

УДК 520.6.07.+542.86+538.971+681.532

**Е. С. Паславский**

Институт космических исследований НАН Украины та НКА Украины, Київ

## Управляемые космического

## левитаторы базирования

*Надійшла до редакції 21.01.00*

У роботі проведено аналіз можливостей використання для цілей керованої левітації існуючих безконтактних, просторово розподілених силових впливів на робоче тіло (на зразки матеріалів, що обробляються). Показано, що в левітаторах, призначених для спецметалургії, найбільш перспективним є індукційний електромагнітний силовий вплив. Він досить просто забезпечує необхідні функції безконтактного утримання, управління та стабілізації робочого тіла (зразка). Виконано наближені розрахунки параметрів та режимів роботи левітаторів космічного базування. Проведено порівняльний аналіз одержаних основних розрахункових параметрів левітаторів космічного базування з фактичними параметрами левітаторів наземного базування.

### ВСТУПЛЕНИЕ

Возможности расширения современного промышленного производства существенно зависят от спектра свойств поставляемых материалов. Условия невесомости открывают возможности постановки экспериментов, способствующих созданию новых технологий и материалов со свойствами, недостижимыми при наличии нескомпенсированных сил земного притяжения.

Большая часть материаловедческих исследований связана с процессами нагрева, плавления и перекристаллизации материалов различных составов. При этом факторами влияния на процесс являются гравитационное поле Земли и другие поля, вибрация, засорение обрабатываемого материала материалом тигля, наличие градиентов температуры, центров кристаллизации, переохлаждение, конвекция и т. п.

Условия космического эксперимента позволяют использовать недостижимые в наземных условиях сочетания указанных факторов. Наиболее важным из них является невесомость.

Кратковременно невесомость достигается в башнях или шахтах сбрасывания, а также в самолетах — на специально пилотируемых участках полета и в ракетах. Долговременная невесомость реализуется

на космических аппаратах, спутниках и космических станциях. В любом варианте стоимость использования условий невесомости высокая. Этим диктуется требование особой тщательности подготовки соответствующих экспериментов.

Слабый принцип эквивалентности подтвержден опытами Р. Этвеша, а позднее Р. Дикке, который установил эквивалентность сил инерции и сил тяготения для различных материалов с относительной точностью  $10^{-11}$ . Это дает основание считать, что невозмущаемые рабочие тела в условиях орбитального полета или свободного падения, будут двигаться по одинаковым траекториям и не будут изменять своего взаимного расположения (при нулевых относительных начальных скоростях). Такую ситуацию выгодно использовать для незагрязняющей бесконтейнерной, бесконтактной обработки расплавов. Скомпенсированность гравитационных и инерциальных сил позволяет надеяться получить требуемые структуры материалов, недостижимые в условиях существенных нескомпенсированных сил тяготения или инерции.

Опыты, проведенные на космических аппаратах, ракетах, самолетах, башнях и шахтах сбрасывания, свидетельствуют о том, что во время сеансов невесомости взаимное расположение аппаратов и рабочих тел медленно изменяется, т. е. существуют

микроускорения различной природы, для обозначения которых часто используется понятие микрогравитация. При этом не всегда делается различие между силами гравитации и силами инерции.

Причин наличия микрогравитации несколько. Это торможение самого аппарата, неоднородность гравитационного поля, взаимодействие с другими массами и электромагнитными полями, работа механизмов и экипажа внутри КА и т. д. Попытка максимальной компенсации различных воздействий была предпринята при создании бесшумных спутников [2]. Полученное остаточное фоновое ускорение на спутнике «Трайяд-1» составило  $10^{-10}$  м/с<sup>2</sup>, т. е.  $\sim 10^{-9}g_0$  ( $g_0$  — ускорение свободного падения). Такой спутник имеет малые размеры, очень дорогой и поэтому не всегда может быть использован для технологических экспериментов.

На орбитальных космических станциях (ОКС) с работающим экипажем остаточные ускорения составляют  $(10^{-5} \div 10^{-3})g_0$ , имеют довольно широкий частотный спектр и изменяющуюся ориентацию [1], что усложняет работу со свободными телами и делает опасной работу с расплавами. По этой причине расплавы удерживают в контейнерах или ампулах. При зазоре между образцом и контейнером или ампулой в 1 см и  $g = 10^{-3}g_0$  выход образца на стенку сосуда может произойти за 1,4 с. При работе с высокотемпературными, химически агрессивными и требующими особой чистоты эксперимента образцами такой контакт недопустим. Для устранения контакта расплав локализируют в пределах контролируемого объема пространства КА левитаторами. Они осуществляют управление образцом путем автоматического бесконтактного силового воздействия в ответ на возникающие микроускорения. Силовое воздействие должно осуществляться бесконтактно, автоматически в нужном направлении и требуемой величины, максимальное значение которой определяется гидростатическим давлением  $P_{гв}$ , возникающим в расплаве

$$P_{гв} = \rho gh, \quad (1)$$

где  $\rho$  — массовая плотность вещества,  $g$  — величина возникающего ускорения,  $h$  — высота гидростатического столба.

#### ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ БЕСКОНТАКТНОГО СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Есть несколько способов бесконтактного силового воздействия. Они основаны на использовании полей, волн, реактивного движения и потоков частиц

или газов. Понятие бесконтактности является чисто условным. Отсутствие всякого контакта означало бы отсутствие воздействия. При электромагнитном воздействии силовой контакт с образцом осуществляется через электромагнитные поля. Важно отметить, что химического воздействия на вещество образца при этом нет. Все другие из указанных воздействий в той или иной мере связаны с массопереносом и возможностью химических реакций вещества образца с посредником переноса энергии — газом, частицами и т. п. Это главный фактор ограниченности использования воздействий не электромагнитной природы.

Силовое, или пондеромоторное, воздействие волн было открыто в конце прошлого столетия П. Н. Лебедевым. Было установлено существование общих закономерностей пондеромоторного воздействия волн разной природы — гидравлических, звуковых и электромагнитных, с чем и связано разнообразие возможностей левитации. Последний из указанных видов воздействий наиболее пригоден для создания совершенных левитаторов космического базирования и будет подробно рассмотрен ниже. Первый, по понятным причинам, не попадает под рассмотрение. Что касается звуковых волн, то их использование можно считать ограниченно приемлемым не только по ранее указанной причине. Принципиально необходимая в этом случае среда вещественной, а не полевой природы, будучи переносчиком акустической энергии удержания образца, является также теплопроводником, приводящим к дополнительным потерям ценной бортовой энергии.

Так как эффективность использования звуковых волн очень низкая, то целесообразность их применения становится сомнительной, за исключением специальных случаев. По данным INTERNET ([http://www.space.gc.ca/ENG/Available Technologies/src00060.html](http://www.space.gc.ca/ENG/Available%20Technologies/src00060.html)) существенное развитие сонарной техники позволило создать левитатор космического базирования Space-DRAMS. Установка оказалась очень дорогой и громоздкой. Установка разработана компанией «Guigne International Ltd» при поддержке Канадского космического агентства (CSA). Стоимость проекта левитатора около 1 млн долларов, стоимость установки Space-DRAMS около 10 млн долларов. Не ясны также возможные последствия побочных явлений, связанных с мощным акустическим полем.

Кроме указанных, существует лазерно-абляционный (реактивный) способ силового воздействия. Этот способ также не обладает большой эффективностью, но он может быть применен для удержания диэлектриков в вакууме.

Есть также газоструйный способ воздействия,

который является довольно эффективным. Однако его использование ограничивается трудностями удержания чистой газовой среды, неудобством управления, нестабильностью теплового режима и т. п.

Из этой краткой характеристики следует, что принцип левитации, основанный на использовании электромагнитных полей, способных создать распределенное в пространстве, достаточное силовое воздействие на левитирующий образец, может рассматриваться как наиболее универсальный и перспективный для чистых и специальных технологий.

#### ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПРИНЦИПЕ ЛЕВИТАЦИИ, ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОСТИ

Технологические процессы, связанные с плавлением материалов и фазовыми переходами первого рода, проходят при температуре выше точки Кюри, поэтому можно не учитывать ферромагнетизм, а также магнитострикцию, электрострикцию и другие явления второго порядка малости. В этом случае создаваемое электромагнитным полем давление  $P$ , действующее на вещество, наиболее просто определяется суммой объемных плотностей электрической и магнитной энергий на границе раздела вакуум—среда. При этом

$$P = \frac{\varepsilon E^2}{2} + \frac{\mu H^2}{2}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды,  $\mu$  — магнитная проницаемость среды,  $H$  — напряженность магнитного поля,  $E$  — напряженность электрического поля.

Случай, когда преобладает второе слагаемое (2), классифицируется как случай удержания магнитным полем, электрическое поле здесь не имеет существенного силового влияния. Когда преобладает первое слагаемое (2), говорят об удержании в электрическом поле (электростатическое удержание). Силовая функция магнитного поля в этом случае незначительна.

В зависимости от частоты поля, значений параметров среды  $\varepsilon$  и  $\mu$  оба слагаемых могут принимать участие в формировании силовой функции в любом соотношении. Вид удержания при близких значениях слагаемых правильно будет называть сверхвысокочастотным электромагнитным удержанием. Он связан с использованием электромагнитного поля сверхвысоких частот, поэтому энергетически невыгоден для удержания больших масс вещества,

так как может приводить к перегреву образца, а также не обеспечен эффективным оборудованием.

В связи с изложенным целесообразно подробнее рассмотреть электростатический и магнитный способы левитации.

Рассмотрим сначала возможности использования электростатического способа левитации. Максимально допустимое давление, создаваемое электрическим полем, определяется максимально допустимой величиной последнего. Для вакуума его значения ограничиваются возникновением автоэлектронной эмиссии с образца, т. е. величиной  $E = 3 \cdot 10^8$  В/м, которой соответствует давление  $P = 4 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>. Такие давления полностью пригодны для удержания достаточно больших твердых холодных тел. Из (1) следует, что даже для материалов с большой плотностью в диапазоне ускорений  $g = (10^{-5} \div 10^{-3})g_0$  возможно было бы удержание образцов значительно больших размеров, чем требует практика. Однако при нагревании рабочие тела выделяют газы и пары, возникает термоэлектронная эмиссия. Эти обстоятельства приводят к катастрофическому понижению допустимой напряженности электрического поля. Только за счет электрического пробоя в газе, который наступает при  $E \approx 10^2 \div 10^6$  В/м, достижимое давление становится незначительным  $0.04 \div 0.4$  Н/м<sup>2</sup> и допустимые размеры образца при  $g = 10^{-3}g_0$  приобретают значения порядка миллиметра. Использование метода подзарядки рабочего тела, в котором создаются аналогичные поля, также пока проблематично. Это ставит под сомнение перспективу широкого использования электростатической левитации образцов в газовой среде или образцов с газовыделением и существенной термоэмиссией.

Таким образом, электростатическая левитация возможна только для малых масс образцов малой плотности в ограниченном диапазоне технологических условий (отсутствие газовой среды низкого давления, отсутствие термоэмиссии) при ограничении микрогравитации, по-видимому, верхним порогом  $10^{-3}g_0$ .

Теперь для сравнения рассмотрим электромагнитный (магнитоиндукционный) способ левитации. Он успешно используется в наземных условиях — значительно более тяжелых, чем полетные по значению  $g$ . Как отмечалось, в этом способе «работает» второе слагаемое формулы (2). Здесь величина магнитного давления ограничивается максимально допустимой величиной напряженности магнитного поля, определяемой максимально допустимой плотностью тока в проводнике индуктора, создающего магнитное поле. В свою очередь предельно допустимая плотность электрического тока в индукторе

определяется частотой тока, электропроводностью, механической и тепловой прочностью материала индуктора, а также условиями охлаждения.

Для ориентировки оценим величину возможного силового воздействия в эксплуатируемых наземных аппаратах. В наземных лабораторных и промышленных устройствах левитации чаще всего используются генераторы с частотой 66 кГц. Индукторы выполняются из меди. Предельно большое (эксплуатационно безопасное) снятие энергии водяным охлаждением в соответствии с работой [8] составляет  $2 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>. Из формулы для мощности  $W = \text{Re}\Pi$ , выделяемой в плоском проводнике с током при полном скинировании можно получить зависимость  $W$  от напряженности магнитного поля на границе раздела сред

$$W = \frac{H^2}{\sigma\delta}, \quad (3)$$

где  $\Pi$  — вектор Пойтинга,  $\delta = \sqrt{2/(\mu\sigma\omega)}$  — глубина скин-слоя,  $\omega = 2\pi f$ ,  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м,  $f = 66 \cdot 10^3$  Гц — частота тока,  $\sigma = 5.8 \cdot 10^7$  Ом<sup>-1</sup>м<sup>-1</sup> — электропроводность материала индуктора.

Используя (3), а также второе слагаемое выражения (2), получим величину максимально достижимого давления магнитного поля  $P = 1874$  Н/м<sup>2</sup>. Оно превосходит достижимое электростатическое давление на много порядков и может уравновесить в наземных условиях слой жидкого металла от 1 до 10 см, в зависимости от массовой плотности. Эта оценка показала наличие необходимых условий для удержания достаточно больших масс металла магнитным полем, с чем и связан интерес к электромагнитной левитации. Однако практически в наземных экспериментальных и промышленных установках в одной плавке удерживается не более 10±20 г металла. При этом мощность оборудования 50—100 кВт и больше.

Для того чтобы сделать более обоснованные выводы о возможности использования электромагнитной левитации на борту КА, проанализируем опыт и достижимые результаты при работе с левитаторами в наземных условиях. В работе [3] проведена оценка параметров генераторов, необходимых для удержания 1.4 см<sup>3</sup> различных материалов. Разница в частотах и мощностях используемых генераторов достигает двух порядков для различных материалов, и построение полностью универсальной установки наземного базирования практически нецелесообразно.

В таблице, приведенной в работе [3], перечислены типовые генераторы, их мощности и частоты, а также типовых генераторов, определены группы металлов, которые могут удерживаться и металлы,

которые не могут удерживаться по разным причинам. Видно, например, что платина, имеющая большую массовую плотность и высокую электропроводность, может удерживаться, но только при высоких частотах и больших мощностях. В то же время свинец, с меньшей плотностью и плохой электропроводностью вообще не удерживается ни одним из используемых в настоящее время наземных технологических средств.

Таким образом, как следует из практики, удержание расплавленных металлов в магнитном поле средствами наземного базирования ограничено как по массе, так и по спектру необходимых материалов. Порог этого ограничения лежит ниже ранее приведенных оценок. На этот факт обращали внимание многие исследователи, описаны некоторые явления, сделан ряд предположений. Однако, несмотря на все усилия, факты практического применения результатов с существенным увеличением массы удерживаемого металла не известны. Это связано прежде всего с тем, что не устранены неустойчивости, неизбежно возникающие в применяемых методах. Есть основания полагать, что реализация работ [6, 7, 12—14, 16], направленных на устранение этих неустойчивостей, позволит приблизить значения удерживаемых масс металла к ранее приведенным оценкам. Поэтому далее рассмотрим проблему устойчивости, а также важный для технологий вопрос нагрева. Вопросы удержания, устойчивости и нагрева жидкого металла, а также технологичности конструкции тесно связаны и взаимозависимы. Однако для анализа процессов левитации их нужно разъединять. Рассмотрим эти вопросы на примере конкретных устройств. Для создания удерживающего магнитного поля в практике используются чаще всего двухвитковые индукторы с согласным или встречным направлением токов и горизонтальным или вертикальным расположением оси витков. Соотношения параметров в таких кольцевых индукторах довольно подробно описаны в работах [3, 18], где показана ограниченность наземных средств как по массе, так и по спектру удерживаемых материалов. В работах [18, 19] описана попытка увеличения массы удерживаемого металла за счет растягивания круговых витков в длинные петли. В этом случае вместо особой точки, в которой пондеромоторные силы равны нулю, образовывалась особая линия, через которую мог протекать металл. «Размазывание» особой линии с помощью «беличьего колеса», образованного вторым индуктором с другой частотой тока, улучшило ситуацию. Однако в нижней части индуктора образовывались складки расплава (гребни и желобки), направленные вдоль силовых линий поля, их

шаг был близок к глубине проникновения поля, и металл проливался. Эти явления могут проявиться в левитаторах космического базирования при больших значениях масс, ускорения и магнитного давления в образцах с малым коэффициентом поверхностного натяжения.

На устранение описанного образования складок, известного в физике плазмы как желобковые и шланговые неустойчивости, направлены работы [14, 16]. В них, по-видимому впервые, предлагается использование распределенной системы автоматической стабилизации неустойчивых жидкостей или газообразных проводников с помощью обтекающего контроля полем круговой поляризации. Даются критерии устойчивости и данные натурного эксперимента [14] с индуктором выполненным в виде тора, внутри которого находится расплавленный металл. Для повышения производительности установок бесконтактной плавки выгодно использовать двухчастотную систему токов. Исследование устойчивости расплавленного металла для такой системы выполнено в работе [5]. Расчеты устойчивости, технологической реализуемости и режимов работы, подтверждающих возможность создания установок повышенной производительности с индуктором бегущего поля, выполнены в работах [5—7, 11].

#### РАЗВЯЗКА ФУНКЦИЙ УДЕРЖАНИЯ, СТАБИЛИЗАЦИИ И НАГРЕВА

Для многих технологий практический интерес представляет вопрос развязки функций поля. В практически используемых установках наземного базирования удержание, придание устойчивости образцу и его нагрев осуществляются совместно. Все эти функции выполняются одним магнитным полем. Только конфигурация индуктора, значения частоты и напряженности магнитного поля способны ослаблять или усиливать ту или иную из указанных функций поля за счет других. Для расширения универсальности левитатора желательно, чтобы эти функции были управляемы независимо, т. е. развязаны. Такие возможности существуют. Это, например, использование двухчастотного метода левитации [5], в котором функция удержания в некоторой степени развязана от функций стабилизации и нагрева. Использование дополнительного источника нагрева могло бы также быть полезным для многих технологий. Однако в наземных установках интенсивности удерживающих полей такие, что для большинства материалов дополнительный нагрев не требуется [7]. Более того, часто происходит вынужденный перегрев, что огра-

ничивает спектр технологических режимов и спектр обрабатываемых материалов.

В условиях микрогравитации, при ускорениях порядка  $g = 10^{-3}g_0$ , удерживающие и стабилизирующие поля не оказывают существенного теплового воздействия на образец. В этом случае удобно использовать автономный источник нагрева левитирующего образца, не оказывающий существенно силового воздействия и не загрязняющий образец. В качестве названного источника может быть использован лазер, электронно-лучевая пушка или высокочастотный генератор. В условиях космического полета в связи с дефицитом электроэнергии представляет интерес непосредственное использование лучистой энергии Солнца. Хотя для этого необходимо применение довольно сложных устройств (средств слежения за Солнцем, зеркал-концентраторов, световодов и др.), реализация идеи осуществима и привлекательна.

Важно отметить, что развязка рассматриваемых функций особенно важна для установок космического базирования, к которым предъявляется экономическое требование максимальной универсальности по отношению к разнообразным испытываемым образцам. Универсальность может обеспечиваться раздельной настройкой режимов и устройств по рассматриваемым функциям, что обходится значительно дешевле, чем создание, транспортировка и замена оборудования на борту.

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛЕВИТАТОРОВ, СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТОК

Большого внимания заслуживает также возможность адаптации левитаторов к выполнению в условиях микрогравитации других прикладных функций, кроме материаловедческих. К таким функциям можно отнести возможности управления формой и положением расплавленного металла, транспортировки его в нужное место, перемешивание и другие виды движений, а также дополнительный нагрев при этом образцов от ВЧ-генераторов, лазера, электронной пушки или гелиоисточника с существенным сохранением энергоресурсов за счет бесконтактности. Указанные функции левитаторов открывают новую область применения их на КА — выполнение ремонтных и монтажно-конструкторских работ. Это ремонт метеоритных повреждений, восстановление покрытий, сплавление конструкций, пайка, сварка, использование «электромагнитных фильеров», отливка в «электромагнитную литейную форму» и т. п. Здесь представляет ценность

идея замены посредством левитатора отсутствующего гравитационного давления управляемым электромагнитным давлением, что удобнее, чем центрофугирование, которое не всегда приемлемо.

Для реализации указанных процессов необходимы натурные эксперименты на КА, направленные как на совершенствование микрогравитационных технологий, так и самих левитаторов, адаптированных к условиям микрогравитации. Основанием к этому являются уже осуществленные и готовящиеся постановки экспериментов по спецметаллургии в условиях микрогравитации.

На космических аппаратах проводились эксперименты с установками «Кристалл», «Пион», «Зона». Получен индий в виде цилиндра диаметром 5.2 мм × 12 мм с качественными показателями, не достижимыми в наземных условиях. Установка «Корунд» обрабатывала 18 кг полупроводникового материала [4, 10].

Группа государств Западной Европы создала платформу многоразового пользования «Эврика» [4, 10] с остаточным ускорением  $g_{ост} = 10^{-5}g_0$  специально для технологических целей. В указанных экспериментах материал удерживался в ампулах, соприкасался со стенками ампул, что неизбежно ухудшало технологический режим по чистоте и тепловому режиму. Устранить эти недостатки стремятся с помощью нового класса приборов-левитаторов. По данным INTERNET известно, что в 1997—1999 гг. левитаторы интенсивно разрабатывались в нескольких научных центрах мира. Электростатический левитатор ESL, разработан Loral Space Systems of Palo Alto, California и предоставлен (NASA) Marshall Space Flight Center ([http://es91-server1.msfc.nasa.gov/newhome/headlines/msad09mar98\\_1.htm](http://es91-server1.msfc.nasa.gov/newhome/headlines/msad09mar98_1.htm)). Известны и другие проекты. Например, электростатическая левитационная печь (electrostatic levitation furnace — ELF) (<http://j/tksc.nasda.go.jp/JEM/jemmefc/english/tlf.html>) разрабатывается для Японского экспериментального модуля (JEM) ISS, который вводится в работу после 2000 г., а также установка TEMPUS (Tiefelfreies Elektromagnetisches Positionieren und Prozessieren unter Schwerelosigkeit), (Containerless Electromagnetic Positioning and Processing under Weightlessness), ([http://musc.rs.kp.dlr.de/Experimentanlagen/TEMPUS\\_htmls/tempus\\_e.html](http://musc.rs.kp.dlr.de/Experimentanlagen/TEMPUS_htmls/tempus_e.html)). В приведенных описаниях основные параметры разнообразны и трудно приводимы к единым критериям. Поэтому целесообразно оценить возможные соотношения фундаментальных параметров в процессах и устройствах левитации космического базирования.

#### ОЦЕНОЧНЫЕ РАСЧЕТЫ РЕЖИМОВ ЛЕВИТАЦИИ И ГЕЛИОНАГРЕВА ДЛЯ УСЛОВИЙ ОРБИТАЛЬНОГО ПОЛЕТА

Как указывалось, реализация чистых бесконтактных технологий идет по двум путям. Создают спутники с пониженными значениями ускорений, в которых должно существенно увеличиться время бесконтактного пребывания рабочего тела в заданном объеме. Второй путь — это создание левитаторов, устраняющих контакт рабочего тела со стенками заданного объема при типичных для КА микроускорениях. Первый путь требует энергзатрат на коррекцию траектории всего КА, второй — только на коррекцию положения образца. Очевидно, для специальных спутников приемлемы и первый, и второй варианты, а для космических станций предпочтительней второй вариант. Важно отметить, что использование только первого варианта может оказаться недостаточным. На образец могут действовать силы негравитационного происхождения (кулоновские, реактивные и др.), и образец будет уходить на стенку, несмотря на бесшосовость КА. Таким образом, есть основания рассматривать левитатор как необходимый инструмент автоматизации режимов бесконтактных технологий.

Оценим основные режимы левитации, необходимые для построения управляющей положением образца экспериментальной установки, работающей в условиях микрогравитации.

Целесообразно сначала рассмотреть режимы левитации капиллярных, т. е. удерживаемых поверхностным натяжением масс жидкостей сферической формы, а затем сделать заключение относительно возможностей других реализаций.

Известно, что при ускорении  $g$  масса изолированной жидкости сохраняет форму, близкую к сферической, при том условии, что максимальное гидростатическое давление  $P_{гс}$  не превосходит давления, обусловленного силами поверхностного натяжения  $P_{пн}$  (т. е. при числах Бонда  $Bo \leq 1$ ):

$$P_{пн} \geq P_{гс}. \quad (4)$$

Учитывая, что

$$P_{пн} = \frac{2\sigma_{пн}}{R}, \quad (5)$$

а

$$P_{гс} = \rho g 2R, \quad (6)$$

где  $\sigma_{пн}$  — коэффициент поверхностного натяжения жидкости,  $R$  — радиус сферы, из (4)—(6) получим для  $Bo = 1$  максимальное значение радиуса сферы  $R_m$ , удерживаемой силами поверхностного натяжения, при ускорении  $g$

$$R_m = \sqrt{\sigma_{\text{пн}} / (\rho g)}. \quad (7)$$

Оценим локальное значение напряженности магнитного поля требуемой для равновесия в точке максимального гидростатического давления. Из равенства магнитного  $P_m$  и гидростатического давлений

$$P_m = P_{\text{гс}}, \quad (8)$$

где  $P_m = \mu H^2/2$ ,  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ , при полном скинировании проводника из (6) и (8) получим напряженность магнитного поля  $H_{\text{гс}}$ , обеспечивающую уравновешивание максимального значения гидростатического давления при ускорении  $g$

$$H_{\text{гс}} = \sqrt{4\rho g R / \mu} = \sqrt{2P_{\text{гс}} / \mu}. \quad (9)$$

Такого порядка величины напряженность поля необходима для создания равновесия и управления динамикой движения и положением образца.

Аналогично  $H_{\text{гс}}$  оценивается порядок минимальной напряженности поля  $H_{\text{пн}}$ , требуемой для уравновешивания сил поверхностного натяжения и управления формой жидкости. Из условия

$$P_m = P_{\text{пн}} \quad (10)$$

и (5), (8) получим

$$H_{\text{пн}} = \sqrt{4\sigma_{\text{пн}} / (\mu R_m)} = \sqrt{2P_{\text{пн}} / \mu}. \quad (11)$$

Требуемая частота поля  $f$ , обеспечивающая минимальные энергетические потери, в соответствии с [7] определяется из условия

$$R_m = \delta. \quad (12)$$

Из (7), (8), (12) получим

$$f = \frac{1}{\pi R_m^2 \mu \sigma}. \quad (13)$$

Определим потоки мощностей  $W_{\text{гс}}$  и  $W_{\text{пн}}$ , рассеиваемых на образце при полученных из (9), (11), (13) значениях частот и удерживающих равновесных полей  $H_{\text{гс}}$  и  $H_{\text{пн}}$ . Для этого воспользуемся формулой (3) для плотности потока мощности, проходящего через поверхность образца. Значения  $W$  для условия (8) будут

$$W_{\text{гс}} = \frac{H_{\text{гс}}^2}{\sigma \delta}, \quad (14)$$

а для условия (10) —

$$W_{\text{пн}} = \frac{H_{\text{пн}}^2}{\sigma \delta}. \quad (15)$$

Пренебрегая поправками, связанными с формой образца, определим мощности  $w_{\text{гс}}$  и  $w_{\text{пн}}$ , проходя-

щие в образец сферической формы. При смещении образца от равновесного положения основной поток мощности поступает через площадь половины поверхности сферы  $S$ , поэтому поглотится мощность

$$w_{\text{гс}} = \frac{1}{2} W_{\text{гс}} S, \quad (16)$$

где

$$S = 4\pi R^2.$$

Так как при полном однородном обжати сферического образца изменение его формы не происходит, аналогично будем считать, что рассеяние мощности происходит неоднородно и только на половине площади сферы, испытывающей давление. Тогда образцом поглотится мощность

$$w_{\text{пн}} = \frac{1}{2} W_{\text{пн}} S. \quad (17)$$

Для ориентировки определим также объем образца

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3, \quad (18)$$

и массу

$$M = \rho V. \quad (19)$$

В случае гелионагрева определим для образцов с коэффициентом отражения 0.5 теоретически максимально возможное давление светового потока  $P_{\text{св}}$  от концентратора гелионагревателя

$$P_{\text{св}} \approx 10^{-5} \kappa_3, \quad (20)$$

где  $\kappa_3 = S_3 / S_{\text{фп}}$ ,  $S_3$  и  $S_{\text{фп}}$  — площади потоков на зеркало-концентратор и образец.

Для сравнения мощностей, требуемых на управление и нагрев, вычислим также поток мощности, излучаемой образцом при температуре выше температуры плавления. Известно, что поток мощности  $Q$  от тела с температурой  $T$  на тело с температурой  $T_0$  будет

$$Q = \varepsilon c (T^4 - T_0^4), \quad (21)$$

где

$$\varepsilon^{-1} = \frac{1}{\varepsilon_{\text{н0}}} + \frac{S_0}{S_{\text{н1}}} \left( \frac{1}{\varepsilon_{\text{н1}}} - 1 \right)$$

— приведенная излучательная способность двух тел с излучательной способностью  $\varepsilon_{\text{н0}}$  — одного и  $\varepsilon_{\text{н1}}$  — другого,  $S_0$  и  $S_{\text{н1}}$  — площади поверхностей теплообмена,  $c = 5.67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>) — постоянная Стефана—Больцмана.

При близко расположенных поглотителях можно считать  $S_0 = S_{\text{н1}}$ . Для реальных условий диапазон значений приведенной излучательной способности

## Параметры левитации

Параметр	Алюминий		Свинец		Вольфрам	
$t$ , °C	750		700		3382	
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	2380		11200		19340	
$\sigma_{\text{пн}}$ , Н/м	0.52		0.42		2.3	
$\sigma$ , 10 <sup>6</sup> Ом <sup>-1</sup> м <sup>-1</sup>	4		0.93		0.85	
$g$ , м/с <sup>2</sup>	0.00981		0.00981		0.00981	
$R_{\text{ш}}$ , м	0.149		0.0618		0.11	
$R$ , м		0.005		0.005		0.005
$f$ , Гц	2.85	2533	71.3	10895	24.5	11850
$\delta$ , м	0.149	0.005	0.0618	0.005	0.11	0.005
$P_{\text{гс}}$ , Н/м <sup>2</sup>	6.98	0.233	13.58	1.1	41.8	1.9
$H_{\text{гс}}$ , А/м	3330	609	4649	1322	8150	1738
$P_{\text{пн}}$ , Н/м <sup>2</sup>	6.98	208	13.58	168	41.8	920
$H_{\text{пн}}$ , А/м	3330	18194	4649	16352	8150	38248
$W_{\text{гс}}$ , Вт/м <sup>2</sup>	18.5	18.5	376	376	706	706
$W_{\text{пн}}$ , Вт/м <sup>2</sup>	18.5	16551	376	57501	706	344214
$S$ , см <sup>2</sup>	2790	3.14	480	3.14	1520	3.14
$w_{\text{гс}}$ , Вт	2.6	0.0029	9.0	0.06	54	0.11
$w_{\text{пн}}$ , Вт	2.6	2.6	9.0	9.0	54	54
$V$ , см <sup>3</sup>	13800	0.52	980	0.52	5600	0.52
$M$ , г	32900	1.24	11000	5.86	107.8	10
$Q$ , 10 <sup>3</sup> Вт/м <sup>2</sup>	2.7—10.8	2.7—10.8	2—8	2—8	1340—5300	1340—5300
$q$ , Вт	750—3000	0.85—3.4	96—384	0.63—2.54	(0.2—0.8) · 10 <sup>6</sup>	400—800
$P_{\text{св}}$ , Н/м <sup>2</sup>				~10 <sup>-5</sup> кз		

находится в пределах  $0.2 \pm 0.8$ . Целесообразно определить  $Q$  для крайних значений  $\varepsilon = 0.2$  и  $\varepsilon = 0.8$ , а затем также полную мощность  $q$ , излучаемую образцами в рассматриваемых случаях

$$q = QS, \quad (22)$$

В таблице представлены справочные данные и результаты вычислений, полученных из выражений (3), (5)—(7), (9), (11), (13)—(22) для алюминия, свинца и вольфрама. Рассмотрены случаи для образцов двух размеров. В первом случае выбран радиус, равный радиусу жидкого образца, находящегося в пограничном режиме между капиллярным и некапиллярным состоянием ( $Bo = 1$ ) при ускорении  $g = 10^{-3}g_0$ . Во втором случае выбран радиус 0.5 см.

Из расчетных данных, приведенных в таблице, можно сделать такие выводы.

1. В условиях микрогравитации силами поверхностного натяжения удерживаются образцы расплавленных металлов в виде сферы существенных размеров и масс. При  $g = 10^{-3}g_0$  капиллярные свойства алюминия сохраняются до радиуса почти 15 см и массы 32.8 кг, свинца — до 6.18 см и 11.0 кг, вольфрама — до 11 см и 107.8 кг соответственно.

2. Плотность потока мощности электромагнитного воздействия, требуемая для управления положением образца, не зависит от его размера.

3. Плотность потока мощности электромагнитного воздействия, требуемая для управления формой образца, быстро увеличивается с уменьшением радиуса образца.

4. Указанные в п. 2 и п. 3 мощности увеличиваются с увеличением плотности образца и с уменьшением его электропроводности.

5. Значения требуемых напряженностей магнитного поля лежат в области технической реализуемости для условий космического эксперимента.

6. Плотность потока мощности, требуемая для электромагнитного управления положением образца, пренебрежимо мала по сравнению с плотностью потока мощности радиационного излучения при температуре плавления большинства материалов.

7. Плотность потока мощности, требуемая для управления формой образца, по сравнению с радиационной, пренебрежимо мала для образцов с радиусом, близким к критическому капиллярному радиусу и может превосходить радиационную при достаточно малых значениях радиуса образца.

8. Абсолютные значения мощности, необходимой для управления положением образцов максималь-

ных капиллярных размеров и масс для подавляющего большинства материалов не превышает единиц или десятков ватт, а для образцов массой порядка 10 граммов — порядка милливольт или долей ватта.

9. В условиях микрогравитации функции удержания, стабилизации и нагрева при левитации существенно независимы по сравнению с наземными условиями.

10. В условиях микрогравитации значения масс жидкого металла, устойчиво удерживаемых в виде сферы силами поверхностного натяжения, весьма значительны (10÷100 кг). Это дает основания полагать, что до появления особых задач и мощной космической энергетики, для научных и технических целей пока достаточно исследований образцов материалов с массами, не только не превосходящими критические капиллярные массы, но даже значительно меньше их.

11. Давление светового потока гелионагревателя значительно меньше управляющих давлений, так как  $k_3$  не превышает  $10^3$ .

Несмотря на выводы п. 10, полезно отметить, что уже сейчас имеются теоретические и практические разработки, которые могут быть использованы в дальнейшем для управлением положением и формой левитируемых некапиллярных масс жидких электропроводников [6, 7, 15, 17].

#### О ПОСТРОЕНИИ СХЕМЫ ЛЕВИТАТОРА

Выше рассмотрены фундаментальные ограничения, накладываемые на параметры левитаторов. Для выбора технически реализуемой схемы левитатора необходимо учесть также обстоятельства эксплуатационно-практического характера. К ним относятся проблема безопасности эксперимента, вопросы ввода и вывода энергии, минимизации потребления энергии и массогабаритных параметров, удобства эксплуатации, информационного обеспечения и др.

Наиболее важным является вопрос безопасности. Аварии техногенного характера чаще всего происходят и являются наиболее опасными в местах скопления большого количества энергии и повышения ее концентрации. Металл, нагретый до высоких температур, является потенциально аварийно опасным объектом. Выйдя из-под контроля, достаточно большая масса расплавленного металла, попав на обшивку КА, может прожечь ее. Это обстоятельство диктует необходимость принятия дополнительных мер безопасности. Радикальной мерой следует считать уменьшение энергоемкости образца до безопасных значений, во всяком случае, до

приобретения серьезного опыта по обеспечению безопасности.

В рамках допустимой энергоемкости в зависимости от требуемых рабочих температур размеры образцов могут быть разными: возможно существенное их увеличение при пониженных температурах. Требование универсальности левитатора по отношению к размерам и рабочим температурам образцов, а также видам нагрева (ВЧ, лазерный, гелионагрев) понижают возможности использования мощности источников удерживающего поля. Практика показывает, что из-за потерь на согласование с нагрузкой и потерь, связанных с удовлетворением технологических требований, необходимые мощности источников тока, образующих удерживающие поля, иногда приходится увеличивать в десятки раз. Однако это не составляет особой угрозы. Поскольку требуемые для левитации мощности незначительны, масса источников удерживающего поля будет оставаться малой по сравнению с массой другого технологического оборудования. Кроме того, для оптимизации процесса левитации имеется возможность предусмотреть набор сменных индукторов, приспособленных к конкретным условиям проводимых экспериментов.

При планировании эксперимента полезно различать существование двух потоков энергии. Один предназначен для стабилизации положения образца, другой — для его нагрева. Эти потоки существенно не равны и имеет место их взаимообмен на образце и индукторе.

Для ограничения температуры индуктора в пределах рабочего диапазона необходимо предусмотреть систему выноса тепла к холодильнику-рассеивателю.

В случае использования гелионагрева должна быть предусмотрена система слежения зеркала-концентратора за направлением «на Солнце», а также система отключения светового потока в периодах между сеансами работы и в аварийных ситуациях. Все виды нагрева должна быть оснащена автоматизированным регулятором интенсивности. При использовании в левитаторах жидкостной системы охлаждения она должна быть оснащена устройством безопасного стравливания давления на случай аварийного смещения фокального пятна на индуктор. Индуктор должен безопасно выдерживать прикосновение к нему расплавленного образца в аварийных ситуациях.

Кроме указанного, энерго- и массогабаритные параметры левитаторов диктуются запросами пользователей. В настоящее время большинство материаловедов может удовлетвориться исследованием образцов малых масс — порядка нескольких граммов,

т. е. таких, какие исследуются в наземных левитаторах. Учитывая то, что расчет ведется для микроускорений, которые в полетном режиме составляют малую долю  $g_0$ , можно, не проводя конструкторские разработки, ориентировочно оценить энерго- и массогабаритные параметры, определяющие стоимость левитаторов космического базирования. Из ранее приведенных соотношений можно заметить, что ориентировочным пересчетным коэффициентом для основных параметров (массы, объема, мощности на удержание образца) будет отношение  $g/g_0$ .

Пересчет относится только к оборудованию, непосредственно связанному с принципами левитации. Значения же коэффициентов пересчета рассматриваемых здесь параметров для всей технологической установки с левитатором могут быть другими за счет материаловедческого оборудования, приборов, сервисных устройств и гелионагревателя. Но и это оборудование, сконструированное специально для условий микрогравитации, может иметь небольшие значения энергетических и массовых параметров.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из приведенных здесь соображений следует, что с целью минимизации стоимости первый опытный образец левитатора должен быть ориентирован на образцы малой (капиллярной) массы, а также на возможность предполетной натурной отработки всех его систем и режимов в наземных условиях. Трудности в наземной отработке составляют режимы, связанные с условиями микрогравитации, хотя и они могут частично имитироваться.

В простейшем случае в левитаторе космического базирования может быть использован индуктор, аналогичный наземному, образующий два разнесенных вдоль оси кольцевых тока с согласным или встречным направлением. В соответствии с работой [20] такой индуктор обладает как осевой, так и радиальной восстанавливающей силой. В работе [9] показана возможность создания устойчивых режимов удержания образца с требуемым качеством регулирования.

Другая схема левитатора может представлять собой блок, состоящий из трех упомянутых двухвитковых индукторов, расположенных взаимно ортогонально вокруг центра масс образца. Он обеспечит более изотропно стабилизацию положения образца по трем координатам, а также возможность смещения, поворота и вращения образца с помощью управляемой токовой запитки индукторов.

Создание бесконтактных электромагнитных

фильтров и транспортеров струй высокотемпературного расплавленного металла связано с большими энергозатратами и повышенной опасностью. Поэтому в настоящее время, как следует из таблицы, могут подлежать рассмотрению только низкотемпературные расплавы с малым коэффициентом поверхностного натяжения и высокой электропроводностью. Однако для ремонтно-монтажных целей (пайка, наплавка) в настоящее время возможна доставка не струй, а расплавленных шариков к месту пайки (наплавки), а также впрессовка их в поврежденную полость. Этот процесс осуществим с помощью набора двухвитковых индукторов, оснащенного системой управления, реализующей необходимый режим перемещения образца

1. Авдеевский В. С. Основные задачи исследования гидромеханики и теплообмена в условиях невесомости // Изв. АН СССР. Сер. физ.—1985.—49, № 4.—С. 627—634.
2. Брагинский В. Б. Экспериментальная проверка теории относительности. — М.: Знание, 1977.—64 с.
3. Глебовский В. Г., Бурцев В. Т. Плавки металлов и сплавов во взвешенном состоянии. — М.: Металлургия, 1974.—176 с.
4. Гришин С. Д., Лесков Л. В. Индустриализация космоса: Проблемы, перспективы. — М.: Наука, 1987.—352 с.
5. Губарев В. Ф., Ладиков-Роев Ю. П., Паславский Е. С. Исследование устойчивости при двухчастотном удержании жидкого металла // Кибернетика и вычислительная техника.—1974.—Вып. 33.—С. 93—96.
6. Губарев В. Ф., Паславский Е. С. Подавление гидромагнитных неустойчивостей жидкого металла автоматически управляемым магнитным полем // Магнитная гидродинамика.—1973.—№ 4.—С. 45—54.
7. Губарев В. Ф., Паславский Е. С. Проблема удержания больших масс жидкого металла автоматически управляемым магнитным полем // Магнитная гидродинамика.—1973.—№ 2.—С. 105—110.
8. Дорошук В. Е. Кризисы теплообмена при кипении воды в трубах. — М.: Энергоиздат, 1983.—119 с.
9. Кирко И. М., Микельсон А. Э. Об устойчивости свободного парения жидкого металла в переменном магнитном поле // Вопросы магнитной гидродинамики и динамики плазмы.—1962.—Вып. 2.—С. 597—604.
10. Космическое материаловедение / Под ред. Б. Фюрбахера. — М.: Мир, 1989.—478 с.
11. Кривонос Ю. Г., Паславский Е. С., Ткаченко В. А. Анализ области параметров устойчивого удержания жидких проводников магнитным полем // Управление объектами с распределенными параметрами. — Киев: Ин-т кибернетики АН УССР, 1987.—С. 47—52.
12. Ладиков Ю. П. Стабилизация процессов в сплошных средах. — М.: Наука, 1978.—432 с.
13. Ладиков Ю. П., Ткаченко В. Ф. Гидродинамические неустойчивости в металлургических процессах. — М.: Наука, 1983.—248 с.
14. Паславский Е. С. Стабилизация и удержание жидких металлов магнитным полем // Распределенное управление процессами в сплошных средах. — Киев: ИК АН Украины, 1969.—С. 43—57.
15. Паславский Е. С., Кривонос Ю. Г., Самойленко Ю. И. и др. Способ бесконтактного удержания жидких проводников

// Патент № 1700774 на изобретение, зарегистрированный 13.10.93 г. в Роспатенте.

16. Паславский Е. С., Самойленко Ю. И. Применение распределенной системы автоматического регулирования для стабилизации плазменных объектов // ЖТФ.—1967.—37, № 5.—С. 983—985.
17. Паславский Е. С., Ткаченко В. А., Гуляницкий Э. И. и др. Устройство для бесконтактной плавки и очистки электропроводных материалов во взвешенном состоянии // А. с. № 1764189 А1 (SV). — Оpubл. в Б. И.—1992.—№ 35.
18. Фогель А. А. Индукционные методы удержания жидких металлов во взвешенном состоянии. — Л.: Машиностроение, 1979.—104 с.
19. Фогель А. А., Найденов А. Ф., Сидорова Т. А. Трудности, возникающие при увеличении веса расплавляемого металла, удерживаемого во взвешенном в электромагнитном поле состоянии // Промышленное применение токов высокой чистоты. — Л.: Машиностроение, 1964.—Вып. 5.—С. 249—290.
20. Okress E. C., Wroughton D. M., Comenetz G., et al.

Electromagnetic levitation of solid and molten metals // J. Appl. Phys.—1952.—23.—P. 545—552, 1413.

---

#### CONTROLLED LEVITATORS FOR SPACE TECHNOLOGIES

E. S. Paslavsky

We analyze the possibilities of using existing contactless, spatially distributed force effects on a working body (processed samples of materials) with the aim to equilibrate microgravitation. The electromagnetic induction force effect is shown to be the most promising in the levitators intended for special metallurgy. It is capable to provide in the most simple way the necessary functions of contactless containment, automatic control, and stabilization of the working body (sample). The parameters and working regimes of spaceborne levitators were approximately calculated. The main computed parameters of spaceborne levitators are compared to the actual parameters of ground-based levitators.