздела трех фаз соляная кислота — воздух — ртуть сработали, подобно упругим силам теннисной ракетки, отбивающей мяч, — и капля изменила направление полета.



Капля ртути в соляной кислоте.

А если в матричной жидкости присутствует не одна, а несколько капель, то как они поведут себя в условиях невесомости? Как долго будут они сохранять устойчивость, как будет происходить процесс их слияния?

Теоретически вопрос о слиянии капель при их сближении был исследован еще в 1944 году советским физиком-теоретиком Я. И. Френкелем. В предложенной им математической модели этого процесса сделан ряд упрощений. Во-первых, Френкель предположил, что контакт сферических капель происходит в первый момент только в одной точке. Во-вторых, он считал, что на начальной стадии процесса слияние капель происходит только под действием сил, действующих на вогнутых участках поверхности сфер при их контакте, а вся остальная часть поверхности капель не принимает участия в этом процессе. В-третьих, Френкель предположил, что единственные силы, определяющие слияние жидких сфер, — это силы поверхностного натяжения. Силы веса не учитываются моделью Френкеля, которая поэтому, строго говоря, применима только к условиям невесомости. С помощью своей теории Я. И. Френкель смог количественно рассчитать скорость слияния капель.

Теорию Френкеля проверил экспериментально харьковский физик Я. Е. Гегузин. В опытах был использован

принцип гидроневесомости, предложенный Плато. Оказалось, что теория Френкеля в основных чертах подтверждается, но многие детали в реальных условиях выглядят иначе — слишком много упрощений было внесено в расчетную модель. Например, при слиянии жидких взаимно не растворимых сфер движется не только зона перемычки между ними, но и окружающие ее участки поверхности. Экспериментально были исследованы также и последующие стадии слияния капель, которые не предсказываются теорией.

На борту орбитальной станции «Салют-5» в 1976 году был поставлен эксперимент «Поток». В этом эксперименте исследовалось поведение системы мелких пузырей в невесомости. Газовый пузырь в жидкости, которая заполняла сферическую полость в сосуде с прозрачными стенками, перед началом опыта был разбит на большое количество мелких пузырей. Жидкость находилась в изотермических условиях, периодические смещения пузырьков относительно центров равновесия под действием малых переменных ускорений были незначительны. Постоянная — точнее, медленно меняющаяся — компонента ускорения могла приводить к смещению системы пузырьков по направлению к одной из стенок сосуда. Однако космонавты Б. В. Волынов и В. М. Жолобов отметили неожиданный результат: за пять суток все мелкие пузырьки постепенно слились между собой и в жидкости образовался один большой пузырь. Почему это произошло?

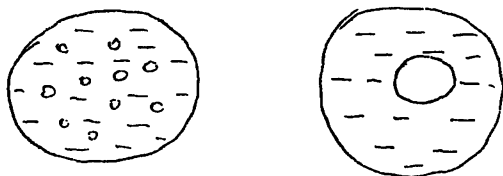
Давление воздуха внутри пузырька зависит от его радиуса: чем меньше радиус, тем больше давление. Когда космонавты встряхнули прибор, в жидкости образовались пузырьки разного размера. Поэтому в разных пузырьках была разная величина давления и концентрация газа. И вели себя эти пузырьки по-разному.

Рассмотрим сначала поведение пузырька, концентрация газа внутри которого была больше, чем в окружающей его жидкости. Из-за разности концентраций должен возникнуть диффузионный поток газа, направленный из пузырька в сторону жидкости и стремящийся выровнять перепад концентраций. В результате размер пузырька будет уменьшаться и он в конце концов исчезнет.

А как поведут себя более крупные пузырьки? Для них картина будет обратной: концентрация газа в пузырьке меньше, чем в окружающей жидкости, и поток газа будет направлен в сторону пузырька. В результате такие пу-

зырьки будут постепенно расти. Концентрация газа, растворенного в жидкости, при этом снижается, и исчезать будут друг за другом все более крупные пузырьки. В конце концов в жидкости останется только один крупный пузырь. Именно такой результат и наблюдали на станции «Салют-5» космонавты Воинов и Жолотов.

Разумеется, повторить этот опыт на Земле нельзя: поведение пузырей будет определяться в первую очередь силой Архимеда.



Эксперимент «Поток» на станции «Салют-5»
(слева — начало эксперимента, справа — конец).

УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОЦЕССОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Когда фронт кристаллизации, движущийся в расплаве, теряет устойчивость, в слитке образуются различные дефекты. Сначала структура образцов становится ячеистой — возникают параллельные столбчатые кристаллики, вытянутые в направлении роста. На поверхности раздела кристалл — расплав возникает плоская сетка. Затем при дальнейшем усилении процессов неустойчивости во внутренней части образцов появляются дендриты — кристаллические образования «древовидной» структуры. В пределе вместо монокристаллических образцов могут быть получены образцы, обладающие поликристаллической структурой, иными словами, состоящие из большого числа зерен (блоков), кристаллические решетки которых разориентированы друг относительно друга. Практическая ценность таких образцов, естественно, значительно снижается.

Многие технологические процессы производства материалов ориентированы на выращивание монокристаллических слитков, которые представляют собой единый кристалл с упорядоченной структурой решетки. Количество дефектов структуры должно быть минимальным. Поэтому

технологические процессы производства перспективных материалов должны, в частности, обеспечивать достаточно высокую устойчивость процессов кристаллизации.

Типичный механизм потери устойчивости состоит в явлении так называемого концентрационного пересохлаждения. Это явление состоит в следующем. Допустим, что примесь оттесняется фронтом кристаллизации в сторону расплава, тогда перед фронтом образуется область повышенной концентрации. Но равновесная температура кристаллизации есть функция химического состава.

В результате возможны два случая. В первом — фактический градиент температуры и распределение концентрации перед фронтом таковы, что возникший на фронте случайный выступ оказывается окруженным пересохлажденной жидкостью и будет продолжать расти. Иными словами, плоский фронт в этом случае неустойчив.

В противоположном случае, когда распределение температуры и концентрации примеси в зоне расплава, непосредственно примыкающей к фронту кристаллизации, таковы, что случайно образовавшийся выступ попадает в область перегретой жидкости. Это способствует его растворению. Плоский фронт кристаллизации в этих условиях сохраняет устойчивость.

Количественный анализ условий устойчивости плоского фронта кристаллизации показывает, что целесообразно обеспечить достаточно высокую величину градиента температуры в расплаве вблизи фронта, а скорость движения фронта не должна превышать некоторой критической величины.

Переход к условиям невесомости оказывает существенное влияние на устойчивость фронта кристаллизации. Рассмотрим случай, когда расплав до начала кристаллизации прогрет равномерно, а конвекция отсутствует. В некоторый момент начинается охлаждение образца со стороны затравки и возникает движение фронта кристаллизации в сторону расплава. Вследствие отсутствия конвективного перемешивания непосредственно вблизи фронта градиент температуры оказывается выше, чем в условиях аналогичного опыта на Земле. А это повышает устойчивость фронта кристаллизации. Если в расплаве возникает ламинарная конвекция, индуцированная термокапиллярным эффектом, то это ведет к ограничению скорости кристаллизации и, следовательно, к повышению устойчивости фронта.

В условиях невесомости улучшается также однород-

ность распределения примесей в образцах. В режиме диффузионного роста из расплава отсутствует явление макроликвации, характерное для земных условий.

Слитки, выращенные на Земле, могут вследствие конвекции обладать сложным строением в микромасштабе. Это так называемая полосчатость в распределении примесей вдоль образца, которая существенно ухудшает качество слитков. С переходом в условия невесомости роль тепловой конвекции резко падает и однородность слитков может значительно возрасти.

Эксперименты, проведенные на станциях «Салют-6» и «Салют-7», при запуске высотных ракет «Мир-2», а также аналогичные исследования, выполненные за рубежом, в целом подтвердили эти ожидания. Космические образцы кристаллов германия, кремния, антимонида индия и других полупроводниковых материалов обладали намного более высоким качеством, чем их аналоги, выращенные на Земле. Многие из этих образцов обладали монокристаллической структурой, на порядки снизилась плотность дислокаций, а распределение примесей стало во многих случаях более однородным.

МЕНУЭТ С ПОВЕРХНОСТНЫМ НАТЯЖЕНИЕМ

В книге «Символическая логика», которую написал Льюис Кэрролл, известный английский математик и писатель, есть странное на первый взгляд высказывание: «К рыбе, не умеющей танцевать менуэт, относятся без почтения». Не могут ли технологические эксперименты в космосе оказаться в положении такой рыбы? В самом деле, перейдя в невесомость, сумели избавиться от конвекции гравитационного типа — это хорошо. Но взамен получили термокапиллярную конвекцию, которая, по оценкам, может быть не менее интенсивной. Спрашивается, нельзя ли все-таки научить рыбу танцевать менуэт и что делать с термокапиллярной конвекцией?

Мы не случайно вспомнили книгу Кэрролла, посвященную логике. В физике существует такой прием: если какой-то эффект мешает вам решить задачу и вы не знаете, как от него избавиться, то поставьте вопрос иначе: а нельзя ли этот эффект использовать и найти решение, не подавляя, а наоборот, опираясь на него? Нельзя ли использовать поверхностное натяжение для того, чтобы управлять конвекцией, индуцированной поверхностным натяжением?

Такие возможности существуют, и их довольно много. Начнем с того, что вспомним: термокапиллярная конвекция — процесс довольно инерционный. Если создать для жидкости такие условия, что вдоль ее свободной поверхности будет существовать стационарный перепад температуры, то на этой поверхности образуется пограничный слой Марангони. Толщина этого слоя зависит от перепада поверхностного натяжения вдоль свободной поверхности жидкости, а также от ее плотности и вязкости. В случае электронных расплавов (полупроводники, металлы) толщина этого слоя очень невелика — доли миллиметра, а скорость течения в нем составляет порядка нескольких сантиметров в секунду. Такой слой формируется на поверхности жидкости за очень малое время — меньше 1 секунды.

Но сколько потребуется времени, чтобы термокапиллярное течение, возникнув на поверхности расплава, охватило весь его объем? Оценки показывают: намного больше, в типичных условиях на это потребуются десятки минут.

Разумеется, эти оценки надо было подтвердить прямыми экспериментами. В следующих разделах мы расскажем о том, как эта задача была решена с помощью установки «Пион». А пока заметим следующее: термокапиллярная конвекция в объеме жидкости развивается сравнительно медленно.

На этом свойстве термокапиллярной конвекции основан первый способ преодоления ее вредных последствий: надо провести весь технологический процесс быстро и закончить его до того, как конвекция в жидкости станет достаточно интенсивной.

Решали эту задачу при запуске высотных ракет «Мир-2». Эксперименты проводились на образцах германия и кремния, которые выращивались на установках экзотермического нагрева. Продолжительность состояния невесомости составляла всего 10 минут, поэтому образцы быстро нагревались до температуры плавления, а потом быстро охлаждались, чтобы процесс кристаллизации завершился в невесомости.

Скорость кристаллизации слитков в этих опытах была необычайно высока — до 18 миллиметров в минуту при диаметре 6—8 миллиметров. На Земле с той же аппаратурой были получены поликристаллические образцы. Слитки, выращенные в невесомости, обладали монокристаллической структурой, а состояние их поверхности

свидетельствовало, что контакт со стенками ампул был минимальным.

Если бы эксперимент продолжался около часа, как это для тех же материалов было на борту орбитальных станций, возникновение в объеме жидких образцов германия и кремния интенсивной термокапиллярной конвекции стало бы неизбежным. В условиях быстрой кристаллизации на борту высотных ракет этого не должно было произойти.

Когда массообмен в расплаве определяется конвекцией, распределение примесей вдоль слитков оказывается неоднородным — наблюдается макроликвация. Когда массообмен носит диффузионный характер, примеси распределены в основной части слитка равномерно. Образцы германия и кремния, выращенные способом быстрой кристаллизации на высотных ракетах, обладали однородным распределением легирующих примесей. Отсюда следует однозначный вывод: термокапиллярная конвекция в этом режиме существенной роли не играла.

Другой способ подавления термокапиллярной конвекции основан на зависимости критерия Марангони от перепада поверхностного натяжения. Безразмерный критерий Марангони определяет интенсивность термокапиллярных течений. Его величина прямо пропорциональна перепаду поверхностного натяжения вдоль свободной поверхности жидкости, а этот перепад, в свою очередь, пропорционален перепаду температуры, то есть разности между максимальным значением температуры в расплаве и температурой плавления на фронте кристаллизации.

А теперь изменим условия эксперимента: не меняя максимального и минимального значения температуры на крайних точках свободной поверхности жидкости, заставим в промежуточной области эту температуру колебаться, например, по гармоническому закону. Технически осуществить это несложно — достаточно «гофрировать» систему подогрева образца, например, путем ввода дополнительных витков джоулевых нагревателей. Как поведет себя в этом случае термокапиллярное течение на такой поверхности, какими свойствами будет обладать пограничный слой Марангони?

Скорее всего возникнет система более мелких вихрей, локализованных вблизи поверхности и слабо проникающих в объем жидкости. Интенсивность термокапиллярной конвекции при этом может снизиться. Эффективность этого способа управления термокапиллярной конвекцией

была экспериментально проверена на установке «Пион». Опыты подтвердили, что, изменяя распределение температуры вдоль свободной поверхности жидкости, можно действительно воздействовать на характер конвективных течений в ее объеме.

Третий способ управления термокапиллярной конвекцией основан на использовании свойств поверхностно-активных веществ (ПАВ). Эти вещества обладают той особенностью, что с увеличением их концентрации в жидкости ее поверхностное натяжение быстро снижается. Например, добавление к дистиллированной воде незначительных количеств жирных кислот, спиртов и некоторых других веществ снижает поверхностное натяжение более чем в два раза.

ПАВы образуют на поверхности жидкости тонкую пленку толщиной в несколько молекулярных слоев. Эта пленка устойчива по отношению к диффузионным процессам рассеивания.

Если жидкость, содержащая ПАВ, попадает в условия, когда вдоль ее свободной границы образуется градиент температуры, пленка будет препятствовать возникновению на этой границе градиента поверхностного натяжения. Происходит это потому, что пленка ПАВ с изменением температуры перераспределяется по поверхности и компенсирует изменение поверхностного натяжения с изменением температуры. Этот эффект называется положительной адсорбцией.

Возможность практического использования положительной адсорбции для подавления термокапиллярной конвекции была впервые подтверждена в модельных экспериментах с установкой «Пион», выполненных в 1984 году на орбитальной станции «Салют-7».

Существуют и другие возможные способы управления термокапиллярной конвекцией в невесомости. Можно, например, вводить в тонкий слой по периферии образцов, предназначенных для плавки в невесомости, добавки, обладающие высокой вязкостью либо большой плотностью. Число Марангони обратно пропорционально и вязкости, и плотности. Поэтому такие добавки будут снижать интенсивность термокапиллярной конвекции, а их поступление в центральные части слитков не будет играть существенной роли в силу отсутствия конвективного массообмена.

Получается, что менуэт в невесомости — не безнадежное дело.

ПРИНЦИПЫ ЛЕВИТАЦИИ

Левитаторы — это устройства, предназначенные для фиксации образцов в зоне нагрева без контактов со стенками камеры в условиях действия малых остаточных ускорений на борту космических аппаратов. Эти приборы позволяют полностью реализовать такое важное преимущество технологических процессов в невесомости, как бесконтейнерное производство сплавов и стеклообразных сред.

В настоящее время в СССР и за рубежом разрабатываются левитаторы трех различных типов — ультразвуковые, электромагнитные и электростатические. Рассмотрим принципы их действия.

Вряд ли поэт Н. Заболоцкий когда-либо слышал о левитаторах. Но в его стихах можно найти почти точное описание работы акустического левитатора:

Колеблется воздух,
Прозрачен и чист,
В сияющих звездах
Колеблется лист.

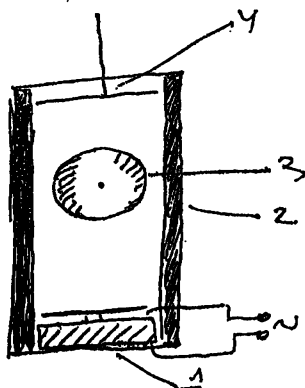
«Колеблется воздух» — в цилиндрической камере акустического левитатора создается стоячая звуковая волна. Для ее создания на одном из торцов камеры размещается пьезоэлектрическая пластина. На пластину от генератора электромагнитных колебаний подается сигнал; обусловленные пьезоэффектом вибрации пластины создают звуковую волну в газе, который заполняет камеру.

«В сияющих звездах» — боковые стенки камеры окружены витками электронагревательной катушки. Тепловое излучение стенок плавит образец, который давлением звуковой волны удерживается в центре камеры («колеблется лист»). Вот и все, только у поэта получилось короче и, конечно, более выразительно.

Читатель, конечно, понимает: это шутка. В действительности устройство прибора намного сложнее. Для создания стоячей волны в камеру необходимо ввести отражатель. По мере нагрева и охлаждения образца резонансная частота стоячей звуковой волны меняется — скорость звука зависит от температуры. Чтобы компенсировать это изменение, надо или перемещать отражатель, или непрерывно менять плотность газа, наполняющего левитатор. Нерешенную пока проблему представляет собой подбор

пьезоэлемента, рассчитанного на работу при высоких температурах. Словом, трудностей при создании таких приборов немало. Поэтому пока опробованы только небольшие модели таких установок, работавшие в области ограниченных параметров.

Другой тип левитатора — индукционный электромагнитный левитатор — рассчитан на работу с электропроводящими материалами (металлы и сплавы). Принцип его действия основан на использовании электромагнитных сил. Представим себе две катушки, по виткам которых



Акустический левитатор: 1 — пьезоэлемент, 2 — камера, 3 — расплав, 4 — отражатель звуковой волны.

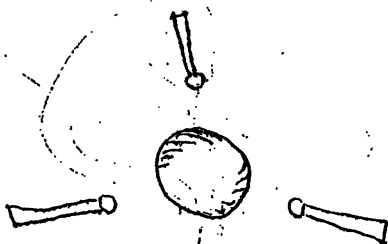
протекает переменный ток и между которыми размещен исследуемый образец. Магнитное поле тока I_1 , протекающего через катушку, индуцирует в электропроводном образце ток I_2 . По закону Ампера оба тока отталкиваются друг от друга.

Нетрудно подобрать такие условия, при которых электромагнитные силы, действующие между катушками и образцом, будут компенсировать остаточные ускорения. Преимущество установок этого типа состоит в том, что они пригодны не только для удержания, но и для нагрева образцов токами проводимости.

К сожалению, такие установки обладают также и целым рядом недостатков. Они пригодны только для ограниченного круга веществ, потребляют большую мощность при плохом КПД, могут возбуждать в расплаве конвективные течения, индуцированные электромагнитными си-

лами. Поэтому практические разработки в этом направлении отсутствуют.

В отличие от индукционного электростатический левитатор пригоден для удержания образцов из диэлектрического материала (стекло). Образец из такого материала находится в неоднородном электрическом поле, которое создают вокруг него стержнеобразные электроды, находящиеся под потенциалом около 5 киловольт. Электроды включены в высокочастотный контур с опорной частотой $f_0 = 2,3$ мегагерца. При смещении образца под дей-



Электростатический левитатор.

ствием малых ускорений относительно положения равновесия меняется емкость контура, а следовательно, и частота колебаний f .

В блоке управления левитатора разность частот $f - f_0$ преобразуется в дополнительное напряжение, которое подается на соответствующий электрод с тем, чтобы компенсировать смещение и вернуть образец в положение равновесия в центре рабочей камеры. Во внешнем электрическом поле происходит поляризация незаряженного образца, и электростатические взаимодействия между образцом и электродами восстанавливают равновесие.

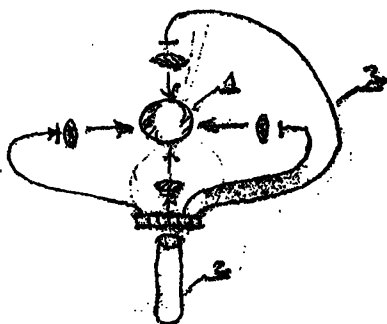
Основанная на этих принципах установка разработана в ФРГ и подготовлена к испытаниям на орбитальном блоке «Спейслэб».

Может быть предложен также ряд других принципов создания устройств подобного рода, например, электромагнитный демпфер, позволяющий гасить вибрации, действующие на борту космического аппарата.

Характерное время затухания — несколько секунд. Поэтому для гашения не слишком низкочастотных колебаний этот метод может представлять практический интерес.

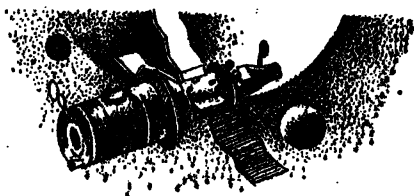
Две другие перспективные схемы левитаторов — ионно-плазменный и лазерно-абляционный. Первый из них основан на нагреве и удержании образца пучками плазмы инертного газа, например, ксенона.

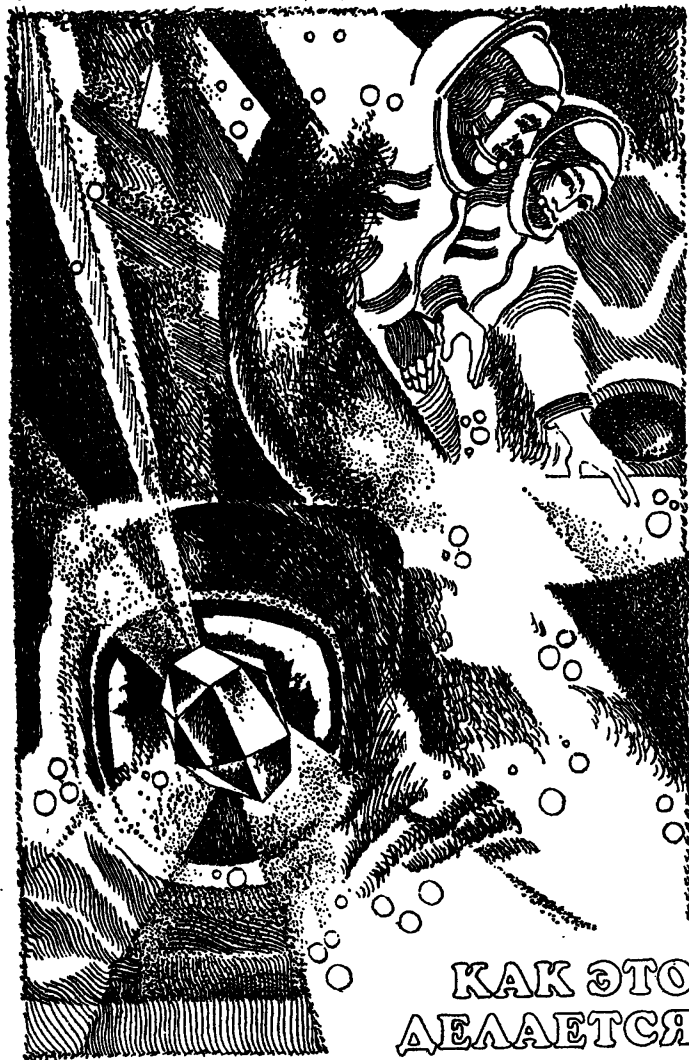
Лазерно-абляционный левитатор основан на испарении порций материала с поверхности образца короткими импульсами лазерного излучения длительностью 10^{-7} — 10^{-8} секунды. Для решения задачи нужен импульсный лазер со средней мощностью не более 100 ватт, работающий с частотой повторения несколько герц. Компенсация



Абляционно-лазерный левитатор: 1 — образец, 2 — лазер, 3 — световоды.

малых ускорений осуществляется силой реакции царов вещества образца, выбрасываемых из лунки на его поверхности при попадании импульса лазерного излучения. Потери вещества образца, по оценкам, не превосходят долей процента за час работы установки.





КАК ЭТО ДЕЛАЕТСЯ

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ПРИБОРОВ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Вспоминаются шуточные строчки Л. Кэрролла из стихотворения «Охота на Змея»:

Пять признаков (пять, повторяю вам опять),
По которым всегда мы проверим,

Столкнулись ли мы среди бури и тьмы
С настоящим, доподлинным Змерем.

Различных типов аппаратуры, которая используется для решения задач космической технологии, тоже пять. Во-первых, это приборы для контроля физических условий проведения экспериментов в области космической технологии. К числу таких приборов в первую очередь относятся измерители малых ускорений. Эти приборы были рассмотрены во второй главе книги. Во-вторых, это установки, предназначенные для проведения фундаментальных исследований в области научных основ космической технологии. Об этих установках пойдет речь в этой главе.

В-третьих, это печи для нагрева образцов. В этих установках используются разные методы нагрева, и с их помощью решаются разные задачи — исследовательские и технологические. Объединяет их главное — физическое единство основных принципов работы. Эти установки также будут рассмотрены в настоящей главе. В-четвертых, это левитаторы, которые предназначены для получения образцов бесконтейнерными методами. Установки этого типа ввиду сложности устройства получили пока очень ограниченное распространение. Принципы их построения были рассмотрены в предыдущей главе.

И наконец, в-пятых, установки для производства медико-биологических препаратов. Принципы устройства аппаратуры этого типа специфичны, и их удобнее рассмотреть в главе, посвященной производству органических материалов.

В Советском Союзе и за рубежом в течение последних 10—15 лет развернуты серьезные исследования по созданию всех пяти типов аппаратуры, предназначенной для решения как задач исследовательского плана, так и для практического обеспечения этапа опытно-промышленного производства некоторых материалов на борту пилотируемых и автоматических космических аппаратов.

Особенно разнообразны печи, которые предназначены для выращивания образцов полупроводниковых материалов, приготовления металлов и сплавов, варки стекла. Аппаратура, основным элементом которой являются печи, построена с использованием электронагревных элементов джоулева типа, тепла экзотермических химических реакций, зеркально-лучевых методов нагрева образцов. Разработаны печи, в которых использованы устройства для левитации образцов. Основная часть технологи-

ческих экспериментов, проведенных к настоящему времени в СССР и за рубежом, выполнена с использованием аппаратуры такого типа. По этим причинам основное внимание в данной главе будет уделено именно печам для проведения космических плавок образцов.

ЭЛЕКТРОНАГРЕВНЫЕ ПЕЧИ

Преимущество ампульных печей электронагревного типа состоит в том, что при конструктивной простоте они обеспечивают проведение массовых технологических экспериментов с широким кругом веществ и на основе различных технологических методов выращивания образцов. Поэтому на начальном этапе исследований по космической технологии такие печи использовались наиболее широко.

Разработанные к настоящему времени варианты электронагревных печей построены на основе одного из двух принципов: регулирование по времени тепловых характеристик или протяжка ампулы с образцом через стационарную тепловую зону. Порядок работы каждого из этих вариантов пояснен на рисунках.

В первом случае вначале осуществляется нагрев заготовки до температуры плавления или сублимации, затем после выдержки при стационарных тепловых условиях начинается охлаждение. Путем регулирования тепловых характеристик можно обеспечить темп охлаждения, необходимый для проведения выбранного технологического процесса.

Во втором случае ампула с помощью специального механизма протягивается через стационарную тепловую зону. Преимущество этого способа состоит в том, что распределение температуры поддерживается неизменным в течение всего экспериментального цикла, и это упрощает регулирование температуры внутри самой ампулы. Недостаток метода состоит в том, что вибрации, сопровождающие работу механизма протяжки ампулы, могут оказать влияние на качество образца.

Особенности конструкции этих установок рассмотрим более подробно на примере аппаратуры «Кристалл», на которой в СССР выполнено больше всего экспериментов. Аппаратура «Кристалл» состоит из электронагревной камеры, пульта управления и кассеты ампул, в которых размещаются исследуемые образцы.

Космонавты при работе с аппаратурой «Кристалл»

выполняют подготовительные и заключительные операции, определяют циклограмму технологического процесса и устанавливают соответствующий режим на пульте управления. В течение эксперимента космонавты проводят периодический контроль за работой аппаратуры, на пульт управления которой на цифровое табло выведены показания датчиков температуры, размещенных на корпусе установки, вблизи зоны плавления и в других точках установки. Сбор, обработка и хранение информации о ходе технологического процесса производится автоматически устройством управления. Заданная космонавтами на пульте программа эксперимента принимается этим устройством, которое выдает необходимые команды на исполнительные органы аппаратуры.

Аппаратура «Кристалл» предназначена для выращивания полупроводниковых кристаллов и эпитаксиальных структур из расплава или из паровой фазы в условиях невесомости. Исследуемый материал на Земле помещался в специальную кварцевую ампулу, которая вакуумировалась, запаивалась и могла в случае необходимости устанавливаться в защитный контейнер. При проведении эксперимента космонавт вынимал ампулу из кассеты, устанавливал ее в рабочую камеру печи, после чего включал аппаратуру. После завершения эксперимента и охлаждения печи ампула с образцом извлекалась из установки и подготавливалась для возвращения на Землю.

Установка «Магма-Ф» отличается от аппаратуры «Кристалл» тем, что при той же потребляемой мощности она позволяет выращивать образцы более крупного размера. В конструкцию печи введен также ряд технологических усовершенствований, повышающих ее ресурс и улучшающих тепловые характеристики.

Для измерения профиля температур в технологической ампуле и для определения уровня микроускорений, действующих на станции во время проведения экспериментов, установка «Магма-Ф» оснащена дополнительно регистратором температуры и акселерометром. Оба устройства разработаны совместно с французскими специалистами.

Эксперименты с аппаратурой «Магма-Ф» проводились на станции «Салют-7». Часть этих экспериментов была выполнена по совместной советско-французской программе.

При разработке нового поколения установок электронагревного типа, предназначенных для проведения фун-

даментальных исследований в области космической технологии, основное внимание уделяется повышению точности поддержания технологических режимов и созданию прецизионных измерительных устройств, предназначенных для регистрации, контроля и стабилизации параметров при экспериментах. На установке «Кристаллизатор», например, точность поддержания температуры повышена до $\pm 0,3^\circ$ в диапазоне $500\text{--}850^\circ\text{C}$, а точность ее измерения — до $\pm 0,25^\circ\text{C}$. Установка снабжена также измерителем малых ускорений.

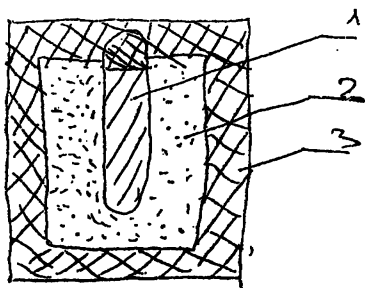
ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИЕ ПЕЧИ

Установки электронагревного типа малоприспособны для проведения экспериментов в условиях кратковременной невесомости на борту высотных ракет, так как не обеспечивают достаточно быстрого разогрева образцов. Поэтому при запуске высотных ракет по программе технологических экспериментов в США был использован такой прием: нагреватель печи включался перед стартом ракеты с использованием внешнего источника электроэнергии. Когда образец разогревался до температуры плавления, внешний источник отключался и ракета стартовала. Последующий нагрев образцов осуществлялся с использованием бортовых аккумуляторов.

Недостаток экспериментов очевиден: плавление образцов лишь частично осуществляется в невесомости, а частично — в условиях перегрузок на активном участке полета ракеты. Это сильно затрудняет разбор результатов технологических экспериментов.

Чтобы избежать этой трудности, в Советском Союзе для проведения технологических экспериментов при запуске высотных ракет «Мир-2», которые были осуществлены в 1976—1982 годах, была разработана специальная аппаратура, основанная на использовании тепла химических реакций экзотермического типа. Эти эксперименты были начаты в СССР в период, когда систематические исследования проблем космической технологии находились на начальном этапе. Поэтому необходимо было вести исследования широким фронтом, сразу по всем основным направлениям космического производства. Для этого нужна была аппаратура, обеспечивающая возможность одновременного проведения большого числа экспериментов и их дублирования. Этим задачам в наибольшей степени отвечали печи экзотермического типа.

Схема тепловой ячейки такой печи показана на рисунке. Технологическая ампула устанавливается по оси цилиндрического экзопакета, который содержит смесь химических веществ в твердой фазе. При подаче в экзопакет маломощного электрического импульса в смеси начинается экзотермическая реакция, которая сопровождается выделением большого количества тепла и проходит без выброса газа. Максимальная температура, которую можно обеспечить с помощью такого экзопакета на оси ампулы, составляла 1850°C . Это значительно выше, чем дают печи электронагревного типа.



Экзотермическая тепловая ячейка: 1 — ампула, 2 — экзопакет, 3 — обойма-холодильник.

Инициирование химической реакции в экзопакете происходило в момент, когда на борту зонда с аппаратурой наступало состояние невесомости. С этой целью от системы управления на устройство, иницирующее реакцию, подавался импульс тока. Это устройство содержало таблетку с легковоспламеняющимся составом, который сгорал при пропускании импульса тока через вмонтированную в него проволоку.

На этих принципах был разработан ряд нагревательных устройств (БКТ — одиночная тепловая ячейка, СКАТ и СПРИНТ — комплекты аппаратуры для одновременного проведения большого числа экспериментов). Все эти устройства были использованы для выполнения советской программы технологических экспериментов в условиях кратковременной невесомости на борту высотных ракет «Мир-2» в 1976—1982 годах.

Комплект аппаратуры СПРИНТ, например, включал в себя до 32 экзотермических печей, систему регистрации температуры, высокочувствительный акселерометр, пред-

предназначенный для измерения малых ускорений во время экспериментов, блоки питания, управления и контроля. Ампулы с исследуемыми веществами устанавливались в молибденовые контейнеры, внутренний диаметр которых составлял 19 миллиметров, а высота 85 миллиметров. Температура измерялась с точностью до $\pm 4^\circ \text{C}$.

Длительность теплового цикла в условиях типичного эксперимента составляла около 600 секунд, включая нагрев в течение 100 секунд со скоростью до 1000 градусов в минуту, плавление образцов в течение 60 секунд, выдержку расплава и охлаждение — 400 секунд со скоростью до 150 градусов в минуту.

ЗЕРКАЛЬНО-ЛУЧЕВЫЕ УСТАНОВКИ

Зеркально-лучевые установки предназначены для выращивания образцов либо методом зонной плавки, когда расплав контактирует только с твердой заготовкой и перекристаллизованным образцом, либо для работы в составе левитаторов для проведения бесконтейнерной плавки материалов. В этих установках с целью плавления образца на его свободной поверхности фокусируется излучение либо от бортового источника света с достаточно высокой яркостной температурой, либо излучение Солнца. Для фокусировки излучения используются зеркала.

Такие печи обычно используются для выращивания монокристаллов полупроводниковых материалов, обладающих высоким совершенством и достаточно крупного размера.

Установки этого типа разработаны в СССР и за рубежом. В ИПО «Солнце» Академии наук Туркменской ССР разработана зеркально-лучевая печь, предназначенная для использования на орбитальных станциях типа «Салют». Нагрев образцов осуществляется двумя галогенными источниками излучения мощностью 150 ватт каждый, которые размещены в фокусе эллипсоидных отражателей. Печь снабжена системами, необходимыми для проведения технологических экспериментов.

Аналогичная зеркально-лучевая печь разработана в ФРГ для орбитальной лаборатории «Спейслэб». Максимальная температура, до которой можно нагреть образец диаметром 20 миллиметров, — 2100°C .

В декабре 1982 года при запуске высотных ракет «Мир-2» впервые был осуществлен эксперимент по плавлению материалов сконцентрированным излучением

Солнца. Для проведения эксперимента была разработана специальная установка «Камин», в состав которой входили два параболических концентратора солнечного излучения, обеспечивающие коэффициент концентрации около 300.

Концентраторы могли разворачиваться на поворотных стойках, чтобы обеспечить слежение за Солнцем. Установка имела автономный источник электропитания, акселерометр и усилитель сигнала термодатчика. Параболоиды со стороны светового потока были закрыты иллюминаторами, пропускавшими основную часть солнечного спектра.

Образцы до начала эксперимента вывешивались на тонких стержнях, плавление которых при облучении обеспечивало бесконтейнерную плавку образцов в фокусе параболических концентраторов.

Основное преимущество зеркально-лучевых печей — возможность бесконтейнерного нагрева до температуры плавления самых термостойких материалов, — вообще говоря, можно реализовать и в устройствах, основанных на несколько иных принципах. В первую очередь это установки, в которых нагрев образцов осуществляется электронным пучком. К числу таких устройств относится, например, установка «Испаритель», которая разработана в Институте электросварки имени Е. О. Патона и успешно прошла испытания на орбитальной станции «Салют-7».

МЕТОДЫ ВЫРАЩИВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ

Отличительная особенность печей разного типа, разработанных в СССР и за рубежом для проведения экспериментов в космосе, состоит в том, что они являются универсальными и предназначены для выращивания кристаллов с помощью разных технологических методов. Рассмотрим основные из этих методов.

1. *Направленная кристаллизация слитков.* Образец размещается в технологической ампуле и при нагреве плавится целиком, за исключением небольшой части, которая расположена вблизи холодного края ампулы и остается твердой. Нерасплавленная часть образца обладает достаточно высоким совершенством и в процессе охлаждения и кристаллизации играет роль затравочного кристалла. При понижении температуры со стороны затравки по расплаву движется плоский фронт кристаллизации.

Во многих случаях этот метод позволяет получать монокристаллические слитки с высокими характеристика-

ми. Его преимуществом является относительная простота и удобство для выявления многих особенностей процессов кристаллизации в условиях невесомости. Поэтому метод направленной кристаллизации широко использовался в исследованиях по космической технологии.

2. *Объемная кристаллизация.* Метод отличается от предыдущего тем, что образец может быть переплавлен целиком и затравка отсутствует.

Метод объемного затвердевания может быть использован при бесконтейнерной варке стекла на космических аппаратах в установках с левитацией расплавленной стеклообразной массы. Объемная, или массовая, кристаллизация характерна также для экспериментов по выращиванию кристаллов из растворов (в первую очередь из водных растворов различных соединений).

3. *Эпитаксия.* Ориентированное наращивание кристаллов одного вещества на кристалле другого называется эпитаксией (от греческих слов «epi» — над и «taxis» — упорядоченный). Решетка растущего кристалла соответствует кристаллографической структуре подложки. Этим методом наращивают тонкие бездефектные пленки на монокристаллической подложке. Могут быть, в частности, получены пленки с чередующейся структурой (так называемые сэндвич-структуры).

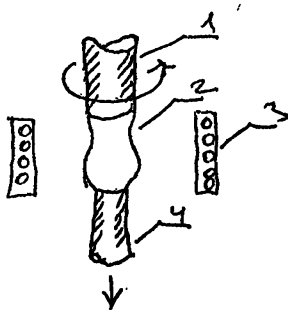
Эпитаксиальные пленки выращивают из жидкой или газообразной фазы, причем второй способ используется чаще.

4. *Газотранспортный перенос.* В холодной части ампулы размещаются либо объемные кристаллы, либо плоская подложка, на которую идет кристаллизация материала путем его осаждения из паровой фазы. Заготовка размещается в горячей части ампулы. При нагреве происходит сублимация (испарение) материала заготовки, который в паровой фазе диффундирует в направлении холодного конца ампулы.

Чтобы повысить скорость массопереноса, иногда используют газообразное вещество, которое при большом давлении (до десятков атмосфер) заполняет ампулу. В результате химических реакций с исходным материалом образуются газообразные соединения, которые также диффундируют в направлении холодного торца, где происходит конденсация и кристаллизация на холодной подложке. При кристаллизации германия, например, в качестве такого транспортного газообразного агента используют его химические соединения с йодом или хлором. По-

сле осаждения слоя германия на подложке йод или хлор свободно диффундируют в обратном направлении за новой «порцией» исходного материала.

При больших давлениях внутри ампулы в присутствии градиента температуры в системе может возникать тепловая конвекция. Вследствие этого может ухудшаться однородность эпитаксиальных структур, выращиваемых методом газотранспортного переноса. Перенос этой технологии выращивания кристаллов и эпитаксиальных структур в условия невесомости позволяет обойти эту трудность и обеспечить высокое качество материалов.



Зонная плавка (стрелками показано вращение и протяжка образца): 1 — заготовка, 2 — расплав, 3 — нагреватель, 4 — кристалл.

5. *Зонная плавка.* Этот метод был первоначально предложен для очистки полупроводниковых материалов и металлов от вредных примесей. В основе очистки лежит явление различной растворимости примесей в твердой и жидкой фазах вещества, то есть отличие коэффициента распределения от единицы. Поэтому если расплавить часть образца и двигать относительно него нагреватель (или образец относительно нагревателя), то движущийся вдоль расплава фронт кристаллизации будет, подобно поршню, «гнать» перед собой примесь. Для увеличения степени очистки процесс иногда повторяют несколько раз.

Узкую зону расплава посередине твердого образца можно создавать, например, с помощью зеркально-лучевой печи. Чтобы обеспечить движение фронта кристаллизации, обе твердые части образца — заготовка и перекристаллизованный слиток — должны протягиваться через

зону нагрева с фиксированной скоростью. А чтобы обеспечить равномерный нагрев образца по азимуту, его дополнительно вращают.

В условиях невесомости зонная плавка, или, как иногда говорят, метод плавающей зоны, практически интересна для выращивания монокристаллических слитков полупроводниковых материалов и некоторых металлов с высокой степенью совершенства. Основное преимущество метода в условиях невесомости — возможность выращивания слитков крупного размера вследствие повышения устойчивости жидкой зоны. Дополнительное преимущество состоит в том, что в невесомости можно обеспечить условия, когда расплав не контактирует со стенками коптепера.

Сложность использования метода плавающей зоны в космических условиях состоит в том, что с увеличением размеров свободной жидкой поверхности в зоне, где существует градиент температуры, значительной интенсивности могут достичь конвективные течения, индуцированные эффектами поверхностного натяжения.

Поэтому для отработки метода плавающей зоны применительно к космическим условиям необходимо провести фундаментальные исследования по определению границ устойчивости жидких перемычек в невесомости, по исследованию конвективных течений, индуцированных поверхностным натяжением, и методов управления интенсивностью этих течений.

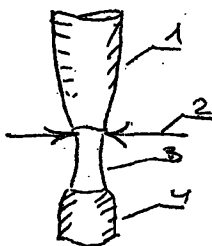
6. Метод движущегося растворителя. Этот метод применим к веществам, которые обладают высокой растворимостью в расплаве одного из компонентов. Примером такого вещества является система арсенид галлия — галлий.

Температура плавления галлия 30°C , а арсенида галлия — 1238°C . Отсюда видно важное преимущество метода движущегося растворителя: он позволяет выращивать монокристаллы соединений в печах, максимальная рабочая температура которых значительно ниже температуры плавления выращиваемого образца.

Для проведения процесса методом движущегося растворителя собираются арсенид-галлиевые «сэндвичи», состоящие из монокристаллической затравки арсенида галлия, галлиевой зоны, насыщенной растворенным в ней мышьяком, и поликристаллического источника арсенида галлия. «Сэндвич» устанавливается в печи таким образом, чтобы максимальная температура приходилась на

галлиевую ванну, которая плавится в процессе эксперимента.

В процессе кристаллизации из раствора мышьяка в расплаве галлия на твердую заправку происходит осаждение кристаллических слоев арсенида галлия. Расплав находится между двумя твердыми стержнями, а градиент температуры вдоль него подбирается, исходя из требования обеспечить такую разницу концентраций в растворе, когда на горячей границе происходит растворение арсенида галлия, а на холодной — кристаллизация. Отсутствие в невесомости конвекции в расплаве позволяет



Метод Степанова:

- 1 — профилированный кристалл, 2 — формообразователь,
3 — расплав, 4 — исходный материал.

рассчитывать на получение монокристаллов с улучшенной структурой.

7. Метод Степанова. Для использования в электронных приборах полупроводниковым кристаллам обычно придают ту или иную форму. Для этого выращенный в установке монокристалл предварительно подвергают механической обработке. Часть дорогого материала при этом неизбежно не используется.

Член-корреспондент АН СССР А. В. Степанов предложил метод, который позволяет сразу выращивать монокристаллы заданной формы, исключив их последующую механическую обработку. Чтобы решить эту задачу, расплаву придается нужный профиль с помощью специального формообразователя, который изготавливается из несмачиваемого материала. Площадь контакта расплава с формообразователем может быть минимальной, поэтому возможность поступления с его поверхности примесей не существенна,

Форма расплава определяется силами поверхностного натяжения. В конечном счете это определяет и форму выращенного монокристалла. В земных условиях, однако, на форму расплава дополнительное влияние может оказывать сила веса, а это ограничивает практические возможности метода. Перенос выращивания образцов методом Степанова в невесомость позволяет преодолеть эту трудность.

Используя силы поверхностного натяжения и отсутствие в невесомости помех, обусловленных тяготением, можно создать технологические процессы производства в космосе плоских мембран, тонких пленок, волокон, оптических поверхностей специальной формы и т. п.

АППАРАТУРА ДЛЯ МОДЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

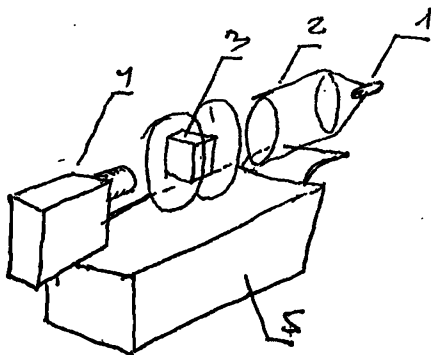
Используя печи различного типа, можно провести много разнообразных экспериментов в области космической технологии. Однако все установки этого типа обладают одним общим недостатком — они не позволяют заглянуть «в середину» образца, исследовать процессы, происходящие в его объеме, и в полной мере изучить динамику явлений в невесомости.

Этот круг важных исследовательских задач решают с помощью установок, на которых исследуются прозрачные модельные вещества. При этом условия эксперимента подбираются таким образом, чтобы безразмерные числа Бонда, Рэлея, Марангони и другие критерии, определяющие характер основных физических процессов в невесомости, лежали в том же диапазоне значений, как и в технологических процессах выращивания полупроводниковых монокристаллов, производства сплавов, варки стекла. Соблюдение этого условия позволяет распространить выводы, полученные в модельных экспериментах, на реальные технологические процессы.

В Советском Союзе такой подход впервые был применен в 1976 — 1977 годах в цикле экспериментов по космической технологии на борту орбитальной станции «Салют-5». С этой целью был разработан специальный комплект приборов «Диффузия», «Кристалл», «Поток», «Сфера», «Реакция». Эти приборы были предназначены для исследования в невесомости процессов диффузии в образцах сплава дибензила с толаном, кристаллизации алюмокалиевых квасцов из их водного раствора, устой-

чивости газовых включений в жидкости, бесконтейнерной кристаллизации модельных сплавов, растекания жидкостей под действием сил поверхностного натяжения.

Для более углубленного исследования физических процессов в невесомости была разработана аппаратура «Пион» (аббревиатура слов «Прибор для исследования особенностей невесомости»). Первые эксперименты с этим прибором были выполнены на орбитальной станции «Салют-6» в мае 1981 года.



Принцип действия установки «Пион»: 1 — источник света, 2 — осветитель, формирующий параллельный пучок света, 3 — рабочая камера с исследуемой кюветой, 4 — кинокамера, 5 — блок управления.

Принцип работы аппаратуры «Пион» состоит в измерении углов отклонения световых лучей оптическими неоднородностями в прозрачной жидкости, которые вызваны неравномерным распределением температуры и плотности. Для измерения углов отклонения световых лучей использован теневой метод визуализации оптических неоднородностей.

Как это происходит, поясняется на рисунке. А для той части читателей, которой больше по душе поэтические описания, процитируем строки Б. Пастернака:

По мере смены освещенья
И лес меняет колорит.
То весь горит, то черной тенью
Нависшей коготи покрыт.

С меньшей точностью, но зато с большей образной силой эти строки также можно отнести к объяснению принципов, на которых основан теневой прибор.

Теневой прибор — основная часть установки «Пион». Установка предназначена для определения полей температуры и скорости конвективных течений в прозрачных жидкостях, для исследования устойчивости и динамики пузырей в жидкости, для исследования способов управления термокапиллярной конвекцией.

Прибор работает следующим образом. В отсутствие неоднородностей свет от точечного источника преобразуется объективом в параллельный пучок, который, пройдя кювету с исследуемой жидкостью, фокусируется другим объективом на точечную диафрагму, закрывающую изображение источника. Плоскость изображений в этом случае остается неосвещенной. Допустим теперь, что в кювете с жидкостью, сквозь которую проходит параллельный пучок света, появилась неоднородность. Эта оптическая неоднородность смещает пучок света, в результате чего в плоскости изображений на темном фоне появится светлое пятно. По структуре световых пятен можно судить о расположении оптических неоднородностей в исследуемой жидкости.

А как измерить скорость конвективных течений в жидкости? Для решения этой задачи в приборе «Пион» в сочетании с теневым методом использован метод моток нейтральной плавучести. Твердые частицы размером не более 0,5 миллиметра, обладающие той же плотностью, что и исследуемая жидкость, равномерно взвешиваются в ее объеме. Подсвеченные параллельным пучком света, эти частицы позволяют сделать видимой картину течений в жидкости.

В течение всего эксперимента развитие процессов жидкости регистрируется с помощью кинокамеры. Температура жидкости измеряется одновременно в нескольких точках с помощью термопар. На кинокадрах фиксируется изображение исследуемого объекта, температура в одной из точек кюветы и время эксперимента.

После испытания прибора «Пион» в мае 1981 года на станции «Салют-6» была проведена работа по дальнейшему усовершенствованию этой аппаратуры. Цели усовершенствования состояли в повышении чувствительности прибора, в переходе к количественным методам измерения плотности жидкости, в увеличении точности измерения поля скоростей и в повышении степени автома-

тизации эксперимента. В результате работы, проведенной в этих направлениях, в 1981 — 1982 годах был создан модифицированный комплект аппаратуры «Пион-М» для проведения экспериментов на орбитальной станции «Салют-7».

Принцип работы установки остался прежним, однако практически все узлы были существенно переработаны.

Интересные возможности для изучения физических процессов в невесомости открывают голографические методы регистрации оптических изображений. В Советском Союзе для использования на орбитальных станциях типа «Салют» разработан комплект голографической аппаратуры — КГА. Аппаратура создана в Ленинградском физико-техническом институте.

Несколько слов о голографических методах и о тех преимуществах, которые они могут обеспечить. На обычной фотографии фиксируется изображение объекта в плоскости фотоэмульсии. Можно сфотографировать объемный предмет, но его изображение на фотографии всегда будет плоским.

В отличие от этого голография позволяет получить объемное изображение предмета на плоской фотоэмульсии. Каким образом это достигается? Дело в том, что на голограмме регистрируется не само изображение предмета, а фиксируется структура световой волны, отраженной этим предметом. Для получения голограммы на фотоэмульсию одновременно со светом, который рассеивается предметом, направляется и часть света источника, который освещает этот предмет (опорный пучок). В качестве источника света используется лазер. Взаимодействие обоих пучков света — рассеянного и опорного — позволяет получить на фотоэмульсии не изображение предмета, а интерферограмму — результат взаимного усиления или ослабления обоих пучков. Такое чередование светлых и темных полос на фотопластинке и представляет собой голограмму, которая внешне ничем не напоминает оригинал.

Однако, получив голограмму, с ее помощью можно восстановить изображение предмета, причем изображение это будет объемным. Чтобы получить такое изображение в пространстве, голограмму просвечивают, словно диапозитив, опорным пучком света.

Установка КГА позволяет производить регистрацию голограмм прозрачных и отражающих свет объектов, осу-

ществлять запись голографических интерферограмм и проводить исследования в реальном масштабе времени.

Установка предназначена для исследования процессов тепломассообмена и роста кристаллов, биофизических объектов. Аппаратура КГА успешно прошла испытания на станциях «Салют-6» и «Салют-7».

В Западной Европе для проведения на борту орбитальной лаборатории «Спейслэб» экспериментов в области гидромеханики невесомости разработан специальный модуль аппаратуры для исследований по физике жидкостей. Главной разработчик аппаратуры — итальянская фирма ФИАТ.

Основное назначение модуля — проведение исследований по устойчивости жидкой зоны между двумя дисками в зависимости от размеров зоны, свойств жидкости, поверхностного натяжения, температуры, а также смещения, вращения и вибрации дисков. Модуль снабжен системой кино- и фоторегистрации в поперечном и продольном сечениях столба жидкости. Осуществляются также измерение и контроль температур. Энергопотребление аппаратуры — до 300 ватт, ее масса — 50 килограммов.

Как уже говорилось, первые испытания модуля прошли неудачно. Разработчики сделали вывод о необходимости модернизации аппаратуры.

В Советском Союзе уделяется большое внимание дальнейшему совершенствованию аппаратуры, предназначенной для экспериментальных исследований научных проблем космической технологии. Так, на основе прибора «Пион-М» разработана новая аппаратура с гибким программным устройством и системой автоматической подачи экспериментальных кювет в рабочую камеру прибора. По оценкам, производительность экспериментов на этой аппаратуре может быть увеличена в 6—8 раз по сравнению с прибором «Пион-М» при тех же затратах времени космонавтов.

Для исследования устойчивости процессов кристаллизации из растворов на установке «Пион-М» разработан прецизионный термостат, который обеспечивает поддержание заданной температуры с точностью до $\pm 0,01^\circ \text{C}$. Время эксперимента, в течение которого поддерживались такие условия, составляло 280 часов. Аппаратура такого класса, предназначенная для проведения экспериментов в космосе, создана впервые в мире.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МАТЕРИАЛОВ

Одновременно с созданием аппаратуры для проведения фундаментальных исследований по физике невесомости были начаты работы по созданию нового поколения технологических установок. Эти установки создаются с учетом накопленного опыта исследований и экспериментов в области космической технологии. Их основное назначение состоит в том, чтобы сделать следующий важный шаг в решении проблем космической технологии и подготовить опытно-промышленное производство некоторых материалов на борту пилотируемых и автоматических космических аппаратов.

В Советском Союзе первой установкой нового поколения явилась аппаратура «Корунд», разработанная Ю. Н. Дьяковым, В. Т. Хряповым, Е. В. Марковым и их сотрудниками. Испытания этой аппаратуры, предназначенной для промышленного производства ряда полупроводниковых материалов, были начаты в 1982 году на орбитальной станции «Салют-7».

Аппаратура «Корунд» значительно отличается от экспериментальных установок «Кристалл» и «Магма-Ф», разработанных тем же коллективом авторов. В отличие от установок «Сплав» и «Кристалл» здесь использован совмещенный режим работы: температура может изменяться до 1270°C со скоростью нагрева от $0,1$ до 10°C в минуту, а капсулу, содержащую ампулу с исследуемым веществом, можно протягивать через тепловое поле со скоростью от нескольких миллиметров в сутки до 50 миллиметров в минуту. Обеспечена более высокая точность измерения температуры — до $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

Размеры ампул позволяют устанавливать в них значительно более крупные образцы: масса такого образца в зависимости от плотности может достигать $1,5$ килограмма.

В барабан установки одновременно загружается 12 капсул с разными материалами. После того как на пульте управления космонавты набирают программу, аппаратура должна работать в автоматическом режиме. Одна загрузка барабана в состоянии дать до 18 килограммов полупроводниковых материалов в виде монокристаллов и эпитаксиальных пленок, свойства которых будут существенно улучшены по сравнению с земными аналогами.

Мощность, потребляемая аппаратурой «Корунд», от-

носительно велика — до 720 ватт. Ее масса 130 килограммов. В 1987 году на станции «Мир» начались эксперименты с модернизированной аппаратурой «Корунд-1М».

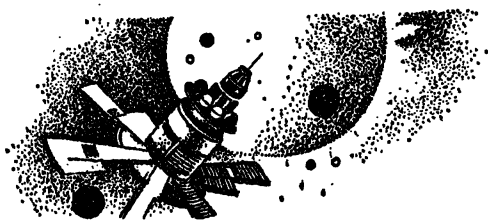
Аппаратура «Корунд» намного более совершенна, чем предшествовавшие ей экспериментальные установки. Она предназначена для решения значительного более ответственных задач. Но в соответствии с этим возросла и сложность ее отработки на борту орбитальной станции.

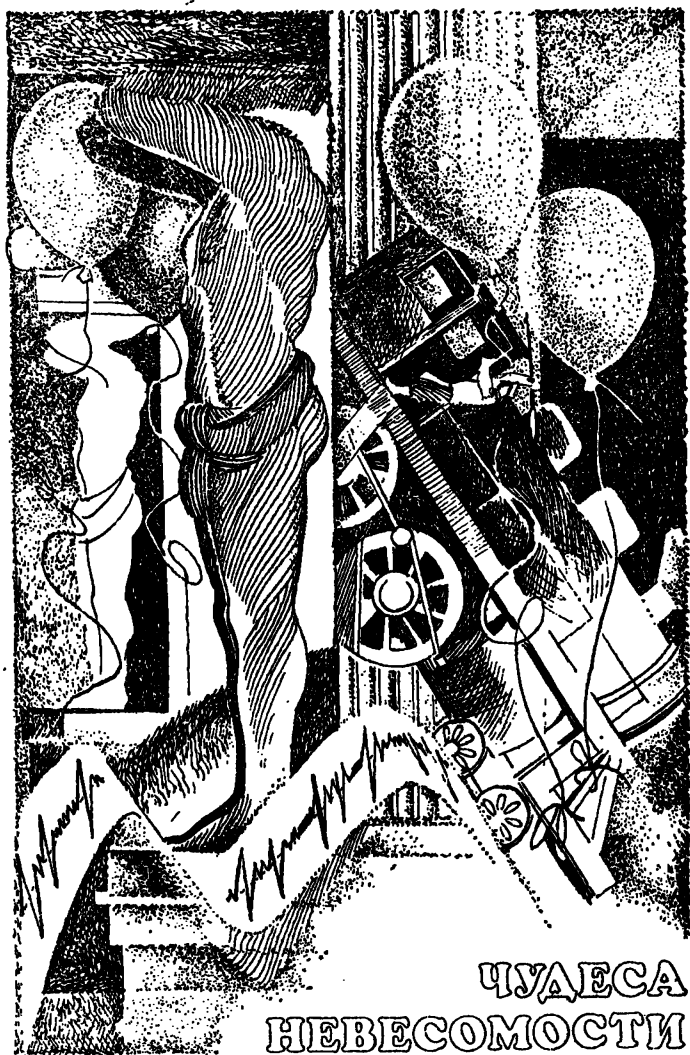
Очередной этап развертывания работ в области космической технологии будет состоять в переходе к мелко-массштабному опытно-промышленному производству материалов на специализированных технологических модулях орбитальных станций и космических аппаратах.

Технологические модули (платформы) могут также совершать автономный полет по околоземной орбите и периодически посещаться космонавтами для смены образцов и ремонта оборудования.

В настоящее время в СССР начата разработка многоцелевой и специализированной аппаратуры, предназначенной для размещения и эксплуатации на борту подобных специализированных модулей и автономных платформ. Разрабатываемая аппаратура предназначена для опытно-промышленного производства полупроводниковых материалов.

Работы по созданию аппаратуры для опытно-промышленного производства материалов в космосе интенсивно ведутся также за рубежом. С 1982 года Европейское космическое агентство, в которое входят ФРГ, Франция, Англия, Италия, Испания и другие страны Западной Европы, разрабатывает автономный многоразовый возвращаемый спутник-платформу «Эврика». Общая масса платформы 3,5 тонны, масса полезной нагрузки — 1,1 тонны. Платформа для автономного полета выводится на круговую орбиту высотой 500 километров, на которой величина постоянного ускорения не будет превышать $10^{-5} g_0$.





ЧУДЕСА НЕВЕЕСОМОСТИ

НЕОЖИДАННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Академик П. Л. Капица любил высказываться следующим образом: «Согласие между экспериментом и теорией представляет собой состояние мешанского благополучия в науке. Этим закрывается развитие науки. Наука — это

то, чего не может быть. А то, что может быть, — это технический прогресс».

У той части читателей, которые последовательно читали все предыдущие главы, могло сложиться впечатление, что физика невесомости в целом довольно благополучная научная дисциплина, а космическую технологию вообще пора рассматривать как одно из направлений технического прогресса. Если, однако, второе верно, то первое не совсем.

Дело в том, что, работая над предыдущими главами, авторы пошли на небольшую хитрость — излагали как известные те теоретические исследования, которые были получены путем анализа и обобщения результатов экспериментов, выполненных в невесомости.

В действительности, когда первые серии технологических экспериментов находились в стадии подготовки, многое было неясным. Поэтому не все результаты экспериментов удалось предугадать правильно, а некоторые из них вообще оказались неожиданными для специалистов. Приведем примеры таких неожиданных результатов.

В 1975 году в рамках советско-американской программы «Союз» — «Аполлон» был поставлен эксперимент «Универсальная печь». Руководил работой В. С. Земсков из Института металлургии АН СССР. Цель эксперимента состояла в том, чтобы получить образцы твердого раствора германий — кремний, содержавшего микропримесь сурьмы с однородным распределением компонентов. Неоднородность распределения кремния в исходных заготовках составляла около 0,5 процента. Образцы устанавливались в градиентную зону электронно-нагреваемой печи и подвергались переплавке методом направленной кристаллизации.

Замысел эксперимента состоял в следующем. В невесомости отсутствует гравитационная конвекция, поэтому процессы массообмена в расплаве будут определяться диффузией. Если расплавленный германий подержать в этих условиях при постоянном тепловом поле, то вследствие диффузии кремний, вначале не вполне равномерно распределенный по объему образца, перераспределится по нему. Ожидали поэтому, что после кристаллизации будут выращены образцы с однородным распределением кремния и сурьмы.

Результаты опыта оказались прямо противоположными: в образцах германия, доставленных из космоса, была отмечена значительная неоднородность распределения

кремния в поперечном сечении слитков. Вблизи затравки на диаметрально противоположных краях сечения слитка содержание кремния различалось в 8 раз. По длине слитка неоднородность распределения кремния постепенно сглаживалась.

Неоднородным оказалось и распределение сурьмы в поперечном сечении слитка. Но здесь возникла еще одна неожиданность: с того края образца, где распределение кремния было максимальным, содержание сурьмы имело минимум. И наоборот: минимальное содержание кремния соответствовало максимальной концентрации сурьмы.

Как тут не вспомнить высказывания академика Капицы? С точки зрения отсутствия мешающего благополучия в науке результаты экспериментов Земскова были прекрасны — они полностью противоречили первоначальным теоретическим предсказаниям.

Однако со времени проведения этих экспериментов прошло более десяти лет. Есть поэтому основания поинтересоваться, как осмыслены полученные в них результаты, какие сделаны выводы, предложены теоретические модели. Такие теоретические модели, разумеется, были выдвинуты. Обсуждены физические эффекты, которые первоначально не были приняты во внимание, но могли оказать решающее влияние на ход эксперимента и его результаты.

Однако окончательного однозначного объяснения результаты эксперимента «Универсальная печь» так и не получили. Причина состоит в том, что для этого не хватило объективной измерительной информации, которую можно было добыть лишь в ходе самого эксперимента.

В 1976 году авторы приняли участие в постановке первых советских комплексных экспериментов по физике невесомости на орбитальной станции «Салют-5». Был, в частности, подготовлен эксперимент «Сфера».

Вот как описывались задачи опыта в материалах, опубликованных до полета космонавтов на станцию: «Цели эксперимента: исследование процесса затвердевания жидкого металла в условиях бесконтейнерного удержания в невесомости.

Известно, что в невесомости жидкость стремится принять форму, соответствующую минимуму свободной энергии, — форму идеально правильной сферы. В принципе это открывает возможности производства в космических

условиях шариков правильной формы, которые могут найти применение в точном машиностроении, например, в качестве шарикоподшипников. Возможно также получение полых сфер. Кроме того, сферы, получаемые в невесомости при затвердевании жидких металлов, за счет работы сил поверхностного натяжения могут обладать более правильной структурой поверхности с меньшим количеством дефектов. Вместе с тем при затвердевании расплавов в невесомости действуют и другие факторы, усложняющие процесс сфероидизации (свободные колебания объема жидкости, различная скорость остывания на поверхности и в объеме и др.). С целью получения непосредственных данных по всей совокупности этих процессов в невесомости и ставится эксперимент «Сфера».

Прибор, с которым проводились опыты, представлял собой электронагревное устройство, в цилиндрической трубке которого плавился образец сплава Вуда. Этот сплав состоит из висмута, свинца, кадмия и олова и имеет низкую температуру плавления — около 70°C . После плавления образец выталкивался штоком в лавсановый мешок, где и затвердевал без контактов со стенками.

Время, в течение которого заготовка при прохождении через нее электрического тока разогревалась до температуры плавления, составляло на Земле 30 секунд. Можно было ожидать, что в невесомости электрический и тепловой контакт между образцом и стенками нагревателя ухудшится. Поэтому, чтобы обеспечить плавление образца, время его нагрева до выталкивания в лавсановый мешок было увеличено до 2 минут.

Первые неожиданности начались, когда космонавты Б. В. Волынов и В. М. Жолобов приступили к проведению эксперимента: образец плохо плавился и «не хотел» вылетать из нагревателя. Прибор работал не так, как на Земле, и не так, как рассчитывали. Опыт удалось провести, только взяв из комплекта аппаратуры запасной прибор «Сфера».

Образцы, доставленные из космоса на Землю, удивили исследователей. Они имели эллипсоидальную форму, а их поверхность была покрыта хаотически расположенными волокнами. Металлографический и рентгеноструктурный анализ показал, что внутренняя структура образца после переплава в космосе сильно изменилась: нарушилось равномерное распределение компонентов по объему слитка, образовались иглообразные кристаллы, различаю-

щиеся по химическому составу. Вместо первичной относительно однородной структуры образовались новые фазы, состоящие из двух, трех и четырех компонентов в различном соотношении между ними. При этом двойные и тройные фазы выделились в виде дендритов округлой и игольчатой формы соответственно.

Попытки подобрать в лабораторных условиях такой тепловой режим плавления и кристаллизации образцов, который обеспечил бы получение у них сходной структуры, не привели к успеху. Экспериментаторы оказались в положении людей, которые получили на свое письмо подробный и обстоятельный ответ, но только написанный на непонятном языке. Вот такой сюрприз приготовила им невесомость.

Чтобы у читателей не сложилось впечатление, будто подобные неожиданности случались только на раннем этапе исследований в области космической технологии, приведем совсем свежий пример.

Декабрь 1983 года. На борту орбитальной лаборатории «Спейслэб» впервые испытывается западноевропейский модуль по физике жидкости. Аппаратура очень совершенна, оснащена по последнему слову техники. Головной разработчик — фирма ФИАТ — имеет большой опыт в создании и эксплуатации самых сложных приборов. Времени на разработку было более чем достаточно — без малого десять лет. Проект аппаратуры неоднократно докладывался на ряде международных конференций и обсуждался с участием ведущих специалистов по космической технологии.

Кажется, были все основания рассчитывать на полный успех. И вместо этого полный провал. Началось с того, что отказала система измерения поля скоростей течений в свободной жидкой зоне. Для этого был разработан метод пробных твердых частиц нейтральной плавучести такой же, как на установке «Пион». При подогреве жидкости пробные частицы вследствие термокапиллярного дрейфа собрались в одном месте — измерение стало невозможным.

Между прочим, подобный эффект наблюдался и в экспериментах на установке «Пион». Но там достаточно было космонавту перед опытом постучать по стеклянным стенкам кюветы с рабочей жидкостью, и распределение взвешенных в ней частиц снова становилось равномерным.

Астронавты на борту «Спейслэба» сделать этого не могли — они имели дело со свободным столбом жидкости, никаких стенок не было. Но на этом неприятности не кончились.

Создатели аппаратуры понимали, что работать в космосе со свободной жидкой перемишкой между двумя дисками будет очень непросто. Были приняты меры, чтобы предотвратить нежелательный выброс жидкости — кремний-органического масла — из прибора (песмачиваемая часть дисков, специальные прокладки и др.). Оказалось, однако, что этих мер недостаточно — масло вылетело из установки в рабочий отсек орбитальной лаборатории, растеклось по панелям. Астронавтам пришлось с помощью разных подручных средств долго собирать его.

Мы далеки от мысли обвинять в случившемся разработчиков аппаратуры. Дело не в ошибках, которые они совершили. Дело в том, что этих ошибок трудно было избежать, — условия невесомости пока все еще непривычны для проектантов и исследователей.

Список неожиданностей, которые возникали в космических экспериментах, можно дополнить. Явление отрыва расплавов от стенок технологической ампулы. Аномально быстрый рост совершенных монокристаллов в условиях кратковременной невесомости. Переохлаждение расплавов и кристаллизация из центра слитков в бесконтейнерном процессе затвердевания. Аномально высокая скорость роста некоторых кристаллов методом газотранспортного переноса. Но стоит ли продолжать?

Приведенных примеров достаточно, чтобы сделать вывод. Существует принципиальная возможность производить в космосе улучшенные материалы — сегодня это однозначно доказано прямыми экспериментами. Но научных предпосылок для оптимальной организации технологических процессов такого производства в полном объеме пока нет. Поэтому необходимо продолжить исследования. И вести их надо как в теоретическом плане, так и в плане специальных экспериментов по физике невесомости в натуральных условиях.

Неожиданные результаты, которых было немало в опытах на борту космических аппаратов, помогли составить более ясное представление, каким сегодня должен быть правильно поставленный эксперимент в области космической технологии. «Суть не в том, каков ответ, — говорил известный физик-теоретик и математик А. Пуанкаре, — суть в том, каков вопрос».

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКЦИИ

В 1981—1984 годах на орбитальных станциях «Салют-6» и «Салют-7» на установке «Пион» был выполнен цикл экспериментов по изучению конвективных течений и способов управления ими в невесомости. В качестве модельных веществ в этих экспериментах были использованы глицерин, его смесь с этиловым спиртом, дистиллированная вода. С учетом рабочего диапазона температур (до 250°C для глицерина) моделировались процессы в расплавах металлов и полупроводниках, а также в расплавленном стекле.

В первой серии экспериментов (май 1981 года, станция «Салют-6») были получены прямые доказательства, что в исследуемых условиях обычная конвекция гравитационного типа отсутствует.

Следующая часть задачи состояла в исследовании термокапиллярных конвективных течений. Для экспериментов была использована цилиндрическая кювета, стенки которой (оргстекло) смачивались рабочей жидкостью — этиловым спиртом. Чтобы создать в жидкости свободную поверхность, в нее вводился газовый пузырь диаметром около 10 миллиметров, который молекулярными силами сцепления со стенками кюветы фиксировался на одном месте.

Измерения с помощью термопар показали, что после включения нагревателя на стенке кюветы максимальная температура составляет 45°C , а стационарный тепловой режим в жидкости устанавливается в течение примерно 30 минут. В течение этого времени с помощью тепевого прибора и кино съемки наблюдали развитие в жидкости конвективного течения, индуцированного термокапиллярным эффектом.

В начале течение возникало в узкой зоне, непосредственно примыкающей к газовому пузырю. К 10-й минуте образовались два вихря малой интенсивности. Затем их размеры увеличились, и скорость течения достигла $0,7\text{ мм/с}$. Течение стабилизировалось примерно к 30-й минуте.

Сравнение результатов эксперимента с данными, полученными путем численного решения системы уравнений, учитывающих возникновение термокапиллярной конвекции в аналогичных условиях, показало, что они удовлетворительно согласуются между собой. Тем самым существующие теоретические представления и математические модели процессов конвективных течений в условиях

космического полета получили прямое экспериментальное подтверждение. А это означает, что соответствующие расчетно-теоретические методы можно смело использовать для решения практических задач оптимизации технологических процессов космического производства.

Затем был исследован дрейф в жидкости мелких газовых включений, происходящий в присутствии перепада температур. Пузырьки воздуха двигались по направлению к горячей стенке кюветы. Причина их движения состояла в различии коэффициентов поверхностного натяжения на границах раздела жидкой и газовой фаз (явление термокапиллярного дрейфа).

Таким образом, в этой серии экспериментов с прибором «Пион» впервые в условиях орбитального полета были непосредственно исследованы процессы термокапиллярной конвекции. Следующая задача состояла в том, чтобы проверить в конкретных экспериментах фактическую эффективность различных способов управления интенсивностью термокапиллярных конвективных течений.

Значение этой задачи для космической технологии принципиальное. В самом деле, если одно из главных преимуществ методов космической технологии — это устранение конвекции гравитационного типа, а в невесомости, избавившись от этой конвекции, мы получаем взамен не менее интенсивную термокапиллярную конвекцию, то возникает простой вопрос: а стоит ли вообще эта космическая овчинка выделки? История науки знает примеры физических явлений и эффектов, возможность практического использования которых много лет была известна ученым, но до реального воплощения в виде конкретного прибора дело не доходило до тех пор, пока не были изобретены подходящие инженерные решения...

Обратимся к методам управления термокапиллярной конвекцией. Один из них состоит в создании вдоль свободной поверхности жидкости не монотонно возрастающего, а «гофрированного» теплового поля. Решить эту задачу можно, используя, например, дополнительные нагреватели. Эта возможность впервые была исследована с помощью прибора «Пион-М» в серии лабораторных экспериментов в 1983 году. В этих экспериментах было показано, что введение дополнительного нагревателя оказывает существенное влияние на структуру течения в целом и на термокапиллярный пограничный слой на свободной поверхности жидкости.

Следующая серия экспериментов была выполнена с

прибором «Пион-М» в октябре 1983 года на орбитальной станции «Салют-7». В рамках этой серии с целью исследования эффектов термокапиллярной конвекции были проведены эксперименты «Термогофр» и «Конвекция-1».

В первом из этих экспериментов в качестве рабочей жидкости был использован чистый глицерин, который в качестве малых примесей содержал поверхностно-активные вещества (ПАВ). Это позволило исследовать влияние ПАВ на термокапиллярную конвекцию.

Основной результат опытов состоял в том, что в исследованном диапазоне условий конвективные движения в жидкости отсутствовали. Наиболее вероятная причина состояла во взаимной компенсации термокапиллярного эффекта и эффекта положительной адсорбции.

Почему эта взаимная компенсация двух эффектов проявилась в экспериментах с прибором «Пион-М» в 1983 году, но отсутствовала в опытах 1981 года с прибором «Пион», когда впервые наблюдались интенсивные термокапиллярные течения? В опытах 1981 года использовались другие рабочие вещества — этиловый спирт и его смесь с глицерином. Известно, что спирт является превосходным растворителем ПАВ, которые поэтому и не могли оказать какого-либо воздействия на интенсивность термокапиллярной конвекции. В 1983 году использовался чистый глицерин, который не растворяет ПАВ. В этих опытах и наблюдали автокомпенсацию обоих эффектов.

Ввиду принципиальной важности выполненных наблюдений их следовало подтвердить другими опытами. Это было сделано в эксперименте «Конвекция-2» на другой рабочей жидкости — дистиллированной воде. Вихревые движения жидкости не наблюдались и в этом случае.

Причина отсутствия термокапиллярной конвекции та же, что и в опытах с глицерином: вода легко захватывает примеси, которые не растворяются в ней и играют роль ПАВ.

С целью еще одной дополнительной проверки влияния ПАВ в жидкости была создана система из 9—12 отдельных пузырей. Эксперимент показал, что пузыри оставались неподвижными как в изотермических условиях, так и при нагреве жидкости, когда в ней возникал градиент температуры. В ходе опытов наблюдался лишь один акт коагуляции пузырей, система которых, таким образом, длительное время сохраняла устойчивость.

В условиях, когда термокапиллярный эффект не скомпенсирован положительной адсорбцией, пузыри должны

совершать дрейф в направлении горячего торца кюветы. Поскольку этого не наблюдалось в экспериментах, можно сделать вывод о том, что здесь, как и раньше, происходила автокомпенсация обоих эффектов.

Подводя итоги, еще раз подчеркнем, что эксперименты по исследованию конвективных течений на станциях «Салют-6» и «Салют-7» позволили сделать три вывода. Во-первых, непосредственно наблюдались термокапиллярные конвективные течения, которые ранее не были зарегистрированы в условиях космического полета. Во-вторых, проверена справедливость математических теорий, разработанных для расчета таких течений. В-третьих, экспериментально показано, что в невесомости можно создать такие условия, когда термокапиллярная конвекция не будет играть заметной роли в технологических процессах производства материалов.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПРОДОЛЖАЮТСЯ

— Вот и прекрасно, — сказал один известный специалист, когда ему рассказали об этих результатах. — Раз вы навели в этих вопросах ясность, то сможете теперь взяться за другие задачи. А эти исследования можно будет прекратить.

Но эксперименты были продолжены. В октябре 1985 года на станции «Салют-7» изучали развитие в жидкости конвекции, когда градиенты температуры были очень малы — порядка $0,1$ град/см. Исследования проводились на установке «Пион-М» с разными жидкостями (силиконовое масло, этиловый спирт). Оказалось, что даже таких совсем маленьких перепадов температуры вдоль свободной поверхности жидкости достаточно, чтобы возникла термокапиллярная конвекция. Правда, максимальные скорости конвективных течений в жидкости оказались невелики — не более $0,2$ — $0,7$ мм/с. Полученные результаты важны, так как свидетельствуют, что при проведении технологических процессов в невесомости даже совсем небольшие неустойчивости температуры могут приводить к возникновению термокапиллярной конвекции.

В марте 1987 года эксперименты с установкой «Пион-М» были продолжены на новой орбитальной станции «Мир». Они проводились одновременно с технологическими процессами на аппаратуре «Корунд», которая предназначена для опытно-промышленного производства по-

лупроводниковых материалов. Тем самым был сделан шаг к созданию на борту орбитальной станции единого экспериментально-производственного комплекса. Такой комплекс будет включать в себя установки по производству материалов (например, типа аппаратуры «Корунд») и физические приборы (установка «Пион-М»), которые позволяют проверять способы оптимизации и корректировки технологических маршрутов производства материалов. Будет в этом перспективном комплексе и третий элемент — ЭВМ, которая обеспечит численное моделирование технологических процессов. Вся эта триада сообща обеспечит наилучшее решение производственных задач.

В марте 1987 года на борту станции «Мир» космонавты Ю. Романенко и А. Лавейкин провели с помощью установки «Пион-М» новые эксперименты «Вектор» и «Вихрь». Изучалось влияние вибраций и вязкости на конвективные движения в жидкости, влияние размера газовых включений на интенсивность этих движений, поведение несмешивающихся жидкостей и другие вопросы. В общем, работы в направлении, которое уже стало традиционным, — исследование проблем конвекции.

Но было и кое-что принципиально новое. Этим новым было исследование в невесомости коллоидных систем — гидрозолей и аэрозолей. Коллоидные, или дисперсные, системы — это океан, атмосфера, земная кора, лимфа крови, словом, это почти весь окружающий нас мир. Изучением этих систем занимается коллоидная химия. Но в знаниях ученых есть серьезный пробел: они мало знают, как ведут себя частицы размером в десятки микрон. На Земле под действием силы веса такие частицы быстро выпадают в осадок либо поднимаются вверх. А изучить их поведение полезно — новые сведения пригодились бы в производстве композитов, нашли бы им применение биологи и специалисты по метеорологии. И даже астрофизики не остались бы в стороне: ведь миллиарды лет назад именно из таких частиц начала формироваться наша Солнечная система.

Исследовать такие коллоидные системы можно на установке «Пион». Но вот в чем трудность: специалисты по коллоидной химии не смогли сразу подсказать, как подготовить кювету для этих опытов, — слишком мало пока известно о поведении подобных систем. Поэтому решили пачать с самых простых тестовых опытов, которым лирически настроенные исследователи дали нежное название: эксперимент «Колосок». В несколько запаянных

стеклянных колб налили дистиллированную воду и добавили немного стеклянных частиц размером 10—100 микрометров. Такие же частицы поместили в другие колбы, в которых вместо воды был воздух. Перед началом опыта космонавты встряхивали колбы и смотрели, что получится.

Взгляните на рисунок. Он сделан с экрана видеомэгнитофона, на который космонавты записали результаты своих наблюдений. Запись была передана на Землю. Может быть, изображение получилось и не очень вырази-



Эксперимент «Колосок».

тельным, но Романенко и Лавейкин прокомментировали его так: видим «дерево»... полое внутри. А в соседней колбе, также содержащей аэрозоль, но с частицами из другого сорта стекла, они наблюдали устойчивые структуры типа «летающих тарелок». Очень неожиданные и интересные результаты!

Правда, на один вопрос ответ ясен заранее: какая сила скрепила между собой частицы аэрозоля? Эта сила известна — электростатическое взаимодействие между частицами. Сила известна, а вот что она проявится именно таким образом, этого не ожидали. Тем более интересен результат опытов. Главное, теперь стало понятно, как сделать кювету для новых опытов на установке «Пион-М». В этих опытах будут исследоваться вопросы коллоидной химии.

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ЖИДКИХ ПЕРЕМОЧЕК

Первые эксперименты по выращиванию образцов кремния методом зонной плавки были проведены в 1983 году с помощью зеркально-лучевой печи на борту орбитальной лаборатории «Спейслэб». Величина ускорения при проведении опытов составила около $10^{-3}g_0$.

Выращенный образец обладал поликристаллической структурой, а фронт кристаллизации имел искривленную форму. В распределении примеси вдоль образца проявился такой дефект, как полосчатость. Неудачу опытов и низкое качество образца, выращенного в этом эксперименте, его постановщики объясняют термокапиллярной конвекцией.

Как следует из опытов, проведенных с прибором «Пи-оп», существуют возможности в дальнейшем исключить влияние термокапиллярной конвекции. Для практического использования метода зонной плавки, в котором расплав обязательно имеет свободную поверхность с перепадом вдоль нее температуры, этот вопрос имеет решающее значение.

Чтобы решить эту задачу, можно воспользоваться, например, эффектом положительной адсорбции, который состоит в том, что присутствие пленки ПАВ на поверхности расплава предотвращает возникновение термокапиллярной конвекции. Для расплава германия, например, одни легирующие примеси являются поверхностно-активными (сурьма), а другие нет (галлий).

Роль ПАВ может играть пленка окисла, возникающая на исходном образце в процессе его приготовления. В земных условиях тепловая конвекция в расплаве разрушает эту пленку. В космосе этого не происходит, и пленка может предотвратить развитие термокапиллярной конвекции в расплаве, поскольку она возникает и начинает развиваться именно на его поверхности.

В дальнейшем при отработке метода зонной плавки в космических условиях могут быть применены и другие способы подавления термокапиллярной конвекции — стабилизация процесса с помощью электромагнитных сил, выращивание слитков в режиме быстрой кристаллизации.

В Советском Союзе эксперименты по выращиванию кристаллов из свободной жидкой перемычки были начаты не с помощью зонной плавки, а на основе другого метода, который обладает рядом преимуществ в космиче-

ских условиях, — метода Степанова. Начаты эти эксперименты были за несколько лет до того, как сходные опыты были выполнены на борту «Спейслэб».

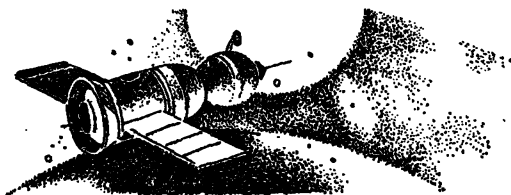
На Земле использование метода Степанова встречается с той трудностью, что форма расплава при увеличении размера образца может искажаться под действием силы тяжести. В космических условиях этот источник искажений отсутствует.

Экспериментальная проверка возможности выращивания в невесомости слитков методом Степанова впервые была проведена в СССР (эксперимент «Капилляр»). Опыты проводились в 1978 году на аппаратуре СКАТ при запуске высотных ракет. Первые эксперименты были проведены на медных образцах, позднее они были повторены на кремнии.

В экспериментах на высотных ракетах нельзя было исследовать динамику процесса формообразования при выращивании кристаллов методом Степанова. Эта задача была решена с помощью прибора «Пион-М» в опытах, выполненных в 1983 году на станции «Салют-7» (эксперимент «Форма»). В качестве исследуемого материала был выбран индий (температура плавления 156°C).

Эксперимент «Форма» был проведен успешно. Были выращены цилиндрические кристаллы индия диаметром 5,2 и длиной 12 миллиметров. В контрольных опытах на Земле такие кристаллы получить не удалось.

По методу зонной плавки образцов в невесомости новый существенный шаг вперед был сделан в 1985 году, когда в Советском Союзе была запущена первая в мире автоматическая технологическая лаборатория «Фотон» («Космос-1645»). На ее борту с помощью установки «Зона» были проведены успешные эксперименты по выращиванию совершенных полупроводниковых монокристаллов методом зонной плавки.





ПОЛУПРОВОДНИКИ ИЗ КОСМОСА

ЧТО МОЖНО УЛУЧШИТЬ В КОСМОСЕ

Производство полупроводников малотоннажное. Это не кирпич, не металл, не пластмассы. Если мерить даже не в тоннах, а в килограммах, то некоторых полупроводников нужно совсем немного. Зато требования к их каче-

ству предъявляются исключительно высокие. Нужны бездефектные монокристаллы или эпитаксиальные структуры.

Высока должна быть химическая чистота кристаллов. Надо, чтобы в них не было дислокаций. Легирующие примеси должны быть распределены в материале так, как это задумали разработчики электронной аппаратуры, для использования в которой вырастили полупроводниковые кристаллы. Нельзя допускать полосчатости и других отклонений в однородности состава.

За любые нарушения этих требований приходится платить. Причем плата очень высока: резко ухудшаются параметры приборов, в которые поставили материал невысокого качества. Низкой оказывается надежность. Падает чувствительность, снижается разрешающая способность. Приборы не обеспечивают быстродействия, на которое рассчитаны. Ограничен спектральный диапазон, в котором работают приемники излучений. Повышается вес, растут габариты аппаратуры.

На мировом рынке электронной аппаратуры идет жесткая конкурентная борьба. Тот, кто отстал, проигрывает миллиарды. Поэтому ведущие зарубежные компании не жалеют средств, чтобы освоить на своих предприятиях самую передовую технологию, обойти конкурентов.

Но все это мало чего стоит, если допущено отставание в технологии производства самих полупроводниковых материалов. Полупроводниковое материаловедение — вот тот фундамент, на который опирается все гигантское здание современной микроэлектронной промышленности. Неудивительно поэтому, что специалисты по микроэлектронике и материаловеды внимательно следят за успехами космической технологии.

Методы космической технологии обещают им многое. Бестигельными методами можно выращивать более крупные, чем на Земле, монокристаллы. Можно выращивать профилированные кристаллы и тонкие полупроводниковые структуры, не опасаясь, что их форма будет искажена силой веса. Можно резко снизить плотность дислокаций в образцах, предотвратить возникновение в них таких дефектов, как полосчатость.

Используя методы газотранспортного переноса, можно не опасаться, что конвекция ухудшит качество образцов. В более отдаленной перспективе на борту космических аппаратов появится возможность вести технологи-

ческие процессы выращивания полупроводниковых материалов в условиях сверхглубокого вакуума.

Некоторые из этих задач — например, выращивание крупногабаритных бесдислокационных монокристаллов с равномерным в макро- и микромасштабе распределением примесей — вообще могут быть решены только в космосе. На Земле даже в условиях производства, организованного по самому последнему слову техники, этого сделать нельзя — мешают эффекты, обусловленные действием веса.

Конечно, все эти преимущества космического производства не бесплатны. Производство материалов на борту космических аппаратов всегда будет обходиться дороже, чем на Земле. В общем виде это верно и так будет всегда. Поэтому все, что можно хорошо сделать на Земле, надо и делать на Земле.

Но полупроводниковый материал, как мы уже отмечали, — не кирпич. Для него важна не столько цена, сколько качество: приборы, в которые потом установят полупроводниковый кристалл, все равно будут намного дороже, чем материал. А вот характеристики приборов — и опосредствованно их стоимость — от качества материала зависят очень сильно.

Поэтому любой потребитель охотно заплатит за полупроводниковый материал цену вдвое, втрое или еще более высокую, если свойства этого материала будут лучше. А если этот материал будет уникальным и на Земле его получать просто не умеют, то для разработчиков электронной аппаратуры он даст нечто значительно более ценное, чем простой выигрыш в стоимости, — он даст возможность создавать приборы принципиально нового класса.

ДЛЯ ЧЕГО ЭТО НУЖНО

В школьных учебниках полупроводникам не повезло: о них рассказывается очень скупо и сдержанно. Не повезло им даже с названием, которое никак не отражает их свойств, благодаря которым они играют в нашей жизни столь значительную роль.

Но оглянемся вокруг. Сегодня полупроводники — это системы связи. Телевидение. Информатика. Современные ЭВМ. Системы автоматизации и управления. Робототехника. Станки с программным управлением, заводы-автоматы. Системы управления самолетами и кораблями. Космиче-

ская техника. Лазеры. Приемники излучений. Преобразователи энергии. Измерительная техника. Биороботы и управляемые протезы человеческих органов. Искусственный интеллект...

Так много, что в этом перечне трудно остановиться и поставить точку. Не случайно академик Иоффе говорил: «Полупроводники — это почти весь окружающий нас органический мир».

Полупроводники много значат для нас сегодня. Завтра они будут значить еще больше. Фронт исследований и разработок, связанных с внедрением полупроводниковой техники буквально во все отрасли народного хозяйства, все время расширяется. Почему это происходит? Какие свойства полупроводников позволили им занять такое важное место в нашей жизни?

Вы, конечно, помните старинную былинку про Илью Муромца, который тридцать лет и три года просидел на полатах в родительском доме и не мог двинуть ни рукой, ни ногой. Потом пришли калики перехожие и дали ему испить из ковша водицы, подбирая дозировку которой, они за пару минут превратили стопроцентного инвалида в славного богатыря земли русской. Самое слабое воздействие — глоток воды — и такой результат! Так вот, полупроводники обладают именно такими почти сказочными свойствами.

Электропроводность полупроводников зависит от большого числа внешних факторов — от температуры и освещения, от электрических и магнитных полей, от механических воздействий и корпускулярной бомбардировки... Нельзя, правда, сказать, чтобы это свойство не проявлялось и у других веществ. Но в одном отношении полупроводники резко отличаются от материалов любого другого класса: эти зависимости для них исключительно сильные. А число таких зависимостей исключительно велико.

Вот он, глоток волшебной воды для современного Ильи Муромца: именно эти уникальные свойства полупроводников и обусловили то редкое разнообразие практических применений, которые нашли сегодня эти материалы в самых различных отраслях народного хозяйства.

Полупроводниковое материаловедение и электронная промышленность очень молоды. Транзистор — один из основных элементов полупроводниковой техники — был изобретен в 1948 году У. Шоккли, Дж. Бардиным и

У. Браттеном. Однако практического использования это изобретение не могло получить до тех пор, пока не были разработаны достаточно простые и эффективные технологические методы очистки полупроводниковых материалов от природных примесей. Эту задачу решил в 1953 году В. Пфанн, который предложил использовать для получения полупроводниковых материалов высокой чистоты метод зонной плавки. Только после этого транзистор получил по-настоящему путевку в жизнь.

Уже на этом примере нетрудно убедиться, какую роль играет технология производства полупроводниковых материалов для промышленной электроники. В первую очередь именно с прогрессом в технологии производства материалов связаны успехи электронной промышленности в целом. И космической технологии предстоит здесь сказать свое слово.

Каждый новый этап развития микроэлектроники одновременно означал шаг вперед в технологии обработки полупроводниковых материалов.

Так в свое время возникла микроминиатюризация твердотельных электронных схем. Путем соответствующей обработки полупроводники превратились в диоды и транзисторы, конденсаторы и сопротивления. С помощью подходящей технологии обработки его частей полупроводниковый монокристалл превращался в целую электронную схему. На этой технологической основе возникли ИМС — интегральные микросхемы — микроминиатюрные электронные устройства, элементы которых конструктивно и электрически связаны между собой.

В настоящее время доля ИМС в продукции электронной промышленности неуклонно, нарастает. Особо важную роль они играют в создании ЭВМ новых поколений.

Следующий шаг — планарная технология (от латинского *planis* — плоский). Это высокопроизводительный метод группового изготовления интегральных микросхем и полупроводниковых приборов на поверхности тонкой пленки полупроводника. Метод состоит в том, что на полупроводниковый кристалл кремния, германия или арсенида галлия наносится тонкий слой диэлектрика, который затем удаляется на некоторых участках поверхности, например, путем электронной литографии. Затем через не защищенные слоем диэлектрика участки в кристалл вводятся те или иные легирующие добавки, которые и придают этим участкам необходимые электронные свойства.

На основе тонкопленочной технологии были созданы такие электронные приборы, как полупроводниковый транзистор на частоту до нескольких сотен мегагерц, гибкий транзистор, тонкопленочный видикон и др. Тонкопленочная технология важна для производства преобразователей энергии, например, экономичных и эффективных фотопреобразователей на основе аморфного кремния. Создание таких фотопреобразователей (солнечных батарей) очень важно для космической техники вообще и, в частности, для космического производства.

Перспективное направление в создании полупроводниковых микросхем — получение транзисторов на основе МДП-структур, то есть чередующихся слоев металл — диэлектрик — полупроводник. МДП-структуры в присутствии переменного электрического поля, перпендикулярного их поверхности, могут выполнять функции как активных элементов интегральных схем (диодов, транзисторов), так и пассивных элементов (резисторов, конденсаторов).

Схемы на МДП-транзисторах применяются при создании оперативных и запоминающих устройств, микропроцессоров, электронных калькуляторов. На их основе построена маломощная электронная аппаратура в космической технике.

Можно сделать следующий шаг в технологии производства МДП-структур и связывать их между собой, используя общую подложку. Таким образом созданы ПЗС — приборы с зарядовой связью, в которых внешняя информация (электрические или световые сигналы) преобразуется в зарядовые пакеты, размещаемые в приповерхностных областях. Перемещая эти пакеты вдоль поверхности с помощью внешних электрических импульсов, можно обрабатывать информацию, которая сохраняется в ПЗС. Эти приборы обеспечивают высокую плотность упаковки информации — более 10^5 бит/см².

Дальнейший прогресс в микроэлектронике связан с развитием функционального подхода. Ранее те или иные специализированные функции выполняли конкретные выделенные участки полупроводниковой структуры. С переходом к функциональной электронике эти участки способны выполнять много различных операций. Происходит это потому, что параметры этих участков не остаются постоянными, а меняются под действием внешнего управляющего сигнала, например, электрического или светового импульса. Это значительно повышает производитель-

ность систем обработки информации, основанных на принципах функциональной электроники.

Применение новых функциональных носителей информации открывает широкие возможности для дальнейшего развития таких перспективных направлений микроэлектроники, как оптоэлектроника, квантовая электроника, акустоэлектроника, магнетоэлектроника.

Остановимся в качестве примера на оптоэлектронных приборах. Их назначение состоит в том, чтобы выполнять преобразование световых сигналов в электрические и наоборот — электрических сигналов в световые. Основным элементом светоизлучающих приборов (СИП) — оптрон, который состоит из трех компонентов: источника излучения, электрического изолятора, проводящего свет, и приемника излучения.

Для изготовления источников излучения — светоизлучающих диодов — используют арсенид галлия, в качестве приемников света — кремниевые фотодиоды и фототранзисторы. Современные оптоэлектронные устройства пригодны для создания вычислительных машин с объемом памяти 10^{13} бит и быстродействием до 10^{14} операций в секунду. Объем памяти можно повысить до 10^{14} бит, если использовать лазеры и магнитооптический эффект.

Наиболее распространенный метод изготовления СИП — эпитаксиальный рост на монокристаллической подложке из арсенида или фосфида галлия. При этом используется рост как из жидкой, так и из паровой фазы. О возможных преимуществах использования этих методов в космических условиях мы уже рассказывали. Ориентируясь на эти методы, можно ставить задачи повышения качества СИП, изменения цвета свечения, повышения яркости, контрастности, надежности, снижения потребляемой мощности.

Еще более высокие параметры запоминающих и логических элементов вычислительных машин можно получить, если воспользоваться квантовыми когерентными свойствами носителей электрического заряда в твердом теле (эффект Джозефсона). Быстродействие приборов, основанных на этом эффекте, оказывается рекордным — 10^{-11} секунды. Рекордны по сравнению с другими аналогичными приборами и другие параметры: минимальный измеряемый ток 10^{-10} ампер, минимальное магнитное поле 10^{-18} тесла и т. д.

Успехи полупроводниковой микроэлектроники в наше время весьма значительны. Но это не единственное направление развития полупроводниковой промышленности сегодня. Полупроводниковые материалы находят многочисленные применения также и в дискретных приборах и устройствах различного назначения.

Ограничимся только несколькими примерами. Люминофоры — полупроводниковые вещества, испускающие холодный свет под действием электрического тока. Свойствами люминофоров обладают сульфиды цинка и кадмия, окислы магния и бария и другие полупроводниковые материалы, в которые вводится активное вещество (обычно атомы меди, марганца...). От технологии приготовления люминофоров во многом зависят такие их свойства, как яркость свечения, разрешающая способность. Важно, в частности, обеспечить достаточно высокую химическую однородность. В перспективе такие люминофоры пригодны, например, для изготовления крупногабаритных телевизионных экранов площадью несколько квадратных метров.

В фотосопротивлениях, или фоторезисторах, — чувствительных световых индикаторах, реагирующих на изменение мощности излучения в различных спектральных диапазонах, используются сульфид, селенид и теллурид кадмия, сульфид и селенид свинца. Чувствительность, спектральные характеристики индикаторов зависят от технологии их производства. Фоторезисторы применяют как детекторы излучений в системах автоматического регулирования, фототелеграфии, для других целей.

Датчики Холл-эффекта — приборы, в которых используется зависимость электрического тока от магнитного поля. Их изготавливают из кремния, германия, антимонида индия, теллурида ртути, арсенида индия. Назначение таких приборов — преобразование постоянного тока в переменный, измерение магнитных полей.

Совсем коротко упомянем полупроводниковые нагревательные и холодильные элементы, тензодатчики, термосопротивления, болометры, счетчики ядерных излучений, устройства для электрофотографии — нового способа фотографирования с помощью полупроводников. И чтобы не продолжать этот перечень, который может быть очень длинным, еще раз подчеркнем: полупроводники — это основа современных систем обработки информации и большого числа систем преобразования энергии.

Принципиально важна для создания таких систем

технология производства полупроводников. Прочитируем вузовский учебник: «Трудности широкого использования большинства новых физических принципов заключаются в необходимости применения новых, недостаточно хорошо освоенных материалов и технологических процессов. Поэтому успех реализации новых перспективных направлений полупроводниковой электроники в первую очередь зависит от прогресса в технологии полупроводникового производства».

Вот оно, место космической технологии! Конечно, можно посочувствовать сегодняшним «каликам переходим»: громаден запас знаний, который необходим, чтобы готовить ту живую воду, которая позволяет приводить в действие руки и ноги современного Ильи Муромца — народного хозяйства.

Количественные изменения, которые полупроводники и техника, основанная на использовании их уникальных свойств, внесли в нашу жизнь, действительно впечатляют. Этих изменений так много и они настолько глубоки, что возникает вопрос, а не таят ли в себе эти количественные изменения предпосылок для качественных скачков в жизни людей?

В трудах величайшего мыслителя античности Аристотеля есть любопытное рассуждение о том, почему в человеческом обществе неизбежно рабство. Существует только одно условие, пишет Аристотель, при котором можно вообразить начальников, которые не нуждаются в подчиненных, и господ, которые не нуждаются в рабах. Это условие состоит в том, чтобы всякое орудие выполняло свою работу по слову команды или разумной догадке. А поскольку таких орудий нет, то рабство неизбежно. Сегодня полупроводниковая техника дала в руки человечества такие орудия.

КАК ЭТО СДЕЛАТЬ

Путешествуя в Зазеркалье, Алиса из книги Л. Кэрролла встречается с большим любителем разнообразных изобретений Белым Рыцарем. Вот одно из них.

«— Я придумал средство от выпадения волос, — сказал Рыцарь.

— Какое же? Мне бы очень хотелось узнать.

— Берешь палочку и ставишь ее на голову, чтобы волосы вились вокруг нее, как плющ. Волосы почему падают? Потому что свисают вниз. Ну а вверх падать

невозможно! Это мое собственное изобретение. Можешь его испытать, если хочешь».

Но Алиса не заинтересовалась выдумкой Рыцаря. Это произошло, очевидно, потому, что предложенный им способ решения задачи отвечал только одному требованию, которому должны удовлетворять изобретения, — он был новым. А вот требованию полезности он не удовлетворял.

Методы космической технологии должны быть и новыми, и полезными. Новыми, потому что они опираются на новую физическую дисциплину — физику невесомости. Полезными, потому что иначе они просто не нужны.

Исследования и эксперименты на космических аппаратах позволили выяснить, в каких направлениях надо идти, чтобы организовать в космосе технологические маршруты производства улучшенных полупроводниковых материалов. Эти эксперименты позволили выделить наиболее перспективные методы производства полупроводников в невесомости:

бестигельные методы — метод плавающей зоны, метод Степанова;

газофазные методы — конденсация из паровой фазы, химический газовый транспорт;

ускоренная направленная кристаллизация образцов.

Прямые эксперименты в космосе доказали: полупроводниковые кристаллы, выращенные в невесомости с помощью этих методов, значительно лучше, чем их земные аналоги. Экспериментов было много, ставили их разные специалисты из разных стран и на разном оборудовании. Поэтому результаты вполне надежны.

Но все это не означает, что работа по созданию технологических методов производства полупроводников в космосе завершена. Напротив, она находится в самом начале. Рекомендованные методы нуждаются в детальной разработке, в привязке к установкам нового поколения.

Существуют и такие вопросы, которые исследованы пока совершенно недостаточно. В предыдущем разделе не случайно шла речь больше о производстве полупроводниковых приборов и устройств микроэлектроники, а не о производстве самих материалов. Можно ли в космосе создавать улучшенные электронные микросхемы? Ясного ответа на этот вопрос еще нет.

Космическое полупроводниковое материаловедение сделало пока первые шаги. Полученные результаты обна-

деживают. Зарубежные специалисты, которые спешат представить научные результаты в долларовом выражении, уже подсчитывают, сколько миллиардов прибыли принесет производство полупроводников в космосе в ближайшие 10—15 лет. Но мы не будем спешить считать деньги. Лучше поставим другой вопрос.

ЧТО ДЛЯ ЭТОГО НАДО

Прежде всего нужны установки нового поколения. Эти установки должны быть ориентированы на решение двух различных, хотя и взаимосвязанных задач:

1. Установки для опытно-промышленного производства полупроводниковых материалов.

2. Установки для исследования проблем физики невесомости с целью формирования научных основ космической технологии и создания оптимальных маршрутов производства улучшенных материалов.

Работы по созданию таких установок ведутся в СССР и за рубежом. К установкам первого типа относится аппаратура «Корунд». Установки второго типа — модернизированная аппаратура «Пион», КГА, печь «Кристаллизатор». Аналогичная аппаратура разрабатывается в США, в Западной Европе и в Японии.

Необходимо дальнейшее совершенствование математических моделей физических и технологических процессов в невесомости. Эти модели должны перебросить мост между экспериментами на модельных веществах и технологией производства материалов.

Проводя исследования, целесообразно изучить не только способы производства улучшенных материалов, но и практические возможности создания в космосе интегральных микросхем, устройств оптоэлектроники, функциональной электроники. Перспективным направлением космической технологии вполне может оказаться тонкопленочная технология. Преимущества невесомости здесь наглядны, но для их практической реализации нужны новые эксперименты.

Очень важно обеспечить на борту космических аппаратов такие условия, которые более всего подходят для производства материалов. В настоящее время эти условия известны уже достаточно хорошо.

Нужно свести к минимальной величине остаточные ускорения и вибрации на борту космического аппарата. Разумно потребовать, чтобы их величина не превышала

10⁻⁵г. Для некоторых технологических процессов, возможно, потребуется более «глубокая» невесомость.

Совокупности этих требований в наибольшей степени удовлетворил бы спутник с технологическим оборудованием на борту, совершающий автономный полет. Такой спутник можно либо запускать с борта орбитальной станции, либо непосредственно с Земли.

В более отдаленной перспективе целесообразно предусмотреть посещение автономного спутника космонавтами, которые будут проводить замену образцов и ремонт оборудования.

На борту орбитальной станции будет размещен специальный технологический модуль с оборудованием, предназначенным главным образом для научных исследований вопросов космической технологии, а также лаборатория для экспресс-анализа образцов. В состав экипажа будут включены специалисты по космической технологии и полупроводниковому материаловедению.

Этот перечень задач, которые предстоит решить, не полон. Сюда следовало бы отнести и проблемы дальнейшего увеличения мощности бортовых энергоустановок, и создания экономичных и эффективных транспортных космических систем. Пока эти проблемы не будут решены, космическое производство не удастся развернуть в полном соответствии с его потенциальными возможностями.

ЧТО БУДУТ ПРОДАВАТЬ ЧЕРЕЗ ПЯТЬ ЛЕТ

Какие же все-таки полупроводниковые материалы, произведенные в космосе, поступят к потребителям через пять лет? А через десять лет?

Откроем американский журнал «Коммершиел Спейс», в котором в 1985 году была опубликована обзорная статья с интересным названием: «Орбитальная технология обещает вкладчикам немедленный доход». Немпожко в стиле рассказов Марка Твена, но для практичных американцев, поверное, завлекательно. В статье сообщается, что в системе Национального управления по авиации и космическим исследованиям в США создано специальное управление космического производства, которое проводит большую работу по привлечению к этой деятельности частных промышленных компаний. «Интерес высок, — заявляют представители управления, — и задача состоит в том, чтобы превратить интерес в участие и ре-

зультат». С чего же собираются начать американские промышленники?

Компания «Майкрогрэвити Ризерч Ассошиейтс», сообщается в той же статье, готовится к производству на орбитальных платформах арсенида галлия. Специалисты компании проанализировали выполненные эксперименты и пришли к выводу, что выход арсенида галлия, годного для использования в электронных приборах, возрастет в десятки раз, если его производить в космосе, а не на Земле. Качество чипов (небольших заготовок) арсенида галлия будет при этом самым высоким.

Американские экономисты подсчитали, что производство каждого чипа в космосе будет давать компании доход 2600 долларов, в то время как на Земле этот доход составляет всего 400 долларов. А если вследствие увеличения производства продажная цена чипа упадет на 25 процентов, то производить арсенид галлия на Земле станет вообще невыгодным, а его производство в космосе по-прежнему будет приносить доход.

Поскольку с арсенидом галлия американские промышленники считают вопрос ясным, на очереди у них подготовка к производству в космосе других полупроводников для электронной промышленности. Среди них называют фосфид индия и другие соединения химических элементов из третьей и пятой групп таблицы Менделеева.

А вот примеры перспективных полупроводниковых материалов другого типа. В 1986 году были опубликованы результаты экспериментов по выращиванию монокристаллов диоксида ртути и триглицинсульфата, которые были выполнены в 1985 году во время полета орбитальной лаборатории «Спейслаб-3». Диоксид ртути используют для приготовления детекторов рентгеновского и гамма-излучения. Кристаллы, выращиваемые на Земле, имеют недостаточную твердость и при выращивании деформируются под действием силы веса. Это сильно снижает качество детекторов, в которых очень нуждается атомная техника. Триглицинсульфат применяют для изготовления датчиков инфракрасного излучения, важная отличительная особенность которых состоит в том, что они могут работать при нормальной температуре. Это намного удобнее по сравнению с инфракрасными датчиками из других материалов, которые надо охлаждать жидким азотом.

Кристаллы диоксида ртути выращивались из паровой фазы. Эксперименты вела американская фирма «ЕГ энд

Г Энерджи Межермент». Одновременно аналогичный эксперимент на борту «Спейслэб-3» проводили французские специалисты. Представители американской фирмы остались довольны результатами своих опытов, но сообщили о них довольно скудные сведения: удалось вырастить хорошие кристаллы динодида ртути «размером с кусок сахара».

Триглицинсульфат выращивали из раствора. Эксперимент проводили совместно компания «ТРВ», Алабамский университет и Центр Маршалла. Удалось вырастить кристаллы, размер которых намного превосходил размеры земных прототипов.

Представители промышленных фирм немного сообщают о своих опытах, и это можно понять: ведь они планируют производство в космосе таких полупроводниковых материалов. А тут законы конкуренции требуют не разглашать заранее своих технологических секретов — речь идет о прибыли, исчисляемой даже на первом этапе сотнями миллионов долларов.

А как готовятся к космическому производству советские инженеры? Возьмем газету «Правда» за 17 мая 1987 года. В репортаже из Центра управления полетом рассказывается об экспериментах, которые Ю. Романенко и А. Лавейкин ведут на станции «Мир» с аппаратурой «Корунд-1М» — самой крупной технологической установкой. От своих предшественниц она отличается тем, что предназначена для опытно-промышленного производства. Эта установка уже была испытана на станции «Салют-7». На ней были получены монокристаллы селенида кадмия и антимонида индия — полупроводниковых материалов, которые используются в электронной технике.

— Мы исследовали эти образцы, — рассказывает один из создателей установки «Корунд» Е. В. Марков, — и выяснилось, что их свойства близки к расчетным. Поэтому было решено продолжить получение кристаллов на несколько модернизированном «Корунде». Модернизация была направлена на то, чтобы установка приобрела еще более промышленный характер или, как говорят специалисты, позволила отработать базовые технологические процессы. А их намечено испытать шесть для десяти разных материалов.

Расчетная производительность «Корунда» — килограммы полупроводников. Вот так на практике уже выступают черты будущего космического производства.

В апреле 1985 года в Советском Союзе был выведен

на орбиту космический аппарат «Космос-1645», на борту которого впервые в мире была размещена автоматическая технологическая лаборатория. В ее составе работали две электронагревные печи — «Сплав-02» и «Зона». Продолжительность орбитального полета технологической лаборатории — 303 часа. На борту лаборатории выращены кристаллы различных полупроводниковых материалов, в частности, методом зонной плавки получены совершенные образцы монокристаллов германия.

В 1986 и 1987 годах технологические лаборатории были размещены на борту спутников «Космос-1744» и «Космос-1841». Результаты экспериментов интересны в научном отношении и представляют собой крупный шаг вперед в разработке технологических методов производства полупроводников в космосе. Технологические лаборатории на борту спутников серии «Космос» — прообраз автоматических орбитальных комплексов будущего.





НЕОБЫЧНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СТЕКЛА

КОСМИЧЕСКАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Лет десять назад одному из авторов книги пришлось обсуждать программу технологических экспериментов с крупным специалистом в области металлургии.

— Не секрет, что автомобили, которые выпускает на-

па промышленность, переутяжелены, — сказал он. — На них идет слишком много металла. Вот если бы удалось заменить хотя бы часть металлических конструкций на композиционные материалы, например на пенометаллы, какой бы мы получили выигрыш в весе наших машин! А ведь пенометаллы в принципе можно получать в космосе. Может, включим в программу?

Наш собеседник прекрасно знал свое дело и хорошо понимал выгоды пеноматериалов — в принципе они могут обладать прочностью стали, но иметь удельный вес пробки. Что и говорить, чудо-материалы! Но вот реальные перспективы космической технологии он представлял себе неважно.

Наверное, когда-нибудь появится теоретическая возможность изготовить автомобиль из металла, сваренного в космосе. Во что только обойдется этот царь-автомобиль и для каких целей его будет выгодно использовать?! Разве что показывать как экспонат на выставке неоправданного расточительства, если такую выставку сочтут целесообразным организовать...

К счастью, действительная ситуация иная. За годы, которые прошли после этого разговора, космическая металлургия сформировалась и прочно встала на ноги как одно из перспективных направлений космической технологии.

МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ ИЗ КОСМОСА

В одной из книг мы встретили такую техническую юмореску: «Сам по себе Алюминий сжимается от холода, а расширяется от тепла. Сам по себе Никель расширяется от тепла, а сжимается, понятно, от холода.

Но в сплаве...

В сплаве Алюминий и Никель ведут себя по-другому... Металлы они или не металлы? Могут же они, должны же себя показать! Хотя бы друг другу себя показать!

И они расширяются — на холоде! Там, где никто не стал бы расширяться (кроме воды, но она не в счет), они расширяются — в сплаве.

А сжимаются — в тепле. Дескать, что нам это тепло — нам подавай холод!

Великое дело сплав!»

В юмореске правильно подмечено основное качество, за которое ценят сплавы: они могут обладать уникаль-

ными свойствами, в том числе такими, каких нет у компонентов.

Но что же такое сплав? Задайте этот вопрос специалисту по металлургии, и вы не получите ясного ответа. Есть сплавы, которые представляют собой механическую смесь разнородных кристалликов, образованных отдельно каждым из компонентов. Такие смеси могут обладать необычными и полезными сочетаниями свойств. Например, сплав свинца с оловом, содержащий включения сурьмы, износостоек и обладает малым коэффициентом трения. Сочетание этих качеств делает его удобным для изготовления подшипников.

Есть сплавы, которые в жидком состоянии не смешиваются или смешиваются только начиная с некоторой довольно высокой температуры. На Земле такие сплавы получают либо методами порошковой металлургии, либо с помощью электромагнитных мешалок.

Существуют твердые растворы, то есть растворы одного металла в другом. Например, цинк и свинец растворяются друг в друге в определенной пропорции. Но на Земле их расплав может отстояться, образуются два жидких слоя: сверху более легкий раствор свинца в цинке, внизу — раствор цинка в свинце. В невесомости можно получить твердый раствор однородного состава.

Твердые растворы металлов используются в качестве конструкционных материалов, так как они обладают высокой прочностью и пластичностью (нержавеющая сталь, дуралюмин и др.).

Помимо твердых растворов и механических смесей металлов, существует большое число структур смешанного типа. Фазовый состав сплавов сильно зависит от условий кристаллизации. Сплавы могут быть также химическими соединениями металлов с неметаллами. Одна и та же пара металлов может образовывать сплавы и фазы разного состава, обычная валентность металлов при этом соблюдается необязательно.

Наконец, сплав может одновременно сочетать в себе свойства и химического соединения, и твердого раствора, и механической смеси. Например, при соединении вольфрама с углеродом образуется и твердый раствор углерода в вольфраме, и карбиды вольфрама.

Разнообразие условий приводит к тому, что существует очень много сплавов. В отличие от простых кристаллических структур их кристаллическая решетка может иметь весьма сложное строение, разнообразны могут

быть и типы межатомных связей в этой решетке. В результате металлические соединения могут обладать исключительно широким спектром механических, физико-химических, электрических, магнитных и других свойств.

Используя методы космической технологии, это потенциальное разнообразие свойств металлических соединений можно расширить еще более. В СССР и за рубежом в этом направлении выполнено много технологических экспериментов.

В первую очередь внимание исследователей привлекли магнитные и сверхпроводящие сплавы, практическое значение которых особенно велико. В Советском Союзе цикл соответствующих экспериментов выполнен на орбитальной станции «Салют-6» и на высотных ракетах «Мир-2» под руководством члена-корреспондента АН СССР Е. М. Савицкого.

Магнитные материалы находят широкое применение в народном хозяйстве. Используя сплавы редкоземельных металлов и кобальта, удалось создать такие постоянные магниты, которые способны удерживать груз, вес которого в 500 раз превышает вес самого магнита.

Свойства магнитных материалов определяются в первую очередь их фазовым составом и кристаллографической структурой. Существенным образом зависят эти свойства также от включений вторых фаз, от состава и величины зерен, от дислокационной структуры слитков. Перенос процесс выращивания слитков в условия невесомости, можно управлять этими свойствами.

Эксперименты Е. М. Савицкого и его сотрудников подтвердили возможность получения в космосе металлических соединений с улучшенными магнитными свойствами. Так, магнитные характеристики космических образцов сплава гадолиний — кобальт оказались значительно более высокими, чем у земных аналогов этой системы.

Сходные результаты были получены и в опытах со сверхпроводящими сплавами. Современные сверхпроводники представляют собой класс сложных композитов с заданными свойствами. Состав сверхпроводящего сплава подбирают, чтобы обеспечить заданный набор свойств (критическая температура, критическая величина магнитного поля и плотности тока, механические свойства). Использование многокомпонентных композиций из разных металлов позволяет преодолеть такую трудность, как

высокая хрупкость многих сверхпроводящих материалов. Надо сказать, что к сверхпроводникам сейчас отношение особое. И вот почему...

СОВЕРШЕНО ОТКРЫТИЕ

А произошло следующее. В 1986 году двое швейцарских ученых Дж. Беднорц и К. Мюллер решили проверить сверхпроводящие свойства керамики, которая была известна и раньше. Эта керамика обладала сложным составом: лантан — барий — медь — кислород. Результат опытов оказался потрясающим: керамика обладала сверхпроводящими свойствами, причем сохраняла их при температуре 30 К!

Узнав об этом, физики из криогенных лабораторий всего мира немедленно взялись за эту и другие похожие керамики. Температурный порог сверхпроводимости стал быстро повышаться. Когда пишутся эти строки, рекордный результат — это сверхпроводящая металлокерамика на основе иттрия, которая сохраняет свои свойства при 90—100 К. А это означает, что в качестве хладагента годится жидкий азот.

Появились сообщения о том, что в некоторых керамиках наблюдаются сверхпроводящие фазы, работающие при комнатной температуре. Правда, эти наиболее высокотемпературные фазы пока неустойчивы, со временем они утрачивают сверхпроводящие свойства.

Значение сделанного открытия трудно переоценить: оно обещает революцию в технике. Пока, правда, остаются серьезные ограничения: высокотемпературные сверхпроводящие керамики имеют невысокую критическую плотность тока. Поэтому их еще нельзя применять в силовых электротехнических устройствах (накопители энергии, обмотки электромагнитных термоядерных реакторов, линии энергопередачи). Но в ЭВМ нового поколения их можно использовать уже сегодня. Что это даст цивилизации?

Приведем один только пример. У нас в руках статья М. Клейтона о разработке ЭВМ с искусственным интеллектом (ИИ), опубликованная в феврале 1987 года в американской газете «Крисчен Сайенс Монитор». О чем пишет автор? «Компьютеры способны мыслить. В последнее время мы слышим много болтовни о неминуемом появлении машин, рассуждающих и действующих подобно людям, но их пока нет. Несмотря на это, ИИ по-

тихоньку завоевывает позиции в офисах корпораций, на сборочных конвейерах, в кабинах экипажей пассажирских лайнеров и, разумеется, на Уолл-стрите».

«Оценки для сбыта ИИ в 1990 году варьируют между 4 и 10 миллиардами долларов».

«Хотя более крупные и мощные компьютеры выдают горы информации, аналитические возможности человека давно достигли своего предела. ИИ сулит возможность синтезирования и отбора данных».

«Машины с ИИ, подражающие возможностям человека, охватывают системы компьютерного видения, распознающие с помощью видеокамер дефекты в изделиях на сборочном конвейере. Разрабатываются системы ИИ, использующие «естественный язык» и понимающие устную или письменную английскую речь».

«Некоторые системы начинены знаниями, полученными у десятков профессионалов. Заложенные в компьютерной программе, эти суммарные знания можно применять сразу целиком и с молниеносной скоростью для разрешения ранее неразрешимых производственных проблем».

«Несколько американских промышленных компаний начали жадно осваивать технологию искусственного разума».

Наверное, достаточно для того, чтобы читатель составил более ясное представление, куда могут вывести цивилизацию ЭВМ на высокотемпературных сверхпроводящих элементах. Пора задать другой вопрос: а при чем тут, собственно, невесомость?

Дело в том, что в невесомости иначе идет процесс фазообразования. Возникают новые фазы. Нельзя исключить, что некоторые из них окажутся сверхпроводящими. Можно исследовать механизмы, приводящие к неустойчивости фаз, которые представляют практический интерес. Словом, эксперименты в невесомости могут оказаться полезными при решении проблем высокотемпературной сверхпроводимости.

Теперь слово за специалистами. Может быть, они есть среди наших читателей?

КОМПОЗИТЫ

Еще один класс материалов, перспективный для космической технологии, — это композиты. Наиболее известный представитель этого семейства материалов — желе-

зобетон. Значительно реже обращают внимание, что из материалов этого же класса сконструированы растения, животные и даже сам человек. Между прочим, и сверхпроводящие керамики, о которых мы только что говорили, — тоже композиты.

Материалы, которые используют в настоящее время в промышленности, работают на пределе своих возможностей. Нового прогресса здесь можно добиться, перейдя к системам, включающим разнородные материалы, свойства которых будут дополнять друг друга. Именно так устроены композиты — высокопрочные конструкционные материалы с заданным комплексом механических и физических характеристик.

Композиты построены на принципе объемного искусственного сочетания разнородных по форме и свойствам материалов с четкой границей раздела между ними и использованием преимуществ каждого из них. Этот принцип позволяет конструировать материалы с уникальным сочетанием свойств: высокой прочностью, малым удельным весом, термостойкостью, эластичностью и др. Благодаря этому композиты находят широкое применение в промышленности.

На основе композитов могут быть созданы высокопрочные материалы, одновременно обладающие достаточной пластичностью. Такие материалы представляют интерес, в частности, для космической техники при монтаже крупногабаритных орбитальных сооружений. В ракетно-космической и авиационной технике находят применение жаропрочные композиционные материалы, которые одновременно обладают высоким сопротивлением разрушению и приемлемой пластичностью.

Существуют, однако, сложности приготовления композитов с заданными свойствами — этому могут препятствовать процессы расслоения, обусловленные физико-химическими взаимодействиями на границах раздела фаз. Один из интересных способов уменьшить взаимодействие между компонентами композита состоит в том, чтобы перенести его приготовление в условия невесомости. Эксперименты подтвердили, что эту задачу можно решить, если одновременно подавить разделение компонентов за счет эффектов поверхностного натяжения. В космосе были получены образцы композитов с более однородным распределением армирующих элементов в матричном материале.

К классу композитов относятся также и пеноматериа-

лы — вещества, обладающие высокой прочностью и малым удельным весом. Исследования на борту космических аппаратов — например, советско-болгарский эксперимент «Пирин» на станции «Салют-6» — показали, что космические образцы пеноматериалов улучшаются по сравнению с земными прототипами. Правда, до их практического использования еще далеко.

В космосе выгодно не только производить металлы и сплавы; проводя эксперименты в невесомости, можно получить полезные рекомендации по совершенствованию металлургических процессов на Земле. Например, американская компания «Джон Дир», которая специализируется на выпуске сельскохозяйственного оборудования, планирует провести на космическом корабле «Спейс Шаттл» исследования процессов обработки железа. Цель исследования — усовершенствование плавильного производства и увеличение сроков службы тракторов, комбайнов и другой сельскохозяйственной техники. Установка, предназначенная для этих исследований, уже прошла испытания на летающей лаборатории.

НЕ ТОЛЬКО МАТЕРИАЛЫ

Мы убедились: в космосе можно с выгодой получать различные металлические соединения. Но этим преимущество космической металлургии не исчерпывается.

Космические условия можно использовать также для производства металлургическими методами изделий различного назначения. Сюда относятся литье металлов и сплавов в целях получения изделий специальной формы, производство тонких пленок и волокон, адгезионное и многослойное литье... Физической основой этих методов служит активное использование эффектов поверхностного натяжения и смачивания в отсутствие сил веса, которые на Земле искажают форму жидких тел.

Описаны технологические операции выполнения этих работ. Например, тонкие пленки, ленты и волокна в принципе можно получать механическим вытягиванием из расплава. Необходимо, правда, принять меры против возможного разрыва тонких пленок под действием термочапильных сил.

Известны также предложения по нанесению в космосе эвтектических покрытий на лопатки газовых турбин авиационных двигателей. Для этого можно использовать эвтектики, армированные волокнами или упроч-

непные дисперсионно. Для нанесения таких покрытий пригоден, например, метод электролитического осаждения. За счет повышения качества покрытий, полученных в космосе, предполагается поднять рабочую температуру турбин на несколько десятков градусов, а также продлить срок их службы. В обоих случаях, как ожидают, будет получен заметный экономический эффект.

Другой интересный вариант улучшения качества изделий — так называемая скиповая* технология, разработанная в ФРГ. Деталь, которую нужно улучшить, отливается на Земле, и на ее поверхность напыляется тонкий слой тугоплавкого покрытия. В невесомости деталь плавится и подвергается направленной кристаллизации. В результате микроструктура детали улучшается, а форма не изменяется, так как тонкая оболочка из тугоплавкого материала остается в космосе нерасплавленной. Предварительные эксперименты на высотных ракетах подтвердили перспективность метода.

Метод напыления впервые был использован в космосе в 1975 году для восстановления просветляющих покрытий оптического телескопа на советской орбитальной станции «Салют-4». Свойства оптических покрытий могут изменяться при эксплуатации аппаратуры в составе орбитального комплекса, а также под влиянием окружающей космической среды.

Анализ показал, что наибольшую опасность представляет осаждение на оптические элементы конденсата из микроатмосферы около космического аппарата. Температура оптических элементов обычно ниже, чем окружающей ее металлической арматуры. Это создает благоприятные условия осаждения конденсата на оптику.

Под руководством академика А. Б. Северного и А. В. Брунса была создана установка для нанесения нового отражающего слоя на поверхность зеркала телескопа методом термокатодного напыления. Установка была применена для восстановления оптических характеристик телескопа внеатмосферного астрофизического комплекса ОСТ-1, который был установлен на орбитальной станции «Салют-4».

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ НА ОРБИТЕ

Металлургические методы используются на космических аппаратах для выполнения ремонтно-восстанови-

* От английского слова skin — кожа, оболочка.

тельных и монтажных работ. Расскажем об установке «Испаритель», разработанной в Институте электросварки имени Е. О. Патона. Основное ее назначение, так же как и ее модификации «Испаритель-М», — нанесение в космосе топочкопленочных металлических покрытий на экспериментальные образцы конструкционных материалов.

В установке использован электронно-лучевой метод нагрева тугоплавкого контейнера. Находящийся в нем металл испаряется, а пары его затем осаждаются на поверхность образца. Разогрев контейнера осуществляется расфокусированным электронным пучком, который формируется низковольтной пушкой с термоэмиссионным катодом.

Основная сложность, которая возникла при создании установки, состояла в том, что расплавленный металл, находящийся в открытом контейнере, в условиях невесомости вел себя совершенно иначе, чем на Земле. При прямом облучении электронным пучком расплав выплескивался из контейнера, а при изменении степени подогрева в зависимости от условий смачивания стенок контейнера либо растекался по этим стенкам, либо собирался в шар и вылетал наружу. Эти трудности удалось преодолеть, заменив прямой нагрев расплава с помощью электронного пучка нагревом стенок контейнера.

Испытания установки «Испаритель» проводились на станции «Салют-6» начиная с 1979 года. Сама установка размещалась в вакууме — в шлюзовой камере станции, а пульт управления — в рабочем отсеке. Испаряемый металл осаждался в виде тонких пленок на поочередно экспонируемых образцах, смена которых осуществлялась манипулятором. На станции «Салют-7» использовалась модернизированная установка «Испаритель-М». Восстановленные металлические покрытия обладали хорошими зеркальными свойствами.

К числу других металлургических операций, выполненных на космических аппаратах, относятся работы по сварке, пайке и резке материалов при выполнении монтажных работ. Первой работой такого рода явились эксперименты по сварке электронным пучком и другими методами, проведенные в 1969 году на космическом корабле «Союз-6». Для экспериментов была использована установка «Вулкан», разработанная в ИЭС имени Патона. В 1976 году на орбитальной станции «Салют-5» был поставлен эксперимент «Реакция», цель которого состоя-

ла в отработке метода соединения металлических конструкций с помощью пайки. Опыты на станции прошли успешно.

В 1984 году на станции «Салют-7» в открытом космосе проведен ряд технологических операций с помощью ручного универсального инструмента (УРИ), разработанного также в ИЭС имени Патона. Для выполнения операций резки, пайки и сварки образцов с помощью установки УРИ используется метод электронно-лучевого нагрева.

Методы нагрева твердой заготовки можно использовать для получения пористых деталей или балок заданного профиля, которые будут обладать одновременно высокой прочностью и малой плотностью. Эта задача имеет большое практическое значение для монтажа в космосе крупногабаритных конструкций различного назначения.

Интересен, например, сплав магния с литием, плотность которого равна $1,35 \text{ г/см}^3$ — вдвое меньше плотности алюминиевых сплавов. Недостаток этого сплава — химическая активность в земных условиях (щелочные металлы обладают высоким окислительным потенциалом). Для космических условий этот недостаток несуществен.

Рассмотрена, в частности, следующая технологическая схема. На Земле получают компактные заготовки сплава магний — литий — алюминий, содержащие пенообразующий элемент типа гидрида бария, который разлагается при нагреве, выделяя большое количество газа. На орбите вспенивание заготовки производится путем нагревания в специальном жестком формообразователе, который определяет профиль детали. По оценкам, возможно десятикратное увеличение объема заготовки.

Для проведения металлургических операций на борту космических аппаратов перспективно непосредственное использование энергии излучения Солнца. Преимущество этого метода состоит в том, что отпадает необходимость в промежуточном преобразовании солнечной энергии в электрическую, а затем снова в тепловую. Первая бортовая аппаратура этого типа — установка «Камин», предназначенная для тепловой обработки образцов, установленных в фокусе параболического солнечного концентратора, — была испытана в 1982 году при запуске советской высотной ракеты «Мир-2».

КОСМИЧЕСКОЕ СТЕКЛОДЕЛИЕ

О важности стеклоделия и преимуществах работы оптических систем в невесомости говорят давно. Еще в 1920 году К. Э. Циолковский писал в повести «Вне Земли»: «Под влиянием твердых тел — сеток, каркасов и сосудов — жидкости принимают чрезвычайно интересные и разнообразные формы. Так, можно получить из воды или масла формы двояковыпуклого и двояковогнутого стекол, которые могут заменить чечевицы оптических инструментов».

Но, несмотря на явный интерес исследователей, космическому стеклоделию пока не повезло. Причина сравнительного отставания этого направления проста: здесь даже для постановки первых опытов требуется намного более сложное оборудование. Прежде всего нужны достаточно высокотемпературные печи, оснащенные левитаторами. Ввиду сложности разработки создание таких установок задержалось.

И все же, несмотря на трудности, первые эксперименты проведены. Они показали, что стекло, полученное в космосе, имеет гораздо меньше оптических дефектов.

ШАРИКИ ИЗ КОСМОСА

Уже рассказывалось о кристаллизации в невесомости свободных расплавов чистых материалов. Были получены сферические образцы меди и серебра, отклонение которых от круглости не превышало одного процента. Основная причина небольшой несферичности образцов состояла в усадке их материала при затвердевании: плотность металлов увеличивается скачком на несколько процентов при переходе из жидкого состояния в твердое.

Возникла заманчивая идея попытаться получить значительно более правильные сферы, перейдя от металлов к стеклообразным системам, плотность которых при затвердевании меняется плавно, без скачков. Такие эксперименты были поставлены на высотных ракетах «Мир-2», но, к сожалению, оказались неудачными. Теплопроводность стекол невелика, и для их охлаждения требуется значительно больше времени, чем для металлов. Использование стеклообразных систем с низкой температурой плавления также ничего не дало, потому что скорость радиационного охлаждения пропорциональна температуре в четвертой степени. В обоих случаях продолжитель-

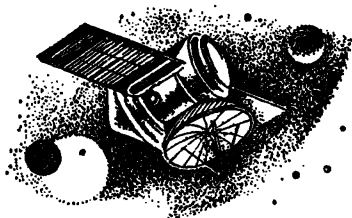
ность полета ракеты — 10 минут — оказалась слишком мала для проведения эксперимента.

Больше повезло американским специалистам. В 1984 году на борту космического корабля «Спейс Шаттл» находилась установка для получения латексных шариков правильной формы. Диаметр шариков около 10 микрометров. В земных условиях шарики такого размера и больше изготовить не удастся. Природный латекс — млечный сок каучуконосных растений, содержащий до 40 процентов каучука. Синтетические латексы получают полимеризацией различных мономеров в водной среде: содержание полимеров в латексе 20—60 процентов, остальное вода и примеси. В земных условиях латексные шарики диаметром больше 3 микрометров получить не удастся. В невесомости считают возможным получать шарики диаметром до 20 микрометров.

Шарики стандартного размера и правильной формы можно использовать для калибровки электронных микроскопов и другой медицинской аппаратуры. Существуют планы применить шарики из латекса для измерения размеров пор в стенках кишечника, что важно для диагностики рака, пор в глазной ткани при исследовании глаукомы. Цена таких шариков, по оценкам, 77 долларов за грамм.

Первая партия шариков передана Национальному бюро стандартов для коммерческой реализации. Предполагают реализовать 600 партий, каждая из которых содержит около 15 миллионов латексных шариков одинакового размера. Цена партии 400 долларов.

Вот еще один парадокс космической технологии: меньше всего экспериментов выполнено по космическому стеклоделанию, но практический выход в денежном выражении — около четверти миллиона долларов — принесло именно это направление. В перспективе рынок сбыта шариков составит около 30 миллионов долларов в год.





КОСМИЧЕСКАЯ БИОТЕХНОЛОГИЯ

НЕКОТОРЫЕ СООБЩЕНИЯ АМЕРИКАНСКОЙ ПРЕССЫ И КОММЕНТАРИИ К НИМ

«Фирма «Мак-Доннелл Дуглас» совместно с фирмой «Орто Фармацевтикал» для проведения экспериментов на космическом корабле «Спейс Шаттл» разработала установку по электрофорезу биологических образцов (каких

именно, не сообщается, поскольку это является секретом фирмы). В ближайшие годы этим методом предполагают получать ежегодно 180 граммов готовой продукции (какой именно, фирменный секрет). Этого количества будет достаточно для лечения нескольких сот тысяч людей. По оценке, общий рынок сбыта фармацевтических препаратов, полученных методами космической технологии, может достигнуть 23 миллиардов долларов».

«Аэроспейс Дэйли», 1982, 14.01, с. 68

«При полете космического корабля «Спейс Шаттл» 51Д, намеченном на 12 апреля 1985 года, на борту должен находиться Чарльз Уолкер, сотрудник фирмы «Мак-Доннелл Дуглас», который будет обслуживать принадлежащую этой фирме установку для электрофореза. Подача заявка на полет другого сотрудника фирмы в ноябре 1985 года для обслуживания опытного образца промышленной установки для электрофореза. Обозреватели подчеркивают, что фирма посылает своих сотрудников для обслуживания электрофоретических установок, а не обучает этому космонавтов, опасаясь, что в последнем случае информация, представляющая собой секрет фирмы, может попасть в руки конкурентов».

*«Авиэйшн Уик энд Спейс Текнолоджи»,
1985, 4.03, с. 11*

«В период с 12 по 19 апреля 1985 года состоялся полет космического корабля «Спейс Шаттл» 51Д. На борту корабля находился космонавт-экспериментатор Чарльз Уолкер, сотрудник фирмы «Мак-Доннелл Дуглас», который обслуживал установку для электрофореза».

Агентство Рейтер, 1985, 23.04

Мы начали рассказ о космической биотехнологии с этих сообщений для того, чтобы читатели могли сразу воспринять серьезность постановки этих проблем. А также непосредственно по первоисточникам ощутить ту обстановку жесткой конкурентной борьбы, в которой в предвидении скорых и больших прибылей развертываются эти работы на Западе.

Каковы научные предпосылки решения проблем космической биотехнологии? В их основе лежат уже знакомые нам механизмы, связанные с физическими закопо-

мерностями, которые рассматриваются в гидромеханике невесомости.

Но, с другой стороны, биологические объекты значительно сложнее самых сложных неорганических физико-химических систем. Поэтому чтобы составить достаточно ясное представление об особенностях биологических объектов, разговор придется начать издалека — поступить, как советовал Морж из книги Л. Кэрролла «Алиса в Зазеркалье»:

И молвил Морж: пришла пора
Подумать о делах —
О башмаках и сургуче,
Капусте, королях,
И почему, как суп в котле,
Кипит вода в морях.

Итак, вопрос номер один: что такое биотехнология?

ЧТО ТАКОЕ БИОТЕХНОЛОГИЯ

Биотехнология — это использование биологических процессов и продуктов в интересах народного хозяйства и здравоохранения. В настоящее время биотехнология, и в первую очередь такое ее направление, как микробиологический синтез, превратилась в самостоятельную отрасль промышленности.

Микробиологическая промышленность решает задачи производства кормовых белков из природного газа, аминокислот, новых антибиотиков, ферментов и многих других продуктов. Успехи биотехнологии сделали доступными для медицины естественные регуляторы человеческого организма: противовирусный препарат — интерферон, искусственно синтезированный инсулин, необходимый для лечения диабета, вакцины против гепатита, клещевого энцефалита и других инфекционных заболеваний.

В ближайшей перспективе на основе методов генотехники реально создание промышленных микроорганизмов, способных перерабатывать в пищевой белок другие материалы, даже пластмассы и минералы. Исследуются возможности получения клеточных гибридов между бактериями, которые существуют за счет энергии Солнца, и микроорганизмами, способными вырабатывать белок. Решение этой проблемы открыло бы путь к созданию микробиологических фабрик, работающих на солнечной энергии и выпускающих кормовой белок.

Изучаются способы применить методы генотехники для решения очень важной для здравоохранения задачи — лечения наследственных генетических недугов. Предложена, например, так называемая генная терапия, существо которой состоит в следующем. Из костного мозга больного извлекают некоторое количество жидкости и помещают ее в чашку Петри. Там клетки этой жидкости инфицируют специально «сконструированными» вирусами, которые переносят в эти клетки здоровый ген. Когда эти клетки вновь вводят больному, начинает работать «правильный» ген, а пораженный становится бездействующим.

Но как сконструировать такие вирусы? Экспериментаторы показали, что если взять особый тип вирусов — ретровирусы, то их можно перестроить таким образом, что они будут служить переносчиками генов в клетки. Разумеется, соответствующая культура вирусов — носителей генной информации должна обладать предельно высокой чистотой. Обеспечить такую чистоту в земных условиях чрезвычайно трудно.

Освоено выращивание в промышленных условиях культуры клеток растений, которая используется для производства физиологически активных соединений (биомасса женьшеня, диоскореи). Клеточная технология применяется также в племенном деле для создания высокопродуктивных пород скота путем имплантации искусственных эмбрионов любым низкопородным животным.

Клеточная технология была использована и для создания клетки нового типа — так называемой гибридомы, которая была получена путем слияния обычного лимфоцита с другой клеткой лимфоцита, пораженного раком. Лимфоциты — белые кровяные тельца — вырабатывают белки-антитела, функция которых состоит в разрушении любых чужеродных тел, поступающих в организм. Нередко, однако, концентрация антител оказывается слишком низкой, иными словами, эффективность иммунной реакции недостаточна, чтобы остановить развитие болезни.

Использование гибридом позволяет резко активизировать работу иммунной системы. Эти искусственно созданные клетки наследуют от своих «родителей» полезные свойства. Подобно исходному лимфоциту, гибридома способна продуцировать антитела, а подобно раковой клетке — быстро растет и размножается. Гибридомная технология — новый важный этап развития иммуноло-

гии, одно из перспективных направлений биотехнологии.

Важнейшую роль в биологических процессах играют особые вещества — ферменты, функция которых состоит в том, чтобы направлять и регулировать обмен веществ в организме. Каждый вид фермента катализирует превращение определенного вида веществ, иногда одну-единственную реакцию. Поэтому сложную совокупность биохимических реакций в живом организме осуществляет огромное количество ферментов.

В современной биотехнологии освоено производство большого числа ферментов. Они необходимы для лечения ряда серьезных заболеваний. С помощью искусственно полученных ферментов можно организовать синтез тканей, кожи, бумаги. Создание подобной биохимической индустрии сыграет важную роль в охране окружающей среды.

Если заглянуть в более отдаленный этап развития биотехнологии, то можно вспомнить, что фотосинтез — продуцирование зеленым растением органического вещества из воды и углекислого газа за счет энергии излучения Солнца — также контролируется ферментами. В будущем биотехнологии предстоит решить проблему создания искусственных веществ, которые позволят использовать реакцию фотосинтеза в промышленных установках.

Если сделать следующий логический шаг, то надо вспомнить и еще один факт: природное ископаемое топливо — нефть, газ, уголь — имеет органическое происхождение. Естественно поставить задачу воссоздания запасов этого топлива биотехнологическими методами.

Оценивая роль и место современной биотехнологии среди других направлений научно-технического прогресса, необходимо еще раз подчеркнуть ее особое значение. Речь идет не только о решении важных народнохозяйственных задач. Биотехнология открывает возможности на новых принципах организовать целый ряд отраслей промышленности, обеспечив устойчивое равновесие с окружающей средой. И наконец, биотехнология в состоянии поднять на новый, существенно более высокий уровень всю современную систему здравоохранения.

Одна из наиболее важных предпосылок успешного развития биотехнологии и комплекса биохимических научных дисциплин, на которые она опирается, состоит в разработке новых высокоэффективных методов разделения биологически активных макромолекулярных веществ.

Первое место среди этих методов принадлежит электрофорезу.

Поэтому вопрос номер два — что такое электрофорез?

ЭЛЕКТРОФОРЕЗ

Биологические вещества представляют собой коллоидные растворы, то есть гетерогенные системы, состоящие из дисперсной фазы — биологических макромолекул — и жидкой дисперсной среды. Находящиеся в коллоидном растворе макромолекулы — это белки, нуклеиновые кислоты, полисахариды и другие образования. Размер этих частиц обычно 10^{-5} — 10^{-7} см.

Благодаря наличию молекулярных групп, способных к электролитической диссоциации, биологические макромолекулы, находящиеся в дисперсной среде, несут определенный электрический заряд. Если среду поместить в сосуд между электродами, к которым подведена разность потенциалов, то под действием внешнего электрического поля заряженные частицы начнут перемещаться к аноду или к катоду в зависимости от знака их электрического заряда. Это явление называется электрофорезом.

Скорость движения частицы в электрическом поле напряженностью один вольт на сантиметр называется электрофоретической подвижностью. Различные частицы обладают разной подвижностью, и этим различием можно воспользоваться, чтобы разделять смеси биологически активных веществ. Именно на этом принципе основаны все электрофоретические методы разделения макромолекулярных биологических материалов.

В чем преимущества электрофореза в космических условиях? В одном, но решающем — в отсутствии конвекции.

На Земле конвекция мешает проведению электрофореза, значительно ухудшает его результаты. Во-первых, падает разрешающая способность, не удастся разделить биологические макромолекулы, обладающие близкими физико-химическими свойствами. Между тем для эффективности биотехнологических процессов именно чистота продуктов имеет решающее значение: белки, аминокислоты и другие биологически активные вещества могут быть очень близки по физико-химическим свойствам, но в биологическом плане выполнять совершенно разные функции.

Во-вторых, стремясь ограничить конвекцию, экспери-

ментаторы, работающие в земных лабораториях, вынуждены резко ограничивать производительность своих установок. Между тем, по оценкам зарубежных специалистов, выход готовой продукции электрофореза к массе сырья может относиться как 1 к 10 000. Поскольку в невесомости конвекция отсутствует, можно использовать установки, рассчитанные на относительно большой расход вещества. Проигрыша в разрешающей способности при этом не будет.

СВЕТЛАНА САВИЦКАЯ НАЧИНАЕТ ЭКСПЕРИМЕНТ

— Включаем «Таврию», — докладывает в Центр управления полетом космонавт Светлана Савицкая.

Так в августе 1982 года был начат первый отечественный эксперимент по электрофорезу. Задача эксперимента «Таврия», который был проведен на станции «Салют-7», состояла в том, чтобы подтвердить повышение эффективности очистки и разделения биологически активных веществ в невесомости. Для опытов были выбраны различные биологические объекты типа клеток, белков, аминокислот, ферментов, которые нужны медикам, биологам и специалистам по сельскому хозяйству. Теоретическая основа эксперимента «Таврия» во многом разработана специалистами Крымского медицинского института.

Кто-то из участников эксперимента «Таврия» подсчитал: чтобы провести опыт по электрофорезу на борту орбитальной станции, Светлане Савицкой пришлось выполнить 130 отдельных операций, причем некоторые из них были далеко не простыми. Савицкая блестяще справилась со своей задачей. Опыты были проведены даже более успешно, чем ожидали их постановщики.

Результаты эксперимента показали, что в условиях невесомости возможно повышение разрешающей способности электрофореза в 10—15 раз. Заметно возрастает и производительность разделения.

ХОТЯТ МИЛЛИАРД ДОЛЛАРОВ

Эксперименты по электрофорезу биопрепаратов были поставлены в 1973—1974 годах на американской орбитальной станции «Скайлэб», а затем, в 1975 году, в рамках советско-американской программы «Союз — «Аполлон».

Руководили экспериментами Р. Аллен (США) и К. Ханниг (ФРГ). Эксперименты подтвердили перспективность методов электрофореза в космосе.

После начала полетов американских космических кораблей «Спейс Шаттл» эти эксперименты были продолжены. Первая серия экспериментов, выполненная во время третьего полета «Спейс Шаттл» в марте того самого 1982 года, когда Светлана Савицкая провела эксперимент «Таврия», закончилась неудачно. Замороженные ампулы с образцами были возвращены на Землю и помещены в холодильную камеру, которая, будучи оставленной на субботу и воскресенье без наблюдения, вышла из строя. Все образцы растаяли, и получить информацию не удалось.

Однако при следующем полете «Спейс Шаттл», состоявшемся в том же году, эксперименты были проведены успешно и дали положительные результаты. Дальнейшие исследования в этом направлении взяли на себя американские фирмы «Мак-Доннелл Дуглас» и «Орто Фармацевтикал», с рассказа об отношении которых к этим экспериментам мы начали главу о космической биотехнологии.

Ход экспериментов по электрофорезу впоследствии не был лишен элементов драматизма. Вот, например, как они проходили в августе и сентябре 1984 года во время двенадцатого полета корабля «Спейс Шаттл». Космонавт-исследователь Ч. Уолкер, сотрудник фирмы «Мак-Доннелл Дуглас», включил установку для электрофореза. Спустя час после начала работы начались резкие колебания давления в жидкости, и установка автоматически выключилась. Уолкер попробовал отрегулировать скорость вращения насосов буферной жидкости, но безуспешно — колебания продолжались.

Специалисты на Земле срочно провели анализ возникшей ситуации и пришли к выводу, что в программу работы установки заложена слишком жесткая реакция на изменение давления атмосферы в помещении для экипажа. Исправить автоматику Уолкеру не удалось. Тогда он принял решение обеспечивать устойчивость потока в колонках вручную. После этого установка стала работать нормально.

Уолкеру удалось получить 0,79 литра гормона — незначительно меньше, чем планировалось. Этого количества достаточно для клинической проверки эффективности гормона, состав и конкретное назначение которого фир-

мы — разработчики аппаратуры так тщательно оберегают от конкурентов. Однако лабораторный анализ продукта электрофореза, полученного на борту «Спейс Шаттл», показал, что он заражен бактериальными эндотоксинами и не пригоден ни для клинической проверки, ни для испытаний на животных. Эксперименты продолжаются.

Мы рассказали так подробно о ходе этих исследований и о возникающих при этом сложностях, чтобы у читателя не сложилось впечатления, будто все трудности уже позади. Напротив, предстоит еще большая и серьезная работа. Опыт экспериментов по электрофорезу свидетельствует также о том, что исследования такой сложности без участия экспериментатора высокой квалификации могут закончиться провалом.

Очевидно, на стадии проведения научных исследований в области космической технологии роль оператора будет оставаться значительной. Другое дело — производство, его лучше организовать на автоматических космических аппаратах.

Фирма «Мак-Доннелл Дуглас» планирует продолжить исследования. В ближайшее время на борту «Спейс Шаттл» намечено начать испытания электрофоретической аппаратуры для опытно-промышленного производства биопрепаратов.

Начиная с 1988 года эту аппаратуру предполагают размещать на автономном искусственном спутнике «Лискрафт», который будет посещаться космонавтами с корабля «Спейс Шаттл».

В середине 1980-х годов фирма «Мак-Доннелл Дуглас» предполагала получить миллиард долларов прибыли от продажи препаратов, произведенных в космосе. Об этом представитель фирмы сообщил американскому журналу «Авиэйшн Уик энд Спейс Текнолоджи» (1984, 10.09).

И последние сообщения: в конце 1985 года фирмы «Мак-Доннелл Дуглас» и «Орто Фармацевтикал» наконец рассекретили, с каким продуктом они работают в космосе. Очевидно, решили, что у конкурентов теперь уже не будет времени, чтобы обогнать их. Это эритропоэтин — гормон, вырабатываемый почками и регулирующий скорость образования эритроцитов в крови. Этот гормон можно будет использовать для лечения больных анемией, организм которых по каким-то причинам утратил способность вырабатывать красные кровяные тела — эритро-

циту. С его помощью надеются также избегать переливания крови перед операциями в тех случаях, когда это грозит осложнениями.

Когда же начнется промышленное производство этого продукта, которого ждут больные? В январе 1986 года по планам американских фирм был нанесен чувствительный удар: катастрофа американского космического корабля «Челленджер» вызвала значительную отсрочку следующих полетов...

ПЕРСПЕКТИВЫ

Какие конкретно биопрепараты целесообразно вырабатывать в космосе? Опубликовано много конкретных предложений. Сводка наиболее интересных из них недавно составлена одним из ведущих советских специалистов по биотехнологии — В. Г. Бабским. С некоторыми уточнениями она представлена в таблице. Речь идет о биологически активных веществах (БАВ), которые могут дать непосредственный эффект в диагностике или лечении ряда заболеваний. Есть в таблице и такие вещества, которые необходимы для фундаментальных медико-биологических исследований.

Объем производства этих препаратов зависит от их назначения: для диагностики или для исследований их нужно совсем немного; для использования в качестве лекарств значительно больше.

По мнению специалистов, применение особо чистых и новых БАВ в фармацевтических целях даст значительный лечебный эффект. Известно, например, что современные вакцины содержат менее одного процента ответственных генов. Иными словами, это означает, что при вакцинации иммунная система на 99 процентов загружена выработкой антител против балластных веществ. Именно эти ненужные антитела вызывают аллергию и другие осложнения при вакцинации. Вакцины, очищенные в космосе, практически не будут содержать этих вредных примесей.

Значительный лечебный эффект ожидается также от применения таких ферментов, как урокиназа. Этот фермент, который в естественных условиях в очень малых количествах вырабатывается надпочечниками, — прекрасное противотромбозное средство. Если бы медики имели возможность в критических ситуациях вводить в организм повышенное количество этого фермента, они

№ п/п	БАВ	Область применения
1	Чистые культуры β -клеток, производящие инсулин.	Трансплантация в поджелудочную железу больных диабетом. Преодоление проблемы отторжения трансплантата с помощью чистых культур.
2	Препараты для лечения ожогов и ран.	Лечебная практика.
3	Интерферон.	Антивирусное и противоопухолевое средство.
4	Гормоны роста.	Стимуляция роста костей, лечение язв.
5	Клетки почек, производящие фермент урикиназу.	Противотромбозное средство; предупреждение инфарктов и инсультов.
6	Антитрипсин.	Замедление развития эмфиземы; усиление эффективности препаратов при химиотерапии раковых заболеваний.
7	Чистые культуры В- и Т-клеток.	Противоопухолевая терапия.
8	Чистые антигемофильные факторы.	Лечение наследственной гемофилии.
9	Чистый вирусный антиген.	Производство антивирусных вакцин.
10	Чистые клетки стволовых культур.	Трансплантация больным с неоплазией костного мозга.
11	Чистые культуры опухолевых культур.	Фундаментальные исследования мембран опухолевых клеток.
12	Чистые иммуноглобулины.	Диагностика иммунных заболеваний.

получили бы весьма эффективное средство предупреждения таких грозных в наше время заболеваний, как инфаркты и инсульты. Методы космической биотехнологии могут оказаться полезными для массового производства урокипазы.

Прогресс в космической биотехнологии обеспечит высокую экономическую эффективность. Например, согласно данным, опубликованным в журнале «Советское здравоохранение» (№ 2 за 1982 год), увеличение в СССР средней продолжительности жизни всего на одну неделю даст обществу экономический эффект около 8 миллиардов рублей.

Первый шаг к опытно-промышленному производству в космосе биопрепаратов уже сделан. В 1985 году на борту орбитальной станции «Салют-7» космонавты В. П. Савиных и А. А. Волков продолжили цикл биотехнологических экспериментов, начатых за три года до этого С. Е. Савицкой и А. А. Серебровым. Но теперь в их распоряжении была значительно более совершенная аппаратура — электрофоретические установки «ЭФУ-Робот» и «Светоблок-Т».

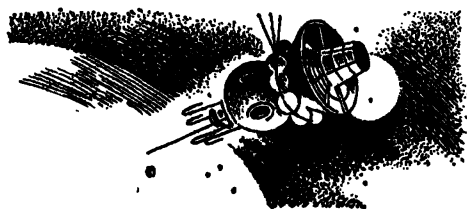
Программа биотехнологических экспериментов составлена под методическим руководством Института биоорганической химии имени М. М. Шемякина АН СССР. Заказчики экспериментов — институты и лаборатории, связанные с медициной, сельским хозяйством, пищевой промышленностью. В процессе экспериментов на станции «Салют-7» произведено 6 мг очищенного белка гемоагглютиниана (противовирусного препарата). Получено также 32 ампулы биопрепаратов, которые содержат клетки-продуценты для пищевой промышленности и животноводства. Эти клетки используют для производства на Земле больших количеств хорошо очищенных стимуляторов роста растений и животных. Увеличить количество очищенной биомассы можно методом клонирования. Производительность космической установки «ЭФУ-Робот» намного выше, чем аналогичной аппаратуры на Земле, — отсюда выгода электрофоретического процесса в невесомости.

В. А. Джанибеков и Г. М. Гречко доставили ампулы с биопрепаратами на Землю. Материалы поступили в распоряжение медиков и биологов, специалистов по сельскому хозяйству и животноводству.

Для продолжения работ по производству особо чистых медико-биологических препаратов в Советском Сою-

же создана значительно более совершенная аппаратура — установка «Каштан», предназначенная для работы на борту автоматической технологической лаборатории серии «Космос».

В Советском Союзе результаты технологических экспериментов — общенародное достояние. У нас нет организаций или фирм, которые, продавая продукцию космического производства, положат прибыли в свой карман. Советские люди имеют право пользоваться лекарствами, в том числе приготовленными в космосе, почти бесплатно. А успехи нашего сельского хозяйства и нашего животноводства, в том числе достигнутые с помощью веществ, которые доставлены из космоса, — это наши общие успехи.





ВЫГОДЫ НОВОГО ЗНАНИЯ

НЕСКОЛЬКО СЛОВ ОБ АЛХИМИИ

Алхимию и алхимиков принято ругать. Еще Фауст у Гёте весьма пренебрежительно отзывался о своем отце, увлечением которого были поиски панацеи — лекарства от всех болезней:

Алхимии тех дней забытый столп,
Он запирался с верными в чулане
И с ними там перегонял из колб
Соединенья всякой дряни.

Между тем это не совсем справедливо. Средневековые ученые Альберт Великий, Роджер Бэкон, Раймонд Луллий, увлекавшиеся алхимией, открыли немало приемов, которые прочно вошли в арсенал современных химических методов.

Мечтой алхимиков было научиться превращать обычные металлы в золото и серебро, найти философский камень и эликсир жизни. В этом они не преуспели и, разумеется, не могли преуспеть. Однако Иоганн Бетгер, придворный алхимик саксонского курфюрста Августа II Сильного, пытаясь изготовить золото для своего вечно нуждавшегося в деньгах господина, открыл секрет производства фарфора. Этим он обогатил своего хозяина — саксонский фарфор славится и до сих пор — и обрек самого себя на пожизненное заточение...

Произнося это похвальное слово алхимикам, авторы имели некую заднюю мысль: между алхимией и космическим материаловедением можно усмотреть определенную параллель. Алхимики стремились производить редкие и дорогие вещества и найти новую, исключительно ценную информацию. Задача космического материаловедения также состоит в том, чтобы научиться производить уникальные материалы.

А вот что касается новой информации... Раскроем снова «Фауста» Гёте.

Свершается! И все прозрачней масса!
Я убеждаюсь, что дождался часа,
Когда природы тайную печать
Нам удалось сознательно сломать
Благодаря пытливости привычной.
И то, что жизнь творила органично,
Мы научились кристаллизовать.

Совершенно верно, из космоса выгодно возить не только новые материалы, но и новую научную информацию.

ФИЗИКА НЕВЕСОМОСТИ РАБОТАЕТ

Здесь кончается сходство космического материаловедения с алхимией и начинаются различия. Этих различий больше, и они гораздо значительнее сходства.

Главное различие состоит в том, что алхимия не опиралась на сколько-нибудь серьезный научный фундамент, ее теоретические предпосылки были глубоко ошибочны. Теоретической основой космического материаловедения является физика невесомости — новая научная дисциплина.

Но физика невесомости не только научный фундамент космического производства. Ее результаты могут иметь и самостоятельное значение.

Физика невесомости как самостоятельное научное направление возникла на стыке нескольких дисциплин: теории тепло- и массообмена, кристаллографии, физики фазовых переходов, физики поверхностных явлений. Поэтому новые результаты, полученные в теоретических и экспериментальных исследованиях в рамках этого направления, обогащают также и эти дисциплины, дополняют и развивают существующие научные представления. Но ученые и инженеры знают: хорошая теория — дело сугубо практическое. Соответствующие результаты будут использованы при решении прикладных задач не только в космосе, но и на Земле. В этом и состоит первая возможность практического использования научных результатов физики невесомости.

Для проведения технологических экспериментов на космических аппаратах разрабатывается уникальная аппаратура. Создаются устройства для прецизионных измерений и контроля рабочих параметров технологических процессов. Найденные при выполнении этих работ новые инженерные решения, перспективные способы проведения технологических процессов, конкретные изобретения также смогут быть использованы для земных целей. Это вторая возможность.

Методы космического материаловедения и физики невесомости лежат в основе производства в космосе уникальных материалов. Но эти же методы можно использовать для решения тех или иных научных проблем, способствующих совершенствованию земных технологических процессов. Это третий способ использовать практически достижения физики невесомости: из космоса выгодно привозить не только новые материалы, но и новую информацию — своего рода «философский камень» для земных технологических процессов.

КОСМИЧЕСКАЯ МЕТАЛЛОФИЗИКА

Методами космической металлургии в космосе можно производить сплавы с уникальными свойствами, а также некоторые изделия. Но возможен и другой подход к обеспечению эффективности космических исследований. Можно изучать процессы фазообразования, формирования сплавов при затвердевании, механизмы влияния на их свойства малых добавок.

Свойства некоторых сплавов, например алюминий — кремний — марганец, существенным образом зависят от малых добавок. Вводя в эти сплавы такие элементы, как стронций или мышьяк, можно контролировать их характеристики.

Механизм действия этих малых добавок, которые сильно меняют свойства сплавов, малопонятен. Сравнивая результаты направленной кристаллизации слитков в условиях невесомости, когда процессы тепло- и массообмена, а также фазообразования протекают иначе, чем на Земле, с аналогичными экспериментами, выполненными в обычных земных условиях, можно глубже понять механизмы управления структурой и свойствами сплавов. Полученная информация позволит внести усовершенствования в существующие металлургические процессы.

ОРГАНИЧЕСКИЕ КРИСТАЛЛЫ

В СССР, в США и в других странах развернута подготовка к производству в условиях невесомости уникальных лекарств от таких серьезных болезней, как диабет, рак, гемофилия, СПИД. Для этого будут использованы методы электрофореза. Ожидают, что космическая фармацевтическая промышленность будет обладать высокой экономической эффективностью.

Но существует и другой подход к физическим экспериментам в области биотехнологии. Для того чтобы с помощью методов генной инженерии перестраивать молекулы белковых веществ в целях производства новых лекарств для борьбы с вирусами и бактериями, надо хорошо знать их структуру. Эту структуру удобно изучать, выращивая соответствующие белковые вещества в виде органических кристаллов. Если размеры этих кристаллов достаточно крупные, то их структуру можно исследовать с помощью рентгенополюсических методов.

К сожалению, органические кристаллы, выращиваемые

мые на Земле, имеют слишком малые размеры. Эксперименты показали, что в космических условиях удастся выращивать кристаллы белковых веществ в 10—100 раз более крупные. Не менее важно, что они обладают значительно более упорядоченной структурой. А это открывает принципиально новые возможности для рентгеноструктурных исследований этих кристаллов и последующего использования на основе информации, полученной в космосе, методов клеточной инженерии.

В конечном счете речь идет о том, чтобы, расшифровав структуру белка, научиться синтезировать на его основе другие белки, которые будут обладать заданными свойствами. Можно, в частности, конструировать новые энзимы — особые вещества, управляющие биохимическими реакциями. Это позволит сформировать новое направление биотехнологии, отличительная особенность которого состоит в использовании информации, полученной в космических исследованиях.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

В условиях невесомости, когда нетрудно исключить влияние естественной конвекции, можно поставить эксперименты, проведение которых на Земле представляет немалые трудности. К их числу относится, например, исследование свойств вещества вблизи так называемой тройной точки, когда оно может одновременно существовать в трех разных фазовых состояниях — твердом, жидком и газообразном.

Можно значительно повысить точность, с которой обычно измеряются теплофизические, электрофизические, оптические и другие характеристики различных веществ. Более точные значения этих параметров будут иметь не только научное значение, они помогут оптимизировать многие технологические процессы.

В условиях невесомости удобно исследовать более детально, чем это возможно на Земле, многие эффекты физики поверхностных явлений. С более высокой точностью могут быть измерены коэффициенты поверхностного натяжения, их зависимость от температуры и от концентрации примесей.

Исследование процессов физической химии и горения на Земле значительно осложняется явлениями конвекции. Проведение экспериментов в невесомости, где обычная тепловая конвекция отсутствует, и одновременно

на Земле с использованием аналогичной аппаратуры позволит разработать более точную теорию этих процессов.

ПРИНИМАЮТСЯ ЗАЯВКИ

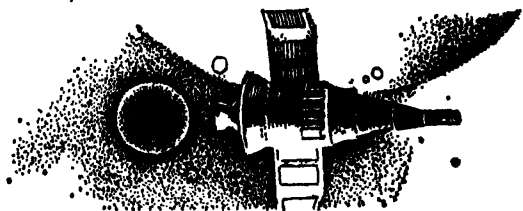
Эта глава оказалась самой короткой в книге — слишком мало пока накоплено конкретных материалов по вопросам, которым она посвящена. Но это несколько не снижает их важности. И здесь опять уместно обратиться к бессмертной трагедии Гёте, которую мы уже цитировали в этой главе.

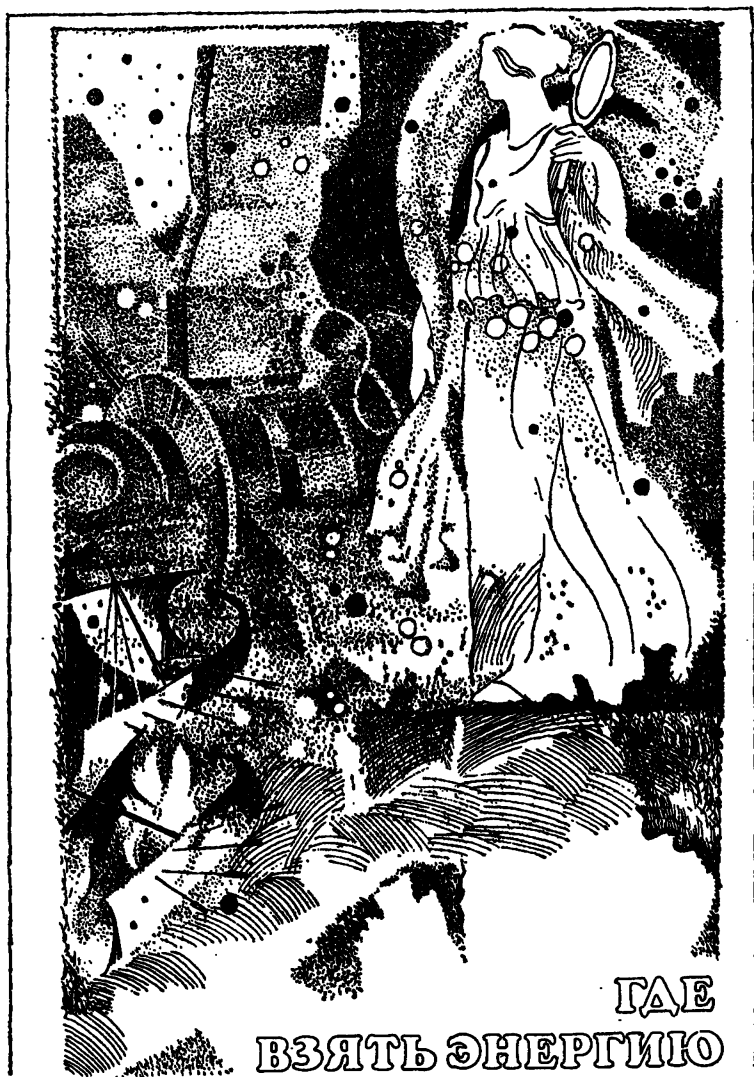
В том, что известно, пользы нет,
Одно неведомое нужно, —

говорит Фауст, вечный искатель истины.

Практические возможности физики невесомости выявлены пока совершенно недостаточно. Многого здесь мы пока по-настоящему даже не можем себе представить. Что ж, тем более интересными обещают быть предстоящие исследования.

Поэтому хочется закончить эту небольшую главу обращением к читателям: ищите! Возможно, вам удастся предложить идею нового интересного эксперимента по физике невесомости, который будет иметь не только научное, но и практическое значение.





ГДЕ ВЗЯТЬ ЭНЕРГИЮ

СКОЛЬКО НУЖНО ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МАТЕРИАЛОВ В КОСМОСЕ

Первые установки для экспериментов по космической технологии потребляли мало энергии — десятки ватт, в крайнем случае 100—200 ватт. Установки для опытно-

промышленного производства рассчитаны уже на киловатты. А каким будет энергопотребление на этапе промышленного производства?

Во-первых, потребуется расширить номенклатуру материалов, предусмотреть возможность работы с тугоплавкими и термостойкими образцами. Во-вторых, необходимо будет обеспечить выращивание крупногабаритных образцов — диаметром до 50—60 и больше миллиметров. В-третьих, для повышения производительности бортового производственного комплекса целесообразно будет «запараллелить» работу нескольких однотипных установок.

Все это поведет к тому, что на этапе промышленного производства в космосе потребуются бортовые энергоустановки мощностью до 50—100 киловатт.

После завершения производственного цикла автономный орбитальный комплекс будет посещаться космонавтами, которые произведут замену образцов, выполнят в случае необходимости ремонтные и профилактические операции, установят новую программу работы оборудования на пульте управления.

Автономный орбитальный комплекс для производства материалов должен быть рассчитан на достаточно длительный срок существования — до 5—15 лет. Чтобы обеспечить такое продолжительное время жизни, он должен быть выведен на достаточно высокую круговую околоземную орбиту — до 500—700 километров над поверхностью Земли.

Размещение производственного комплекса на высокой орбите необходимо также для того, чтобы снизить до минимально возможной величины остаточные ускорения, обусловленные лобовым сопротивлением верхних слоев атмосферы. Если для проведения ряда технологических процессов потребуется использовать не электрическую энергию, вырабатываемую бортовой энергоустановкой, а концентрированные потоки солнечного излучения, то, возможно, производственный комплекс потребуется перевести на более сложные орбиты. Одной из таких орбит является так называемая солнечно-синхронная полярная орбита, находящийся на которой космический аппарат почти постоянно освещен Солнцем и не заходит в тень Земли.

В соответствии с возможностями энергоустановок технологических орбитальных автономных модулей, платформ и комплексов будет нарастать и грузопоток мате-

риалов, получаемых в космосе. На этапе опытно-промышленного производства его величина не превысит немногих килограммов в год, а номенклатура будет весьма ограниченной. Переход к промышленному производству будет означать значительное расширение ассортимента материалов, а их суммарный грузопоток достигнет десятков килограммов в год.

Какие космические энергоустановки могут обеспечить выполнение этих требований?

ТИПЫ КОСМИЧЕСКИХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

К бортовым космическим энергоустановкам предъявляются жесткие требования. Они должны иметь минимальную удельную массу (то есть массу, отнесенную к единице электрической мощности), обладать высокой надежностью и ресурсом.

Современные космические энергоустановки основаны на использовании источников первичной энергии трех видов: химической, ядерной и солнечной. Энергоустановка включает преобразователь энергии, который обеспечивает трансформацию первичной энергии в форму, удобную для работы бортовой аппаратуры, главным образом в электрическую энергию.

Химические источники энергии — это аккумуляторы и топливные элементы. В аккумуляторах происходит непосредственное преобразование химической энергии в электрическую. По мере выработки энергии необходима периодическая подзарядка бортовых аккумуляторов.

Их собственная энергоемкость невелика — около $100 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}$ для серебряно-цинковых аккумуляторов. Поэтому аккумуляторы обычно используются совместно с солнечными батареями, которые подзаряжают их, когда Солнце освещает космический аппарат. Когда аппарат находится в тени Земли, бортовая аппаратура получает энергию от аккумуляторов.

Другая разновидность химических источников энергии — электрохимические генераторы, или топливные элементы. В них происходит химическая реакция с выделением электроэнергии. При этом расходуются вступающие в химическую реакцию вещества, которые непрерывно подаются в генератор из баков.

При поступлении топлива и окислителя в генераторе происходит химическая реакция, при которой генерируется электрический ток и конечным продуктом кото-

рой является вода. Электрический ток генерируется в топливном элементе в результате того, что в него введены металлические электроды, на одном из которых выделяются положительные ионы водорода, а на другом — отрицательные ионы кислорода. Топливный элемент разделен пористой перегородкой — ионообменной мембраной, — сквозь которую положительные и отрицательные ионы диффундируют навстречу друг другу и соединяются, образуя воду.

Преимущество элементов состоит в том, что они обеспечивают гораздо более высокий выход энергии в расчете на единицу массы. А недостаток их в том, что они не допускают перезарядки, запас рабочего вещества в них используется однократно.

В качестве реагирующих рабочих веществ в топливных элементах обычно используют жидкие водород и кислород. Удельная масса современных топливных элементов снижена до 20 кг/кВт , а удельный расход топлива и окислителя составляет около $0,4 \text{ кг/кВт} \cdot \text{ч}$.

Определенными преимуществами обладают ядерные источники энергии — радиоизотопные и реакторные. Мощность радиоизотопных источников очень мала, обычно не более нескольких сотен ватт. Ядерные источники в состоянии обеспечить производство электроэнергии в широком диапазоне мощностей — от нескольких киловатт до десятков и сотен киловатт и больше.

В ядерных источниках сначала выделяется тепловая энергия, которая затем преобразуется в электрическую. Такие энергоустановки обеспечивают необходимый уровень мощности независимо от положения космического аппарата на орбите и обладают большим ресурсом. Прогнозируемая удельная масса энергоустановки с ядерным реактором в диапазоне мощностей $80\text{—}200$ киловатт — около 40 кг/кВт (или 25 Вт/кг).

Однако применительно к задачам космической технологии ядерные энергоустановки обладают крупными недостатками. Эти недостатки связаны главным образом с требованиями безопасности. Создание экранов, защищающих операторов и аппаратуру от радиоактивных проникающих излучений, сильно утяжелит установку. Непростым делом будут динамические маневры по сближению и стыковке транспортных кораблей с орбитальной станцией, на борту которой будет ядерная энергоустановка. Жесткие ядерные излучения могут оказать вредное воздействие на технологические процессы производ-

ства материалов (возникновение дефектов структуры в кристаллах, ухудшение качества биологически активных препаратов и т. д.). В силу этих причин в проектах орбитальных производственных комплексов использование ядерных источников энергии в настоящее время не предусматривается.

Третий тип космических энергоустановок — это солнечные энергоустановки. На советских орбитальных станциях «Салют» и «Мир» установлены солнечные фотопреобразователи, которые работают в сочетании с буферными аккумуляторными батареями, компенсирующими нехватку энергии при полете станции в тени Земли. Такая энергоустановка надежно обеспечивает непрерывную работу аппаратуры в течение нескольких лет существования станции.

Иначе решен вопрос с энергообеспечением полетов американского многоразового транспортного космического корабля «Спейс Шаттл» и орбитального блока «Спейслэб», где в качестве энергоустановки используются топливные элементы. В результате длительность пребывания корабля и лаборатории на околоземной орбите ограничена всего 7—8 сутками. Этого хватает для проведения экспериментов, но совершенно недостаточно для опытно-промышленного производства в космосе материалов.

Таким образом, солнечные энергоустановки следует рассматривать как основной тип источников энергии для космического производства.

ЭНЕРГИЯ СОЛНЦА

Энергия, излучаемая Солнцем, огромна. Напомним: мощность солнечного излучения на околоземных орбитах около 1,4 киловатта на квадратный метр. Нужен лишь преобразователь этой энергии в форму, удобную для использования в технологических процессах производства материалов.

Разумеется, наиболее заманчиво использовать энергию солнечных лучей непосредственно для нагрева образцов. Макеты таких установок созданы и успешно испытаны на Земле.

В Институте проблем материаловедения Академии наук СССР разработана гелиоустановка «Луч-1», рассчитанная на эксплуатацию в условиях космического полета. Установка имеет зеркальный параболический отра-

жатель диаметром 1,5 метра. Падающие на него лучи собираются в фокусе, где расположен контротражатель, также имеющий форму параболоида, но значительно меньшего размера. Контротражатель направляет сконцентрированные солнечные лучи на кварцевые линзы, проходя через которые световой поток попадает в рабочую зону установки, где размещены образцы.

Установка оснащена системой автоматического слежения за Солнцем. При ее испытаниях на полигоне в Крыму в зоне расположения образцов зарегистрирована плотность потока излучения до 900 Вт/см^2 . Ожидают, что в условиях космического полета эта величина возрастет примерно вдвое.

В том же институте разработан другой вариант установки для нагрева образцов концентрированным солнечным излучением. Для подвода к образцам от зеркальной системы потока концентрированного излучения используется волоконная оптика, то есть пучок тонких гибких стеклянных нитей, внутри которых почти без потерь распространяется световой поток. Установка удобна тем, что зеркальную систему можно разместить снаружи орбитальной станции, а сконцентрированный световой поток подвести по световодам непосредственно в рабочий отсек станции. Это значительно облегчает эксплуатацию установки в условиях космического полета.

В 1982 году на советской высотной ракете «Мир-2» прошли первые испытания установки «Камин», предназначенной для плавки образцов в невесомости.

И все же, несмотря на перечисленные преимущества, технологические установки прямого солнечного нагрева не получили пока большого распространения. Широкому использованию установок этого типа в интересах космической технологии мешает несколько обстоятельств. Во-первых, продолжительность «суток» на орбитальной станции невелика — всего 90 минут. Для многих технологических процессов светлого времени этих «суток» не хватает. Во-вторых, в условиях орбитального полета, когда ориентация самой станции относительно Солнца непрерывно сложным образом меняется, задача управления оптической системой концентратора оказывается непростой.

Поэтому для целей космической технологии используется, как правило, другой тип солнечных энергоустановок — солнечные батареи, или фотопреобразователи. Преобразователи этого типа основаны на свойстве неко-

торых полупроводников, например кремния и германия, генерировать электрический ток при облучении их поверхности светом.

На орбитальной станции «Салют-7» установлены панели солнечных батарей. Общая площадь трех батарей равна 52 квадратным метрам, полная масса — около 360 килограммов. Минимальная средневитковая мощность батареи составляет 1,5 киловатта. Панели солнечной батареи подключены к электрохимическим генераторам. На освещенной Солнцем части орбиты солнечная батарея вырабатывает электроэнергию, которая используется для питания бортовой аппаратуры и для подзарядки аккумуляторов. На теневой части орбиты аппаратура получает энергию от аккумуляторов.

Стандартные солнечные батареи на основе кремния имеют КПД 7—12 процентов, их удельная мощность около 130 Вт/м^2 при удельной массе $2,5\text{—}10 \text{ кг/м}^2$.

Ресурс солнечных батарей зависит от высоты орбиты космического аппарата. Если эта высота не превышает 500 километров, то батареи без заметного ухудшения характеристик могут работать несколько лет. На более высоких орбитах космический аппарат пересекает радиационные пояса Земли. При этом в результате бомбардировки поверхности солнечных батарей быстрыми протонами и электронами, которые содержатся в радиационных поясах, отдаваемая батареями мощность в течение месяца снижается в 3—5 раз.

Разработаны проекты космических энергоустановок с солнечными батареями на мощность 25—100 киловатт. При создании крупногабаритных солнечных батарей необходимо еще решить несколько проблем и прежде всего повысить мощность, снимаемую с единицы массы фотопреобразователя, и снизить его стоимость.

Повышения мощности солнечных батарей можно добиться, переходя от обычных, кремниевых фотопреобразователей к преобразователям на основе арсенида галлия или более сложного полупроводникового материала галлий—алюминий—мышьяк. Эти фотопреобразователи обеспечивают повышение КПД до 15—16 процентов, а в лабораторных условиях — до 22 процентов. Кроме того, толщина таких материалов меньше, чем в случае кремниевых фотопреобразователей. Поэтому использование их на космических станциях дает ощутимый выигрыш в массе и в размерах солнечных батарей.

Однако солнечные батареи на основе арсенида галлия

имеют серьезный недостаток — они очень дороги. По зарубежным данным, их стоимость достигает 200—300 долларов в расчете на один ватт снимаемой мощности, что почти на порядок больше, чем для кремниевых батарей. Нетрудно подсчитать, что стоимость таких солнечных батарей суммарной мощностью 100 киловатт — эту величину мы называли, имея в виду потребности развернутого производства материалов в космосе, — составит внушительную сумму — в 30 миллионов долларов.

Ясно поэтому, что для обеспечения энергетических потребностей космического производства необходимо искать другие решения.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ БАТАРЕИ

Предложены различные способы повышения эффективности и снижения стоимости фотопреобразователей. Кремниевый солнечный элемент почти не использует ультрафиолетовую и инфракрасную части солнечного спектра.

Поэтому его КПД, определяемый по отношению к энергии солнечного излучения во всем его спектральном диапазоне, невысок. В СССР под руководством академика Ж. И. Алфёрова на основе полупроводников сложного состава, так называемых гетеропереходов, разработаны новые типы фотопреобразователей, которые в значительной мере лишены этого недостатка.

Существует и другой способ повышения эффективности фотопреобразователей. Если использовать преобразователь, состоящий из ячеек, которые изготовлены из различных полупроводниковых материалов и рассчитаны на различные участки спектра излучения Солнца, то такой многоячейковый фотопреобразователь целесообразно разместить в фокусе концентратора солнечного света. Концентратор можно изготовить из тонкой пленки, на которую напылен слой металла с высоким коэффициентом отражения. Пленка намного легче и дешевле самого фотопреобразователя.

В Ленинградском физико-техническом институте имени А. Ф. Иоффе созданы каскадные фотопреобразователи на основе арсенидов галлия и мышьяка, которые при использовании концентратора дают КПД 30 процентов. Согласно расчетам комбинация различных гетеропереходов может обеспечить повышение КПД до 45 процентов,

а по оценкам члена-корреспондента АН СССР Н. С. Лидоренко — до 90 процентов.

Еще одно перспективное направление повышения эффективности и снижения стоимости фотопреобразователей — это переход к тонкопленочной технологии. Исследуются возможности производства тонких пленок поликристаллического и аморфного кремния, арсенида галлия и др.

Один из способов производства пленочных солнечных кремниевых элементов основан на разложении в плазме разряда газообразного силана — соединения кремния с водородом. В этом процессе на тонкую пленку осаждается аморфный кремний. Толщина пленки может быть порядка 100—200 микрон. В настоящее время на основе тонких пленок аморфного гидрогенизированного кремния созданы образцы фотопреобразователей с КПД 11 процентов.

Солнечные батареи на основе аморфного кремния с учетом потребностей космической технологии обладают рядом принципиальных преимуществ. Во-первых, это резкое снижение стоимости. По зарубежным оценкам, к 1990 году на этой основе будет освоено производство фотопреобразователей с удельной стоимостью в пределах 0,1—0,3 доллара за один ватт мощности. Это в сотни раз меньше стоимости современных перспективных солнечных батарей.

Во-вторых, сырьем для производства солнечных батарей этого типа служит чрезвычайно дешевый и доступный материал. Поэтому не возникнет трудностей, связанных с нехваткой исходного сырья при наращивании мощностей предприятий по выпуску солнечных батарей для оснащения космических аппаратов разных классов.

В-третьих, на основе тонкопленочных фотопреобразователей нетрудно создать панели солнечных батарей рулонного типа. В свернутом состоянии они будут напоминать рулон обычных обоев, а это очень удобно, когда возникнет задача вывода в космос энергоустановок большой мощности. Суммарная площадь панелей солнечных батарей, рассчитанных на электрическую мощность 100 киловатт, составит не менее 700 квадратных метров. «Упаковка» конструкции таких габаритов на космическом транспортном корабле, а затем ее развертывание на орбите — очень непростое дело. А для батарей, которые можно свернуть в рулон, задача намного облегчается. Вероятно, развернуть такую солнечную батарею можно с помощью

способа, на основании которого работает всем известная детская игрушка «уйди-уйди».

В-четвертых, солнечные батареи, приготовленные на основе тонкопленочной технологии с использованием аморфных материалов, в перспективе можно будет изготавливать также в многоячейстом варианте и в сочетании с концентраторами солнечного излучения. Все это позволяет рассчитывать, что к тому времени, когда работы по космической технологии подойдут к этапу массового производства в космосе неорганических и органических материалов, будут созданы солнечные батареи новых типов. Наиболее перспективны для целей космического производства тонкопленочные фотопреобразователи на основе аморфного кремния, а также с использованием многоячейстых фотоэлементов с концентраторами солнечной энергии.

КОНЦЕНТРАТОРЫ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

О применении зеркал в космосе писали К. Э. Циолковский и Ю. В. Кондратюк. В своей неопубликованной рукописи, имеющей примечательное название «Тем, кто будет читать, чтобы строить», Кондратюк предлагал разместить на околоземных орбитах большие пленочные отражатели солнечного излучения, установленные на специальных жестких каркасах. По его мнению, эти зеркала можно использовать для освещения городов, для обогрева тундры и тайги, для разгона космических аппаратов, снабженных солнечным парусом. На этой рукописи стоит дата: 1918—1919 год...

В интересах космической технологии бортовые концентраторы солнечного излучения можно использовать по-разному. Во-первых, на их основе могут быть созданы энергоустановки, в которых лучистая энергия Солнца будет непосредственно использоваться для нагрева образцов. О сложности решения этой задачи мы уже говорили. Однако если речь пойдет об энергоустановках большой мощности, то заранее нельзя определить, на каком пути встретится больше трудностей — при создании солнечных батарей или энергоустановок прямого нагрева. Во всяком случае, очевидно, что цепочка преобразования солнечной энергии в тепловую на основе второй схемы значительно короче.

Концентраторы солнечного излучения прямого нагрева могут обеспечить равномерный нагрев образцов до

весьма высоких температур — 3000 °C и выше. Такие концентраторы можно использовать для выращивания полупроводниковых монокристаллов методом плавающей зоны, для варки стекла и получения сплавов бестигельными методами. Для регулирования светового потока можно применить оптические системы, управляемые автоматически, и диафрагмирование. Тот же концентратор пригоден для выполнения технологических операций по сварке, резке и пайке при монтажно-строительных работах в космосе. Такие работы будут проводиться, например, при строительстве в космосе крупногабаритных энергопроизводственных комплексов.

КОСМИЧЕСКИЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ XXI ВЕКА

Перспективы энергоустановок для космического производства на ближайшие 15—20 лет в достаточной степени ясны. Будут использоваться главным образом солнечные батареи, среди которых наибольшего внимания заслуживают тонкопленочные фотопреобразователи на основе аморфного кремния, а также многоячеистые преобразователи с концентраторами солнечного излучения. Мощность этих энергоустановок будет увеличена до десятков киловатт. Для проведения технологических процессов найдут применение солнечные концентраторы.

А дальше? Какими путями пойдет развитие космической энергетики в следующем столетии? Анализируя одни только тенденции развития и потребности космического производства, на этот вопрос ответить нельзя.

Но если учесть другие направления индустриального освоения космического пространства, то можно получить более ясную картину. Индустриализация космоса — динамический процесс, который развивается одновременно в нескольких направлениях (космические информационные системы, космическое производство и строительство, космическая энергетика больших мощностей). Состояние работ по различным направлениям индустриализации космоса находится на разных этапах. Космические информационные системы (спутниковая метеорология, картография, системы связи, разведка полезных ископаемых, охрана природной среды и др.) широко используются в народном хозяйстве. По космической технологии в СССР и за рубежом развернуты экспериментальные и теоретические исследования, ведется подготовка к опытно-про-

мышленному производству материалов. Космические электростанции исследуются пока в проектом плане.

Создание таких электростанций может существенно повлиять на развитие космического производства. Поэтому на вопросе о таких электростанциях следует остановиться немного более подробно.

Космические солнечные электростанции (КСЭ) предназначены для энергоснабжения Земли. Их предполагают размещать на геостационарной орбите на высоте 36 тысяч километров над поверхностью планеты. Энергия солнечного излучения будет преобразовываться в электрическую, например, с помощью фотопреобразователей и передаваться на Землю в виде хорошо сфокусированного пучка радиоволн в СВЧ-диапазоне. В этом диапазоне излучение практически не поглощается ни атмосферой, ни облаками. На Земле оно попадает на приемную антенну и преобразуется в электрический ток промышленной частоты.

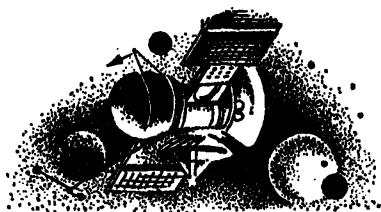
Предполагаемая мощность такой электростанции 5—10 гигаватт, масса 50—100 тысяч тонн, площадь солнечных батарей 50—100 квадратных километров. Это сооружение грандиозных масштабов. Поэтому маловероятно, чтобы такие космические объекты появились раньше середины следующего столетия. Однако работы в этом направлении будут проводиться, потому что такие электростанции могут помочь преодолеть те трудности, с которыми в настоящее время столкнулась энергетика (опасность истощения минеральных ресурсов, возрастающее загрязнение природной среды промышленными отходами и т. д.).

Наряду с КСЭ, в которых используются фотопреобразователи и СВЧ-аппаратура, рассматриваются проекты космических электростанций другого типа, которые отличаются тем, что солнечная энергия непосредственно преобразуется в энергию лазерного излучения. На Землю в этом случае передается хорошо сфокусированное лазерное излучение. Независимо от того, какой в конечном счете выберут тип КСЭ, на первом этапе их разработки будут, очевидно, созданы образцы, рассчитанные на уменьшенную мощность, например около одного мегаватта.

Если в первом десятилетии XXI века на орбитах вокруг Земли появятся энергоустановки мощностью один мегаватт, а затем и выше, это откроет перед космическим производством принципиально новые перспективы. Пре-

жде всего отпадет необходимость в создании автономной энергоустановки. Вместо нее можно будет использовать либо антенну для приема СВЧ-излучения, либо легкий концентратор на основе металлизированных тонких пленок для лазерного излучения. Это обеспечит выигрыш в полезной нагрузке, а следовательно, и в стоимости космического производства. Появится также возможность сравнительно недорогой ценой значительно повысить уровень энергообеспечения космических производственных комплексов.

Существует и еще одно направление космического производства, связанное с развитием орбитальных энергосистем большой мощности. Если когда-либо задача строительства сети КСЭ для энергоснабжения Земли и орбитальных производственных комплексов будет переведена на рельсы практической реализации, то возникнет вопрос о целесообразности использования в таком строительстве материалов, которые будут доставлять в космос не с Земли, а с Луны.





ВНЕЗЕМНЫЕ РЕСУРСЫ

ХОД ЭФИРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

1. Минералы, руды, самородные металлы и некоторые другие простые вещества — от болидов, астероидов, лун и планет (известь, глина — из минералов).

2. CO_2 , H_2O и другие сложные и простые газы, ме-

галлы и металлоиды — из минералов, сильным накаливанием в солнечных печах.

3. Почва из раздробленных минералов, атмосфера из CO_2 , H_2O и других газов.

4. Почва и атмосфера с помощью растений (выделено Циолковским) и обильного солнца дают множество растительных продуктов: пищу, строительные материалы, одежду, кислород, углерод и т. д.

5. Пища, кислород и углерод, превращаясь с помощью людей в CO_2 и другие экскременты, возвращают почве все ее потери.

6. Но добывание пищи и технических материалов возможно теоретически и в особых солнечных машинах, заменяющих растения.

7. Углерод и другие продукты растений и солнечных машин раскисляют металлы, то есть из руд дают чистые металлы и CO_2 .

8. Преобразование минералов в строительные и другие технические материалы, в разные газы и в пищу увеличивает число жизней до предела, допускаемого солнечной энергией. Мертвое оживает, происходит воскресение материи.

9. Люди, растения и искусственная пища, сходя со сцены, возвращают все взятое почве и атмосфере.

10. Когда население достигло предела, устанавливается равновесие между приходом и расходом. Но, может быть, минералы еще потребляются в усиленном количестве для улучшения жизненной обстановки*.

ПИСЬМО КОСМИЧЕСКОГО КОЛОНИСТА **

Дорогие Брайен и Ненси!

Мы живем в колонии «Бернал-Альфа», которая представляет собой сферу с диаметром 500 метров и протяженностью экватора около мили. Каждые 32 секунды сфера оборачивается вокруг своей оси, таким образом, в районе экватора создается сила веса, равная земной. «Земля» имеет вид небольшой закругляющейся долины, которая поднимается по обе стороны от экватора до 45°

* Воспроизводим по рукописи К. Э. Циолковского, которая написана 2 мая 1924 года и ранее не публиковалась (Архив АН СССР, ф. 555, оп. 1, д. 250).

** За космического колониста это письмо написал в 1975 году профессор Принстонского университета в США Джерард О'Нейл. Печатается с сокращениями.

широты. Наши дома находятся в зоне нормальной силы веса, но многие из нас работают на строительстве, которое ведется там, где силы веса вообще не существует. Большая часть поверхности «земли» занята невысокими, расположенными уступами жилыми домами, широкими торговыми аллеями и маленькими парками. Многие предприятия, обслуживающие центры и магазины, расположены под «землей», в районе, прилегающем к полюсу, где сила веса небольшая.

У нас есть пешеходные и велосипедные дорожки, проходящие по кольцевому маршруту вдоль экватора. Неподалеку от него течет наша небольшая река.

Солнечные лучи попадают к нам примерно под углом в 45° , почти как на Земле в середине утра или во второй половине дня. Продолжительность дня, а следовательно, и погода зависят от нас — от того, когда и сколько мы пропустим солнечного света.

На «Бернале» такой же климат, как на Гавайских островах, и мы круглый год проводим много времени на открытом воздухе. Наше жилое помещение имеет примерно те же размеры, что и дом, который был у нас прежде на Земле. У нас есть сад.

Для города с населением в 10 тысяч человек мы имеем все необходимое для развлечений: четыре небольших кинотеатра, довольно много хороших маленьких ресторанов, много любительских и театральных групп.

Чтобы добраться до соседних колоний, требуется всего несколько минут, поэтому мы часто ездим туда, чтобы посмотреть фильм, послушать концерт или просто сменить на время климат.

Все колонии подчиняются корпорации энергетических спутников, которая учреждена как многонациональный доходный консорциум при ООН. Космическая колония может сооружать на орбите солнечные энергетические установки, используя материалы, полученные путем переработки богатой рудами лунной почвы и доставленные на место ценой относительно низких затрат с помощью построенной на Луне ракетной пусковой установки.

В процессе строительства был применен метод «ботиночного шнурка» — сооружение первым высокоорбитальным промышленным комплексом других таких же комплексов. При помощи этого метода количество производимой в космосе продукции увеличивается в геометрической прогрессии.

Размеры поселений постоянно росли, некоторые из

них достигли 12 миль в диаметре. Мы уже ведем разговоры о переносе сырьевой базы с Луны на астероиды, где у нас будет полный набор элементов, включая углерод, азот и кислород. Учитывая имеющиеся там неиссякаемые запасы сырья, мы можем построить космические колонии общей площадью поверхности «земли», в 3000 раз превышающей земную.

При использовании принципа «ботиночного шнурка» энергия спутников оказывает огромное влияние на развитие земной индустрии. Уже через 13 лет после начала строительства орбитальное производство удовлетворило все энергетические нужды США.

Мы ведем здесь очень приятный образ жизни. Свежие овощи и фрукты не переводятся у нас круглый год. Мы с Дженни после первых трех лет пребывания в колонии взяли шестимесячный отпуск. И роскошно провели время. Мы оба работаем. Дженни — инспектором турбинных лопастей, я наблюдаю за точностью сборки.

Сейчас мы начинаем задавать себе вопрос: захотим ли мы вернуться на Землю, когда подойдет время уходить на пенсию? Скорее всего мы решим двинуться еще дальше, а не возвращаться назад.

ПРОГРАММА-МИНИМУМ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Вы заметили, как по-разному написаны эти работы? Мыслям Циолковского тесно на бумаге, он пишет заметки «для себя», чтобы затем развить их подробно в других работах. Как много стоит за каждой его фразой! Вчитайтесь, к примеру, в пункт 6 — ведь за этими краткими словами стоит целая программа работ по биотехнологии, которой в нашей книге посвящена отдельная глава...

Совершенно иначе читается «письмо», которое его автор отнес к 1990 году. Это популярное изложение идей, которые впервые были сформулированы в трудах гениального основоположника космонавтики. Но одна общая мысль объединяет эти две разные работы: в обоих случаях идет речь о решении производственных задач в космосе на основе использования внеземных ресурсов. Какова роль этого направления космической технологии согласно современным представлениям?

В предыдущих главах мы писали о тех задачах, которые космическая технология решает по производству на орбитальных аппаратах неорганических и органиче-

ских материалов в интересах ускорения научно-технического прогресса на Земле. Если в повестку дня практической космонавтики будут включены задачи, о которых писали К. Э. Циолковский и вслед за ним Дж. О'Нейл, то фронт работ по космической технологии станет намного более широким. Следует поэтому поставить вопрос, существуют ли у человечества в настоящее время реальные потребности, ради удовлетворения которых широко-масштабное строительство подобных космических колоний станет необходимостью.

Проблемы промышленного освоения космоса впервые и весьма обстоятельно были исследованы К. Э. Циолковским. Согласно его представлениям основная цель проникновения в космос состоит в том, чтобы «завоевать Вселенную для блага человечества, завоевать пространство и энергию, испускаемую Солнцем». Циолковский указывал несколько причин, которые делают актуальной постановку такой задачи: принципиальная возможность значительного роста энергопотребления и, следовательно, качества жизни*, возможность производства в космосе улучшенных материалов и изделий, переселение в космос избыточной части населения Земли, повышение устойчивости цивилизации по отношению к катастрофам космических масштабов.

Первые два аргумента полностью сохраняют свою силу и в наше время, и о них шла речь в предыдущих главах. Иначе обстоит дело с двумя другими аргументами. По мнению специалистов по демографии, население Земли должно стабилизироваться в XXI веке, достигнув по разным оценкам 10—15 миллиардов человек. Такое население при условии решения известных социальных и политических проблем может обеспечить себе удовлетворительные условия жизни на нашей планете, не покидая ее.

Что касается космических катастроф, то для звезд типа Солнца их вероятность весьма невелика. Земная цивилизация вступила в космическую эру своего существования около 30 лет назад. Условия в Солнечной системе согласно современным представлениям не будут сколько-нибудь существенно меняться в течение нескольких ближайших миллиардов лет. Записав рядом обе названные цифры, можно спокойно предоставить поразмыслить на

* Употреблен современный термин, которым К. Э. Циолковский не пользовался.

тому об опасности космических катастроф нашим отдаленным потомкам. Судя по всему, у них будет для этого достаточно времени.

А теперь посмотрим, что думает по этому поводу О'Нейл. Он подробно говорит о программе строительства космических солнечных электростанций для энергоснабжения Земли. Об этой программе много писали в советской и зарубежной литературе. Коротко говоря, положение оценивается следующим образом: ранее середины XXI века программа их строительства не станет актуальной. Но можно ожидать, что во второй половине этого столетия такие электростанции будут давать заметный вклад в энергетику нашей планеты.

При этом следует заметить, что речь идет именно о сооружении космических объектов энерго-производственной инфраструктуры Земли, а вовсе не о космических колониях, предназначенных для массового переселения на них жителей нашей планеты.

По О'Нейлу, массовая эмиграция с Земли в космос будет способствовать разрешению многих социальных противоречий современного капиталистического общества, достигших в наше время большой остроты. Говоря о многочисленных автономных колониях в космосе с их ограниченным народонаселением, О'Нейл вспоминает Афины времен Перикла, которые достигли расцвета, когда, по его словам, их население не превышало нескольких десятков тысяч человек, а конфронтация с окружающим миром не была особенно жесткой. Можно также предположить, что, размышляя о спасительности колонизации космоса, О'Нейл думал о своих ирландских предках, которые в надежде спастись от жестокостей эпохи первоначального накопления пересекали на своих утлых парусниках Атлантический океан, ожидая найти на другом его берегу землю обетованную.

Все это, конечно, сильная идеализация истории. Достаточно вспомнить, что на каждого свободного гражданина в античном обществе приходилось 5—6 обслуживающих его рабов, которые были полностью лишены каких-либо прав. И не случайно идиллия Афин классического периода, о которой с вожделением пишет О'Нейл, продолжалась очень недолго — около 20 лет. А затем наступил период упадка и разорения. Нет, не в космосе надо спасаться от тех резких противоречий, которые раздирают сегодня капиталистический мир!

Итак, каковы же выводы? Во-первых, мы не увидели убедительных аргументов в пользу безотлагательной массовой эмиграции населения Земли на космические поселения. Во-вторых, можно предвидеть, что хотя не так быстро, но неуклонно будет происходить процесс последовательного промышленного освоения космического пространства. Этот процесс предполагает строительство в космосе промышленных объектов различного назначения: космических систем связи, спутников для исследования Земли, орбитальных заводов для производства в невесомости органических и неорганических материалов, отражателей солнечного излучения для освещения районов Земли, космических солнечных электростанций. На этих космических объектах неизбежно появится и население — космонавты, строители, обслуживающий персонал, врачи. Но их будет относительно не очень много, и жить в космосе они будут по вахтенному принципу, как на некоторых заполярных станциях.

Однако это уже не программа-максимум, которая была ориентирована на широкомасштабную и быструю колонизацию окосолнечного пространства, а скорее программа-минимум космической технологии.

Эта реалистическая программа развертывания работ по космической технологии в отдаленной перспективе — вероятно, не ранее XXI—XXII веков — будет в определенной степени ориентирована на использование для строительства в космосе внеземных ресурсов. Конкретно речь может идти об использовании сырьевых запасов Луны, а затем вещества астероидов. Остановимся коротко на соответствующих возможностях.

ГОРНЫЕ КАРЬЕРЫ НА ЛУНЕ

В работах К. Эриксе, А. Т. Улубекова, Б. О'Лири, Б. Ф. Яника рассмотрен ряд предложений использовать сырьевые ресурсы естественного спутника нашей планеты:

1. Строительство околоземных энергопроизводственных комплексов на основе сырья, доставляемого с поверхности Луны.

2. Производство топлива для двигателей космических кораблей, совершающих рейсы в околоземном и около-солнечном пространстве.

3. Добыча полезных ископаемых и их доставка на Землю.

4. Перенос на Луну с Земли части энергоемких и экологически опасных производств.

В чем состоят основные цели этих проектных исследований? Это уменьшение зависимости программ промышленного освоения космоса от использования ресурсов одной только Земли, ослабление антропогенного давления на окружающую среду, обусловленного развитием промышленности. Из четырех конкретных направлений индустриализации Луны два последних, ориентированные на доставку с ее поверхности полуфабрикатов и материалов, вряд ли соответствуют достижению сформулированных целей.

На Луне отсутствуют рудные месторождения, богатые полезными ископаемыми, не обнаружены в свободном виде вода и кислород. Это приводит к значительному удорожанию разработки лунных ресурсов. Кроме того, площадь поверхности Луны составляет всего 7 процентов площади Земли. Поэтому маловероятно, чтобы в обозримой перспективе лунная индустрия смогла давать какой-либо вклад в работу земной промышленности.

Возможны, правда, исключения. Известно, например, что перспективные термоядерные электростанции будут в качестве сырья использовать смесь изотопов водорода-дейтерия и трития. Но если дейтерия много в Мировом океане, то тритий — радиоактивный изотоп — в Земле отсутствует. Его приходится получать, бомбардируя нейтронами ядра редкого изотопа лития. А вот в лунных породах, которые миллиарды лет подвергаются бомбардировке солнечным ветром, мог накопиться другой редкий изотоп — гелий-3. Его можно использовать вместо трития. Добыча гелия-3 на Луне может оказаться рентабельной — для термоядерных электростанций он потребуется в очень малых количествах.

Больше перспектив у работ по использованию лунного сырья для космического строительства. Из лунных пород типа реголита можно получать железо, алюминий, кремний и, возможно, титан, хром, марганец. В качестве побочного продукта возможно получение воды и кислорода. Из лунного грунта можно также получать стекло и другие материалы.

Добычу пород на Луне наиболее целесообразно осуществлять открытым способом в горнодобывающих карьерах. Для вскрышных работ и выемки породы будут использоваться экскаваторы, а доставка породы будет осу-

ществляться с помощью транспортеров. Если задача состоит в том, чтобы доставлять в космос $3 \cdot 10^5$ тонн руды и полуфабрикатов в год (такого количества материалов достаточно для сооружения одной космической солнечной электростанции), то суммарная производительность лунных карьеров должна быть $3 \cdot 10^6$ тонн в год.

Предварительная переработка сырья будет осуществляться непосредственно на Луне, на горнообогатительных комбинатах. Необходимую энергию для работы промышленного комплекса на Луне можно получать от ядерных или солнечных энергоустановок. Для производства из лунного сырья стекла, керамики, стекловаты и других материалов пригодны концентраторы солнечного излучения.

Основные преимущества транспортировки грузов с Луны состоят в том, что для Луны скорость освобождения в 5 раз меньше, чем для Земли, — 2,36 и 11,2 км/с соответственно. Кроме того, на Луне нет атмосферы. Поэтому энергоемкость доставки грузов с поверхности Луны в космос намного меньше.

Переработку лунного концентрата более выгодно производить на окологрунных производственных комплексах, размещаемых, например, в точках либрации. Продукция таких комплексов на 90 процентов обеспечит потребности в материалах, необходимых для строительства космических солнечных электростанций.

Однако для того, чтобы организовать регулярную доставку рудных концентратов с поверхности Луны в космос, предварительно потребуется провести значительные и трудоемкие работы по промышленному освоению спутника нашей планеты. Эти работы будут включать в себя создание лунной исследовательской базы, геологическую разведку полезных ископаемых, сооружение горнодобывающего и промышленного комплексов на Луне, организацию необходимых транспортных перевозок. По оценкам, для выполнения совокупности этих работ потребуется не менее 70 лет.

В 1984 году Национальное управление по аэронавтике и космическим исследованиям и Национальная академия наук США провели конференцию по проблемам изучения Луны, где был обсужден, в частности, вопрос о создании на Луне постоянной исследовательской базы, подобной станции в Антарктиде.

Ориентировочные затраты на создание лунной исследовательской станции с экипажем около 10 человек —

50—90 миллиардов долларов (в ценах 1984 года). Продолжительность предварительных исследований, разработки, создания и начального периода эксплуатации станции — около 25 лет. В связи с проектами создания лунной станции специалисты подчеркивают целесообразность широкого международного сотрудничества по этой программе.

Даже если в первой четверти XXI века подобные проекты будут осуществлены, это будет лишь сравнительно небольшая часть работ, которую предстоит проделать для создания лунного промышленного комплекса. Можно поэтому считать, что есть основания отнести начало промышленного использования Луны на вторую половину XXII века.

ОБ АСТЕРОИДАХ И ПРОЧЕМ

После того как будет создан энергопроизводственный комплекс для переработки лунных ресурсов, логично будет поставить задачу доставки на этот комплекс небольшого астероида.

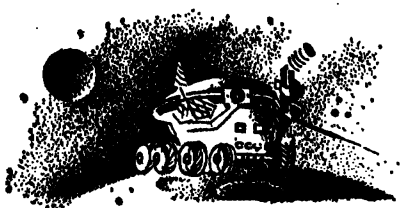
Практический интерес представляет использование астероидов групп Аполлона и Амура, которые сравнительно близко подходят к Земле. В этом случае энергоемкость операций по их захвату сравнима с затратами энергии на транспортировку лунного грунта.

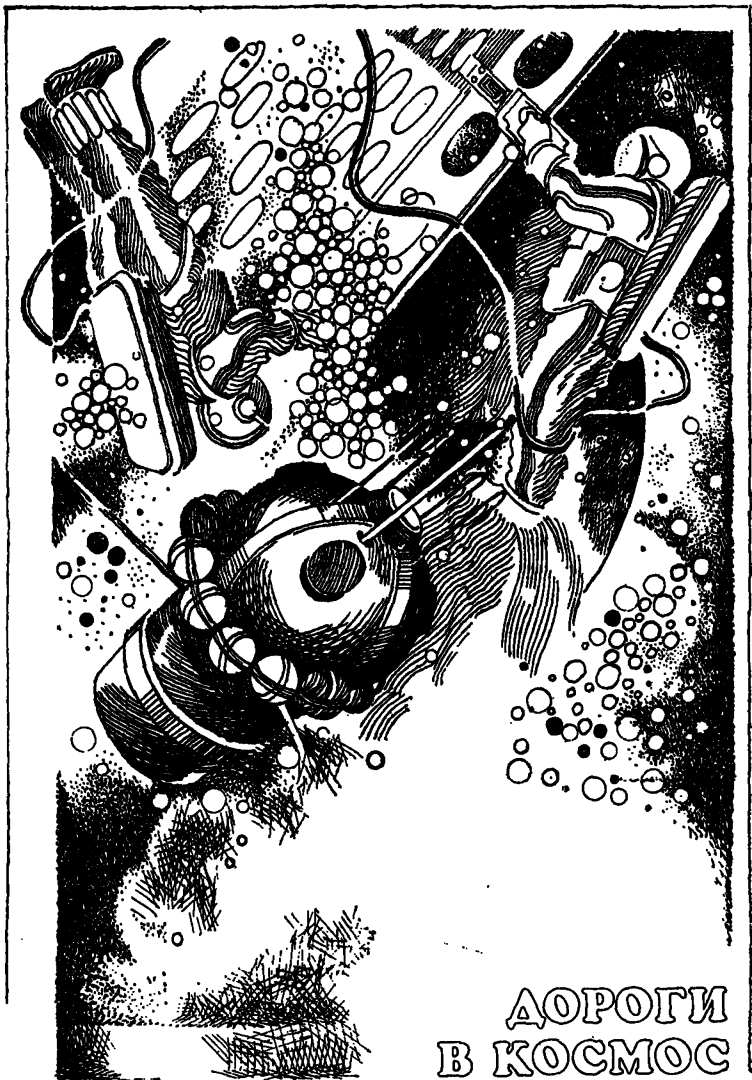
По составу часть метеоритов содержит в значительных количествах железо и никель, а другие — углерод и в связанном состоянии воду. Можно думать, что таким же составом обладают и астероиды.

Имея в виду еще более отдаленную перспективу освоения Солнечной системы, выдвигают проекты перемещения спутников планет-гигантов, создания на орбитах вокруг Солнца крупномасштабных космических поселений разной конструкции (эфирные города Циолковского, раковина Покровского, сфера Дайсона), изменения климата и колонизацию Венеры и Марса и т. д. Однако все эти проекты направлены не на создание космической промышленности, а на решение другой задачи — расселение человечества в Солнечной системе. Как мы уже писали, в настоящее время отсутствуют достаточно убедительные аргументы в пользу того, чтобы сделать решение этой задачи не только принципиально возможным, но и необходимым.

Появятся ли такие аргументы в будущем? Трудно сказать. С отдалением перспективы прогноз становится все менее достоверным и определенным. Зато у писателей-юмористов появляется привлекательная тема для шуточных предсказаний.

Еще А. П. Чехов в одном из своих ранних рассказов писал о якобы существующем в Англии проекте просверлить Луну колоссальным буровым. Дыра будет принадлежать англичанам. Однако сами англичане в наше время выдвигают и более «смелые» проекты. Так, современный английский популяризатор науки и техники Д. Джоунс в своей книге «Изобретения Дедала» не без юмора предлагает весьма радикальный эксперимент: установить на несчастном спутнике нашей планеты громадный молот, который станет упорно колотить по ее поверхности с частотой, подобранной таким образом, что в конце концов Луна, как бокал, резонансно возбуждаемый голосом певца, разлетится вдребезги. В результате Земля навсегда лишится своего спутника, а вместо него образуется кольцо, напоминающее кольцо Сатурна. Вид этого кольца украсит ночное небо, а космическая промышленность получит в изобилии дешевый и доступный материал для любых строительных работ на околоземных орбитах.





ДОРОГИ В КОСМОС

СКОЛЬКО СТОИТ БИЛЕТ В КОСМОС

«Завинтив входной люк, Лось сел напротив Гусева и стал глядеть ему в глаза, — в колючие, как у пойманной птицы, точки зрачков.

— Летим, Алексей Иванович?

— Пускайте.

Тогда Лось взялся за рычажок реостата и слегка повернул его. Раздался глухой удар, — тот первый удар, от которого вздрогнула на пустыре тысячная толпа. Повернул второй реостат... Аппарат рванулся. Удары стали мягче, сотрясение уменьшилось. Лось прокричал:

— Поднялись».

Вы, конечно, узнали эти строки из знаменитого романа А. Толстого «Аэлита». Действительно просто, как бывает только в фантастических романах, — повернул рычажок, и ты уже в космосе. Но вот на другое обычно не обращают внимания: ракету для полета на Марс и обратно удалось построить в полуголодной и разоренной России 1921 года силами инженера Лося и, кажется, двух рабочих. Вот это уже фантастика в квадрате!

Если бы такие ракеты были сейчас в нашем распоряжении, для космического производства не было бы никаких проблем. Поездка в космос обходилась бы не дороже, чем билет до Калуги, в крайнем случае до Ленинграда. А для промышленного производства материалов экономичность — один из самых важных факторов.

Но не случайно в русском народе всегда говорили: «За морем телушка полушка, да рубль перевоз». Вот сухие цифры. Доставка на околоземную орбиту высотой 300 километров полезной нагрузки с помощью современных ракет-носителей либо на основе американской многоразовой космической транспортной системы «Спейс Шаттл» обходится в среднем в круглую сумму 2500—5000 долларов в расчете на каждый килограмм массы. Что и говорить, в наши дни космическое путешествие пришлось бы инженеру Лосю явно не по средствам...

Еще дороже перелеты на более высокие орбиты. Например, чтобы вывести груз на геостационарную орбиту, придется согласно зарубежным данным израсходовать 60 тысяч долларов в расчете на каждый килограмм массы.

А на каких орбитах будут размещаться космические производственные комплексы? Какова будет их масса? Какую величину грузопотока потребуется обеспечить?

В Советском Союзе основная часть технологических экспериментов выполнена на борту пилотируемых орбитальных комплексов «Салют» — «Союз» — «Прогресс». Масса такого комплекса около 33 тонн. Масса грузового транспортного корабля «Прогресс» 7 тонн, в том числе масса полезной нагрузки 2,3 тонны. Масса пилотируемого

корабля «Союз Т» также около 7 тонн, включая возвращаемый модуль массой 3 тонны. В 1987 году в Советском Союзе начаты испытания новой мощной универсальной ракеты-носителя «Энергия», которая предназначена для вывода на околоземную орбиту многоразовых космических кораблей и крупногабаритных космических аппаратов научного и народнохозяйственного назначения. Ракета-носитель «Энергия» способна выводить на орбиту полезную нагрузку массой более 100 тонн. Создание этой системы открывает новый важный этап в промышленном освоении космоса.

Следует ожидать, что на этапе опытно-промышленного производства материалов будет совершен переход к орбитальным комплексам модульного типа со сменяемыми экипажами. Набор аппаратуры для производства органических и неорганических материалов будет размещен в специальном технологическом модуле. Для энергоснабжения этой аппаратуры, а также для отвода избыточного тепла из модуля будут использоваться единая бортовая энергоустановка и система терморегулирования.

Одновременно найдут применение автономные искусственные спутники-платформы с установленным на них технологическим оборудованием. Такие автономные технологические платформы будут работать в двух режимах — они будут предназначены для полностью автономного полета, включая вывод на околоземную орбиту и возвращение на Землю, либо будут выводиться на орбиту транспортным кораблем и периодически посещаться космонавтами с базовой станции. Время существования таких спутников-платформ на орбите от нескольких недель до нескольких месяцев.

На этапе развернутого промышленного производства будут созданы специальные орбитальные комплексы, в состав которых войдут базовый блок с лабораторией для экспресс-анализа образцов, пилотируемые и грузовые транспортные космические корабли, автономные технологические корабли, автономные технологические модули-платформы. Величина грузооборота продукции космической промышленности на этом этапе (ориентировочно около 2000 года) достигнет сотен килограммов в год. Кроме того, потребуется выводить в космос специальное оборудование, детали энергоустановок и т. д. Разумно оценить потребный масштаб соответствующего грузопотока, приняв его величину на два порядка больше грузопотока-нетто, то есть чистой продукции.

Суммарный грузопоток для обеспечения работы орбитальных промышленных комплексов на рубеже XX и XXI столетий составит, таким образом, несколько десятков тонн в год. В эту цифру не входит, разумеется, масса самих орбитальных комплексов и транспортных кораблей обслуживания. Если учесть и эту массу, то величина грузопотока на космических трассах Земля — околоземные орбиты — Земля возрастет еще на порядок и достигнет сотен тонн в год.

На каких конкретно околоземных орбитах лучше всего размещать космические производственные комплексы? Высота оптимальной орбиты выбирается, исходя из нескольких соображений. Во-первых, необходимо ограничить величину остаточных ускорений, обусловленных лобовым сопротивлением верхней атмосферы. Во-вторых, должны быть минимальными затраты энергии на вывод грузов на эту орбиту, а также затраты топлива на поддержание ее высоты. Очевидно, эти требования взаимно противоречивы. Например, для компенсации сопротивления атмосферы при полете комплекса «Салют» — «Союз» по круговой орбите высотой 200 километров ежегодно потребовалось бы 20 тонн топлива. При переходе на орбиту 300 километров расход топлива снижается до 3 тонн, то есть почти в семь раз. Поэтому, несмотря на то, что стоимость доставки топлива на орбиту высотой 300 километров с помощью транспортных кораблей «Прогресс» на 25 процентов больше, чем на 200-километровую орбиту, первая орбита оказывается в конечном счете более экономичной.

Исходя из указанных соображений, можно считать, что для размещения космических комплексов более всего подходят круговые орбиты высотой 400—600 километров. Использование еще более высоких орбит нецелесообразно, так как там проходит нижняя граница радиационных поясов Земли. Длительный полет в зоне этих поясов опасен для солнечных батарей, бортовой аппаратуры и, разумеется, для экипажей космических кораблей.

С ЗЕМЛИ НА ОРБИТУ

В США рекламируют многоразовый транспортный космический корабль «Спейс Шаттл» и орбитальную лабораторию «Спейслэб» чуть ли не как идеальную транспортную космическую систему нашего времени. Вот что писал, например, журнал «Америка» в сентябре 1984 го-

да: «Спейслэб» оправдала все наши ожидания... Одновременно сам корабль продемонстрировал свои уникальные качества как средство доставки в космос аппаратуры для исследовательских работ».

Так ли это с точки зрения требований космической технологии? О некоторых недостатках американской транспортной системы «Спейс Шаттл» мы уже писали. Во-первых, уровень остаточных ускорений на ее борту близок к критической величине — эти ускорения не ниже $10^{-4} g_0$. Во-вторых, для целого ряда технологических процессов продолжительность состояния невесомости, которую обеспечивает эта система, — около недели — слишком мала.

Что касается этапа промышленного производства, то здесь важную роль будет играть стоимостный фактор. Между тем минимальная цена доставки на околоземную орбиту грузов системой «Спейс Шаттл» составляет 2500 долларов за килограмм. Но ведь, кроме самих образцов, в космос надо выводить и оборудование для их производства. Причем после каждой рабочей недели на орбите это оборудование приходится возвращать на Землю, а в следующий раз снова выводить в космос. Представьте себе завод, с территории которого в конце рабочей недели вывозят все станки. А в понедельник везут обратно. Как вы думаете, сколько потребуется директору этого завода времени, чтобы пустить по миру свое предприятие?

А ведь для работы оборудования нужна еще и энергия, значит, придется везти с собой дополнительное топливо — в качестве энергоустановки на борту «Спейс Шаттл» используются электрохимические генераторы. Вероятно, если американские специалисты всерьез прикинут, во что будет в конечном счете обходиться производство в космосе материалов, если ориентировать его обслуживание на транспортную систему «Спейс Шаттл», им придется к сумме, которую мы назвали, приписать справа еще два нуля.

Впрочем, мы, конечно, не сомневаемся в том, что американские специалисты умеют считать. Просто между рекламными статьями в журнале «Америка» или в других подобных изданиях и подлинными целями, ради достижения которых в действительности создавалась система «Спейс Шаттл», есть существенная разница. Нет сомнений, главное назначение этой системы — военное. Теперь об этом фактически пишут в самих США.

Речь идет о доставке в космос элементов боевых лазеров, ускорителей частиц, электродинамических пушек. Таких систем пока нет, но именно на их разработку выделены сейчас в США миллиарды долларов. Именно на них делает ставку нынешняя администрация США, поставившая цель выиграть космическую гонку вооружений и добиться превосходства в «звездных войнах».

Для решения задач космического производства потребуются в конечном счете совсем другие транспортные средства — прежде всего значительно более экономичные. 50—100 долларов за килограмм — вот что должна обеспечить перспективная транспортная космическая система. Путь «Шаттла» к этим цифрам не ведет.

Каковы те принципы, на которых можно построить такую экономичную транспортную космическую систему? Приведем мнение одного из проектантов космических кораблей — летчика-космонавта К. П. Феоктистова. Наиболее перспективной он считает полностью многоразовую одноступенчатую ракету. Этот космический корабль в отличие от «Шаттла» должен быть бескрылым.

Вторая ступень «Шаттла» имеет крылья и совершает посадку как обычный самолет, не используя тормозных двигателей. Это позволяет производить посадку на специальные аэродромы с бетонной дорожкой. Скорость посадочной ступени при этом намного выше, чем у современных истребителей, — около 350 километров в час.

Но для экономичного транспортного космического корабля крылья не нужны. При выведении на орбиту они увеличивают аэродинамическое сопротивление. В космосе они уменьшают полезную нагрузку. А при посадке начинают работать только в атмосфере.

Особая точность посадки для космического корабля значения не имеет. Корабль «Союз», например, приземляется в район посадки с вполне приемлемой точностью. Зато в отличие от «Шаттла» ему не нужны специально оборудованные посадочные полосы.

Наиболее подходящее топливо для перспективного многоразового корабля — кислород-водород. Преимущества этого топлива состоят в том, что оно обладает высокими энергетическими характеристиками, а продукты его сгорания экологически наиболее безопасны, так как состоят в основном из воды.

Экономичность таких транспортных кораблей с увеличением массы полезной нагрузки возрастает. Однако здесь существуют ограничения, связанные с акустическими на-

грузками при увеличении мощности стартовых двигателей ракеты. Разумная предельная величина полезной нагрузки, выводимой таким одноступенчатым многоразовым кораблем на околоземную орбиту, составляет 400—500 тонн.

Когда будут созданы такие экономичные космические корабли? Их проектирование уже начато.

Приведем пример. Английская компания «Бритиш Эроспейс» совместно с фирмой «Роллс Ройс» опубликовала проект одноступенчатого полностью многоразового корабля ХОТОЛ (по первым буквам английского названия «Горизонтальный взлет и посадка»). Длина корабля 55 метров, масса без топлива — 195 тонн.

ХОТОЛ поднимается в воздух и летит вначале как обычный самолет — подъемная сила создается крыльями. На этом этапе полета работают воздушно-реактивные двигатели корабля, которые используют атмосферный кислород. После достижения сверхзвуковой скорости корабль выходит в разреженные слои атмосферы, где включаются обычные ракетные двигатели, работающие на жидком топливе кислород-водород. С помощью этих двигателей ХОТОЛ выводится на низкую околоземную орбиту.

Предполагается, что на этой орбите вокруг Земли уже вращается долговременная орбитальная станция. ХОТОЛ представляет собой автоматический грузовой корабль с дистанционным управлением. Грузоподъемность корабля составляет 7 тонн.

После доставки грузов и выполнения задач полета ХОТОЛ возвращается на Землю. На этом этапе баки для горючего почти пустые, и масса корабля намного меньше массы «Шаттла». Поэтому меньше и его нагрев при входе в плотные слои атмосферы. ХОТОЛ снижается как обычный планер и совершает посадку на аэродроме.

По оценкам английских специалистов, корабль ХОТОЛ может быть создан к 2000 году. Он позволит снизить стоимость доставки грузов на околоземную орбиту с тысяч до сотен долларов за килограмм. Корабль в состоянии обеспечивать достаточно дешевую транспортировку основной части грузов на трассах «Земля — опорная круговая орбита — Земля».

Сейчас трудно сказать, какая конкретно схема экономичной многоразовой транспортной космической системы будет воплощена в жизнь. Специалисты имеют по этому вопросу разные мнения. Для нас более важно другое!

создание такой системы вполне реально. И ориентировочный срок введения ее в эксплуатацию — рубеж XX и XXI столетий.

КОСМИЧЕСКИЕ БУКСИРЫ

Если вы плавали по великой русской реке-труженице Волге, то, конечно, наблюдали, как мимо вас то и дело проходят похожие на больших черных жуков работяги-буксиры. Деловито пыхтя, они толкают перед собой огромную баржу или тянут плот чуть не километровой длины. Они не очень спешат — ваш белый красавец теплоход легко обгоняет любого из них. Но у этих речных трудяг есть одно неоценимое качество, которое не бросается в глаза, — это самый дешевый вид транспорта.

В космосе тоже нужны такие буксиры. Они нужны, чтобы переводить космические аппараты с низкой околоземной орбиты на более высокую и возвращать их обратно. Их двигательные установки можно использовать, чтобы компенсировать сопротивление атмосферы. Маневры, выполняемые с помощью космических буксиров, могут занимать много времени — что изменится, если образцы, выращенные на автоматической технологической платформе, будут доставлены на базовую орбитальную станцию, скажем, в течение недели? Самое главное требование к таким перевозкам — это их экономичность.

Но экономичность в космосе — это минимальный расход топлива двигательной установки. Как снизить расход топлива при выполнении заданной транспортной задачи, так сказать, при поездке из пункта А в пункт Б?

Чтобы перевести космический аппарат с одной орбиты на другую, надо сообщить ему дополнительное количество движения, или импульс. Импульс — это произведение тяги двигателей на время их работы. Если время работы увеличивается, то можно сообщить космическому аппарату тот же импульс, используя двигатели с более низким уровнем тяги.

Тяга, развиваемая двигателем, равна произведению расхода рабочего вещества в секунду на среднюю скорость, с которой это вещество вылетает из сопла двигателя. Разные классы двигателей обеспечивают разный уровень скоростей истечения и соответственно расхода рабочего вещества. Что выгоднее?

Это зависит от задачи. Если полный импульс, который надо передать космическому аппарату, сравнительно

невелик, то можно использовать наиболее простые газовые двигатели. Скорость истечения рабочего вещества в этом случае порядка всего нескольких десятков метров в секунду.

Если требуется тяга порядка одной тонны, то лучше использовать обычные ЖРД — жидкостные ракетные двигатели. Скорость истечения в этом случае больше — около $2-3 \cdot 10^3$ м/с, а ежесекундный расход топлива 3—5 килограммов. Поэтому время работы таких двигателей ограничено.

Возникает вопрос: нельзя ли еще больше, например на порядок, повысить скорость истечения? Это позволило бы значительно уменьшить запас рабочего вещества на борту космического аппарата и, следовательно, обеспечить выигрыш в массе полезной нагрузки. И следующий логический шаг — сделать саму транспортировку грузов в космос более дешевой.

Возможность решить такую задачу существует. Для этого надо перейти к принципиально новому классу космических двигателей — к электрическим ракетным двигателям (ЭРД). Отличительная особенность ЭРД состоит в том, что источник энергии и рабочее вещество разделены, а передача энергии от источника к рабочему веществу и его ускорение осуществляются электромагнитными силами. Это позволяет получать очень высокие скорости истечения рабочего вещества. Если, например, в качестве рабочего вещества используется поток плазмы или ионов, то скорость истечения может быть на один-два порядка выше, чем в случае ЖРД (10^4-10^5 м/с).

Высокие скорости истечения делают этот класс двигателей наиболее экономичным для выполнения транспортных операций в космосе. ЭРД обеспечивают вывод на конечную орбиту максимальной полезной нагрузки либо минимальную массу на исходной орбите.

ЭРД работают от энергоустановки, находящейся на борту космического аппарата (например, от солнечной батареи или ядерного реактора). Это ограничивает возможный уровень энергопотребления и тяги. В соответствии с этим ограничен и уровень ускорений, которые может сообщить космическому аппарату электрический ракетный двигатель, — обычно порядка $10^{-3}-10^{-4}$ g.

Маневр, совершаемый космическим аппаратом при переходе с одной орбиты на другую, в количественном отношении описывается характеристической скоростью. Эта скорость, которую аппарат приобрел бы под действи-

ем заданной тяги в идеальном случае, то есть двигаясь по прямой в отсутствие других сил. Если, например, величина характеристической скорости, которую следует сообщить космическому аппарату, составляет 100 м/с, то при уровне ускорения 10^{-4} м/с² (10^{-3} g₀) для этого потребуется 10^6 секунд, то есть около 12 суток.

Из оценок видна еще одна отличительная особенность ЭРД — они пригодны только для межорбитальных перевозок в космосе, а продолжительность транспортных операций, выполняемых с их помощью, относительно велика. Однако, как и для речных буксиров, для большинства транспортных грузовых операций в космосе важнее не время, а стоимость. А в этом отношении преимущества ЭРД очевидны.

ЭРД НА КОСМИЧЕСКИХ ТРАССАХ

Было бы, однако, неправильно думать, что малая величина ускорений, обеспечиваемых ЭРД, — это только недостаток. В некоторых случаях это, наоборот, достоинство. Представьте себе такую задачу: на орбитальной станции, расположенной на низкой околоземной орбите, космонавты смонтировали технологическую платформу, которая предназначена для производства материалов в автономном полете. Теперь эту платформу надо перевести на более высокую орбиту, где более низок уровень остаточных ускорений, обусловленных сопротивлением атмосферы.

С помощью какой двигательной установки лучше всего решить эту задачу? На платформе размещены хрупкие, ажурные конструкции панелей солнечной батареи, концентратора солнечного излучения, холодильника-излучателя, который сбрасывает в космос тепло, отводимое от работающих печей, антенны систем радиосвязи и передачи телеметрической информации. Если рассчитывать на использование ЖРД, то на все это оборудование будут действовать вполне ощутимые перегрузки. Конструкторам придется проектировать все эти системы, обеспечивая необходимый запас прочности. А расплачиваться за это придется в конечном счете весом.

Намного лучше воспользоваться ЭРД. На борту платформы есть энергоустановка. Пока выполняется перелет на рабочую орбиту, пусть она снабжает энергией ЭРД — аппаратура все равно не включена. Уровень ускорений при этом будет минимальным — прекрасно, разработа-

ки аппаратуры скажут за это спасибо. Выигрыш в массе, а в конечном счете и в стоимости всей операции будет вполне ощутимым.

Некоторые типы ЭРД уже работают на космических аппаратах. Например, для корректировки орбиты советского искусственного спутника «Метеор» используются плазменные электрические ракетные двигатели. На американских связанных спутниках «Интелсат» и «Сатком» установлены электротермические двигатели на гидразине. Эти двигатели служат для коррекции положения спутников, находящихся на геостационарной орбите.

КОСМИЧЕСКИЙ ТРОЛЛЕЙБУС

Преимущества ЭРД для выполнения грузовых перевозок в космосе очевидны. Поэтому возникает логичный вопрос: а нельзя ли, сохранив эти преимущества, снять ограничение по уровню тяги, которую могут развивать двигатели этого класса? Эти ограничения обусловлены тем, что ЭРД работают совместно с бортовой энергоустановкой. Получается замкнутый круг: хочешь увеличить тягу — надо повысить мощность энергоустановки, а за это приходится расплачиваться весом. Зачем же тогда увеличивать тягу?

Космический корабль с электроракетной установкой напоминает автобус: он везет на борту и двигатель, и запас топлива к нему. А нельзя ли превратить его в троллейбус, энергия к двигателю которого подводится извне, по проводам? Причем источник этой энергии может находиться очень далеко от этого троллейбуса, даже за тысячи километров. Как это было бы заманчиво для космических транспортных кораблей!

Оказывается, способы решения этой задачи существуют. Идею такого способа в 1924 году выдвинул К. Э. Циолковский, который предложил подводить электромагнитную энергию к космическому кораблю в виде хорошо сфокусированного пучка, а затем использовать ее «для отбрасывания частиц воздуха или запасенного «мертвого» материала для получения космической скорости еще в атмосфере». В наше время эту идею конкретизировал американский инженер А. Кантровиц, который показал, что удобнее всего подводить к космическому кораблю сконцентрированный поток электромагнитной энергии в виде пучка лазерного излучения.

Сам лазер может находиться достаточно далеко от кос-

мического корабля, например на геостационарной орбите или на Земле. Оптическая система, установленная на корабле, принимает пучок лазерного излучения и фокусирует его на рабочем веществе. Рабочее вещество нагревается до высоких температур и выбрасывается из сопла двигателя. Скорость истечения в зависимости от плотности потока энергии и типа рабочего вещества может достигать 10^4 — $5 \cdot 10^4$ м/с.

Тяга, создаваемая таким двигателем, определяется только мощностью самого лазера. Поскольку энергоустановка, питающая этот лазер, находится вне космического корабля, уровень тяги может быть значительным.

Возможность получения высоких скоростей истечения сближает световые двигатели с ЭРД. Но в отличие от них ограничения на уровень тяги для световых двигателей менее жесткие. Сочетание обоих преимуществ делает двигатели этого класса интересными для решения широкого круга транспортных операций в интересах космического производства.

Чтобы обеспечить тягу на уровне 10^4 ньютон при скорости истечения 10^4 м/с, необходима мощность лазерного излучения 100 мегаватт при условии, если КПД двигателя составляет 50 процентов. Из этих оценок сразу видны две проблемы, которые должны быть решены для создания достаточно эффективных световых двигателей: во-первых, необходимо создать лазер, обладающий соответствующей световой мощностью, и, во-вторых, надо обеспечить достаточно высокий КПД преобразования энергии лазерного излучения в тягу двигателя.

Решению обеих задач посвящено много работ. Однако их анализ увел бы нас слишком далеко от темы книги. Ограничимся поэтому кратким резюме по этим работам: физические предпосылки решения указанных задач существуют, но до их технического решения еще далеко.

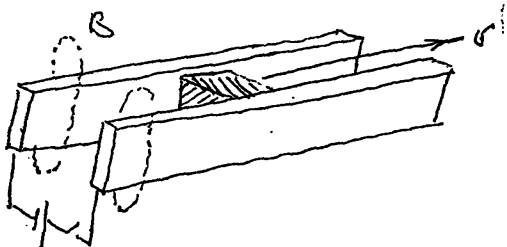
Отметим здесь только одну любопытную подробность. В одной из предыдущих глав шла речь о космических солнечных электростанциях, которые планируют размещать на геостационарной орбите. Проектная мощность таких электростанций 5—10 гигаватт. По одному из вариантов такие станции предполагают создавать на основе прямого преобразования энергии солнечного света в энергию лазерного излучения.

Допустим на минуту, что такая лазерная КСЭ введена в эксплуатацию. При расходимости лазерного пучка 10^{-7} радиан его диаметр на расстоянии 36 000 километров

составит около 4 метров — очень удобно для приема зеркальной системой космического корабля.

При таком уровне мощности можно обеспечить не только оперативное выполнение межорбитальных транспортных операций, но и старт космического корабля с поверхности Земли. Настоящий космический троллейбус!

Интересны и перспективны световые двигатели. Но один недостаток у них все же есть — появятся они не раньше XXI века.



Электродинамический ускоритель массы.

ПОКА ЭКЗОТИКА

Если уж нам пришлось опять заглянуть в следующее столетие, то надо полюбопытствовать, а какие еще транспортные новинки может оно принести нашим потомкам. Вероятно, появятся ядерные и термоядерные двигатели космических аппаратов. Это полезные двигатели, но для развития космического производства особого интереса они не представляют. Поэтому останавливаться на них мы не будем.

Уже шла речь о промышленном освоении внеземных ресурсов, о проведении в космосе строительных работ с использованием материалов, добываемых на Луне или на одном из астероидов. Не будем здесь ничего говорить о том, насколько реальны или нереальны эти задачи. Поставим вопрос иначе: предположим, что пришло время начать в этом направлении практический разговор, и посмотрим, какие космические транспортные системы более всего подойдут для решения этих задач.

Таких систем четыре. Первая из них — это электромагнитный рельсовый ускоритель массы (ЭРУ). В этом

ускорителе разгон твердой капсулы осуществляется электромагнитными силами вдоль направляющих рельсов. Идею такого ускорителя впервые высказал К. Э. Циолковский; его описание содержится также в рукописях Ю. В. Кондратюка.

По современным оценкам, ЭРУ можно использовать для выведения материалов в космос с поверхности Луны в целях обеспечения сырьем орбитальных промышленных комплексов. Доставка грузов с поверхности Луны намного экономичнее по сравнению с их транспортировкой с Земли: удельные затраты энергии в этом случае уменьшаются в 20 раз даже без учета выигрыша за счет отсутствия потерь в атмосфере, которой у Луны нет.

Тем не менее ЭРУ на поверхности Луны будет представлять собой весьма крупномасштабное сооружение. Длина его составит около 300 метров, а мощность, расходуемая за один цикл, при массе выводимой на околоземную орбиту полезной нагрузки 10 килограммов и КПД системы 50 процентов составит 60 мегаджоулей.

Вторая транспортная система, которую мы упомянем, — это солнечный парус. Первоначальные идеи здесь были высказаны К. Э. Циолковским и Ф. А. Цандером. Солнечный парус можно рассматривать как перспективное транспортное средство начиная с расстояний несколько тысяч километров от Земли, где сопротивлением атмосферы можно пренебречь.

Солнечный парус пригоден для транспортных операций на геостационарной орбите, вблизи Луны, для буксировки астероидов на околоземные орбиты. По сравнению с другими транспортными космическими системами у солнечного паруса есть преимущества: простота, надежность, невысокая стоимость, способность работать без сложной автоматики. Солнечные паруса можно использовать для выполнения маневров навстречу давлению света — в этом смысле они ничем не отличаются от обычных яхт.

Основной недостаток солнечных парусов — длительное время транспортных операций. Зато при использовании современных тонкопленочных материалов масса паруса в типичном случае не будет превышать 10 процентов массы транспортного корабля.

Две другие транспортные космические системы — это космический лифт, или башня Циолковского, и центробежный ускоритель массы. Идея космического лифта была в 1960 году развита Ю. Н. Арцутановым.

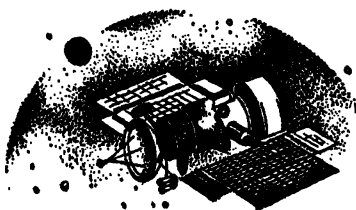
Согласно современным представлениям космический

лифт можно использовать для вывода грузов с Луны на окололунную орбиту. Преимущество лифта на Луне состоит в том, что для его сооружения годятся конструкционные материалы типа композитов, которые освоены промышленностью уже в настоящее время.

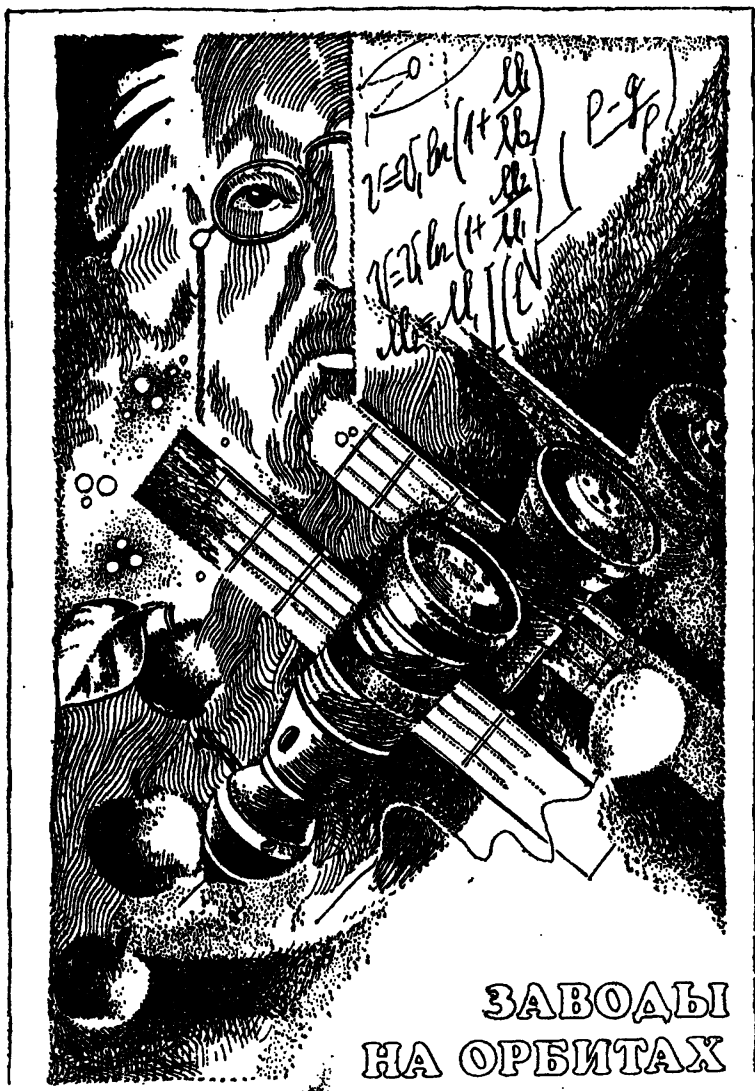
Что касается электромеханического ускорителя, то его можно разместить на астероиде. Воспользовавшись тем, что скорость освобождения для этих условий очень мала, с помощью такого ускорителя нетрудно отбрасывать в космос куски породы астероида, который в результате начнет двигаться в противоположном направлении.

Однако наиболее вероятно, что это задача даже не XXI века. Прогнозы и анализ становятся все менее определенными. Поэтому подошло время вспомнить слова поэта:

Двоятся смыслы. Множатся пути.
Где связь вещей? Дробится образ мира.
И все же цельность надо обрести
И не терять в ночи ориентира *.



* Стихи Ю. В. Ливника.



ЗАВОДЫ НА ОРБИТАХ

КАК ЭТО ВИДЕЛ ЦИОЛКОВСКИЙ

Перед нами рукопись неоконченной статьи К. Э. Циолковского «Космические путешествия», над которой ученый работал в последние годы жизни. Рукопись хранится в Архиве Академии наук СССР. Интересна она тем, что

отражает мысли Циолковского о том, как будет проходить освоение космического пространства, к которым он пришел в самом конце своего долгого творческого пути. Перелистаем пожелтевшие страницы.

«Цель этого труда, — пишет Циолковский, — заинтересовать картинами будущего космического существования человечества, побудив тем самым читателя к его достижению и соответствующей работе».

Итак, Циолковский думает о пропаганде космонавтики, о том, чтобы привлечь к решению стоящих перед ней задач молодые силы.

«Я не основываюсь тут на необыкновенных силах и не сделанных еще открытиях: все сообразно нашему времени, фантастично только то, что излагаемое предполагается осуществленным, хотя оно совсем не осуществлено».

Началось с того, что герои рассказа заинтересовались идеями Циолковского и вступили с ним в переписку. Обратите внимание на этот момент: Циолковский думал о близком будущем. А жить ему оставалось один год...

Правительство помогло энтузиастам. «Лаборатории были роскошно обставлены и имели достаточно самых талантливых помощников, мастеров и рабочих. Все заводы и учреждения обязаны были исполнять их заказы».

Циолковский думает о том, как практически надо организовать работу. Нужна широкая пропаганда идей космонавтики. Всюду читаются лекции по ее проблемам. Полеты в космос, промышленное освоение космического пространства помогут человечеству преодолеть трудности, с которыми оно сталкивается на Земле.

Программа космического строительства становится интернациональной. В работах участвуют специалисты из разных стран, пишет Циолковский. Но самый большой вклад вносит наша страна...

ОРБИТАЛЬНЫЕ НАРОДНОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ КОМПЛЕКСЫ

Многое из того, о чем мечтал Циолковский, стало действительностью наших дней. На околоземных орбитах по нескольку лет функционируют долговременные орбитальные станции и научно-технические комплексы. Многие месяцы на их борту продолжается космическая вахта экипажей. Вокруг Земли кружатся автоматические ис-

кусственные спутники. Многие отрасли народного хозяйства активно используют информацию, поступающую с космических комплексов и спутников. Делает первые шаги космическая промышленность...

Что дальше? Каким видится развитие космической технологии в ближайшие 10—15 лет и в более отдаленной перспективе? Какую роль она будет играть среди других направлений космонавтики?

Космическая технология — перспективная отрасль народного хозяйства. Исследования и эксперименты доказали: в космосе можно организовать производство улучшенных материалов, которые найдут разнообразные применения в промышленности и в интересах здравоохранения.

Но решают ли полученные доказательства судьбу космической технологии? Нет, одних доказательств технической перспективности недостаточно. Необходима еще экономическая целесообразность.

Представьте себе простую задачу: надо наполнить большой бак водой. Вам привезли цистерну и дали шланг с узеньким проходным сечением. Через этот шланг вода будет очень долго выливаться в ваш бак. Наверное, вы постараетесь придумать что-нибудь другое, чтобы поскорее справиться со своим делом.

Так и с космической технологией — у нее тоже есть свой «узкий шланг». Мы уже писали, каким должен быть его следующий этап — это разработка комплекса установок для опытно-промышленного производства материалов, создание технологических модулей орбитальных станций, запуск автоматических технологических лабораторий и платформ для производства материалов. Вся эта работа потребует больших затрат и даст практический выход только через несколько лет. Выгодно ли это народному хозяйству, не лучше ли вложить те же средства в другие отрасли, где отдачу можно получить быстрее и легче?

Один юморист сказал, что в очень сильные холода даже лед излучает тепло. Но стоит ли ради этого создавать такие условия?

Наверное, положение стало бы совершенно тупиковым, если бы не одно обстоятельство, которое мы до сих пор не принимали в расчет. Дело в том, что современные космические системы имеют комплексное народнохозяйственное значение, они нужны не только для целей космической технологии. Современные народнохозяйственные космические комплексы — это системы связи, наблюде-

ния Земли из космоса, разведка полезных ископаемых, охрана окружающей среды, метеорология. Космическая технология — лишь одно из многочисленных практических приложений космонавтики.

И для ускорения научно-технического прогресса, для повышения эффективности всего круга этих практических приложений необходимо продвижение в первую очередь в одних и тех же направлениях: нужны многомодульные научно-технические орбитальные комплексы, многоцелевые автоматические лаборатории и платформы следующего поколения, новые энергоустановки и космические транспортные системы. Комплексный характер задач, стоящих перед космонавтикой, — вот стопроцентная гарантия того, что соответствующие космические системы будут созданы.

Итак, выход найден: бак будет быстро наполняться с помощью большого числа «шлангов».

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОРБИТАЛЬНЫЕ СТАНЦИИ

Попробуем теперь представить себе, как, с помощью каких средств будут создаваться эти пилотируемые и автоматические орбитальные комплексы следующего поколения и как они будут выглядеть.

Начнем с долговременной орбитальной станции. Подобно советским орбитальным станциям «Салют» и «Мир», станция следующего поколения будет предназначена для решения широкого круга задач. На ее борту будут проводиться уникальные эксперименты по космической технологии, медико-биологические исследования, астрономические наблюдения, дистанционное изучение Земли. Станция станет космической базой по обслуживанию многоцелевых спутников и автоматических платформ, совершающих автономный полет по различным орбитам.

Как и станция «Мир», перспективная орбитальная станция будет построена по модульному принципу. Только этих модулей будет значительно больше. В ее составе будет находиться, в частности, технологический модуль для проведения экспериментов по физике невесомости и космической технологии, а также лаборатория для экспресс-анализа образцов. Наличие такой лаборатории позволит оперативно вносить необходимые изменения в программы, которые вводятся в системы управления технологических установок, расположенных на самой станции либо на борту автоматических платформ-спутников.

Будет предусмотрено регулярное посещение этих автоматических платформ космонавтами, которые смогут производить замену образцов, а в случае необходимости и ремонт оборудования. С целью уменьшения остаточных ускорений орбитальную станцию целесообразно разместить на орбите высотой 500 километров.

Один из нерешенных вопросов — создание энергоустановки для перспективной орбитальной станции с расчетной электрической мощностью 50—100 киловатт. Если использовать для этой цели современные кремниевые солнечные батареи, то их площадь составит около 2500 квадратных метров. Монтаж таких батарей сложен, и они будут мешать проведению многих исследований на борту станции.

Более перспективное решение — использовать солнечные батареи рулонного типа на основе аморфного кремния на тонкопленочной подложке. Другой вариант — многоячеистые солнечные батареи в сочетании с пленочными концентраторами солнечного излучения. Переход к перспективным солнечным батареям тем более важен, что на следующих этапах эксплуатации станции ее мощность, по-видимому, будет значительно увеличена — до 300 киловатт.

Для того чтобы повысить экономичность функционирования станции в течение длительного времени, потребуется обеспечить более высокую автономность системы жизнеобеспечения. Эту систему необходимо строить в основном по принципу замкнутого контура с регенерацией кислорода, воды и пищи. При длительных сроках существования станции и увеличении ее экипажа до 10 и более человек доставка этих материалов с Земли привела бы к резкому увеличению грузовых перевозок на станцию.

Работа по созданию автономной системы жизнеобеспечения будет выполняться поэтапно. Контуров регенерации воды и кислорода целесообразно объединить, так как питьевую воду можно получать при регенерации кислорода искусственной атмосферы станции, а кислород — путем электролиза сливной воды. Существуют проекты включения в состав станции вращающегося модуля — оранжереи, в которой в условиях искусственной тяжести будут выращиваться растения. По оценкам, таким способом можно обеспечить регенерацию кислорода на борту станции и значительную часть потребностей экипажа в пище.

При строительстве орбитального комплекса найдут применение перспективные методы космической технологии. Используя силы поверхностного натяжения, можно выдувать тонкостенные оболочки модулей различного назначения. Натягивая пленки жидких металлов на жестком каркасе, можно получать в космосе крупногабаритные конструкции сложной формы.

При выполнении строительных работ наряду с космонавтами, вооруженными ручным инструментом, будут использоваться дистанционно управляемые роботы. Рассматривается, в частности, возможность дистанционного управления с «телеприсутствием». Существо этого метода состоит в том, что человек совершает движения руками и ногами, на которых укреплены датчики, а робот, находящийся в открытом космосе, повторяет эти движения. Предполагается, что такие телероботы будут созданы в середине 1990-х годов.

Следующий шаг по дальнейшему совершенствованию телероботов будет состоять в оснащении их «искусственным интеллектом», то есть системой автоматического управления, которая возьмет на себя контроль за выполнением простейших движений и позволит оператору сосредоточить внимание на более сложных операциях.

Для визуального контроля телероботы на первом этапе будут оснащены системой черно-белого телевидения, а к 2000 году ожидают появления цветных камер с объемным изображением на основе голографических принципов.

Программа строительства и постепенного совершенствования долговременных орбитальных станций и научно-технических комплексов в течение многих лет последовательно осуществляется в Советском Союзе. Эксплуатация советских орбитальных станций обеспечила выполнение целого ряда космических программ научного и народнохозяйственного значения, в том числе в области космической технологии.

В 1984 году правительство США приняло решение развернуть работы по созданию долговременной орбитальной станции. В решении отмечается, что США отстали в этом вопросе от Советского Союза. Руководство НАСА — Национального управления по авиации и космическим исследованиям — рассматривает создание станции как краеугольный камень нового этапа программы космических исследований США. Создание станции в первоначальном варианте планировалось в

1992 году, в развернутом — в 1996—2000 годах. В связи с катастрофой американского космического корабля «Челленджер» в январе 1986 года эти сроки, по-видимому, будут отложены на 2—3 года.

В создании американской долговременной орбитальной станции предполагают принять участие Япония и Канада. Япония взяла на себя разработку лабораторного блока, на котором предусматривается размещение, в частности, оборудования для производства неорганических материалов и медицинских препаратов.

Европейское космическое агентство, в свою очередь, приступило к разработке собственной долговременной орбитальной станции «Колумб». В состав станции будут входить герметизированный орбитальный блок, агрегатный блок, блок для обслуживания полезных нагрузок и автономный спутник-платформа. В разработке станции предполагается участие ведущих аэрокосмических фирм ФРГ, Англии, Италии, Франции.

ЗАВОДЫ-АВТОМАТЫ В КОСМОСЕ

Наряду с долговременной пилотируемой станцией производственный орбитальный комплекс будет включать автономные искусственные спутники-платформы, на борту которых размещаются технологические установки. Прототип таких автономных платформ — первая в мире автоматическая технологическая лаборатория для экспериментов в области космической технологии, успешный запуск которой состоялся в СССР в апреле 1985 года.

В перспективе будет создан автоматический производственный комплекс с автономной энергоустановкой мощностью до 100 киловатт. Такой комплекс будет выводиться на сравнительно высокую орбиту — 500—700 километров над поверхностью Земли. С помощью космических многоразовых кораблей комплекс будет посещаться космонавтами для выполнения необходимых работ. Можно ожидать, что время активного существования автоматического производственного комплекса будет составлять 5—15 лет.

Некоторые автоматические спутники-платформы будет целесообразно разместить на полярной синхронно-солнечной орбите. Перевод на эту орбиту потребует дополнительных транспортных операций, но позволит активно использовать для плавки образцов концентраторы

солнечного излучения — спутник на такой орбите почти не заходит в тень Земли.

В настоящее время в Западной Европе и в США активно ведется разработка автоматических спутников-платформ, на которых будет размещено технологическое оборудование. Западноевропейское космическое агентство планирует с помощью космического корабля «Спейс Шаттл» вывести в космос многоразовый спутник-платформу «Эврика», которая предназначена, в частности, для технологических экспериментов и опытно-промышленного производства материалов. Масса спутника около 3,5 тонны, масса полезной нагрузки 1,1 тонны. Мощность энергоустановки 1,7 киловатта. Время пребывания спутника на орбите — около 6 месяцев.

В США также планируется использование автоматических платформ для работ в области космической технологии (спутники ММС, «Лискрафт»). Аналогичные эксперименты намечают провести в ФРГ на платформе СПАС.

Во Франции опубликован проект производственного орбитального комплекса «Солярис». В состав комплекса входит долговременная орбитальная станция, операционный модуль с манипуляторами для выполнения технологических операций, автоматический транспортный корабль для доставки на станцию сырья и возвращения продукции.

Комплекс предполагается выводить на круговую орбиту высотой 780 километров. Масса комплекса 4,6 тонны, мощность солнечных батарей — 10—20 киловатт. Время существования комплекса на орбите — до 15 лет. Предполагаемый срок создания — 1992—1995 годы. На борту комплекса «Солярис» планируют организовать промышленное производство высококачественных кристаллов, сплавов и стекол, биопрепаратов фармацевтического назначения.

СТАНЦИЯ «МИР»

Принципиально новый, практически важный шаг по созданию многофункциональной орбитальной станции сделан в Советском Союзе. В феврале 1986 года осуществлен запуск орбитальной станции «Мир», которая является станцией нового поколения. Станция «Мир» оснащена системой шести стыковочных узлов и представляет собой базовый блок многоцелевого постоянно действующего назначения.

щего пилотируемого комплекса. Наличие нескольких стыковочных узлов позволит при следующих полетах транспортных космических кораблей доставить на орбиту и подключить к базовому блоку ряд специализированных орбитальных модулей научного и народнохозяйственного назначения.

Создание постоянно действующего орбитального комплекса «Мир» означает новый важный этап в индустриальном освоении космоса. Значительно расширяются возможности проведения в космосе исследований и экспериментов, работ по производству органических и неорганических материалов. Решению этих задач будет способствовать повышенный уровень системы энергопитания, наличие в составе орбитального комплекса целевых модулей, оснащенных необходимой аппаратурой для проведения экспериментов и производственных процессов, высокий уровень автоматизации систем управления бортовой аппаратурой.

Первым таким модулем стала астрофизическая лаборатория «Квант», включенная в состав орбитального комплекса «Мир» в 1987 году.

Повышению производительности труда экипажей на станции «Мир» будут способствовать также более комфортные условия работы и отдыха, созданные на ее борту (например, использование более совершенных ЭВМ, оснащенных дисплеями, индивидуальные каюты, усовершенствованные тренажеры, более гибкое функционирование системы жизнеобеспечения). Все это позволяет иметь на борту орбитального комплекса «Мир» непрерывную вахту сменяющих друг друга экипажей.

Создание постоянно действующих орбитальных станций и комплексов существенно продвигает человечество по пути дальнейшей индустриализации космоса.

ЭКОНОМИКА КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Создание орбитальных станций следующего поколения, автоматических производственных комплексов — хорошая предпосылка для предстоящего развития работ по космической технологии. Основная черта наступающего этапа работ в этом направлении — переход к опытно-промышленному производству в космосе некоторых материалов.

Существует несколько каналов реализации технико-

экономической эффективности космического производства:

1. Непосредственное получение прибыли от организации на космических аппаратах производства материалов с улучшенными характеристиками.

2. Производство принципиально новых материалов, способных оказать революционизирующее воздействие на промышленность (например, производство с помощью методов космической технологии новых высокоэффективных биомедицинских препаратов).

3. Разработка новых типов аппаратуры научного и народнохозяйственного назначения, основанных на использовании космических образцов материалов и изделий.

4. Совершенствование технологии производственных процессов на Земле на основании научных результатов, полученных при исследовании проблем космической технологии.

5. Развитие фундаментальной науки (физика жидкости, теория тепломассопереноса, физика фазовых переходов, поверхностных явлений, измерение теплофизических констант).

6. Разработка новых технологических приемов, усовершенствование аппаратуры, создание новых контрольно-измерительных систем, которые могут найти практическое применение во многих отраслях народного хозяйства.

Проведение работ по космической технологии не требует излишне большого финансирования, потому что основная часть необходимых для этого затрат проводится в рамках комплексных программ развития космонавтики. Зато вклад космической технологии в ускорение научно-технического прогресса значителен.

В 1982 году американская фирма «Интернейшнл Рисёрс Девелопмент» проанализировала потенциальные рынки сбыта и оценила возможные доходы США от космической технологии. Результаты оценки приведены в таблице.

В 1985 году другая американская консультативная фирма — «Сентер фор Спейс Полиси» — также опубликовала оценку доходов от производства полупроводниковых и медицинских препаратов в космосе. Согласно этой оценке в 2000 году минимальные доходы составят 2,8 миллиарда долларов, максимальные — 20 миллиардов.

Направления космической технологии	Доход, миллиарды долларов			
	1987 г.	1990 г.	1993 г.	1996 г.
Биомедицинские препараты	0,1	0,4	3,0	5,0
Полупроводники	0,2	0,5	1,5	2,0
Сплавы	—	0,1	0,5	1,0
Итого:	0,3	1,0	5,0	8,0

Как получают эти цифры? Покажем это на конкретных примерах, опубликованных в зарубежной печати. Один из перспективных полупроводниковых материалов — это арсенид галлия, то есть соединение галлия с мышьяком. Этот материал широко используется в электронике: из него делают приемники излучений, фотопреобразователи, быстродействующие переключатели в микроминиатюрных интегральных схемах. Пригоден этот материал и для изготовления твердотельных лазеров.

Арсенид галлия — очень дорогой материал. Однако при его производстве в земных условиях значительная часть продукции оказывается негодной, полезный выход составляет иногда всего 2 процента. Специалисты ожидают, что в космосе эту величину удастся поднять до 98 процентов. В результате даже с учетом затрат на транспортировку производство арсенида галлия в космосе окажется выгодным делом. Если исходить из существующих цен, то производство арсенида галлия в космосе обеспечит прибыль в 6—7 раз выше, чем дает его производство на Земле. Разница так велика, что космическое производство этого материала будет приносить прибыль даже и в том случае, если вследствие расширения производственных возможностей цена арсенида галлия в будущем упадет.

Американская компания «Майкрогрэвити Ризёрч Ассошиейтс» планирует развернуть в космосе производство арсенида галлия на основе технологии, разработанной под руководством известного специалиста по космической технологии Г. Гейтоса. Представители компании заявили, что, по их оценкам, к 2000 году объем продажи этого материала, полученного в космосе, достигнет 3,1 миллиарда долларов в год — около 2—2,5 процента мирового производства арсенида галлия.

Другая американская компания, «Рокуэлл Интернейшнл», опубликовала планы космического производства свободных от дефектов монокристаллов фосфида ин-

дия — полупроводникового материала из той же группы. Продажная цена этого материала — 1 миллион долларов за килограмм. За рубежом опубликованы также программы производства в космосе ряда полупроводниковых материалов, которые используются для изготовления приемников излучений в разных участках длин волн (теллурид кадмия — инфракрасное излучение, диодид ртути — рентгеновское излучение и др.).

Не станем дискутировать с авторами подобных оценок о том, насколько точно они подсчитали сумму ожидаемых миллиардов прибыли. Согласимся с ними в главном: космическая технология — перспективное направление космонавтики, которое в состоянии обеспечить высокую технико-экономическую эффективность.

Чтобы реализовать эти планы, за рубежом выделяют значительные ассигнования на выполнение программ по космической технологии. Так, в бюджете Национального управления по аэронавтике и космическим исследованиям США на работы по космической технологии было выделено в 1985 финансовом году 27 миллионов долларов. В бюджете на 1987 финансовый год предусмотрено выделение 34 миллионов долларов.

ЕСЛИ БЫ ТОЛЬКО ДЕНЬГИ

Перед нами американский журнал «Коммершиел Спейс», номер 1 за 1985 год. Статья, посвященная коммерциализации космоса. С редкой откровенностью анонимный автор раскрывает позицию, с которой оценивают проблему космической индустриализации представители военно-промышленного комплекса США.

Начался новый этап освоения космоса, говорится в статье. Основное содержание этого этапа — коммерциализация космоса. Причем этот этап тесно связан с планами стратегической оборонной инициативы, иными словами «звездных войн».

Термин «коммерциализация» означает стремление окупить расходы на космическую промышленность за счет различных услуг, которые она может оказывать. В бюджете Национального управления по аэронавтике и космическим исследованиям США появилась новая статья — «коммерческое использование космоса», по которой в 1986 году выделено 30 миллионов долларов. Задача состоит в том, чтобы привлечь капиталовложения частных фирм на аренду отсеков космических аппаратов, на

разработку собственных проектов, развязать их инициативу в области космической технологии.

Национальные цели США в космосе ориентированы главным образом на СОИ, очень откровенно говорится в статье. Но решение задач СОИ предлагается теснее связать с коммерциализацией космоса, поскольку технические средства, необходимые для обеих программ, во многом совпадают (бортовые энергоустановки мощностью до сотен киловатт, системы управления, космические роботы, двигательные установки с плавной регулировкой тяги и др.). Поэтому работы по космической технологии в США имеют в первую очередь военную направленность, являясь частью работ по СОИ.

Термины «индустриализация» или «коммерциализация космоса» — очень удобный предлог для того, чтобы прикрыть истинные цели космической политики США, направленной на обеспечение постоянного военного присутствия в космосе. Кроме того, это хороший способ дополнительного скрытого финансирования работ, ведущихся в интересах министерства обороны США.

Возможно, почувствовав, что зашел слишком далеко, автор статьи в конце концов спохватывается и признает: космическое производство выгодно само по себе. Американские фирмы, сообщает он, в ближайшие пять-десять лет планируют выпустить на рынок многие материалы, произведенные в космосе, — арсенид галлия, теллурид кадмия, фосфид индия, кремний, фосфидные стекла, халькогениды, ниобаты, танталаты и многое другое. Но меняет ли это сколько-нибудь существенно главное в его подходе к делу?

История космонавтики знает разные традиции использования ее достижений. Великий русский ученый, основоположник космонавтики К. Э. Циолковский подчеркивал исключительно мирную направленность своих трудов. «Я надеюсь, — писал он, — что мои работы, может быть, скоро, а может быть, в отдаленном будущем дадут обществу горы хлеба и бездны могущества». В одной из своих неопубликованных рукописей ученый отмечал: «Ненависть к жизни есть или болезнь, или заблуждение».

С иных позиций подходил к тем же вопросам американский инженер Р. Годдард, который вслед за Циолковским внес заметный вклад в развитие космонавтики. Начиная со своих первых практических работ, Годдард сразу придал им военную направленность, стал выполнять заказы военных ведомств США. Вот так с самых первых

шагов космонавтики наметились два диаметрально противоположных подхода к практическому использованию ее достижений.

Советские ученые и инженеры — наследники миролюбивых традиций К. Э. Циолковского. Для координации работ по практическому использованию космического пространства в интересах народного хозяйства в нашей стране создан Главкосмос СССР.

«Трудно назвать какое-либо другое направление науки и техники, которое так быстро начало бы оказывать влияние практически на все отрасли народного хозяйства, как космонавтика, — говорит начальник Главкосмоса СССР А. И. Дунаев. — Именно космос для народного хозяйства открыл новые горизонты, которых раньше у нас не было. Нужно только умело этим пользоваться. Эта задача сегодня стоит на повестке дня».

«Главкосмос должен вырасти — и я в это верю — в эффективный координирующий центр, способный решать доселе не решенные задачи научно-технического прогресса. Мы должны стать мощным банком данных для нашей экономики. Будем и дальше продолжать развивать взаимодействие с нашими министерствами, ведомствами, организациями в области использования космической техники для нужд народного хозяйства и научных исследований. Продолжим работы по международному сотрудничеству, в том числе и на коммерческой основе... Наша организация не занимается вопросами использования космического пространства в военных целях. На военные программы мы не работаем, чего нельзя сказать о НАСА, в чьи задачи активно вторгается политика, зачастую оттесняя научные задачи на второй план».

Два мира — два подхода к тому, как использовать космическое пространство... Но человечеству нужны не «звездные войны», а «звездный мир» — индустриальное освоение космического пространства в интересах всех народов, в интересах цивилизации в целом. И у человечества достаточно сил, чтобы направить ход истории в нужную сторону, чтобы космос оставался мирным.

ЭТАПЫ КОСМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Как будет происходить развитие работ по космическому материаловедению и производству в последующие годы? Основное содержание первого этапа работ, который близок к завершению, — научные исследования

проблем космической технологии и поисковые эксперименты. Следующий этап, переход к которому практически уже происходит, — опытно-промышленное производство материалов.

В чем состоят отличительные черты этого этапа? Во-первых, это переход к технологическим установкам нового поколения, на которых можно получать образцы, представляющие непосредственный интерес для промышленности или медицины (установки типа «Корунд» и «Каптан»). Во-вторых, можно ожидать, что образцы, полученные на таких установках, будут действительно обладать уникальными характеристиками и найдут применение в электронных приборах и в медицинской практике. В-третьих, с помощью усовершенствованной аппаратуры будут выполнены новые циклы исследований по физике невесомости, направленные на оптимизацию методов космической технологии. Ориентировочные сроки этого этапа работ по космической технологии — 1990—1995 годы.

Можно ожидать, что в 1995—2005 годах будет совершен переход к следующему, третьему этапу космической технологии — промышленному производству материалов в космосе. Основная отличительная черта этого этапа — частичная переориентация некоторых отраслей промышленности на использование продукции космического производства. В отличие от тех оценок, которые выполнены американскими специалистами, мы полагаем, что лидирующую роль на этом этапе будет играть не космическая биотехнология, а полупроводниковое материаловедение — здесь остается меньше нерешенных проблем.

Обязательное условие перехода космической технологии к третьему этапу — планомерная организация регулярных запусков автоматических платформ с технологическим оборудованием на борту. Вероятно, будут созданы платформы разных типов — для производства неорганических и органических материалов отдельно, поскольку необходимые условия и технология их получения и хранения заметным образом различаются. Должно быть организовано регулярное посещение этих автоматических платформ космонавтами с борта базовой орбитальной станции.

Четвертый этап космической технологии (2005—2015 гг.) — развернутое производство материалов в космосе. Этот этап характеризуется дальнейшим развертыванием и углублением процессов интеграции космической

технологии, с одной стороны, и микроэлектроники, электротехники, металлургии, фармакологии и других отраслей народного хозяйства — с другой. Можно ожидать, что на этом этапе будет происходить значительное расширение номенклатуры и объема космического производства материалов и изделий.

Предпосылки для успешного перехода космической технологии к четвертому этапу состоят в создании новых, экономичных и эффективных космических транспортных систем и бортовых энергоустановок. Это создаст необходимые условия для значительного роста объемов продукции космического производства, а также для обеспечения необходимого уровня экономической эффективности.

Переход космической технологии к промышленному производству материалов отнюдь не будет означать свертывания научных исследований ее проблем. «Наука всегда оказывается не права, — заметил однажды Б. Шоу с присущей ему парадоксальностью высказываний. — Она никогда не решает вопроса, не поставив при этом десятка новых».

Замечание это совершенно справедливо. Развитие космической технологии и развертывание на космических аппаратах производства материалов станут возможны только при том обязательном условии, что одновременно будут проводиться углубленные исследования научных проблем физики невесомости и материаловедения. Эти исследования должны послужить научным фундаментом решения тех новых задач, которые встанут перед космической технологией.

ПРОЛЕГОМЕНЫ КОСМИЧЕСКОЙ ИНДУСТРИИ

— Взгляни-ка на дорогу. Кого ты там видишь?

— Никого, — сказала Алиса.

— Мне бы такое зрение, — заметил Король с завистью. — Увидеть Никого! Да еще на таком расстоянии!

Космическая технология — перспективное направление космонавтики, которое способствует ускорению научно-технического прогресса. А какое место занимает она среди других прикладных направлений космонавтики? И какую роль будет она играть среди этих направлений в более отдаленной перспективе, скажем в XXI веке, до наступления которого осталось не так уж много времени? Чтобы ответить на эти вопросы, мало той зорко-

сти, которой позавидовал Король из книжки Л. Кэрролла.

Для правильного понимания роли космических систем в решении проблем энергопроизводственной инфраструктуры необходимо учесть несколько факторов принципиального характера. Первый из таких факторов — это переход к экономике информационного типа.

Практически это выражается в том, что процессы сбора, передачи, хранения и обработки информации приобретают решающее значение для эффективного функционирования народного хозяйства в целом. По оценкам, в настоящее время в США расходы на эксплуатацию и производство средств связи и вычислительной техники составляют около 12 процентов валового национального продукта, а на выработку, передачу и потребление энергии — 13 процентов. В дальнейшем доля расходов на информационные системы будет возрастать.

В решении проблем информатики космические системы уже в настоящее время играют большую роль. Космические комплексы используются в современных системах связи, телевидения непосредственно на бытовые приемники, метеорологии, навигации, землеведения, разведки полезных ископаемых, охраны окружающей среды, рыболовства.

В перспективе роль космических информационных систем еще более возрастет. Будет решен целый ряд задач сервисного обслуживания — широкое внедрение в практику управления видеотелеконференций, создание межотраслевых банков информации с оперативной передачей их заказчику через космические системы связи, внедрение в различные отрасли народного хозяйства методов дистанционного изучения Земли, новые формы обучения и культурного отдыха. Можно говорить, что на основе широкого использования перспективных космических систем в XXI веке будет завершено создание глобальной информационной инфраструктуры.

Второй фактор — это обеспечение растущих энергетических потребностей цивилизации, необходимость переориентации народного хозяйства на новые источники энергии. Связано это с разными обстоятельствами: ограниченные запасы минеральных энергоресурсов, возрастающее загрязнение природной среды отходами промышленности и сельского хозяйства. В XXI веке человечество может оказаться перед серьезной опасностью «теплого загрязнения» Земли, то есть поступления в атмосфе-

ру слишком больших количеств избыточного тепла — нельзя забывать, что климат нашей планеты находится в состоянии не очень устойчивого равновесия. Нельзя допустить, чтобы рост добавляющего производства энергии нарушил это равновесие.

В этой связи можно ожидать, что в XXI веке будет начата реализация таких крупномасштабных проектов, как сооружение орбитальных отражателей солнечного излучения для освещения районов Земли, космических солнечных электростанций для энергоснабжения наземных и орбитальных производственных комплексов. При решении этих задач методы космической технологии найдут самое широкое применение.

Третий фактор — это экологические соображения. Бурное развитие промышленности, происходящее в настоящее время на земном шаре, оказывает все возрастающее антропогенное давление на природную среду. Это может привести — а в ряде случаев уже привело — к губительным последствиям.

Я люблю тебя, большое время,
Но прошу — прислушайся ко мне:
Не убей последнего тайменя,
Пусть гуляет в темной глубине, —

совершенно правильно писал поэт С. Куняев.

Тщательно продуманные и широкомасштабные мероприятия по созданию экологически сбалансированной экономики должны стать важной отличительной чертой народного хозяйства XXI века. Космическая технология, несомненно, в состоянии внести свой вклад в решение этих задач. Возможность улучшения охраны окружающей среды с помощью космических систем, улучшение качества материалов, внедрение энергосберегающих технологий — все это в состоянии делать космонавтика.

Итак, мы приходим к выводу, что космическая технология и в ближайшие годы, и в более отдаленной перспективе будет играть важную народнохозяйственную роль. Но существует еще один фактор, без правильного понимания и учета которого нельзя создать ясного представления о перспективах развития цивилизации в целом.

Освоение околоземного пространства — одна из тех глобальных проблем, успешное и всестороннее решение которых может явиться лишь результатом коллективных усилий человечества. Именно так подходит к этим

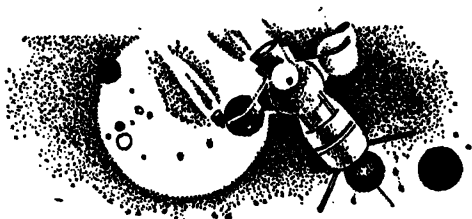
задачам наша страна, плодотворно сотрудничающая в деле внеземных исследований с другими странами. Как ничто иное, космос уже сегодня открывает поле для совместной деятельности народов, где никакие наслоения прошлого не препятствуют осуществлению международных проектов на благо рода человеческого.

К сожалению, как и в сугубо земных делах, на обстановке в космических исследованиях негативно сказывается линия не на сотрудничество, а на противоборство с миром социализма, которую проводят некоторые круги в США. Этой позиции противостоят четкие и конкретные предложения Советского Союза, направленные на то, чтобы сохранить человечеству мир и вдохновить людей на новые большие свершения на Земле и в космосе.

Космос должен оставаться мирным — таково мнение всех миролюбивых сил планеты. Нельзя допустить размещения в космосе оружия любого рода, превратить его в арену подготовки «звездных войн». Замыслы американской военщины по созданию космического оружия и космических войск фактически обрекают человечество на пассивное ожидание гибели.

Советский народ уверен в своем будущем. Если потребуются, будет создано оружие защиты и противодействия. Но мы твердо верим, что человечество не пойдет на самоуничтожение и обеспечит мирное сосуществование стран с различным общественным строем.

Дело мира победит, и космос останется мирным, открытым для грядущих свершений на благо народов всей Земли.



ОГЛАВЛЕНИЕ

О чем эта книга	3
-----------------	---

ФИЗИКА В КОСМОСЕ

Когда исчезает вес	5
Спор с Дж. Т. Мастоном	8
Слово Циолковскому	10
Почему на космическом аппарате нет полной невесомости	11
Как измерить невесомость	13
Как уменьшить малые воздействия на прибор	16
Можно ли получить невесомость на Земле	17
Как открыли пустоту	20
Космический вакуум	21
Как получить высокий вакуум на невысокой орбите . . .	23
Солнечная радиация	24
Судьба открытия невесомости	25
Космос — новая производственная среда	29

ГИДРОМЕХАНИКА НЕВЕСОМОСТИ

Что такое физика невесомости	30
На каких эффектах основаны методы космической технологии	32
Поверхностное натяжение	35
Жидкость на поверхности твердого тела	37
В лаборатории Рэлея	40
Гидростатика	42
Рассказ космонавта	45
Конвективные движения	46
Естественная конвекция	47
Кто открыл эффект Марангони	50
Термокапиллярная конвекция	51

КРИСТАЛЛЫ БЕЗ ВЕСА

Агрегатные и фазовые состояния вещества	54
Как происходит плавление и кристаллизация	57
Кристаллизация и процессы теплообмена	59
Распределение примесей в образцах	61
Дислокации	62
Кристаллизация многофазных систем	64

ТАЙНЫ КАПЛИ

Устойчивость жидких перемычек	67
Пузыри и капли	69
Устойчивость процессов кристаллизации	72
Менуэт с поверхностным натяжением	74
Принципы левитации	78

КАК ЭТО ДЕЛАЕТСЯ

Основные типы приборов для космической технологии . .	82
Электронагревные печи	84
Экзотермические печи	86
Зеркально-лучевые установки	88
Методы выращивания кристаллов	89
Аппаратура для модельных экспериментов	94
Перспективные установки для производства материалов .	99

ЧУДЕСА НЕВЕСОМОСТИ

Неожиданные результаты	101
Исследование конвекции	107
Эксперименты продолжаются	110
Кристаллизация жидких перемычек	113

ПОЛУПРОВОДНИКИ ИЗ КОСМОСА

Что можно улучшить в космосе	115
Для чего это нужно	117
Как это сделать	123
Что для этого надо	125
Что будут продавать через пять лет	126

НЕОБЫЧНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СТЕКЛА

Космическая металлургия	130
Металлы и сплавы из космоса	131

Совершенно открытие	134
Композиты	135
Не только материалы	137
Металлургические операции на орбите	138
Космическое стеклоделие	141
Шарики из космоса	141

КОСМИЧЕСКАЯ БИОТЕХНОЛОГИЯ

Некоторые сообщения американской прессы и комментарии к ним	143
Что такое биотехнология	145
Электрофорез	148
Светлана Савицкая начинает эксперимент	149
Хотят миллиард долларов	149
Перспективы	152

ВЫГОДЫ НОВОГО ЗНАНИЯ

Несколько слов об алхимии	156
Физика невесомости работает	157
Космическая металлофизика	159
Органические кристаллы	159
Теплофизические измерения	160
Принимаются заявки	161

ГДЕ ВЗЯТЬ ЭНЕРГИЮ

Сколько пужно энергии для производства материалов в космосе	162
Типы космических энергоустановок	164
Энергия Солнца	166
Перспективные солнечные батареи	169
Концентраторы солнечного излучения	171
Космические энергосистемы XXI века	172

ВНЕЗЕМНЫЕ РЕСУРСЫ

Ход эфирной промышленности	175
Письмо космического колониста	176
Программа-минимум для космической технологии	178
Горные карьеры на Луне	181
Об астероидах и прочем	184

ДОРОГИ В КОСМОС

Сколько стоит билет в космос	186
С Земли на орбиту	189
Космические буксиры	193
ЭРД на космических трассах	195
Космический троллейбус	196
Пока экзотика	198

ЗАВОДЫ НА ОРБИТАХ

Как это видел Циолковский	201
Орбитальные народнохозяйственные комплексы	202
Перспективные орбитальные станции	204
Заводы-автоматы в космосе	207
Станция «Мир»	208
Экономика космической технологии	209
Если бы только деньги	212
Этапы космического производства	214
Прологомены космической индустрии	216

Авдуевский В. С., Лесков Л. В.

А 18 Работает невесомость. — М.: Мол. гвардия, 1988. — 223[1] с., ил.

ISBN 5-235-00019-6

В книге академика В. С. Авдуевского и доктора физико-математических наук Л. В. Лескова рассказывается о новом научно-техническом направлении — космической технологии, о физических процессах в невесомости, о трудностях становления новой отрасли и ее широких перспективах.

А 3607000000—118
078(02)—88 057—88

ББК30.6

ИБ № 5866

**Всеволод Сергеевич Авдуевский,
Леонид Васильевич Лесков**

РАБОТАЕТ НЕВЕСОМОСТЬ

Зав. редакцией **В. Щербakov**
Редактор **В. Родиков**
Художественный редактор **В. Федотов**
Технический редактор **Т. Кулагина**
Корректоры **Т. Контиевская, Н. Самойлова**

Сдано в набор 21.10.87. Подписано в печать 17.03.88. А00963.
Формат 84×108^{1/2}. Бумага типографская № 2. Гарнитура
«Обыкновенная новая». Печать высокая. Условн. печ. л. 11,76.
Условн. кр.-отг. 12,18. Учетно-изд. л. 12,0. Тираж 50 000 экз.
Цена 50 коп.

Набрано и сматрицировано в ордена Трудового Красного
Знамени издательско-полиграфическом объединении ЦК ВЛКСМ.
«Молодая гвардия»: 103030, Москва, Суцневская, 21. Заказ 1945.

Отпечатано на полиграфкомбинате ЦК ЛКСМ Украины «Мо-
лодь» ордена Трудового Красного Знамени издательско-поли-
графического объединения ЦК ВЛКСМ «Молодая гвардия»:
252119, Киев-119, Пархоменко, 38—44. Заказ 7—425.

ISBN 5-235-00019-6

50 коп.

