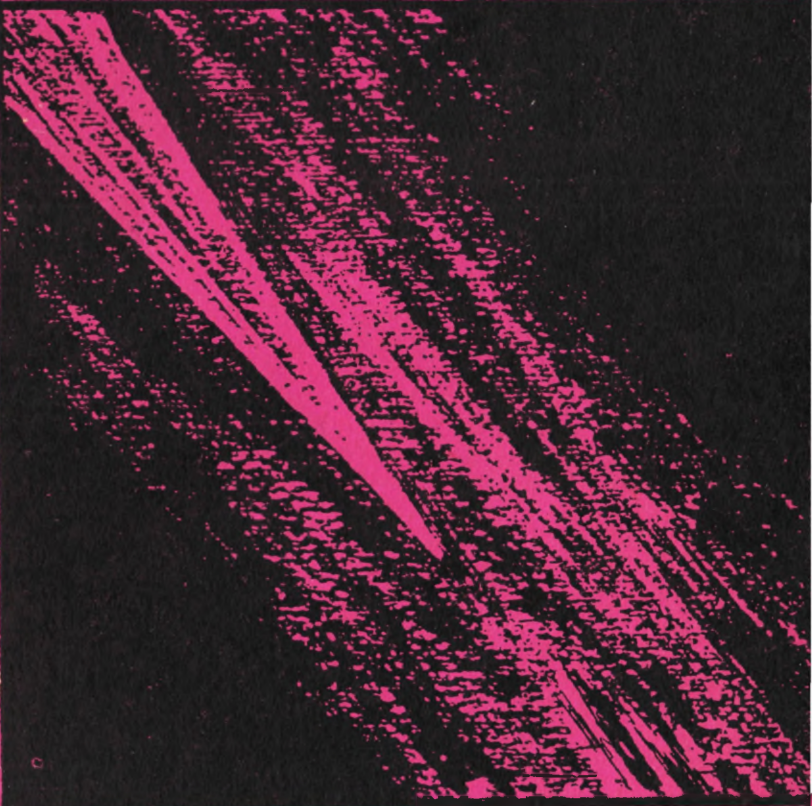


Г.И. ПОКРОВСКИЙ

ФИЗИКА КОСМИЧЕСКИХ СКОРОСТЕЙ



8

IX СЕРИЯ • ФИЗИКА И ХИМИЯ • 1962

Профессор
Г И ПОКРОВСКИЙ

ФИЗИКА КОСМИЧЕСКИХ СКОРОСТЕЙ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»
Всесоюзного общества по распространению
политических и научных знаний
Москва 1962

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Высокие скорости в природе и технике	3
Движущееся тело и среда	6
Дозвуковое движение в плотной среде	7
Сверхзвуковое и гиперзвуковое движение	9
Баллистические волны сверхзвуковых самолётов и других летящих объектов	11
Детонация удлиненного заряда — пример гиперзвукового движения	14
Взрывающийся воздух	15
Температура торможения	16
Что такое абляция	19
Электрические и электромагнитные явления при абляции	20
Зависимость абляции от скорости	23
Действие набегающего потока воздуха на больших высотах	24
Опыты с баллистическими маятниками	25
Сопротивление среды при гиперзвуковых скоростях	27
Авторотация	29
Самоускоряющиеся метеоры, или метеоры ракеты	30
Радиовосход и «радиозаря» искусственных спутников	31

Автор
Георгий Иосифович Покровский

Редактор И. Б. Файнбойм
Техн редактор И. Т. Ракитин
Корректор Н. Н. Огородникова

Обложка художника А. Г. Ординарцева

Сдано в набор 16 I 1962 г. Подписано к печати 15 V 1962 г. Изд № 40.
Формат бумаги 60×92¹/₁₆ Бум л. 1,0. Печ л. 2,0. Уч.-изд л 1,91.
А 06220 Цена 6 коп Тираж 39 000 экз Заказ 183

Издательство «Знание» Москва, Центр, Новая пл., д 3/4

Типография изд ва «Знание» Москва Центр, Новая пл., д 3/4.

ВЫСОКИЕ СКОРОСТИ В ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ

Древнеримские колесницы, средневековые кареты, рессорные коляски, русские лихачи и английские кэбы—весь этот пестрый транспорт, движимый мускульной силой лошадей, с веками становился быстрее, вызывая восхищение своей «головокружительной скоростью»

Но читатели, живущие в середине XX века, только улыбнутся при мысли о скорости, скажем, карет или колясок. В самом деле, рекордом для гужевого транспорта начала нашего века можно было считать 20—25 км/час. Эти скорости гораздо ниже скоростей транспорта, движущегося по тесным улицам современных городов

А что же сказать о воздушном транспорте. Уже сейчас требовательные пассажиры летающих лайнеров не довольны скоростями реактивной пассажирской авиации, достигающими 600—800 км/час.

Развитие скоростного воздушного транспорта, несмотря на достигнутые уже громадные успехи, только начинается. И нам пока еще трудно представить себе, как практически будут использованы возможности науки для достижения сверхвысоких скоростей передвижения человека. Решением этой важной задачи завтрашнего дня усиленно занимаются физики и конструкторы

* *
*

Двадцатый век — век невиданного роста скоростей движения. Особенно ярко выражен этот рост в воздушном транспорте, а в самое последнее время — в транспорте космическом.

В отличие от людей прежних веков мы живем в период стремительного скачка в развитии техники, когда коренным образом меняются взаимоотношения человека и окружающей природы

Быстро растут скорости движения и коренным образом меняются способы движения.

В прежние века человек перемещался, опираясь на землю или воду и таким образом преодолевая силу тяжести. Характерным способом движения в XX веке стал полет, при котором сила тяжести преодолевается подъемной силой воздуха. В XX веке наметились также прочные основы космических полетов, когда действие силы тяжести преодолевается за счет огромного запаса кинетической энергии (энергии движения).

Стремительный прогресс в повышении скоростей движения транспорта виден из табл. 1, в которой приведены данные за четыре века (скорости указаны в километрах).

Таблица 1

Вид транспорта \ Век	XVII	XVIII	XIX	XX
Почтовые лошади	4—4,5	5—6,5	до 16	75—150
Железная дорога	—	—	15—75	150—500
Самолеты поршневые	—	—	—	600—800
Самолеты турбовинтовые	—	—	—	750—1000
Самолеты реактивные	—	—	—	28500
Космические корабли	—	—	—	14000—62000
Межпланетные корабли (теоретические данные)	—	—	—	

Наглядное представление об этом прогрессе дает и рис. 1.

По мере того, как человек овладевал скоростным транспортом, он старался глубже изучить различные виды движения с большими скоростями, происходящего в природе. Ученые стали внимательно наблюдать движение метеоров, влетающих в атмосферу Земли из космического пространства со скоростями 10—50 км/сек.

В экспериментальной физике были созданы модели такого движения. Например, используя специальные пушки (предназначенные не для военных, а для научных целей), исследователи получили скорости 3—5 км/сек (11 000—18 000 км/час). При помощи специальных зарядов взрывчатого вещества, обладающих направленным действием и называемых кумулятивными, удалось достигнуть даже скоростей 5—10 км/сек (18 000—36 000 км/час).

Это очень большие скорости, превосходящие скорости метеоритов и космических кораблей. Однако их оказалось возможным сообщать только телам весьма небольшого веса. Поэтому опыты со сверхвысокими скоростями не открывают каких-либо новых путей для осуществления полетов человека или сложных приборов. Тем не менее они полезны потому, что помогают вскрывать физическую сущность явлений, изучение которых очень важно для практики, в частности при разработке проблем космических полетов.

Весьма существенными следует считать явления, которые возникают при взаимодействии движущегося с большими скоростями тела с окружающей его средой, т. е. с воздухом. В частности, они имеют место при полетах самолетов, при запуске и особенно при возвращении космических кораблей из космического пространства.

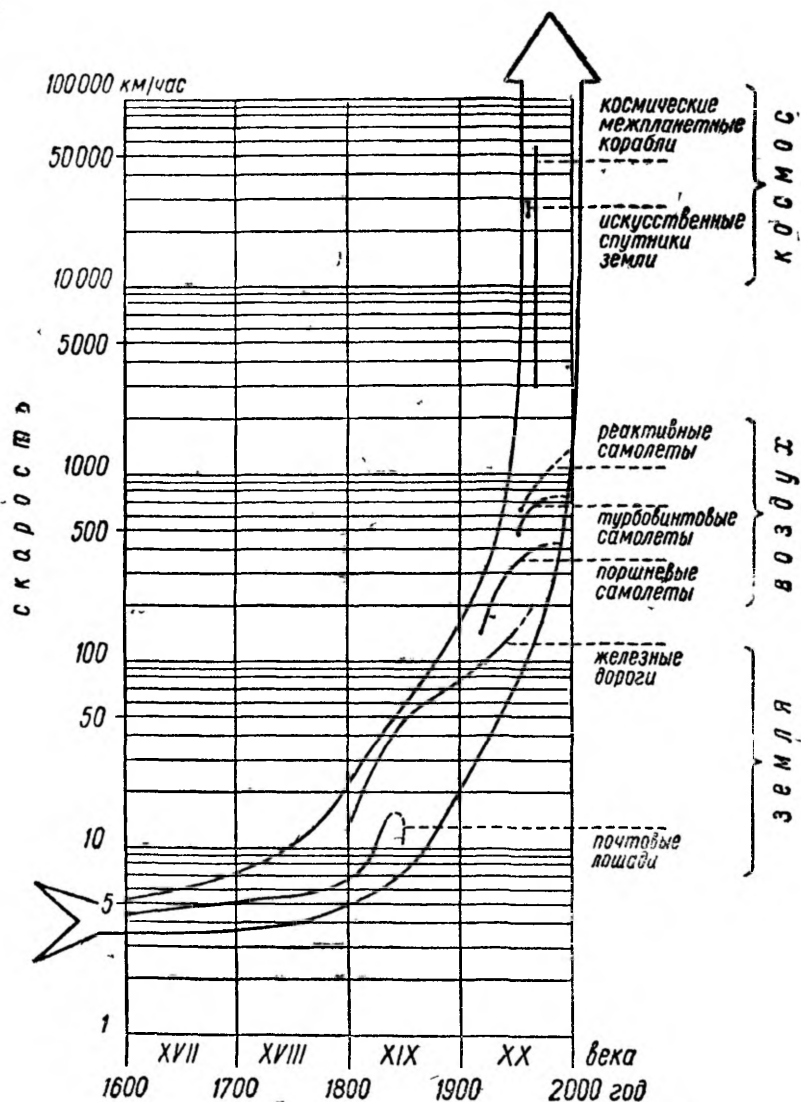


Рис. 1 Рост скоростей транспорта за четыре столетия

ДВИЖУЩЕЕСЯ ТЕЛО И СРЕДА

Всякая среда — воздух, вода, земля и т. д. — состоит из мельчайших частиц, молекул. Молекулы расположены на некоторых расстояниях друг от друга. Эти расстояния сравнительно велики в газе и существенно меньше в жидкостях и твердых телах. Молекулы находятся в состоянии непрерывного беспорядочного движения. Чем больше скорость частиц, тем значительнее эта энергия и тем выше температура.

Молекула любой среды должна в среднем пройти определенное расстояние, прежде чем она встретит на своем пути другую молекулу. При встрече происходит соударение молекул, и они отскакивают друг от друга, как упругие бильiardные шары. Поэтому при соударениях молекулы в совокупности не теряют энергии.

Таким образом движение молекул никогда не затухает.

У каждого вещества при определенной плотности существует определенная средняя длина пробега молекулы между двумя соударениями, называемая длиной свободного пробега. Для воздуха при нормальном давлении (1 атм) и температуре 0° длина свободного пробега очень невелика — она равна приблизительно 0,000001 см. По мере подъема над поверхностью Земли плотность воздуха уменьшается.

В первом приближении можно считать, что плотность воздуха падает приблизительно вдвое при подъеме на каждые 5 км. Эта закономерность несколько нарушается в пределах десятков километров подъема, потому что при увеличении высоты быстро снижается температура воздуха. Однако эти детали существенного значения не имеют.

Плотность воздуха на высоте 50 км в 1000 раз меньше, чем у поверхности Земли. На высоте 100 км плотность снижается в миллион раз по сравнению с плотностью обычного окружающего нас воздуха.

Длина свободного пробега тем больше, чем меньше плотность. Поэтому на высоте 50 км длина свободного пробега равна одной 0,01 см, на высоте 100 км она составляет уже 10 см и на высоте 150 км достигает 100 м.

Известно, что искусственные спутники Земли, космические корабли, а также метеориты и метеоры начинают заметно взаимодействовать с окружающим воздухом и тормозиться под действием его сопротивления, начиная с высоты примерно 150 км. Следовательно, такое взаимодействие происходит уже тогда, когда среда имеет очень малую плотность и длина пробега частицы в ней значительно превосходит обычные размеры движущихся тел.

В некоторых случаях быстрое движение осуществляется и вблизи Земли в относительно плотном воздухе. При этом

свободный пробег молекул столь мал по сравнению с обычными размерами движущихся тел, что среда может считаться сплошной однородной массой.

Взаимодействие движущегося тела с сильно разреженной средой происходит в результате отдельных независимых ударов молекул. Наоборот, в плотной среде отдельные удары сливаются вместе, отдельные молекулы теряют всякую самостоятельность и действуют как единая сплошная масса.

Таким образом, существуют два основных вида взаимодействия тел со средой: взаимодействие с отдельными молекулами; взаимодействие со сплошной средой.

Условной границей между этими видами взаимодействия можно считать такую плотность среды, когда длина свободного пробега равна диаметру движущегося тела. Если для примера взять тело с диаметром равным 1 м, то эта граница будет в атмосфере находиться на высоте около 116 км. Для тела с диаметром равным 10 м эта высота увеличится до 133 км, а для тела диаметром в 1 см снизится до 83 км.

На рис. 2 приведены длины свободного пробега молекул воздуха на различных высотах.

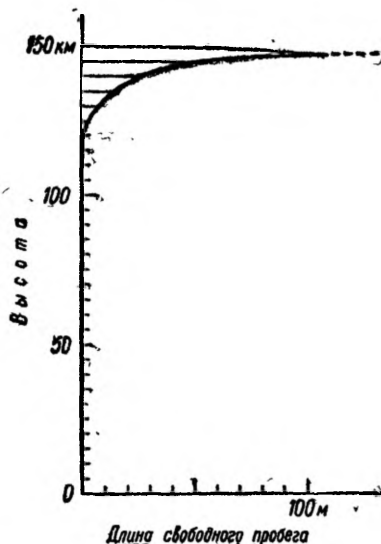


Рис. 2. Зависимость длины свободного пробега молекул воздуха от высоты над поверхностью Земли.

ДОЗВУКОВОЕ ДВИЖЕНИЕ В ПЛОТНОЙ СРЕДЕ

И так, будем условно называть плотной средой такую, в которой длина свободного пробега молекул существенно меньше размеров движущегося тела. В такой среде характер движения тела во многом зависит от того, больше или меньше его скорость по сравнению со скоростью звука.

Скоростью звука в среде называется скорость, с которой передаются в результате соударений молекул небольшие изменения давления и плотности. Эта скорость равна приблизительно 60% средней скорости движения молекул.

То, что скорость звука меньше скорости движения молекул, объясняется тем, что молекулы движутся беспорядочно и, как правило, направление движения отдельных молекул

не совпадает с направлением передачи возмущения в среде.

Если какое-либо тело движется в среде медленнее, чем звук, то возмущения среды, производимые телом, обгоняют это тело и вся среда испытывает некоторос смещение. Это смещение быстро уменьшается по мере увеличения расстояния. На расстоянии, в несколько раз превосходящем размеры тела, возмущения практически становятся незаметными.

Если двигаться вместе с телом и наблюдать поведение окружающей среды, то можно установить, что она обтекает тело плавными струями, причем в хвостовой части при достаточно больших размерах тела и достаточно большой скорости могут возникать беспорядочные вихри (рис. 3).

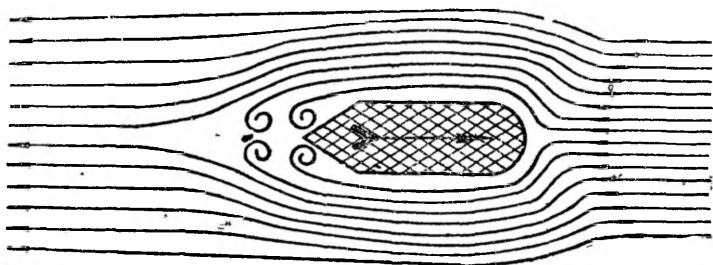


Рис 3 Схема обтекания тела при дозвуковой скорости движения.

При таких условиях сила сопротивления движению прямо пропорциональна плотности среды, квадрату скорости движения и площади поперечного сечения движущегося тела. Кроме того, сила сопротивления зависит от формы тела. Если очертания тела плавные и обтекающие это тело струи среды могут легко менять свое направление, то коэффициент сопротивления (т. е. число, определяющее величину сопротивления при скорости, плотности и поперечном сечении равным единице) оказывается весьма небольшим. Он составляет несколько сотых или десятых.

Если же форма движущегося тела имеет резкие углы, тупую головную, а особенно тупую хвостовую часть, то вихри возникают легко и значительная часть среды вовлекается в сложное вихревое движение, называемое турбулентным движением. На турбулентное движение затрачивается много энергии. Эта энергия получается за счет силы, необходимой для движения тела и равной силе сопротивления среды. Поэтому сила сопротивления возрастает.

Очевидно, для снижения силы сопротивления среды необходимо всемерно уменьшать возможность возникновения вихрей, поглощающих очень много энергии. Наука и техника па-
мегили в этом направлении много интересных возможностей.

В частности, такие возможности выявляют, наблюдая движения животных, живущих в воде. Среди них особый интерес представляет дельфин, способный развивать в воде весьма высокие скорости. Он движется гораздо быстрее, чем могла бы двигаться торпеда, имеющая форму дельфина и двигатель, равноценный по мощности мышцам дельфина.

Это необычайное явление объясняется тем, что дельфин оставляет за собой гораздо меньше вихрей в воде, чем «подобная» ему торпеда, а значит, тратит существенно меньше энергии на свое движение. Это обусловлено гибкостью тела дельфина, благодаря которой уменьшается образование вихрей при его движении в воде.

Итак, сопротивление тела зависит не только от его формы. Требуется нечто большее. Детальные исследования показали, что поверхность тела с минимальным сопротивлением не должна быть жесткой. Она должна упруго поддаваться в случае повышения давления воды и таким образом гасить возникающие вихри в самом начале их возникновения. Кроме того, поверхность должна быть покрыта тонким слоем вещества, имеющего минимальное трение при движении вдоль него воды.

Использование этих закономерностей в настоящее время облегчается потому, что в качестве обшивки тел, движущихся с большими дозвуковыми скоростями в воде и воздухе, можно применять синтетические пластмассы, в частности синтетические микропористые вещества.

Описанные явления характерны для дозвукового движения, т. е. для таких условий, когда скорость движения меньше скорости звука, равной для воздуха около 340 м/сек, или 1220 км/час (и для воды — около 1500 м/сек — 5400 км/час).

СВЕРХЗВУКОВОЕ И ГИПЕРЗВУКОВОЕ ДВИЖЕНИЕ

Если скорость движения заметно превышает скорость звука, то такое движение называют сверхзвуковым движением. Если скорость движения на порядок величины, т. е. примерно в 10 раз и более, превосходит скорость звука, то движение обычно называют гиперзвуковым. Многие современные самолеты летают с сверхзвуковыми скоростями. Скорость артиллерийских снарядов еще во времена Ивана Грозного далеко превосходила скорость звука. Однако только космические ракеты, метеоры, а также струи металла, выбрасываемые специальными (кумулятивными) зарядами взрывчатых веществ, достигают гиперзвуковых скоростей.

Что касается общей картины движения среды, обтекающей со сверхзвуковой или гиперзвуковой скоростями движущееся тело, то она в обоих случаях имеет много сходных черт.

Прежде всего существенно то, что возмущения, вызывае-

мые в среде телом, не могут обогнать на заметное расстояние это тело.

Чтобы наглядно представить себе картину возмущения среды вокруг движущегося тела при сверхзвуковом или гиперзвуковом движении, следует обратиться к аналогии, на которую впервые обратил внимание Н. Е. Жуковский. Эта аналогия

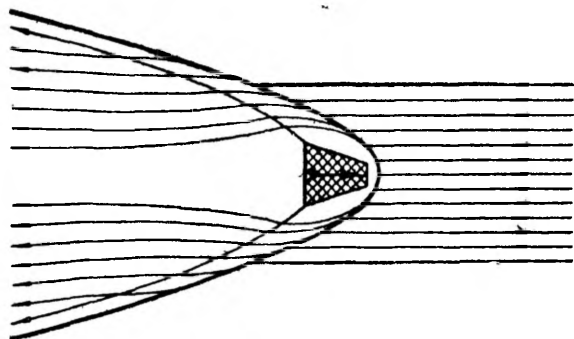


Рис 4 Схема обтекания тела при сверхзвуковом движении.

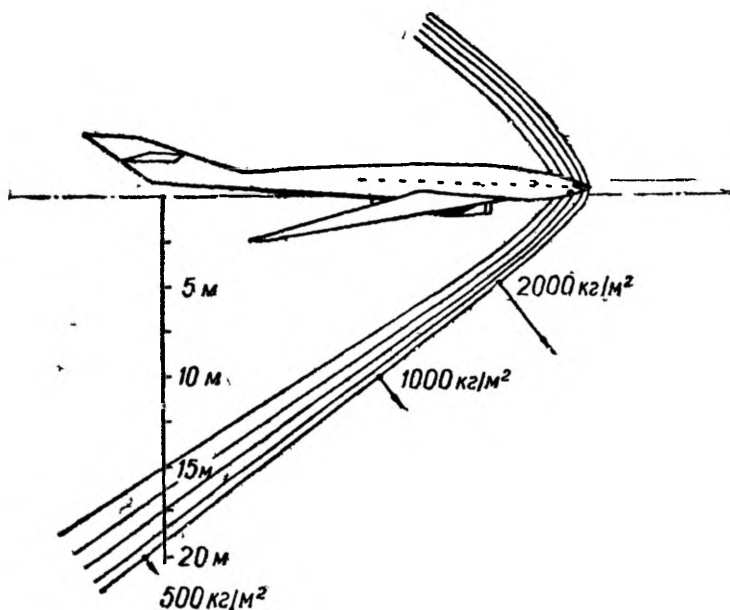


Рис 5 Давления, производимые баллистической волной самолета при силе тяги двигателей равной 10 т и скорости около 2000 км/час.

основана на том, что волны на поверхности воды распространяются сравнительно медленно. Если высота волн незначительна, то скорость их распространения не превышает нескольких метров в секунду. Поэтому не только любая моторная лодка, но даже лодка с гребцами легко может обогнать такие волны на поверхности воды, т. е. достигнуть «сверхволновой» скорости. При этом волны не могут обгонять лодку и расходятся клинообразно от ее форштевня по поверхности воды.

Нечто похожее наблюдается и при сверхзвуковом движении. К головной части движущегося тела прижимается тонкий слой сжатого и нагретого воздуха, который растекается во все стороны конической пеленой, резко ограниченной спереди «скачком уплотнения», т. е. поверхностью, на которой резко повышаются давление, плотность и температура воздуха. Эта коническая пелена впервые была обнаружена и изучена при полете артиллерийских снарядов (рис. 4). Ее часто называют баллистической волной.

Вопрос о баллистической волне, оставляемой за собой самолетом, летящим с сверхзвуковой скоростью, очень важен. В этом случае значительная часть энергии двигателей самолета переходит в баллистическую волну, и та становится очень мощной (рис. 5).

Рассмотрим этот вопрос подробнее.

БАЛЛИСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ СВЕРХЗВУКОВЫХ САМОЛЕТОВ И ДРУГИХ ЛЕТАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ

Мы слышим звук, вызываемый самолетом, движущимся с дозвуковой скоростью, задолго до того, как самолет пройдет над нами. После этого мы также еще долго слышим звук убывающей силы. Если же в пределах слышимости пронесется сверхзвуковой самолет, то впечатление получается совершенно другое. Сначала мы видим совершенно беззвучный самолет. Он стремительно приближается, пронесется непосредственно над нами и начинает удаляться, а звука все еще не слышно. И только когда самолет уходит на некоторое расстояние, мы слышим вдруг сильный и мгновенный взрыв. Непытный человек может даже не сообразить, откуда возник этот звук и что этот взрывоподобный звук вызван именно тем самолетом, который только что пролетел над нами.

Между тем ясно, что именно так и должен восприниматься звук, создаваемый при звуковом или гиперзвуковом движении. В этом случае почти вся энергия, передаваемая воздуху летящим телом, сосредоточивается в конусе баллистической волны, которая доходит до человека на поверхности Земли позднее, чем пролетает самолет. Но она собирает в себе все волны, какие могли бы дойти до человека от самолета,

действуя на слух так, как если бы где-нибудь поблизости произошел взрыв

Можно даже без труда вычислить, какой именно заряд следовало бы взорвать, чтобы получить такой же звуковой эффект, какой производит скоростной самолет

Самолет движется вследствие наличия определенной силы тяги его двигателей Умножая эту силу тяги на пройденный путь, мы получаем работу, производимую двигателями на этом пути Если принять путь равным единице, то работа двигателей будет численно равна силе их тяги

Допустим, что сила тяги равна 10 т Это значит, что на каждом метре пути двигателя отдают воздуху энергию равную 10 000 кгм.

Известно, что один килограмм тротила выделяет при взрыве энергию равную примерно 400 000 кгм. Таким образом, если на 1 м длины распределить заряд такого взрывчатого вещества, как тротил, в количестве равном

$$\frac{10\,000}{400\,000} = \frac{1}{40} \text{ кг} = 25 \text{ г},$$

то при взрыве этого заряда он отдаст в окружающую среду такую же энергию, как и двигатели самолета

Для того чтобы воспроизвести баллистическую волну сверхзвукового самолета, пришлось бы взорвать заряд в виде очень длинного шнура, подвешенного в воздухе (хотя бы на аэростатах заграждения или вертолетах) вдоль всей траектории полета самолета Хотя заряд был бы небольшим по своему поперечному сечению, он был бы очень длинным и имел бы значительную энергию Взрыв его даже на значительном расстоянии давал бы очень заметный эффект (рис 6)

Приближенные простейшие расчеты показывают, что избыточное давление, производимое баллистической волной звукового или гиперзвукового самолета, выраженное в атмосферах, равно

$$P = \frac{\sqrt{F}}{100R},$$

где F — сила тяги двигателей в килограммах и R — расстояние от траектории самолета до той точки, где измеряется давление, в метрах

В частности, если сила тяги равна 10 т (10 000 кг), то давление будет равно

$$P = \frac{1}{R}.$$

Значит, на расстоянии 10 м от летящего самолета давление будет равно 0,1 атм. Это очень большое давление Оно соответствует нагрузке равной 1 т на каждый 1 м² поверхности. Такое давление производил бы тайфун исключительной силы.

имеющий скорость 400 км/час. Понятно, что при таком давлении разрушаются крыши зданий, не говоря уже о стеклах в окнах и различных непрочных деталях

На расстоянии от самолета равном 100 м давление было бы равно 0,01 атм. Это, казалось бы, совсем небольшая величина. Но при таком давлении получается дополнительная нагрузка равная 100 кг/м² поверхности. Это тоже очень много. Это давление мощного урагана, имеющего скорость более 100 км/час.

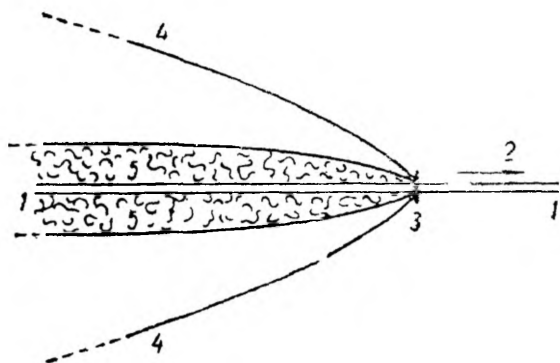


Рис 6 Возмущение воздуха при движении ракеты со скоростью около 8 км/сек в плотном воздухе может быть воспроизведено при помощи взрыва удлиненного заряда, диаметр которого примерно в десятки раз меньше диаметра ракеты. 1 — удлиненный заряд, 2 — направление распространения детонации, 3 — фронт волны детонации, 4 — баллистическая волна, 5 — облако взрывных газов, имеющее форму близкую к форме ракеты

Если рассмотреть в качестве примера полеты более мощных летательных аппаратов, то станет совершенно ясно, что баллистическая волна — это очень мощное явление природы.

Пусть имеется мощная современная космическая ракета, входящая в атмосферу со скоростью 12 км/сек. Эта скорость немного больше так называемой второй космической скорости, с которой тела падают на Землю из межпланетного пространства. При входе в атмосферу ракета будет отдавать свою энергию окружающей атмосфере. В таком случае при расчете давления баллистической волны следует взять вместо силы тяги двигателя силу аэродинамического сопротивления среды. Допустим, что ракета с поперечным сечением 10 м² и головной частью в форме полушара движется с первой космической скоростью вблизи Земли. В этих условиях аэродинамический расчет показывает, что сила сопротивления воздуха

составит 500 000 т. На расстоянии 10 м от такой ракеты давление в баллистической волне достигает 22 атм, что соответствует нагрузке в 220 т/м². Это гигантская величина!

Даже на расстоянии 10 км от ракеты нагрузка от баллистической волны будет равна 220 кг/м². Этого вполне достаточно, чтобы причинить заметные разрушения.

Все сказанное позволяет сделать вывод о том, что звуковые самолеты не должны пролетать на малых высотах над населенной местностью. Во всех странах мира имеются соответствующие правила и законы. При их нарушении низко летающий мощный сверхзвуковой самолет может стать источником больших неприятностей.

Очень крупные метеориты иногда проходят через атмосферу и приближаются к поверхности Земли, имея еще значительную скорость. Они также могут производить заметные разрушения действием своей баллистической волны. Нередко высказываются предположения о том, что знаменитый тунгусский метеорит, упавший в Сибири, возле реки Подкаменная Тунгуска, произвел большие разрушения леса именно своей баллистической волной. Однако более подробные исследования показали, что действие баллистической волны было перекрыто еще более мощным действием ударной волны, вызванной взрывом метеорита. Поэтому прямых следов действия баллистической волны заметить там, вероятно, нельзя. Этот вопрос мы рассмотрим дальше подробнее.

ДЕТОНАЦИЯ УДЛИНЕННОГО ЗАРЯДА — ПРИМЕР ГИПЕРЗВУКОВОГО ДВИЖЕНИЯ

В предыдущем разделе были рассмотрены некоторые особенности движения ракеты со скоростью около 12 км/сек. Однако известно, что такое движение не может длительно происходить в плотном атмосферном воздухе. Весьма трудно обеспечить движение любого тела вблизи Земли с такой скоростью — тело затормозится или горит, далеко еще не достигнув этой скорости.

Однако есть способ воспроизвести все физические явления в окружающем воздухе, возникающие при сверхзвуковом полете.

Повесим вдоль линии движения летящего тела удлиненный заряд из обычного взрывчатого вещества. Взорвем этот заряд с одного конца. Тогда вдоль заряда будет двигаться волна детонации. Волной детонации называется граница, разделяющая еще не взорвавшуюся часть заряда от бурно расширяющихся газообразных продуктов взрыва — взрывных газов. Эти газы, однако, постепенно уменьшают скорость своего движения и, наконец, останавливаются. Образуется цилиндрическое облако взрывных газов диаметром, примерно в несколько де-

сятков раз превосходящее диаметр только что взорванного заряда. Передняя часть облака по форме напоминает головную часть снаряда или ракеты. При движении волны детонации с весьма высокой скоростью (например, 8 км/сек) с такой же скоростью врезается в окружающий воздух газовое облако продуктов взрыва. Правда, это движение обусловлено не перемещением взрывных газов, а возникновением и расширением все новых и новых объемов этих газов.

Однако разница не является существенной. В обоих случаях возникают баллистические волны одинакового характера и одинаковой силы. Таким образом, оказывается возможным путем взрыва простого удлиненного заряда воспроизвести пока еще реально неосуществленное движение в атмосфере вблизи Земли с первой космической скоростью (7,9 км/сек).

ВЗРЫВАЮЩИЙСЯ ВОЗДУХ

Название этого раздела сразу же может вызвать сомнения. Как может воздух взрываться? Ведь всякий взрыв сопровождается выделением огромного количества энергии. А где же найти такие запасы энергии?

Чтобы ответить на вопрос, вспомним, что нередко полет самолета на значительной высоте сопровождается образованием туманного облачного следа. Этот след обладает такой яркостью и четкостью, что его можно видеть и тогда, когда вследствие большой высоты и дальности самолет, оставляющий след, не видим.

Такой след образуется тогда, когда самолет попадает в воздух, перенасыщенный водяными парами. Эти пары должны были бы уже превратиться частично в мельчайшие капельки воды и образовать непрозрачное белое облако. Однако этого не происходит, потому что на большой высоте вследствие чистоты воздуха нет так называемых центров конденсации, т. е. таких мельчайших пылинок, на которых начинают оседать молекулы воды и конденсироваться водяные капли.

Если через такой воздух пролетает самолет, то его двигатели выбрасывают отработанные газы, насыщенные мельчайшими твердыми частицами. Эти частицы и являются центрами конденсации избытка паров воды в белый туманный след самолета.

При конденсации воды выделяется энергия. Эта энергия довольно велика. Например, при конденсации 1 кг воды выделяется так много энергии, как если бы был взорван заряд тротила примерно в 600 г. Образование следа самолета может сопровождаться выделением энергии в 2—3 раза большей энергии двигателей. В соответствии с этим увеличится и энергия, отдаваемая баллистической волне. Ее давления возрастут в 1,5—2 раза.

Таким образом, самолет, выпускающий отработанные газы двигателей, является как бы детонатором, вызывающим своеобразный «конденсационный взрыв» воздуха, перенасыщенного водяным паром.

Это явление возможно и на дозвуковой скорости полета. Однако в этом случае выделяемая энергия более или менее равномерно распространяется во все стороны в атмосфере и остается практически незаметной.

Интересно отметить, что рассмотренные нами туманные следы самолетов аналогичны туманным следам, оставляемым в перенасыщенных парах быстролетающими атомными частицами. Это явление успешно используется в камере Вильсона. Камера Вильсона служит для исследования элементарных частиц. При движении в перенасыщенном паре частицы оставляют за собой следы в виде полосы тумана.

ТЕМПЕРАТУРА ТОРМОЖЕНИЯ

Представим себе, что мы расположились в особой прозрачной и неповреждаемой камере вблизи головной части тела, несущегося с гиперзвуковой скоростью в воздухе. Мы увидим, что набегающие струи воздуха резко тормозятся на скачке уплотнения, который движется вместе с телом, на некотором расстоянии впереди него. За этим скачком плотность воздуха резко возрастает и резко изменяется направление движения воздушных струй. Кроме того, существенно увеличивается температура воздуха.

Как известно, температура характеризует энергию беспорядочного движения молекул. Эта энергия пропорциональна квадрату средней скорости движения. Поэтому температура также пропорциональна квадрату этой скорости. Таким образом, если скорость молекул тела увеличивается в 4 раза, то температура его возрастает в 16 раз. Необходимо отметить, что при этом имеется в виду температура, отсчитываемая от абсолютного нуля, соответствующего состоянию покоя молекул и лежащего ниже нуля Цельсия на $273,2^{\circ}$.

Воздух, набегающий на скачок уплотнения и быстро тормозящийся при проходе через него, преобразует свое поступательное движение в беспорядочное движение своих молекул. Поэтому при торможении воздуха его температура соответственно возрастает. Величина, на которую увеличивается температура воздуха в таких условиях, называется температурой торможения.

Наиболее высокая температура получается на самой передней точке движущегося тела, около которой набегающие потоки воздуха разделяются на части, обтекающие тело с разных сторон. В этой точке происходит полное торможение набегающих на тело частиц воздуха, и вся энергия их движения за-

трачивается на нагревание. Повышение температуры при таких условиях оказывается равным

$$\Delta T = \left(\frac{v}{45} \right)^2,$$

где v — скорость движения, выраженная в $м/сек$. Величина $45 м/сек$ представляет собой скорость движения, необходимую для повышения температуры на 1° .

Из формулы вытекает, что температура торможения пропорциональна квадрату скорости движения. Это вполне понятно, потому что энергия движения также пропорциональна квадрату скорости, а температура пропорциональна энергии.

При скоростях, встречающихся в природе (метеоры) и достигнутых теперь в ракетной технике, величины максимальных температур торможения могут быть очень большими.

Рис. 7 показывает, что температура торможения может достигать огромных величин, которые с первого взгляда кажутся невероятными. Так, при первой космической скорости, необходимой для движения спутника Земли (на сравнительно небольшой высоте в сотни километров — приблизительно $8 км$ в секунду), температура торможения равна 31600° .

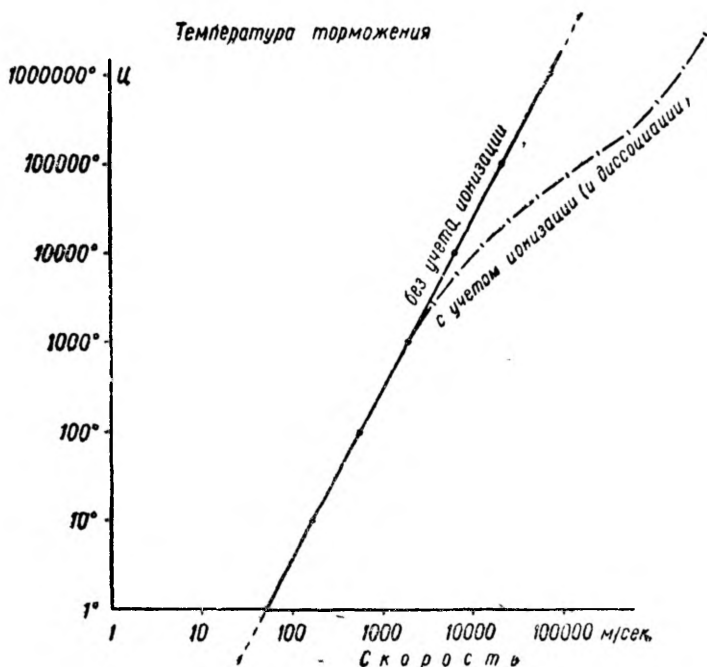


Рис. 7 Зависимость температуры торможения от скорости движения.

При второй космической скорости, необходимой для выхода движущегося тела за пределы тяготения Земли и равной приблизительно 11 км/сек, температура торможения достигает 60000°.

Столь высокие температуры существенно превосходят температуры, получаемые при сгорании наиболее калорийных видов топлива, при взрыве наиболее мощных химических взрывчатых веществ и даже превышают среднюю температуру поверхности Солнца. В земных условиях их можно получить только при помощи мощных электрических разрядов в миллионные доли секунды, если не говорить о ядерных взрывах.

Эти температуры торможения, характеризующие нагревание воздуха, обтекающего тело, возникают только в точке вблизи переднего участка тела (а не во всей массе воздуха). Во всех других местах температура воздуха ниже.

Обычно движение с очень высокими скоростями в воздухе непродолжительно. Если, например, происходит даже сравнительно слабое торможение, при котором тормозящая сила равна весу тела, то для снижения скорости от первой космической (8 км/сек) до нуля потребуется приблизительно 800 сек. (около 13 мин.).

За это время входящие в атмосферу тела, например возвращающиеся на землю космические корабли, метеоры нагреваются на сравнительно небольшую глубину. От поверхности движущегося тела, прогреваемой воздухом, теплота все время передается внутрь тела. Значительное количество энергии излучается также наружу. Роль этого излучения тем больше, чем выше температура.

Кроме того, при высоких температурах поверхностный слой нагреваемого тела плавится и частично испаряется. Капли расплавленного материала и его пары, несущие в себе очень много тепловой энергии, срываются напором обтекающего воздуха и уносят с собой эту энергию, не давая ей проникнуть внутрь среды.

Как правило, метеориты теряют в результате испарения, плавления и обгорания огромную часть своей первоначальной массы. Во многих случаях при этом происходят мощные взрывы. Наиболее известным и ярким примером бесспорно служит взрыв Тунгусского метеорита, упавшего в Сибири в 1908 году.

Плавлением, испарением и обгоранием тел, движущихся с большими скоростями, можно управлять в очень широких пределах и при необходимости сильно ослаблять их. Возможно, в некоторых случаях окажется необходимым не ослаблять, а, наоборот, существенно усиливать разогрев, происходящий при гиперзвуковом движении в воздухе. Усиление же разогрева может, например, привести к усилению торможения, о чем будет сказано дальше.

ЧТО ТАКОЕ АБЛЯЦИЯ

Испарение, плавление, сгорание и разрушение поверхностного слоя тела, движущегося с высокой скоростью, в последнее время начали называть абляцией. В русском переводе это означает снос вещества набегающим потоком воздуха.

Рассмотрим это явление подробнее.

Передача энергии от набегающего воздуха к поверхности движущегося тела осуществляется при температурах до $3000\text{--}4000^\circ$ в основном в результате молекулярной бомбардировки.

Каждая молекула, приближаясь к поверхности, ударяет с той или иной силой, в зависимости от скорости своего движения. Некоторые удары оказываются настолько сильными, что из поверхностного слоя тела вырывается одна, несколько или даже много молекул. Чем сильнее удар, тем больше масса выброшенного вещества по сравнению с массой ударяющей молекулы.

Картина напоминает удар быстро летящей пули в кучу гравия: в разные стороны вылетает множество камешков, и в месте удара образуется воронка, объем которой может во много раз превосходить объем ударившей пули.

Таким образом, абляция может привести к удалению с поверхности движущегося тела массы, значительно превосходящей массу воздуха, встреченного телом на своем пути.

Если температура торможения превосходит $3000\text{--}4000^\circ$, что соответствует скорости, превышающей соответственно $4500\text{--}8000$ м/сек (рис 7), то начинается заметная ионизация воздуха. Ионизацией называется отрыв электронов от молекул и атомов. На это затрачивается энергия, что, в свою очередь, приводит к снижению температур, приведенных условно, в первом приближении, без учета ионизации на рис 7. Кроме того, снижение температуры получается в результате диссоциации молекул, т. е. их распад на атомы.

При ионизации появляется много свободных электронов. Электроны имеют весьма малую массу. Они легче атома водорода почти в 2000 раз. Поэтому в раскаленном газе электроны движутся в сотни раз быстрее атомов и молекул.

Газ, разогретый до высокой температуры и сильно ионизированный, называется плазмой. При движении со скоростями, превышающими $3\text{--}4$ км/сек, воздух, обтекающий движущееся тело, превращается в воздушную плазму. В плазме основными носителями энергии являются электроны. Их много, и они движутся весьма быстро.

Поэтому разогрев, разрушение и абляция вещества поверхностного слоя движущегося тела осуществляются при достаточно высоких скоростях в основном в результате мощной электронной бомбардировки.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ АБЛЯЦИИ

Электронны—основные передатчики энергии при гиперзвуковом движении, как известно, заряжены отрицательно. Перенося энергию, электроны переносят также и электрические заряды. В результате движущееся с большой скоростью тело должно было бы зарядиться до высокого потенциала отрицательным электрическим зарядом. Однако этому процессу противодействует другой процесс—электронная эмиссия накалившимся телом, т. е. выбрасывание электронов из тела, имеющего высокую температуру.

Явление электронной эмиссии хорошо известно всем, что знаком с простейшей радиоаппаратурой. На нем основано регулирование силы тока, проходящего через диоды, триоды и другие радиолампы путем регулирования накала катода. Но электронная бомбардировка тел при гиперзвуковом движении и электронная эмиссия не вполне компенсируют друг друга. Поэтому электрические явления при гиперзвуковом движении играют важную роль.

Чтобы убедиться в этом, можно произвести такой опыт. В электрическую цепь, замыкающую электрический конденсатор с большой емкостью, заряженный до высокого потенциала, включают очень тонкую и сравнительно короткую проволочку. Через нее происходит разряд конденсатора. В виду того, что сопротивление тонкой проволочки электрическому току довольно велико, значительная часть энергии, запасенной в конденсаторе, выделяется внутри проволочки. Она разогревается до температуры в несколько десятков тысяч градусов и почти мгновенно испаряется. Получается очень мощный электрический взрыв. Из паров проволочки образуется облачко плазмы, расширяющееся во все стороны со скоростью в несколько километров в секунду. Если на пути расширяющейся плазмы поставить какое-либо тело, то плазма будет обтекать это тело так, как если бы оно двигалось само со скоростью в несколько километров в секунду. Набегающая на тело раскаленная плазма разогревается еще сильнее и интенсивно действует на обтекаемое тело. Так можно воспроизвести эффект воздействия сред на тела, движущиеся со скоростями до 10 км/сек.

Известно, что при этом происходит интенсивная абляция. Тело, поставленное на пути расширяющейся плазмы, частично разрушается и испаряется. В результате этого его поверхность разъедается на ней появляются неровности, и в некоторых случаях можно наглядно видеть следы струй плазмы, обтекавших и разрушавших тело. Поверхность тела приобретает такое же строение, как у железных метеоритов, прошедших через атмосферу на больших скоростях. Такие метеориты

можно видеть в собрании метеоритов Академии наук СССР

Таким образом, при помощи опытов с электрическим взрывом можно выявить многие интересные особенности гиперзвукового движения в пределах скромной лаборатории

В частности, можно установить, что абляция происходит тем интенсивнее, чем более легкоплавков и теплопроводен материал тел, обтекаемых плазмой. Это вполне понятно и естественно. Однако в ряде случаев происходят резкие и, с первого взгляда, необъяснимые отступления от этого закона.

Например, если поместить в плазму два совершенно одинаковых шарика — один из меди, а другой из парафина, то можно было бы ожидать, что парафиновый шарик испытает гораздо более значительную абляцию, чем медный, так как медь имеет гораздо более высокую температуру плавления. Кроме того, парафин легко загорается в воздухе, в то время как медь горит только при очень высоких температурах или при очень значительном, ненормально высоком содержании кислорода в окружающей среде.

Однако опыт дает прямо противоположный результат. Оказывается, можно подобрать такое расстояние от места электрического взрыва, когда медное тело интенсивно разрушается абляцией, в то время как парафин не испытывает никаких заметных изменений своей поверхности.

Это явление можно объяснить только тем, что плазма передает разрушающую энергию обтекаемому ею телу при помощи потока электронов. Если эти электроны ударяют в тело, являющееся электрическим изолятором, то они заряжают поверхность отрицательным электричеством, которому некуда уйти. Это сразу же ослабляет действие плазмы на тело. Электроны плазмы, несущие энергию, уже не могут производить разрушающего действия.

При приближении к поверхности, несущей отрицательный электрический заряд, электроны испытывают такое сильное отталкивание, что тормозятся и производят либо очень слабые удары по поверхности тела, либо вообще их не производят. Поэтому тело, являющееся хорошим изолятором, противостоит воздействию высокотемпературной плазмы.

Иначе обстоит дело при обтекании плазмой тела с хорошей электропроводностью, которое при этом заземлено. В этом случае заряд электронов плазмы быстро отводится с поверхности обтекаемой плазмой, и последующие электроны без всяких препятствий продолжают бомбардировать электропроводящее тело. Именно эти обстоятельства вызывают более сильную абляцию электропроводящих тел при движении с большими скоростями.

Возможно, в дальнейшем, при развитии ионных ракет, выбрасывающих струю ионов, можно будет искать и новых способов защиты от абляции. Если ионная ракета выбрасы-

вает струю положительных и струю отрицательных ионов, то всегда можно регулировать работу двигателя так, чтобы положительных ионов уходило больше, чем отрицательных. Тогда космический корабль зарядится отрицательным электричеством и это может в какой-то мере защитить его от сильной абляции при входе в верхние слои атмосферы Земли или другой планеты.

Впрочем, не только электрический заряд, но и достаточно сильное магнитное поле может служить защитой от воздействия плазмы.

Всякое магнитное поле характеризуется совокупностью силовых линий, идущих от одного полюса магнита (или электромагнита) к другому по соответствующим направлениям.

Всякая движущаяся частица, несущая на себе тот или иной электрический заряд, взаимодействует с магнитным полем. Ее траектория искривляется в плоскости, перпендикулярной к линиям, и при этом тем сильнее, чем больше заряд и меньше масса.

Это искривление не дает возможности электронам и ионам, входящим в состав плазмы, продолжать в магнитном поле свое обычное движение. Образно говоря, из магнитных силовых линий можно создавать своеобразные «сосуды», не пускающие в свой внутренний объем заряженные частицы извне. Можно также создавать «сосуды», которые, наоборот, не выпускают наружу частицы плазмы, содержащейся в них. В настоящее время идеи «магнитных сосудов» широко используют в установках для изучения частиц высоких энергий в ядерных и термоядерных реакциях.

При соответствующих условиях несомненно можно применить сильные магнитные поля для защиты космических кораблей будущего от воздействия частиц высоких энергий. Такая задача особенно удобно сможет решаться на космических кораблях с ионными ракетными двигателями. В этом случае на космическом корабле обязательно должен находиться мощный источник электрической энергии, скорее всего компактная атомная электростанция. Такой электростанцией легко воспользоваться для питания специальных электромагнитов, создающих в головной части космического корабля электромагнитную защиту.

Если уж мы касаемся таких фантастических картин будущего космонавтики, то хотелось бы пойти еще дальше. Можно представить себе, что плазма, возникающая в окружающей среде, при встрече с телом, имеющим гиперзвуковую скорость, захватывается пульсирующим магнитным полем и отбрасывается назад с повышенной скоростью. Таким способом сможет быть создана схема прямоточного плазменного реактивного двигателя, способного действовать с большим коэффициентом полезного действия.

ЗАВИСИМОСТЬ АБЛЯЦИИ ОТ СКОРОСТИ

Иntenсивность абляции оценивается различными способами. Наиболее простым и наглядным можно считать определение массы, уносимой за единицу времени с головной части тела, имеющего гиперзвуковую скорость. Это количество зависит от энергии, которая приносится к движущемуся телу набегающим потоком воздуха.

Эта энергия прежде всего зависит от скорости движения. Энергия движения пропорциональна квадрату скорости. Кроме того, она пропорциональна массе набегающего на тело за единицу времени воздуха. Масса воздуха пропорциональна скорости, плотности воздуха и поперечному сечению движущегося тела.

Таким образом, можно считать, что энергия, приносимая набегающим потоком в единицу времени (мощность набегающего потока), пропорциональна плотности воздуха, сечению движущегося тела и кубу скорости движения. Это очень «крутая» зависимость. При сравнительно небольшом увеличении скорости мощность набегающего потока растет весьма сильно. Например, если скорость увеличивается в 100 раз, мощность потока возрастает в миллион раз.

Мощность набегающего потока удобно рассматривать в наиболее простом случае, когда поперечное сечение движущегося тела принято равным единице, например, 1 м^2 .

В этом случае получаемую мощность можно назвать плотностью мощности набегающего потока. Для наглядности ее удобно выражать в лошадиных силах или киловаттах. В табл. 2 приведена эта величина различных скоростей при нормальной плотности воздуха.

Она определяется очень просто. Плотность мощности потока при нормальной плотности воздуха, равная $1 \frac{\text{кгм}}{\text{м}^2}$, получается при скорости равной приблизительно $11,7 \text{ м/сек}$.

Следовательно, плотность мощности при всякой иной скорости равна

$$W = \left(\frac{v}{11,7} \right)^3 \frac{\text{кгм}}{\text{м}^2},$$

где v — скорость движения тела (набегающего потока), выраженная в м/сек .

Приведенная формула годится для случая движения в воздухе нормальной плотности, т. е. вблизи от уровня моря. Если же движение происходит на той или иной высоте, то в первом приближении можно считать, что величина W будет уменьшаться вдвое при поднятии на каждые 5 км. Это вытекает из того, что W пропорционально плотности воздуха, а плотность воздуха снижается примерно вдвое при подъеме на каждые 5 км.

В табл. 2 приводится зависимость плотности мощности набегающего потока воздуха от скорости движения (при нормальной плотности воздуха на уровне моря).

Таблица 2

Скорость (м/сек)	11,7	117	1170	11 700	117 000
Плотность мощ- ности (квт)	1	1000	1 000 000	1 000 000 000	100 000 000 000

В предпоследнем столбце табл. 2 указывается скорость 11700 м/сек, или 11,7 км/сек, близкая ко второй космической скорости. При такой скорости плотности мощности потока набегающего воздуха достигает чудовищной величины в миллиард киловатт, т. е. она почти в 300 раз больше мощности величайшей в мире Братской ГЭС на Ангаре.

Поэтому становится особенно понятным, почему достижение очень высоких скоростей движения крупных тел требует подъема в верхние слои атмосферы или даже ухода в космос. Действительно, при подъеме на высоту 50 км плотность мощности набегающего потока уменьшается в 1000 раз, при подъеме на 100 км — в 1 миллион раз и, наконец, на высоте 150 км становится примерно в 1 миллиард раз меньше, чем у поверхности моря. На высотах порядка 170—180 км остаются только сотые или десятичные доли киловатта.

Становится также понятным, почему искусственные спутники Земли могут летать длительное время вокруг Земли не ниже 170—180 км. На меньшей высоте они начинают резко тормозиться воздухом и их орбита быстро снижается, превращаясь из эллипса в спираль.

Некоторая часть энергии набегающего потока воздуха затрачивается на разрушение головной части движущегося тела. При этом разрушаемая масса должна быть пропорциональна энергии, передаваемой телу. Можно считать поэтому, что скорость абляции, т. е. толщина слоя, разрушаемого в секунду, пропорциональна кубу скорости движения. Поэтому такое разрушение должно весьма быстро увеличиваться при увеличении скорости движения.

ДЕЙСТВИЕ НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА ВОЗДУХА НА БОЛЬШИХ ВЫСОТАХ

В предыдущем разделе было сказано, что только часть энергии набегающего потока воздуха затрачивается на абляцию головной части движущегося тела. Значительная часть энергии этого потока уходит на образование мощной баллистической волны.

Соотношение между энергией, идущей на разрушение дви-

жущегося тела и на образование баллистической волны, зависит от плотности воздуха и размеров тела

Уже указывалось, что взаимодействие движущегося тела с окружающей средой может быть двух видов. Во-первых, это взаимодействие с отдельными молекулами и, во-вторых, взаимодействие со сплошной средой. Первый случай будет наблюдаться тогда, когда размеры движущегося тела меньше длины свободного пробега молекул среды. Второй случай осуществится, когда диаметр движущегося тела будет заметно больше длины свободного пробега.

Граница между обоими видами взаимодействия движущегося тела со средой находится на высоте около 83 км, если диаметр тела равен примерно 1 м.

Доля энергии, отдаваемой набегающим потоком на разрушение движущегося тела, заметно больше в том случае, когда плотность воздуха мала и длина пробега молекул превосходит размеры тела. Тогда практически баллистической волны нет и каждая молекула набегаёт на движущееся тело без какой-либо помехи со стороны соседних молекул или частиц, выбрасываемых из разрушающейся головной части движущегося тела. В этом случае при ударе каждой молекулы из поверхностного слоя движущегося тела выбрасывается большее число молекул, ионов и электронов, а также излучается свет и тепловые лучи.

Получается картина, напоминающая в миниатюре картину удара в грунт авиабомбы, снаряда, ракеты или метеорита.

Масса выбрасываемого вещества движется в пределах некоторого конуса более или менее симметричного относительно оси возникающей воронки. Направление выброса разрушенного вещества мало зависит от направления удара молекулы.

При таком выбросе вещества образующаяся воронка превращается как бы в сопло реактивного двигателя, испускающее струю газов. Это значит, что при разрушении в результате абляции головной части движущегося тела возникает дополнительная сила, направленная против движения и производящая дополнительное торможение движущегося тела, кроме действия обычных аэродинамических сил. Это явление имеет очень большое принципиальное значение, и его полезно рассмотреть более подробно. Но для этого необходимо сначала остановиться на простой модели удара встречной молекулы о поверхность тела, имеющего большую скорость

ОПЫТЫ С БАЛЛИСТИЧЕСКИМИ МАЯТНИКАМИ

В артиллерии и стрелковом деле издавна существует простой способ измерения скорости движения пули и снарядов. Еще более 200 лет назад для этого был изобретен маятник, называемый баллистическим.

Баллистический маятник обычно представляет собой тело, подвешенное на четырех параллельных нитях и способное на них свободно качаться (рис. 8). Тело маятника делается таким, чтобы пуля или снаряд застревали в нем.

При ударе пули или снаряда баллистический маятник отклоняется на некоторый угол α , который в первом приближении пропорционален скорости пули или снаряда.

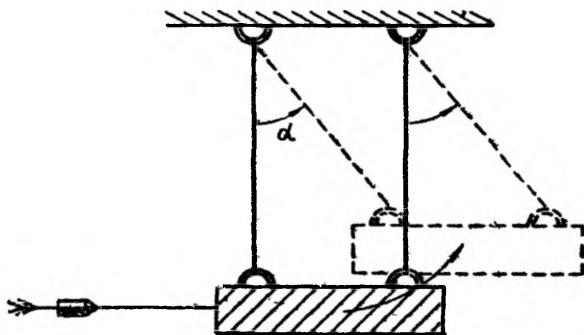


Рис. 8. Баллистический маятник отклоняется при ударе пули

Следовательно, если в каком-либо случае угол $\alpha=1^\circ$, а в другом случае $\alpha=10^\circ$, то скорость во втором случае была больше, чем в первом, в 10 раз. Конечно, это правило справедливо для опытов с пулями или снарядами, имеющими одинаковый постоянный вес.

Самым простым способом изготовить тело баллистического маятника можно считать такой, когда используется обыкновенный кусок бревна дерева твердой породы. Если пуля входит вдоль его волокна, то она не образует заметной воронки и не выбрасывает наружу разрушенного материала. В таких условиях измерять скорость пули и сравнивать результаты различных опытов друг с другом очень просто и удобно.

Однако дерево быстро портится и его надо часто заменять новым. Поэтому возникает мысль заменить деревянный маятник чем-либо другим. Можно в качестве маятника подвесить обычное ведро так, чтобы его ось была горизонтальна и его открытая часть обращена в сторону, откуда летит пуля. Ведро можно заполнить влажной пластической глиной. Тогда повреждения, причиняемые отдельными пулями, легко устранять, замазывая глиной образующиеся входные воронки от пуль. Кажется бы, таким путем получается очень удобный для опытов баллистический маятник.

Но на деле оказывается, что этот маятник таит в себе со-

вершенно неожиданные свойства и может очень сильно подвести экспериментатора. Если сравнить отклонения маятника, сделанного из ведра, наполненного глиной, и маятника того же веса и подвешенного на таких же нитях, но сделанного из дерева, то оказывается, что маятник, содержащий глину, отклоняется от 3 до 10 раз сильнее, чем маятник из дерева. При этом чем более влажной и менее плотной является глина, тем значительнее отклонение.

Дополнительное действие, усиливающее отклонение маятника, обусловлено тем, что при проникновении пули в глину эта глина выбрасывается навстречу пуле. При таком выбросе возникает реактивная сила, дополняющая и значительно увеличивающая действие пули. Чем быстрее движется пуля, тем интенсивнее выброс глины и тем сильнее действие удара пули.

Нечто напоминающее эти опыты происходит и при молекулярной, ионной и электронной бомбардировке головной части движущегося тела. Но в этих случаях ударяющие частицы имеют очень малую массу (в отдельности) и весьма значительную скорость. При таких условиях реактивное действие продуктов абляции будет сильно превышать тормозящее действие самих молекул воздуха. Поэтому увеличение механического действия набегающего потока воздуха должно быть при абляции весьма значительным.

Расчеты показывают, что сопротивление движению будет в этом случае определяться не столько обычными аэродинамическими силами, сколько реактивным эффектом, обусловленным абляцией движущегося тела.

СОПРОТИВЛЕНИЕ СРЕДЫ ПРИ ГИПЕРЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ

Законом сопротивления в аэродинамике и артиллерийской баллистике называется зависимость силы сопротивления от скорости движения. Сила сопротивления обычно пропорциональна плотности среды, поперечному сечению движущегося тела и квадрату скорости движения.

При приближении к скорости звука (примерно 300 м/сек при температуре 0°) появляется «звуковой барьер», т. е. увеличение сопротивления движущегося тела при переходе через скорость звука в результате образования баллистической волны. Звуковой барьер, изучение которого сыграло большую роль в развитии авиации, нельзя считать существенным по сравнению с реактивным эффектом, возникающим на гиперзвуковых скоростях при абляции движущегося тела.

В случае абляции возникает дополнительное сопротивление, также пропорциональное плотности и скорости воздуха и поперечному сечению движущегося тела. Однако это сопротивление пропорционально не квадрату, а кубу скорости движе-

ния. Дополнительное сопротивление появляется начиная со скорости 1—3 км/сек, в зависимости от жаропрочности движущегося тела. При скорости около 8 км/сек (первая космическая скорость) дополнительное сопротивление может превосходить обычное аэродинамическое сопротивление в 2—4 раза.

Поэтому при космических скоростях движения в достаточно разреженном газе в основу расчета сопротивления нужно класть не классическую аэродинамику, а теорию реактивного эффекта абляции.

В связи со сказанным хотелось бы отметить следующее. В различных расчетах и проектах космического полета издавна, начиная с работ К. Э. Циолковского, выдвигалась идея торможения космического корабля перед посадкой на небесное тело при помощи реактивного двигателя, работающего навстречу направлению полета. Такой способ торможения требует значительного запаса топлива, затрачиваемого для того, чтобы погасить движение, происходящее с большой скоростью. Другими словами, необходимо иметь на космическом корабле значительный запас энергии. Но нельзя ли вместо запаса энергии, заключенного, например, в топливе для реактивного двигателя, использовать саму энергию движения?

Ответ на этот вопрос дает рассмотренное нами торможение реактивным эффектом абляции движущегося тела. Пока речь идет лишь о явлениях, возникающих стихийно и самопроизвольно при гиперзвуковых скоростях. Но, может быть, в дальнейшем эти явления можно будет использовать для самых разнообразных практических целей.

Интересно отметить, что, наблюдая кометы, движущиеся в космическом пространстве, можно видеть, что они под действием солнечных лучей выделяют интенсивные потоки газа. Если ядро такой кометы войдет на большой скорости в плотные слои атмосферы Земли, то под влиянием интенсивной абляции и разогрева должно также начаться очень сильное выделение газов. В результате может существенно усилиться разрушение ядра и реактивное действие абляции. Они будут интенсивно нарастать по мере снижения траектории движения и в конце концов приведут к очень мощному взрыву ядра кометы.

Можно высказать предположение, что знаменитый Тунгусский метеорит, взорвавшийся при входе в нижние слои атмосферы в 1908 году, был именно ядром кометы, содержащим большой запас газообразующего вещества. Такая теория была предложена профессором К. П. Станюковичем на 9-й метеоритной конференции Академии наук СССР (Киев, июнь 1960 г.). Дальнейшие исследования должны не только объяснить взрывы метеоритов и другие природные процессы, но также дать технике новые способы управления движением,

Можно ожидать, что торможение тел при гиперзвуковых скоростях должно быть очень интенсивным. Между тем наблюдения показывают, что иногда наблюдаются метеоры, которые оставляют яркий огненный след, следовательно, подвергаются сильной абляции, но почти или совсем не тормозятся. Бывают случаи наблюдения метеоров, имеющих чрезмерно высокие скорости. При этом возникает вопрос, каким путем они могли получить эти скорости.

Чтобы ответить на такие вопросы, нужно несколько отклониться от основной темы этой брошюры.

АВТОРОТАЦИЯ

При полете на вертолете или тихоходном самолете можно сделать следующий эксперимент (на эту возможность впервые обратил мое внимание профессор В. С. Пышнов). Для эксперимента необходимо пожертвовать арбузом. Его следует выбросить, слегка приоткрыв дверцу кабины. Арбуз будет падать, увеличивая скорость и испытывая нарастающее сопротивление воздуха.

И вот через небольшое время такого падения можно видеть совершенно неожиданное явление. Арбуз внезапно взрывается, и его осколки разлетаются в одной определенной плоскости. С первого взгляда взрыв арбуза и необычный разлет его осколков кажутся совершенно непонятными. Однако объяснение оказывается довольно простым.

При движении тела близкого по форме к шару, но не вполне правильного, действие набегающего потока воздуха на тело с разных сторон оказывается неодинаковым. В результате этого тела начинают быстро вращаться около оси, перпендикулярной к направлению движения. От возникшей из-за быстрого вращения центробежной силы и разлетается на куски падающий арбуз. Такое вращение, возникающее само собой, автоматически, вызывается авторотацией. Авторотация имеет очень большое значение во многих случаях движения.

При авторотации происходит равномерная абляция движущегося тела. В зону действия набегающего потока воздуха входят непрерывно новые участки поверхности тела, в то время как участки, разогретые этим потоком, выводятся из зоны нагрева в тыльную зону с резко пониженным давлением воздуха.

При резком снижении давления воздуха, а также при действии центробежных сил, вызванных авторотацией, в разогретом поверхностном слое движущегося тела может начаться интенсивное выделение газов. Чем больше скорость движения, тем сильнее разогрев и тем больше газов будет выделяться. Такое выделение газов может быть особенно интенсивным у метеоров, несущих в себе, подобно ядрам комет, боль-

шое количество растворенных, поглощенных и в результате низких температур в космосе, вдали от Солнца, превращенных в жидкое и твердое состояние газов.

При выделении газов будет происходить разрушение и «вскипание» разогретого слоя, напоминающее вскипание шампанского при быстром открывании бутылки. В результате такого вскипания поверхностный слой будет отбрасываться. При этом возникает значительное реактивное действие. Однако это действие направлено уже не против движения тела, а, наоборот, помогает движению, потому что вещество летит в хвостовую зону с пониженным давлением воздуха.

При таких условиях реактивное действие будет не увеличивать, а уменьшать аэродинамическое сопротивление движущегося тела. Из сказанного вытекает возможность существования тел, интенсивно сгорающих, но почти не уменьшающих своей скорости.

САМОУСКОРЯЮЩИЕСЯ МЕТЕОРЫ, ИЛИ МЕТЕОРЫ-РАКЕТЫ

Выбрасывание вещества в хвостовую зону при авторотации движущегося тела может дать силу тяги, превосходящую даже силу сопротивления среды (несколько увеличенную реактивным действием при абляции в головной части движущегося тела). С первого взгляда, такое явление представляется невероятным.

При вскипании поверхностного разогретого слоя происходит его растрескивание и каждая трещинка становится также местом выделения газов. Поэтому площадь, к которой приложено давление выделяющихся газов, сильно увеличивается. Вместе с тем силы взаимосвязи между частицами поверхностного слоя при его разрушении исчезают. Эти силы уже не противодействуют давлению газов. При таких условиях сила, ускоряющая тело, может заметно превзойти силы, тормозящие его.

Таким образом, при авторотации сильно насыщенное газом тело, движущееся с высокой скоростью в сопротивляющейся среде малой плотности, может не только сохранять свою скорость, но даже увеличивать ее.

При этом, конечно, никакого нарушения основных законов механики не происходит. Вся система, проникающая в сопротивляющуюся среду, безусловно, тормозится. Остающийся за телом газовый хвост тормозится очень сильно. Поэтому общий центр тяжести движущегося ускоренно тела и резко тормозящегося газового хвоста также тормозится, снижает свою скорость. Общая энергия системы тело — газовый хвост также уменьшается, как это всегда происходит при наличии аэродинамического сопротивления.

Механизм самоускорения, возникающего при авторотации,—не единственный возможный способ самоускорения.

Представим себе, что движущееся тело состоит из плотного жаропрочного ядра и более рыхлой газонасыщенной оболочки. При движении без авторотации внешняя оболочка будет разрушена прежде всего в головной части. Здесь на поверхность выйдет материал жаропрочного ядра. Поэтому абляция и газовыделение в головной части могут значительно снизиться. Между тем в хвостовой зоне даже при слабом воздействии разреженного воздуха, а также при общем разогреве движущегося тела газовыделение и выброс вещества рыхлой оболочки будут продолжаться. В этих условиях также возможно такое соотношение сил, при котором возникает некоторое ускорение движения.

Этими примерами, конечно, не исчерпываются все возможные случаи самоускорения. Однако эти примеры показывают, что любопытнейшее явление самоускорения вполне возможно. Пока самоускорение не нашло прямого применения в технике. Но оно представляет собой очень большой интерес применительно к изучению метеоров и метеоритов.

РАДИОВОСХОД И «РАДИОЗАРЯ» ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ

В настоящее время очень широкое применение для научных и технических целей начинают находить искусственные спутники Земли. Наблюдение за ними с Земли необходимо для решения многих задач, например для морской и воздушной навигации, для уточнения карт, для изучения атмосферы на основе измерения движения в ней радиоволн и многих других целей, которые в последние годы были широко освещены в печати.

Обычно наблюдение за искусственными спутниками производят при помощи мощных радиолокаторов и радиотелескопов. При этом спутник можно хорошо наблюдать только тогда, когда он находится выше горизонта. В этом отношении наблюдение при помощи радио за спутником весьма похоже на наблюдение за небесными телами при помощи обычных оптических телескопов или просто невооруженным глазом.

Точно так же, как о восходе Солнца, Луны, планет и отдельных звезд, можно говорить и о радиовосходе искусственных спутников Земли и других космических летательных аппаратов, например межконтинентальных ракет или искусственных планет.

При этом обнаруживается интересное явление. Оказывается, при применении особо чувствительных средств наблюдения можно заметить приближение радиовосхода космического корабля за некоторое время до его фактического наступления.

Дело в том, что электроны и ионы, отражаемые космиче-

ским кораблем, а также возникающие при абляции его поверхности, частично опережают корабль.

Если корабль идет на такой высоте, где есть еще немного воздуха, но свободный пробег частиц уже достаточно велик, то частицы, отраженные от корабля и выброшенные с его поверхности, могут залететь на десятки и сотни километров вперед корабля. Эти частицы в конце концов тормозятся в верхних слоях атмосферы, вызывая их дополнительную ионизацию. Наличие этой дополнительной ионизации может быть обнаружено чувствительными средствами радионаблюдения. Именно на этом основании и можно заранее определить приближение радиовосхода спутника. Так же, как утренняя заря предвещает восход Солнца, так ионизация предвещает восход космического корабля. Поэтому ее можно назвать «радиозарей» этого корабля.

Впрочем, наблюдение «радиозари» требует очень чувствительных и мощных радиосредств. Гораздо сильнее выявляется при помощи существенно менее чувствительных радиолокаторов раскаленный след, оставляемый быстро движущимся телом и состоящий из раскаленных частиц, унесенных с его поверхности вследствие абляции, а также из разогретого и частично ионизированного воздуха. Такой след, так сказать «вечерняя радиозаря», очень хорошо отражает радиоволны. Этим в настоящее время широко пользуются астрономы, автоматически и с большой степенью точности регистрирующие таким способом огромное количество метеоров.

6 коп.