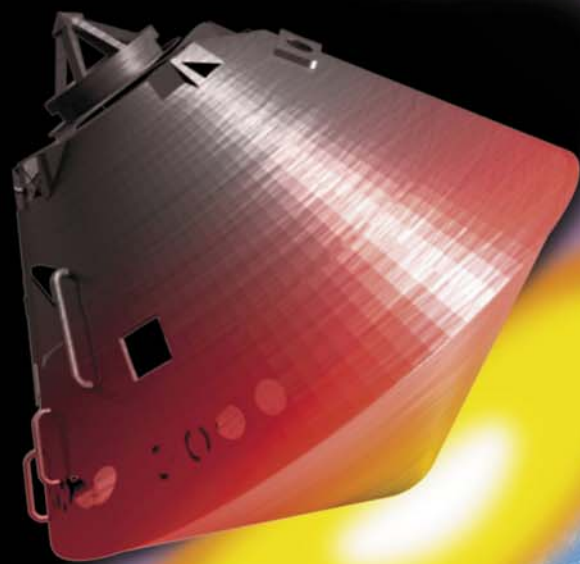


ВИРТУАЛЬНЫЙ ПАРАШЮТ:

от фантастики
к реальности



Возвращающиеся на Землю космические аппараты при входе в атмосферу испытывают колоссальные тепловые нагрузки. Решением этой проблемы может служить торможение корабля при помощи так называемого магнитогидродинамического парашюта, идея которого была теоретически обоснована московскими физиками. Их новосибирские коллеги провели серию экспериментов, результаты которых наглядно продемонстрировали, как этот виртуальный парашют раскрывается в воздушном потоке под действием электромагнитных сил, что приводит к эффективному снижению скорости

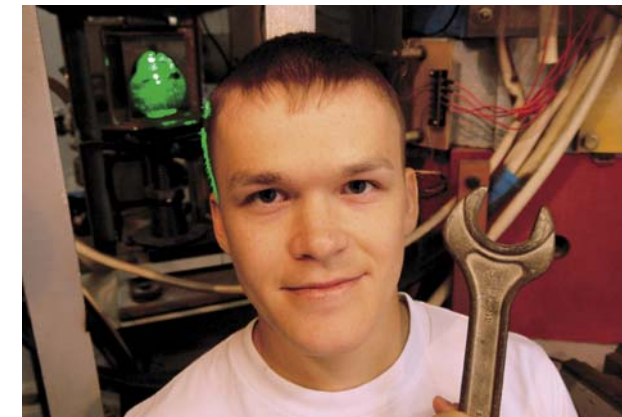
Вот уже более полувека прошло с тех пор, как человек впервые покорил космос. Работа людей на орбите уже никого не удивляет. Времена, когда чуть ли не каждый ребенок мечтал стать космонавтом, прошли. Теперь многим из нас околоземные полеты представляются хорошо отлаженным процессом, а после просмотра зрелищных фантастических фильмов – так и вообще обыденным делом. В действительности осуществление космических полетов и сегодня связано с решением сложнейших инженерных и научных задач. Это касается не только вывода корабля на орбиту, но и доставки экипажа и оборудования обратно на Землю.

Одна из главных опасностей состоит в том, что спускаемый аппарат испытывает колоссальные тепловые нагрузки при входе в плотные слои атмосферы. В разреженном воздухе аппарат не успевает достаточно затормозиться, поэтому входит в плотную атмосферу на огромной скорости – несколько тысяч километров в час. Перед аппаратом происходит сильное сжатие воздуха, сопровождающееся его разогревом до нескольких тысяч градусов за ударной волной – границей резкого скачка плотности газа. Чтобы противостоять возникающим при этом тепловым потокам, посадочный модуль окружают толстыми слоями термической защиты из высокотехнологичных термостойких материалов. По мере снижения скорости аппарата до безопасной эта защита сгорает.

Проблемы торможения летательных аппаратов в разреженной атмосфере волновали инженеров, конструкторов и исследователей со времен создания первых космических кораблей (Петров, 1960). Большинство из предложенных способов снижения скорости основано на увеличении площади поперечного сечения аппарата – это приводит к росту его лобового сопротивления. Но при низких плотностях воздуха механические способы торможения оказываются малоэффективными. Одно из перспективных решений задачи торможения корабля в атмосфере связано с магнитной газодинамикой гиперзвуковых течений.

Ключевые слова: управление потоком, магнитогидродинамика, гиперзвуковой поток воздуха, МГД-парашют.

Key words: flow control, magnetohydrodynamics, hypersonic air flow, MHD-parachute



ЯДРЕНКИН Михаил Андреевич – аспирант Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (Новосибирск). Автор и соавтор около 20 научных публикаций

Магнит удерживает плазму...

Исследователи из Объединенного института высоких температур РАН (Москва) предложили способ бесконтактного увеличения лобового сопротивления летательного аппарата с помощью магнитогазодинамического (МГД) воздействия на плазму вокруг корабля (Bityrin *et al.*, 2005). Плазма образуется по причине термической ионизации газа, поскольку набегающий с гиперзвуковой скоростью на аппарат воздух за ударной волной сильно уплотняется, что приводит к его разогреву до высоких температур.



Сильное сжатие воздуха за ударной волной от летящего с космической скоростью корабля приводит к мощному разогреву и термической ионизации окружающего аппарата газа

В отличие от обычного воздуха плазма обладает электропроводностью. А, как известно, в любой проводящей среде, движущейся сквозь магнитное поле, возникает наведенный электрический ток – это явление электромагнитной индукции. При этом на проводник с индуцированным таким образом током будет действовать сила, противоположная направлению движения проводника. Следовательно, эта сила будет противодействовать потоку плазмы, замедляя его.

Если таким способом затормозить плазму у поверхности летательного аппарата, то из нее сформируется виртуальное тело, движущееся с ним как единое целое. При этом должен увеличиться коэффициент лобового сопротивления корабля даже в разреженном воздухе, так что по достижении спускаемым аппаратом более плотных слоев атмосферы скорость уже будет снижена до уровня, обеспечивающего приемлемые тепловые нагрузки.

Примечательно, что концепция МГД-парашюта подразумевает полное отсутствие механических элементов, выдвигающихся в набегающий поток. В экономичном объеме (например, над и под крылом) можно расположить устройства, создающие магнитное поле.

Чтобы количественно оценить полезный эффект, производимый МГД-парашютом, авторы идеи рассмотрели простую модель тормозящегося тела – в виде пластины с округлыми краями. Математическое моделирование поведения частиц ионизированного газа в потоке воздуха показало, что в сильном магнитном поле форма

ударной волны значительно изменяется (косой скачок уплотнения трансформируется в отошедший прямой). Это происходит из-за того, что газ обтекает всю область МГД-взаимодействия, представляющую собой виртуальный затупленный объект много большего размера, чем реальное физическое тело. Интересно отметить, что в достаточно сильных полях ни форма тела, ни угол атаки (угол между направлением потока и продольной осью тела) не играют особой роли, т. е. эффективность торможения определяется только объемом зоны МГД-взаимодействия, которая в этом случае полностью охватывает тело.

**ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ:
ПРАВИЛА ПРАВОЙ И ЛЕВОЙ РУКИ**

На проводник с электрическим током в магнитном поле действует поперечная сила, направление которой указывает большой палец правой руки.

Когда проводник движется поперечно в магнитном поле, то в проводнике наводится электрический ток, направление которого определяет указательный палец левой руки.

Эти явления используются для преобразования электрической энергии в механическую (в электродвигателях) и обратно (в электрогенераторах)

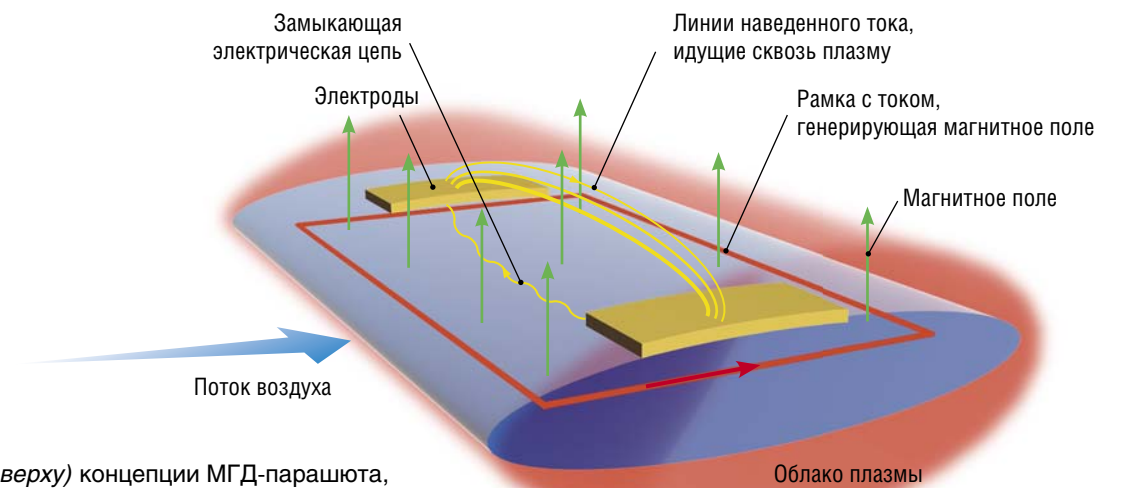
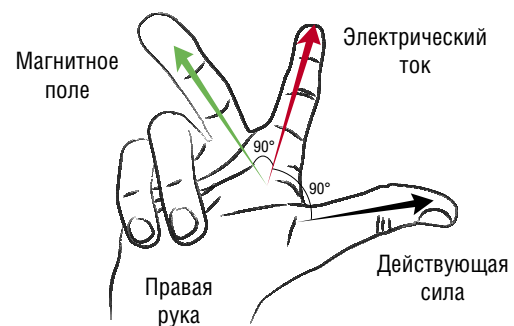
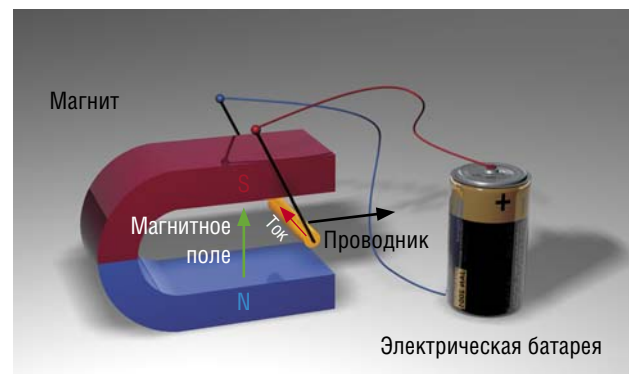
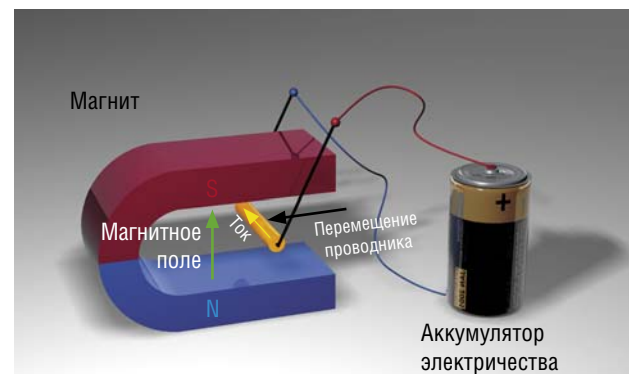
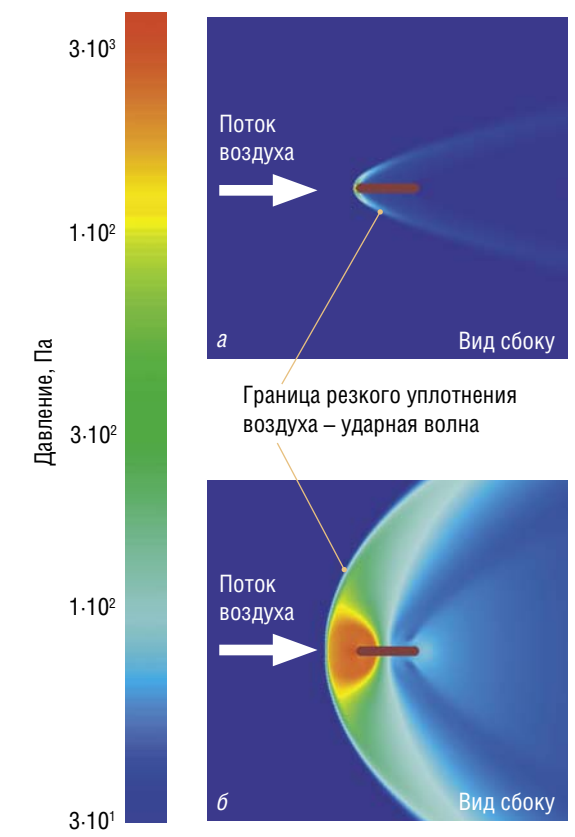


Схема (вверху) концепции МГД-парашюта, предложенной в Объединенном институте высоких температур РАН (Москва): поток плазмы (ионизованного воздуха) в сильном магнитном поле, специально генерируемом вокруг летящего тела, индуцирует поперечный электрический ток в плазме, который замыкается в электрической цепи между двумя выходящими на поверхность аппарата электродами. В этой области набегающему потоку плазмы противодействует электромагнитная сила, которая тормозит его, а при большой мощности поля даже удерживает возле модели. Математическое моделирование показало, что в отличие от обычного режима обтекания (а) при включении магнитного поля вокруг аппарата из плазмы формируется округлое виртуальное тело большого размера (б), движущееся неотрывно от аппарата и таким образом увеличивающее его сопротивление потоку воздуха подобно раскрытому парашюту. По: (Bityurin et al., 2005)



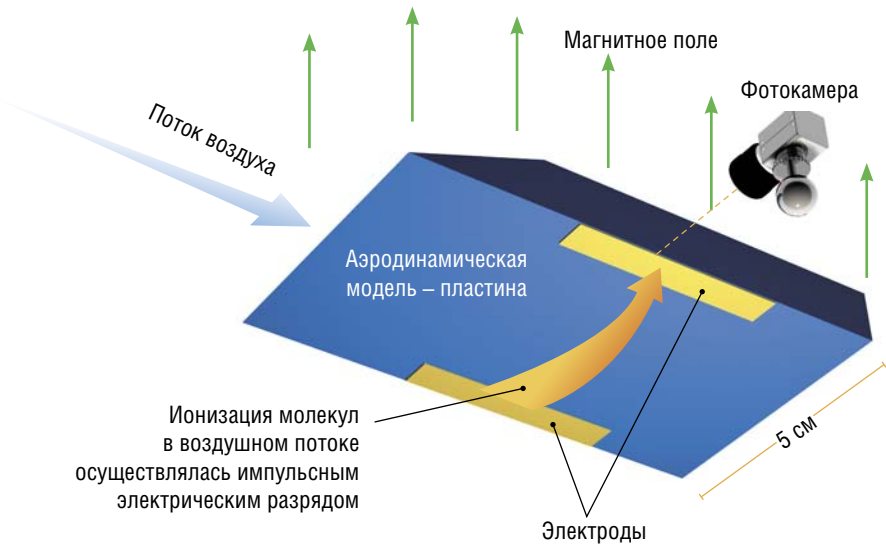
...и отталкивает ударную волну

На самом деле происходящие МГД-процессы в плазме намного сложнее, чем изложено выше, и далеко не все моменты взаимодействия полей и потоков понятны и легко объяснимы. Всегда есть сомнение – подтвердятся ли на практике результат математического моделирования? Это можно выяснить лишь экспериментальным путем. Однако натурный эксперимент в стратосфере потребует немалых затрат, поэтому сначала проводят наземный эксперимент, в котором имитируют атмосферные условия различными способами.

Такой эксперимент выполнили в лаборатории быстротекущих процессов Института теоретической и прикладной механики СО РАН (Fomichev et al., 2011). Для исследования различных способов МГД-управления гиперзвуковыми течениями в лаборатории 10 лет назад был создан специальный стенд на базе аэродинамической трубы импульсного действия. Экспериментальная установка позволяет создавать кратковременные гиперзвуковые потоки, скорость которых может достигать десятикратной скорости звука. Хотя время стационарного истечения газа из сопла не превышало миллисекунды, а продолжительность МГД-взаимодей-

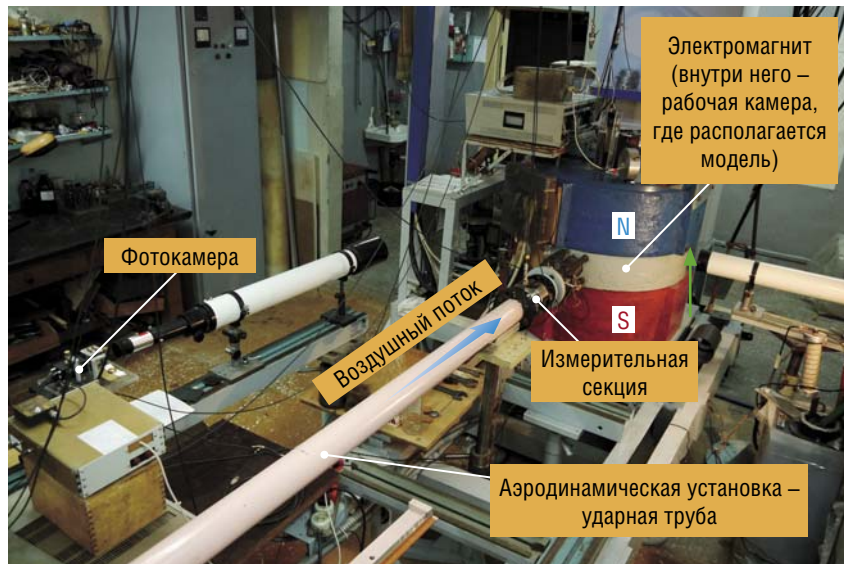
а – в отсутствие магнитного поля торможение в разреженном воздухе неэффективно
б – включено магнитное поле, МГД-парашют тормозит корабль

ствия была на порядок меньше, это не стало препятствием для получения точных результатов. Отлаженная система синхронизации фотокамер, измерительных устройств и систем электропитания стенда позволили организовать измерения параметров газа и получить фотографии в нужные моменты времени с точностью до миллионной доли секунды.



В эксперименте по проверке эффективности МГД-торможения модель обтекаемого тела размещалась внутри аэродинамического стенда ИТПМ СО РАН. Стенд был создан на базе ударной трубы, позволяющей моделировать гиперзвуковые потоки воздуха, в 6–10 раз превышающие скорость звука (при этом параметры воздушного течения близки к полетным условиям на высоте 30–50 км над уровнем моря). Рабочая камера расположена внутри мощного электромагнита, который генерирует однородное поле, что существенно упрощает моделирование исследуемого эффекта. Воздух ионизировали высоковольтным электрическим разрядом. Фотографирование ударной волны в разреженном газе осуществлялось теневым методом с использованием адаптивного визуализирующего транспаранта*

* О способах визуализации течений разреженного газа читайте в статье: Голубев М. П. Увидеть невидимое // НАУКА из первых рук. 2010. № 6 (36). С. 36–45.

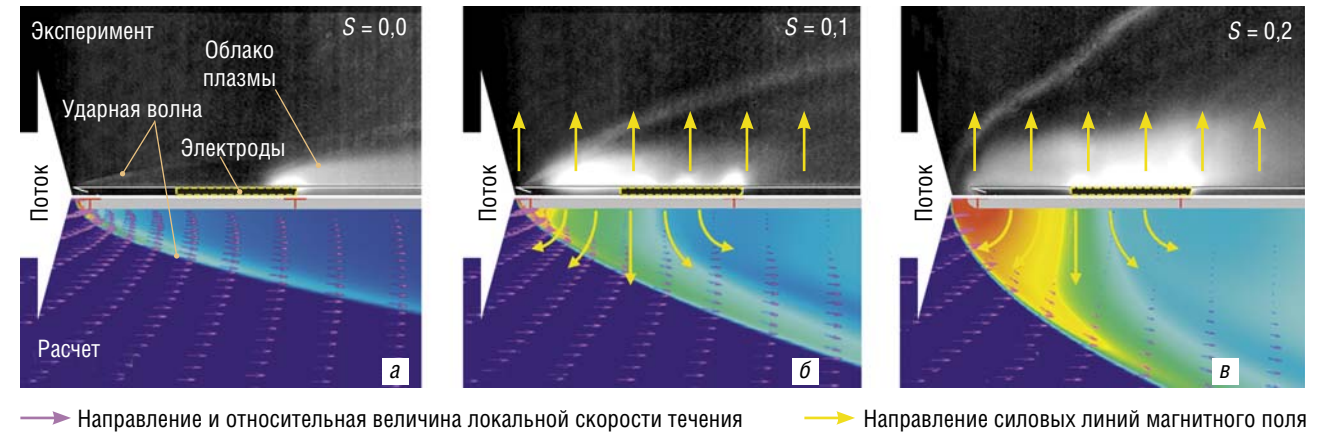


Результаты эксперимента оказались впечатляющими. Если при отсутствии магнитного поля светящееся плазменное облако мгновенно сносилось потоком назад, то в достаточно сильном магнитном поле происходило не только устойчивое горение разряда в области между электродами, но и последующее распространение плазмы против потока. Зона сжатого воздуха при этом действительно отодвигалась от аэродинамической модели, а граница этой зоны (ударная волна) из остроугольной становилась гладкой, как бы огибающей невидимый округлый предмет большого размера. Угол атаки при этом практически не оказывал влияния на процесс торможения, как и было предсказано на основании результатов математического моделирования.

Следует заметить, что свойства плазмы, получаемой в эксперименте в результате электрической ионизации воздуха, могли отличаться от свойств термически

ионизованного газа, заданных в расчетах. Также отличались от используемых в математической модели экспериментальные значения параметров воздушного потока и магнитного поля. Тем не менее в обоих случаях результаты электромагнитного влияния на обтекание тел качественно совпадают по изменениям формы ударных волн, наблюдаемым при увеличении мощности магнитного поля.

Единой основой для сравнения результатов различных масштабных моделей и экспериментов может являться безразмерный параметр гидромагнитного взаимодействия – критерий подобия Стюарта S , который определяет соотношение электромагнитных сил и скоростного напора набегающего потока воздуха. Так, сделанные по имеющимся данным оценки этого параметра для различных форм ударной волны показали, что по мере увеличения индукции магнитного



В ходе экспериментов было установлено, что без магнитного поля светящаяся область разряда (плазма) сдувается потоком назад (а). Однако включение магнитного поля влечет за собой сначала фиксацию плазмы вблизи электродов (б), а затем ее смещение к передней кромке модели (в). Граница резкого уплотнения воздуха при этом трансформируется и отодвигается от тела (а—в). Картина экспериментально наблюдаемых изменений по существу совпадает с результатами численного моделирования – это тем более удивительно, если принять во внимание то, что они были проведены для различных по размеру объектов, при разных значениях параметров воздушного потока, пространственной конфигурации и величины индукции магнитного поля. Предположительно, соответствие наблюдается при совпадении значений параметра Стюарта S

поля значение параметра S сначала возрастало (примерно до 0,3), затем падало. Оптимальные условия МГД-взаимодействия, судя по результатам обоих исследований, соответствовали значениям S около 0,25. При этом величина магнитной индукции в условиях эксперимента была на уровне 1–2 Тл. Хотя это на пять порядков больше, чем индукция магнитного поля Земли, такие поля вполне реализуемы при использовании современных магнитов.

Эффективность МГД-влияния электромагнитных полей на воздушный поток определяется безразмерным параметром гидромагнитного взаимодействия (называемого также критерием подобия Стюарта). Этот параметр определяет соотношение действующих электромагнитных сил и скоростного напора газового потока: $S = L\sigma B^2 / \rho v$, где L – характерный размер, σ – удельная электропроводность плазмы, B – величина магнитной индукции, ρ – плотность набегающего потока, v – его скорость

Безусловно, создание мощной магнитной системы на борту космического корабля – задача непростая. Требуются эффективные сверхпроводящие электромагниты или синтетические постоянные магниты, мощные запасы энергии и, следовательно, легкие и энергоемкие генераторы тока и высокотехнологичные устройства накопления электричества. Магнитная гидродинамика находится на стыке наук, и ее идеи зачастую обгоняют темпы технического прогресса, от которого зависит успех реализации предмета этой статьи.

Как бы то ни было, результаты экспериментальных и численных исследований убедительно продемонстрировали перспективность концепции МГД-парашюта. Это обстоятельство позволяет делать оптимистические прогнозы на будущее и возлагать дерзкие надежды на то, что аэродинамикой гиперзвуковых летательных аппаратов вскоре можно будет управлять – если и не силой мысли, то хотя бы силой гидромагнитного взаимодействия.

Литература
Петров Г. Из космоса – на Землю // Техника – молодежи. 1960. № 8. С. 14–15.
Шерклиф Д. Курс магнитной гидродинамики. М.: Мир, 1967.
Bityurin V.A., Bocharov A.N., Lineberry J. Study of MHD Interaction in Hypersonic Flows // 15th Int. Conf. On MHD Energy Conversion, Moscow. 2005. Vol. 2. P. 399–416.
Fomichev V.P., Yadrenkin M.A., et al. Experimental Study of the MHD-Parachute Phenomena in a Hypersonic Air Flow // AIAA Hawaii Summer Conf., Honolulu. 2011. 76-PDL-6/ICMHD-05.

Автор благодарит д. ф.-м. н. В. А. Битюрину и д. ф.-м. н. А. Н. Бочарова (ОИВТ РАН, Москва) за предоставленные материалы, а также своего научного руководителя д. ф.-м. н. В. П. Фомичева (ИТПМ СО РАН) за помощь в подготовке публикации. Работа выполнена при поддержке РАН (проект № 22-14) и РФФИ (грант № 10-08-00598-а)