

ББК 22.253.3
М52
УДК 532.5.013 (023)

Меркулов В. И. Гидродинамика знакомая и незнакомая.—2-е изд., перераб. и доп.— М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.— 136 с.— ISBN 5-02-013809-6.

В популярной форме излагаются основные законы гидродинамики — науки о движении жидкости и газа. Среди объектов этой науки самолеты и корабли, птицы и дельфины, кровеносные сосуды и нефтепроводы. Изложение иллюстрируется многочисленными примерами, взятыми из окружающей жизни. Для многих читателей особый интерес может представить описание неиспользованных возможностей гидродинамики, новых технических решений и применений. К ним относятся и лыжи с воздушной смазкой, и вентиляция воздушного бассейна города, и катамаран без волнового сопротивления, и новый вид спорта — бег по «тонкому льду».

Предыдущее, первое издание книги вышло в свет в 1976 г. в издательстве «Техника» (Киев) под названием «Популярная гидродинамика» и было в 1977 г. отмечено Дипломом второй степени на Всесоюзном конкурсе научно-популярной литературы. В 1980 г. книга была переведена в Японии на японский язык.

Взрослый читатель, прочитав книгу, расширит свой кругозор, юному книга поможет выбрать профессию. Она полезна и интересна специалистам смежных отраслей науки.

Табл. 1. Ил. 71. Библиогр. 19 назв.

Рецензент

доктор физико-математических наук А. Г. Куликовский

М $\frac{1603040100-093}{053(02)-89}$ КБ 11-84-89

ISBN-5-02-013809-6

© Техника (Киев), 1976
© Издательство «Наука».
Главная редакция
физико-математической
литературы, с дополне-
ниями, 1989

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Гидростатика	7
Основное уравнение гидростатики. Закон Паскаля. Поверхностное натяжение. Гидростатика в невесомости. Равновесие кораблей. Аэростатика. Корабль пустыни. Аэростатический транспорт газа. Вертостат.	
Воздушная подушка	26
Как передвинуть холодильник? Лыжи скользят по воздуху. Экономичные аппараты на воздушной подушке. Аэросани и самолетные шасси с воздушной смазкой. Почему буксует колесо?	
Аэроупругость	37
Стрела попадает в цель. Флаттер. Статическая и динамическая жесткость конструкций. Демпфирование упругих колебаний.	
Человек идет по воде	43
Тихие аплодисменты под водой. Присоединенная масса. По воде можно бежать. Бег по тонкому льду. Переправа без моста. «Секреты» плавания кальмара.	
Динамические эффекты в жидкости и газе	50
Закон сохранения энергии. Вода вытекает из сосуда. Кипит холодная вода. Измерение скорости потока. Столкновение кораблей. Шарик висит в воздухе. Эффект Магнуса. Парус Флеттнера. Летящий автомобиль. Метеор сгорает в воздухе. Смерч-торнадо.	
Вязкая жидкость	68
Не поможешь — не поедешь. Гидродинамическое сопротивление. Парадокс Даламбера. Неньютоновские жидкости.	
Гидродинамические машины	75
Воздушный винт. Гребной винт. Гидротурбина. Гидротрансформатор. Гидравлический удар. Пульсирующий водомет. Генератор воздушных вихрей.	
Волна смывает город	90
Зарождение волн. Волна бежит, вода остается. Сложение волн. Волны чувствуют дно моря. Цунами. Волны в топливном отсеке ракеты. Корабль на подводных крыльях. Как использовать волну.	

Гидродинамика животных	100
Чемпионы подводного плавания. Природные движители. Машущее крыло. Секреты большой скорости.	
Полет в живой природе	108
Планирующий полет. Парящий полет. Машущий полет.	
Магнитная гидродинамика	116
Магнитогидродинамический насос. МГД-двигатель. Бестигельная плавка. Бестигельная зонная плавка. МГД-генератор. Атомные МГД-генераторы. Джинн в магнитной бутылке. Термоядерная реакция. Пинч-эффект. Устойчивость плазменного шнура.	
Перспективы гидромеханики	130
Список рекомендуемой литературы	135

ПРЕДИСЛОВИЕ

Существует много различных интересных наук. Каждая из них вносит свой вклад в дело человеческого прогресса. И нет ни одной, без которой можно обойтись. И в этом смысле все науки равны.

Ученые различных специальностей увлеченно работают каждый в своей области. Годы упорного труда венчаются великолепными открытиями, поражения сменяются победами. И, наверное, каждый считает свою науку, свою проблему самой интересной и самой важной. Без такой убежденности они едва ли смогли бы найти в себе силы преодолеть те трудности, которые расставлены природой на пути к ее секретам.

А как относятся к различным наукам люди, которые только готовятся заняться ими? Их отношение отчасти формируется знаниями, полученными в школе, отчасти научно-популярными книгами, газетными и журнальными статьями или кинофильмами.

И вот здесь наступает неравенство наук. В то время как одним наукам посвящается много книг, кинофильмов и они покрываются ореолом романтики, славы, другие остаются в тени. К последним, как ни странно, относится гидроаэродинамика — наука о движении жидкостей и газов. Это обстоятельство тем более удивительно, что объекты, изучаемые гидродинамикой, мы встречаем на каждом шагу. И сами мы, и все, что нас окружает, движется либо в воздухе (птицы, автомобили, самолеты), либо в воде (рыбы, дельфины, подводные и надводные суда). Человеку приходится изучать воздушные и морские течения, приливные и ветровые волны, движение нефти и газа в тысячекилометровых трубах, течение крови в микроскопических кровеносных сосудах.

Но если все знают, что самолет или корабль на подводных крыльях своими качествами обязаны достижениям гидроаэродинамики, то немногим известно, что задачу о входе космического летательного аппарата в атмосферу Земли или другой планеты также решают гидродинамики. Создание ракетного двигателя мощностью 15 млн. кВт, способного вырвать человека из тяжелых объятий Земли, — это не только успех конструкторов, металлургов, химиков, но и аэродинамиков. И если со временем человек овладеет термоядерной энергией, то в этом будет заслуга не только физиков, но и гидромехаников.

Гидромеханика, как и всякая наука, возникла и развивается в соответствии с потребностями практики. Отвечая запросам древних кораблестроителей, Архимед (287—212 гг. до н. э.) сформулировал законы плавания и устойчивости плавающих тел. Строительство каналов, плотин, шлюзов, фонтанов, дальнейшее развитие судостроения и мореплавания в XVII—XVIII вв. служило серьезным стимулом для развития гидромеханики. Именно в это время появились фундаментальные работы членов Петербургской академии наук Д. Бернулли (1700—1782) и Л. Эйлера (1707—1783). Бернулли ввел термин «гидродинамика», и его книга, вышедшая в свет в 1738 г., так и называлась. Эйлер вывел общие уравнения движения невязкой жидкости, которыми мы пользуемся и в настоящее время.

Зарождение и развитие авиации в конце XIX и начале XX вв. обусловили расширение работ по аэродинамике летательных аппаратов. И здесь прежде всего следует упомянуть профессора Н. Е. Жуковского (1847—1921), которого В. И. Ленин назвал «отцом русской авиации». Формулы и профили Жуковского и теперь играют большую роль в аэродинамике.

Жажда знаний всегда побуждала человека к поискам истины, познанию сущности явлений, часто опережая технические возможности и практические запросы общества.

Какой прекрасный и удивительный мир открывается глазам художника, поэта, писателя! Но он окажется еще прекраснее и удивительнее, если вы посмотрите на него еще и глазами ученого. Так, парящая в небе птица расскажет вам о законах аэродинамики, набегающая на берег волна послужит хорошей иллюстрацией к теории колебаний. Как это интересно — за внешним проявлением увидеть сущность процесса!

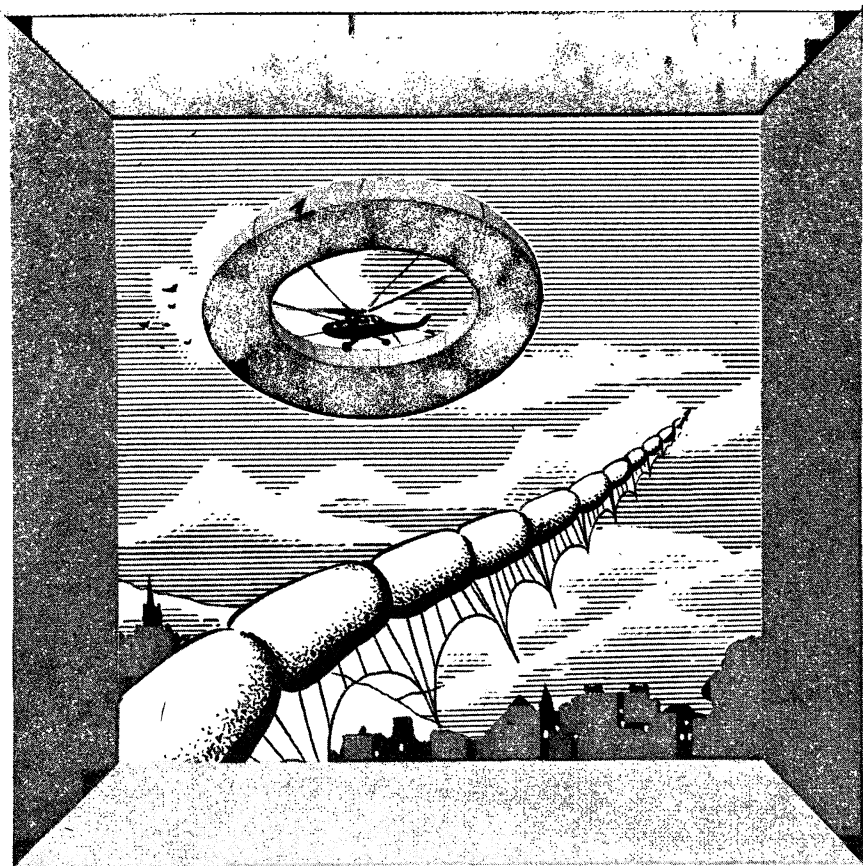
Предлагаемая книга не является систематическим изложением рассматриваемой науки. Написанная в форме отдельных этюдов, посвященных различным разделам гидроаэродинамики, она знакомит читателя только с некоторыми ее проблемами.

Начинается изложение с простейших, уже решенных задач. Но и они таят в себе интересные и неиспользованные возможности. В этих разделах автор старался не только рассказать, что делается, но и как делается. По приведенным формулам читатель при желании может сам проверить результаты или произвести расчет. В следующих главах мы ограничились только рассказами о стоящих перед гидродинамикой задачах.

Подобно тому как нельзя написать симфонию, не прибегая к нотным знакам, так невозможно рассказать о гидроаэродинамике, не прибегая к математическим формулам. В каждой главе книги, кроме законов гидродинамики и их физического проявления, приводится техническое решение какой-либо проблемы.

Несколько слов о принятой терминологии. Механика — наука, изучающая перемещение и равновесие материальных тел под действием различных сил. Прибавлением гидро- (вода) выделяют часть механики, изучающей движение жидкости. Исторически сложилось так, что в рамках гидромеханики изучалось движение не только жидкостей, но и газов. Это объясняется близостью законов движения жидкостей и газов в том случае, если скорости движения меньше скорости звука (для воздуха скорость звука равна 340 м/с). По мере роста скоростей авиации из гидромеханики выделились аэромеханика и газовая динамика, которые учитывают свойство газа сжиматься. В тех случаях, когда из рассмотрения исключаются вопросы равновесия (статика) и изучается только движение под действием некоторых сил (динамика), пользуются терминами гидродинамика, аэродинамика или их комбинацией.

Предлагаемая книга представляет собой дополненное и переработанное переиздание книги «Популярная гидромеханика», изданной украинским республиканским издательством «Техника» в 1976 г. Новое название книги появилось как результат откликов читателей первой книги. Специалисты по гидромеханике отмечали основную особенность книги — открытие неизвестных до сих пор возможностей и областей применения гидромеханики. Однако при этом почти всегда высказывались сомнения в реализуемости предлагаемых технических решений. Чтобы в какой-то степени обосновать эти предложения, автор во многих случаях привел несложные математические расчеты, которые показывают практическую достижимость этих, на первый взгляд, невероятных предложений. Некоторые разделы книги изложены более полно, появились и новые разделы, такие, как «аэроупругость», «смерч-торнадо», «вертоstat».



ГИДРОСТАТИКА

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ГИДРОСТАТИКИ

Знакомство с гидромеханикой естественно начать с ее наиболее простой части — гидростатики. И хотя задачи равновесия жидкости и газа действительно более просты, чем задачи движения, круг этих задач обширен и интересен.

Простейшая задача гидростатики возникнет перед нами, если мы захотим понять, действие каких

сил испытывает вода в стоящем перед нами стакане (рис. 1).

Вырежем вертикальный столбик воды с поперечным сечением S . Этот столб будет испытывать атмосферное давление, которое мы обозначим p_0 . На площади S это давление вызовет силу $p_0 S$. В ту же сторону будет направлен и вес жидкого столба. Если буквой ρ обозначить плотность жидкости, буквой g — ускорение силы тяжести, а буквой h — высоту столба,

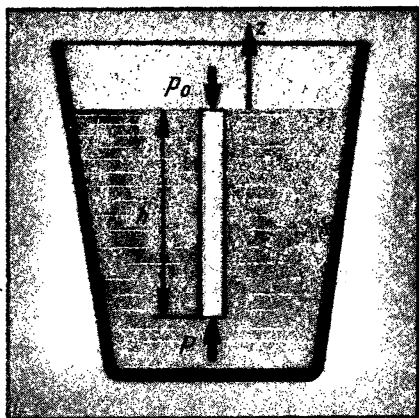


Рис. 1

то его вес можно определить как произведение $qghS$.

Тот факт, что жидкий столб не проваливается вниз, свидетельствует о существовании давления в нижней части столба, которое и уравнивает силы, направленные вниз. Это давление называют гидростатическим. Обозначим его p . Условие равновесия жидкого столба запишется так:

$$(1) \quad p_0 S + qghS = pS.$$

Как и следовало ожидать, площадь S входит в это уравнение общим множителем и может быть сокращена. Обычно вместо высоты столба h вводят координату точки, в которой хотят определить давление p . Отсчитывая эту координату от свободной поверхности жидкости, мы получаем отрицательную величину, которую обозначим через $z = -h$. Введя это обозначение и сократив уравнение (1) на S , получим основное уравнение гидростатики:

$$(2) \quad p + qgz = p_0.$$

Если точка с координатой z расположена на дне стакана, то p — давление на его дно. В общем случае p — давление на уровне z .

Специфика свойств жидкости в отличие от твердого тела состоит в том, что давление в ней не зависит от ориентации площадки, на которой это давление рассматривается. Каждый столб испытывает одинаковое боковое давление, уравновешиваемое давлением соседних столбов или давлением на стенках стакана.

Чтобы лучше понять законы гидростатики, сделайте следующий опыт. Налейте в стакан воды до самого верха. Накройте его бумагой и, придерживая бумагу ладонью, переверните стакан вверх дном. После этого отпустите руку. Вода останется в стакане также, как если бы она опиралась на дно.

Этот опыт легко объяснить, используя уравнение (2). Перепишем его следующим образом:

$$p_0 - qgz = p.$$

Заметим только, что в перевернутом стакане координата z отсчитывается от свободной поверхности вверх и потому всегда положительна.

Проанализировав уравнение, можно заключить, что давление в воде будет уменьшаться при увеличении z . Однако, если вес столба воды qgz меньше атмосферного давления p_0 , давление p будет оставаться положительным, хотя и меньшим атмосферного. Положительное значение внутреннего давления в жидкости означает наличие сил, сжимающих ее. Эти силы и удерживают воду в опрокинутом стакане.

Из уравнения (2) можно определить и высоту столба, который может удерживаться атмосферным давлением.

Очевидно, что когда

$$p = p_0 - qgz = 0,$$

вода разольется. Отсюда

$$(3) \quad z = \frac{p_0}{\rho g}.$$

Подставив сюда числовые значения $p_0 = g \cdot 10332 \text{ Н/м}^2$, $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, получим

$$z = 10,3 \text{ м.}$$

Из этого расчета, например, следует, что качать воду из колодца глубиной больше 10 м можно только расположенным в колодце насосом.

Возвратимся к формуле (3). Если мы применим ее к жидкости большей, чем вода, плотности, то величина z окажется меньше. Так, для ртути $\rho = 13\,600 \text{ кг/м}^3$ и $z = 0,76 \text{ м}$.

Благодаря малой высоте столба, на которую поднимается ртуть, с ней легко проводить опыты по изучению атмосферного давления. Для этого поступают следующим образом. Тонкую стеклянную трубку длиной больше, чем 760 мм, запаянную с одного конца, наполняют ртутью, закрывают отверстие пальцем и опускают этот конец в сосуд с ртутью. Высота ртутного столба в стеклянной трубке показывает атмосферное давление в привычных единицах — миллиметрах ртутного столба.

Из уравнения (3) можно получить и закон Архимеда, и закон Паскаля. Но, поскольку читатель знаком с ними по школьному курсу физики, мы не будем останавливаться на их выводе, а расскажем только о возможных применениях.

ЗАКОН ПАСКАЛЯ

Задумаемся, почему в гидравлических машинах обычно применяют масло, а не воду. Казалось бы, что из соображений дешевизны следу-

ет применять именно воду. Да и названию машины это больше соответствует. Как вы догадываетесь, масло применяют потому, что оно, с одной стороны, ведет себя как жидкость и передает давление во все стороны, а с другой стороны, ведет себя как замазка, затыкая щели, по которым проходит сопряжение подвижных и неподвижных частей механизма. Последнее свойство проявляется только в том случае, если щель достаточно мала. Поэтому сопрягаемые части машин обрабатывают очень точно, с высоким классом чистоты поверхности.

Читатель, наверное, видел на улицах города машину с телескопическим механизмом, предназначенным для подъема корзины с человеком. Машина останавливается. Вложенные друг в друга стальные трубы устанавливаются вертикально. После этого насос начинает качать масло в нижнюю часть этих труб, и трубы одна за другой поднимаются вверх. К самой верхней (и самой тонкой) прикреплена корзина, в которой находится человек.

Вот бы так же взять несколько железобетонных труб, вложить их друг в друга, поставить вертикально и качать внутрь жидкость, пока трубы не поднимутся вверх на небывалую высоту. Эта мечта рушится только потому, что железобетонные и даже сварные стальные трубы изготавливаются с малой точностью. Вложенные друг в друга, они образуют такой зазор, что все масло вытечет через эти щели. Стоп! А почему, собственно, мы обязаны использовать масло? Нельзя ли применить другую жидкость, которая будет просачиваться через щели между трубами достаточно медленно, чтобы насосы успевали ее накачивать. Понятно,

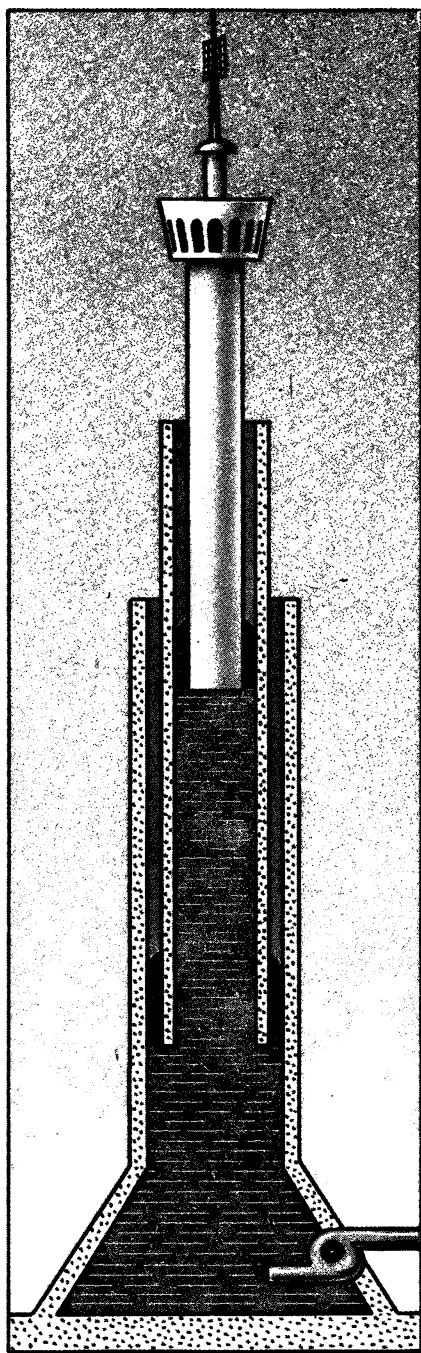


Рис. 2

что эта жидкость должна обладать большой вязкостью, такой, например, как смола. В этом случае мы сталкиваемся с другой трудностью. Каким насосом качать смолу?

Итак, нужна жидкость, которая обладала бы малой вязкостью в насосе и большой — в зазоре между трубами. Здесь весьма уместно вспомнить о некоторых глинистых растворах, которые обладают свойством так называемой тиксотропии. Эти растворы при перемешивании обладают очень малой вязкостью, а в неподвижном состоянии превращаются в твердое тело. Такие глинистые растворы в настоящее время применяют при бурении скважин.

Использование тиксотропных глинистых растворов позволяет решить проблему вертикального монтажа железобетонных труб (рис. 2). Предположим, что имеется десять железобетонных труб последовательно уменьшающихся диаметров, длиной 30 м каждая. Их вкладывают друг в друга. Обычными строительно-монтажными механизмами эти трубы устанавливают вертикально на подготовленный фундамент, где внешняя труба жестко закрепляется цементным раствором. Затем на верхней части внутренней трубы устанавливают в зависимости от ее назначения радио- или телевизионные антенны, ресторан. Все это происходит на высоте около 30 м и не требует специальных подъемных средств. После монтажа оборудования в промежуток между фундаментом и внутренними трубами начинают качать глинистый раствор. В насосе и в трубопроводе, где раствор сильно перемешивается, он ведет себя как жидкость с малой вязкостью. Зато в зазоре между трубами, которые медленно перемещаются

относительно друг друга, раствор становится почти твердым, и внутреннее давление не может протолкнуть его через щель. При этом внутреннее давление может превзойти вес труб, и они начнут подниматься, последовательно выдвигаясь друг из друга.

Даже если их относительное движение будет составлять всего 1 мм/с (при такой скорости скольжения жидкость не будет уходить в щели), менее чем через 10 ч сооружение поднимется почти на трехсотметровую отметку. В таком положении трубы фиксируют с помощью сварки закладных металлических частей. Глину спускают, зазор заливают цементом, и трехсотметровая вышка готова. Таким образом, уникальное сооружение можно быстро и дешево построить с помощью обычной техники, которой обладают даже небольшие строительные организации.

Кроме этих качественных соображений, мы можем привести количественный расчет, который не только обоснует наше предложение, но и послужит инструментом для тех, кто захочет воспользоваться таким эффективным способом монтажа высотных сооружений.

Первый вопрос, на который должен дать ответ расчет, — это вопрос о необходимой вязкости раствора. Если вязкость раствора выбрать малой, то жидкость будет успевать просачиваться через зазор между трубами и мы не сможем создать необходимое давление во внутренней полости, которое бы обеспечило подъем вложенных труб. Если вязкость взять слишком большую, то к весу сооружения, которое мы должны поднимать, добавится существенная сила трения, которую нужно преодолеть за счет того же внутреннего давления.

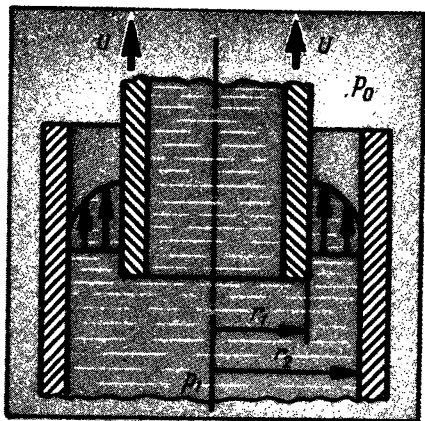


Рис. 3

Обратимся к рис. 3. На нем изображены два вложенных друг в друга отрезка трубы и профиль скорости течения жидкости в зазоре между ними. Течение жидкости обусловлено разностью внутреннего и внешнего давлений $p_1 - p_0$, а также движением внутренней трубы со скоростью U .

Профиль скорости, как известно из специальной литературы, определяется следующей функцией:

$$U(r) = \frac{p_1 - p_0}{2\mu l} [(r_2 - r)^2 - (r_2 - r_1)(r_2 - r)] + U \frac{r_2 - r}{r_2 - r_1},$$

где r — текущий радиус ($r_2 \geq r \geq r_1$), l — длина зазора, μ — вязкость раствора.

Потребуем, чтобы сила трения, приложенная со стороны жидкости к внутренней движущейся трубе, равнялась нулю. Это условие будет выполнено, если

$$\frac{dU}{dr} = 0 \quad \text{при} \quad r = r_1.$$

Отсюда мы получим связь между параметрами задачи:

$$(4) \quad \frac{p_1 - p_0}{2\mu l} (r_2 - r_1) = \frac{U}{r_2 - r_1}.$$

Величина $r_2 - r_1$ представляет собой технологический зазор между трубами. Разность давлений $p_1 - p_0$ определяется площадью и весом внутренней трубы. Эти величины заданы самой конструкцией. А вот вязкость жидкости μ и отчасти скорость подъема мы можем выбирать сами в широком диапазоне.

Из уравнения (4) найдем

$$U\mu = \frac{p_1 - p_0}{2l} (r_2 - r_1)^2.$$

Вязкость глинистых растворов меняется на несколько порядков при изменении скорости сдвига $U/(r_2 - r_1)$. Поэтому всегда представляется возможность выбрать скорость такой, чтобы условие (4) было выполнено. При этом жидкость в своем движении не будет обгонять движение трубы и тормозить ее движение.

Анализируя формулу (4), можно понять, почему, используя минеральное масло в телескопических подъемниках, приходится плотно подгонять одну трубу к другой. Для примера рассмотрим случай

$$U = 0,1 \text{ м/с}, \quad \mu = 0,1 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2, \\ l = 1 \text{ м}, \quad p_1 - p_0 = 10^4 \text{ Н/м}^2.$$

При этом получим

$$r_2 - r_1 \approx 1,4 \text{ мм.}$$

Рассмотрим теперь давление и усилия на разрыв, возникающие в трубе. Так как это вопросы сопротивления материалов, а не гидродинамики, мы, не останавливаясь на них подробно, укажем только пути их решения.

Поскольку бетон, даже армированный, плохо выдерживает усилия на разрыв, трубы должны быть стальные, а бетонные секции могут быть уложены уже после подъема очередной секции труб. Поскольку

подъемный кран будет подниматься вместе с трубами, высота сооружения не усложняет ведения монтажных работ.

Высота и вес сооружения приведут к большому гидростатическому давлению жидкости и к большим усилиям на разрыв в трубе, которая лежит в основании сооружения. Чтобы уменьшить эти усилия, нужно осуществлять подъем по секциям.

Внутренние трубы фиксируются друг относительно друга. После подъема на высоту одной секции смежная пара фиксируется относительно внешней, глинистый раствор выпускается из нижней секции. Затем на высоте секции устанавливается заглушка и сюда подводится глинистый раствор по тонким трубам, для которых давление в 50—100 атм не будет предельным.

Такой порядок монтажа позволяет избежать большого давления в нижней трубе, имеющей максимальный диаметр.

ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ

Кроме силы тяжести, в некоторых случаях нужно учитывать силу поверхностного натяжения. Каждая частица жидкости притягивается со всех сторон соседними частицами. Частицы, находящиеся на поверхности жидкости, находятся в других условиях. Отсутствие сил притяжения со стороны воздуха компенсируется силами поверхностного натяжения. Наличие таких сил можно проиллюстрировать следующим опытом.

Возьмите тонкую швейную иголку и потрите ее пальцами. Кушечек промокательной бумаги положите на воду, а сверху опустите иголку. Через некоторое время бу-

мага пропитается водой и утонет, а иглолка останется на поверхности воды. При этом хорошо будет видно углубление в воде, которое она образует. Именно это явление используют водяные насекомые — водомеры, быстро бегающие по поверхности прудов.

Поскольку силы поверхностного натяжения прямо пропорциональны кривизне мениска, они в наибольшей степени проявляются в капиллярах, т. е. очень тонких трубках. Причем в зависимости от того, смачивается или не смачивается материал капилляра, жидкость будет либо подниматься, либо опускаться по капилляру. По тонким капиллярам в стволах деревьев вода поднимается на десятки метров вверх, снабжая водой самые верхние листья.

Если у вас есть мелкое ситечко для разлики чая, вы можете проделать и другой опыт. Смочите ситечко подсолнечным маслом. Стряхните его, чтобы масло не затягивало ячейки. А теперь налейте в ситечко немного воды. Вода останется в ситечке. Свойство сита не пропускать воду используется при заливке бензина в бак машины. Бензин хорошо смачивает медное ситечко и свободно протекает, а вода обладает отталкивающими свойствами, и поверхностное натяжение задерживает воду в ситечке. Давление в пузырьках газа в газированной воде тоже удерживается силами поверхностного натяжения.

ГИДРОСТАТИКА В НЕВЕСОМОСТИ

Как поведет себя жидкость, если мы захотим приготовить пищу на огне в невесомости? Читатель, конечно, знает, что открытое пламя в условиях невесомости быстро

гаснет. В отсутствие силы тяжести около огня отсутствует конвективное течение, к пламени не будет поступать кислород и, следовательно, горение прекратится. Но можно попытаться вскипятить воду на электрической плитке, для которой не нужен кислород. Легко понять, что пары воды вытолкнут всю воду через отверстие, предназначенное для выхода пара. Таким образом, приготовление пищи в условиях невесомости представляет собой довольно сложную проблему. Пока что космонавты вынуждены пользоваться тюбиками с пастообразной пищей.

Конечно, вскипятить воду на космическом корабле никто и не пытался. Однако на одной из американских космических станций произошел очень похожий процесс. Там был установлен сосуд Дьюара с жидким гелием, предназначенным для охлаждения сверхпроводящего электромагнита. В условиях земного притяжения пар в сосуде Дьюара поднимается к поверхности и выходит через отверстие. (Если отверстие закрыть, то сосуд разорвется от давления пара.) Пока гелий весь не испарится, температура в сосуде не поднимется выше 4 К. Хорошая теплоизоляция, обеспечиваемая сосудом Дьюара, позволяет достаточно долго хранить гелий. Иначе проходит процесс кипения гелия в условиях невесомости. На американской космической станции пары вытолкнули гелий через отверстие, предназначенное для выхода пара, и сосуд быстро опорожнился.

Невесомость, чистый вакуум, плотный поток солнечной энергии, представляемые космическими лабораториями, — все это идеальные условия для некоторых технологических процессов.

Это прежде всего получение сверхчистых материалов. Зачем нужны такие материалы? Исследования показали, что многие привычные нам материалы резко меняют свои физические свойства, когда из них удаляются малые примеси.

Для примера укажем, что обычный алюминий после глубокой очистки (количество примесей не более единицы на 10 тысяч объема) приобретает аномально высокую электропроводность (в 1000 раз больше обычной) при температуре жидкого водорода.

Еще более чувствительны к примесям полупроводниковые материалы, применяемые в электронной технике. Для очистки материалов применяют либо зонную плавку, либо вакуумную переплавку. В первом случае примеси вытесняются из зоны кристаллизации в жидкую зону. Во втором случае примеси диффундируют по расплаву из объема на поверхность и рассеиваются в вакууме.

И в том и в другом случае требуется удерживать материал в жидкой высокотемпературной фазе, при которой материалы особенно агрессивны. Таким образом, тигель или ковш, в котором удерживается очищаемый материал, всегда будет вносить примеси. Чтобы этого избежать, приходится тигель охлаждать, чтобы на его стенках образовался твердый слой переплавляемого материала, так называемый гарнисаж.

Таким образом, процесс очистки происходит в условиях огромного теплового потока. А если учесть, что подогрев осуществляется самой дорогой формой энергии — электромагнитным излучением, то понятна сложность всего технологического процесса.

Иное дело в космической лаборатории. Сфокусированный солнечный луч позволяет нагреть материал до 6000 °С. Естественный вакуум служит и надежным теплоизолятором, и бесконечной емкостью для примесей. И никакого тигля! Его функцию может выполнять электромагнитное поле, которое будет и дозировать, и транспортировать жидкие объемы.

Отсутствие конвективного перемешивания в невесомости делает более глубокой очистку при зонной плавке.

РАВНОВЕСИЕ КОРАБЛЕЙ

Со времен Архимеда известно, что тело будет плавать, если вес вытесненной им жидкости равен весу самого тела. Круглое бревно плавает на поверхности воды в полном соответствии с этим законом. Не будет нарушен закон Архимеда и в том случае, если вы сядете на это бревно. Сила Архимеда равна общему весу, и вам, казалось бы, можно плыть и плыть. Но при самом небольшом возмущении бревно вместе с вами перевернется, и вы окажетесь под водой. И то обстоятельство, что закон Архимеда не нарушался, будет слабым для вас утешением. Отсюда следует, что для плавания, кроме условия, открытого Архимедом, нужны еще условия устойчивости равновесия сил тяжести и сил Архимеда.

Эти условия легче всего понять, рассмотрев, как плавает в воде железная лопата с деревянным черенком (рис. 4). Лопата погружается в воду до тех пор, пока вес вытесненной воды не сравняется с ее весом. Причем архимедова сила приложена к черенку, а равнодействующая сила тяжести — к лопате. Это обстоятельство обуславливает

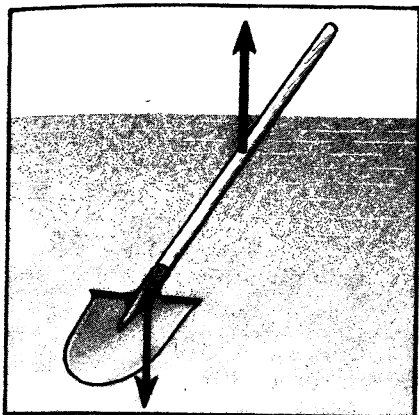


Рис. 4

вертикальное положение лопаты в воде. В том случае, если волна вызовет отклонение лопаты от вертикального положения, возникнет момент, который возвратит лопату в прежнее положение.

Таким образом, если центр тяжести тела будет ниже центра тяжести вытесненного объема жидкости, то тело будет находиться в устойчивом равновесии. На кораблях это условие обеспечивают низким расположением двигателей и грузов. На яхтах, у которых, кроме всего, нужно уравнивать момент силы, приложенной к парусу, ставят тяжелый, низкорасположенный киль. На парусных судах, у которых нет тяжелых двигателей, днище заливают цементом. Размещение груза по объему подводной лодки также проводится с учетом условия устойчивости.

Для кораблей, плавающих по поверхности воды, есть еще один способ обеспечения устойчивости плавания. Его используют с древнейших времен полинезийские рыбаки в своих конструкциях парусных лодок, которые известны как катамараны. Водоизмещающий балансир, отнесенный в сторону от

корпуса лодки, обеспечивает устойчивость катамарана. Условия устойчивости катамарана такие же, как и для автомобиля на широко расставленных колесах.

По рекам и озерам удобно плавать в лодках-плоскодонках. Широкое плоское дно, во-первых, обеспечивает малую глубину погружения лодки и облегчает плавание по мелководью, и, во-вторых, обеспечивает хорошую устойчивость лодки. При наклонном положении такой лодки вытесненный ею объем и, следовательно, точка приложения архимедовой силы смещаются в сторону наклона. В сочетании с силой тяжести эта сила вызовет восстанавливающий момент, и отпадет необходимость в низком расположении центра тяжести. Однако, если такую лодку штормовая волна повернет на бок, она опрокинется, в то время как яхта с тяжелым балластом поведет себя как «ванька-встанька».

Образом «ваньки-встаньки» воспользуемся для объяснения общих условий устойчивости кораблей, избегая введения сложной корабельной терминологии. У настоящего «ваньки-встаньки» центр тяжести расположен выше точки опоры, тем не менее он обладает устойчивостью. Каким требованиям должна удовлетворять игрушка, чтобы обладать устойчивостью?

Обратимся к рис. 5. Здесь G — вес, R — радиус опорной поверхности, r — расстояние от опорной точки до центра тяжести. При отклонении игрушки на малый угол α точка опоры сместится на величину $S = R\alpha$, а центр тяжести сместится в ту же сторону на $s = r\alpha$. Вес G , приложенный в центре тяжести, и равная весу сила реакции, приложенная в точке опоры, создают момент $M = G\alpha(R - r)$.

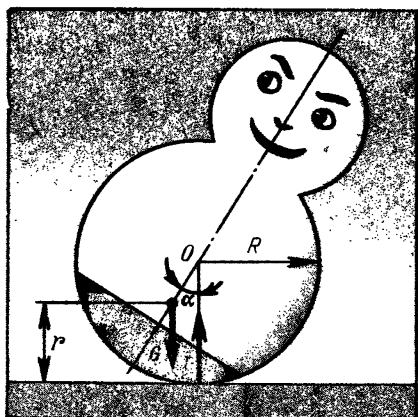


Рис. 5

Отсюда можно сразу сделать вывод: если центр тяжести находится выше центра вращения O ($r > R$), то возникающий при наклоне момент будет действовать в сторону наклона и увеличивать его. При условии $r < R$ этот момент будет восстанавливать исходное вертикальное положение.

Теперь перенесем эти выводы на корабль. Точка опоры для корабля — это точка приложения архимедовой силы (центр величины). При наклоне корабля эта точка смещается по некоторой кривой с радиусом кривизны R и центром кривизны (метацентром) O .

Расстояние от точки приложения архимедовой силы до центра тяжести в наших обозначениях равняется r . И если для игрушки r всегда положительная величина, то для судов, как, например, для яхты, r может быть отрицательна и тогда условие $M > 0$ будет всегда выполняться.

АЭРОСТАТИКА

В конструкциях, которые использует человек, применяются главным образом материалы, спо-

собные сопротивляться как силам растяжения, так и силам сжатия. Появление легких и прочных пленок позволяет поставить вопрос о новом конструкционном материале — пленке, наполненной сжатым воздухом. Сама пленка хорошо уравнивает силы растяжения, а заключенный в ней сжатый воздух способен сопротивляться силам сжатия.

Простое применение этому материалу уже нашлось в изготовлении домашней мебели: диванов, кресел, пуфов и т. д. Хорошо надутая трубка подойдет и для спинки кресла, и как несущая конструкция палатки. Нет сомнения, что пневматические кресла найдут особенно широкое распространение в авиации. Они легче алюминиевых кресел и, кроме того, обладают великолепными амортизационными свойствами.

Рассмотрим возможность изготовления колеса из такого материала. Возьмем кольцевую трубку диаметром d , накачаем ее воздухом под давлением p . Чтобы это кольцо сделать колесом, достаточно в середину его поместить втулку и соединить ее капроновой струной с кольцом.

Теперь нужно ответить на вопрос, какую нагрузку выдержит такое колесо. Сжатый воздух пытается растянуть его, нагрузка через спицы — сжать. Разрежем мысленно колесо горизонтальной плоскостью (рис. 6). Верхняя часть колеса поддерживается силой, равной

$$P = 2 \frac{\pi d^2}{4} p.$$

Здесь $\pi d^2/4$ — площадь поперечного сечения колеса, а коэффициент 2 возник в связи с тем, что плоскость два раза пересекает колесо.

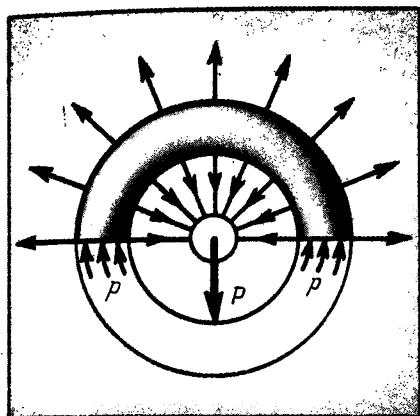


Рис. 6

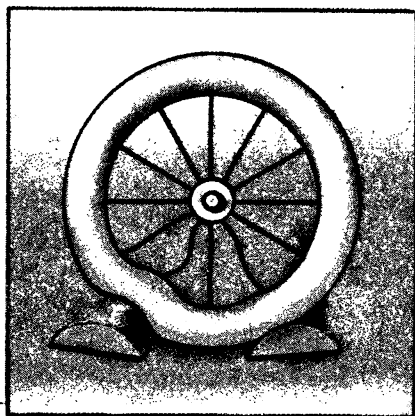


Рис. 7

Сила P и есть допустимая нагрузка, при которой колесо не сплющится.

Например, рассчитаем необходимое давление в трубках, которые могут быть использованы в качестве велосипедных колес без металлического обода. Пусть диаметр каждой трубки будет равен 4 см, а вес велосипедиста вместе с велосипедом — 900 Н. Учитывая, что поддерживающую силу создают два колеса, получаем следующее уравнение:

$$900 = 16pr,$$

откуда

$$p = 18 \text{ Н/см}^2.$$

При необходимости уменьшить давление нужно увеличить диаметр трубки. Так, при диаметре 8 см необходимое давление будет составлять всего $4,5 \text{ Н/см}^2$. Используя такие колеса и надувное кресло, можно изготовить детскую коляску, которая в спущенном состоянии уместится в дамской сумочке.

Движение колеса без обода по неровной поверхности имеет свои особенности. Рассмотрим, что произойдет с колесом, когда оно на-

едет на камень (рис. 7). В момент столкновения благодаря силам инерции нагрузка на колесо, превысит расчетный вес. Поэтому в месте касания колесо прогнется, обогнет камень, затем распрямится и поедет дальше. Как видим, для такого колеса не страшны неровности даже на большой скорости. Более того, чем больше скорость, тем менее заметно действие препятствия. Применение колес без жесткого обода позволяет конструировать транспортные средства без рессор.

К условию равновесия мы должны еще прибавить условие устойчивости колеса. Велосипедистам хорошо известно, что колесо склонно сворачиваться в восьмерку из-за потери устойчивости. Этого явления можно избежать, если втулку сделать пошире.

Исключительная легкость рассматриваемого колеса позволяет сконструировать одноколесный велосипед или мотоцикл. Чтобы человек мог разместиться внутри колеса, оно должно быть спаренным (из двух трубок) и иметь достаточно большой диаметр, например два метра. Коленчатый вал соединяет

между собой правую и левую втулки и служит одновременно рамой, к которой присоединяется мотор, бензобак и сиденье для водителя. При этом важно, чтобы центр масс мотоцикла занимал как можно более низкое положение.

Для тех, кто захочет изготовить такой мотоцикл своими руками, можно дать несколько практических советов. В качестве трубок можно использовать два куска пожарного шланга длиной шесть-семь метров каждый. Камеры можно изготовить из трех-четырех мотоциклетных камер, спицы — из теннисных струн. Камеры нужно накачивать до тех пор, пока оба колеса одновременно не перестанут проседать под вашим весом. И в то же время неравномерное давление должно вызывать прогиб одного из колес. Повороты осуществляются с помощью перемещения всего корпуса вправо или влево. Для этого сиденье должно быть достаточно широким.

Втулка такого колеса, конечно, не может быть сплошной прямой трубой, соединяющей правые спицы с левыми, как у велосипедного колеса. Она должна состоять из двух отдельных дисков — правого и левого, каждый из которых стягивает только правые и левые струны — спицы. Эти диски должны быть снабжены двумя рядами подшипников, в которые вставляются концы вала. Сам вал не может быть прямым и проходить вдоль оси колеса, так как именно в этом месте будет находиться человек. Поэтому вал должен иметь колено, опущенное вниз примерно на половину радиуса колеса. К этому колену будет крепиться и сиденье для пассажира, и механизм привода, который может быть педальным или моторным.

Крутящий момент с помощью цепной передачи должен передаваться к одному или обоим дискам втулки, которые и передадут момент колесу. Наличие такого момента, приложенного к колесу, и противоположного момента, приложенного к валу, приведет к повороту колена, в результате чего центр масс человека, сидящего на валу, сместится и будет проходить впереди точки опоры колеса. Благодаря этому колесо начнет катиться вперед. При торможении центр тяжести перемещается назад и появляется тормозящий момент.

Легко заметить некоторую специфику транспортного устройства. При большом тормозящем или разгонном моменте коленчатый вал может повернуться больше чем на девяносто градусов. При повороте на сто восемьдесят градусов водитель окажется перевернутым вниз головой, а тормозящий или разгонный момент обратится в нуль. Поскольку в таком положении центр масс будет располагаться выше оси вращения, человек будет кувыркаться, как опрокинутый маятник. Такое поведение может возникнуть при попытке спуска или подъема по горе большой крутизны или при сильном разгоне и торможении.

Проведем здесь оценку допустимой крутизны склонов и ускорений, при которых водитель не будет кувыркаться. Максимальный тормозящий и разгонный моменты возникают в положении, когда коленчатый вал из вертикального положения повернется в горизонтальное, т. е. на девяносто градусов. Положение центра масс будем считать смещенным от оси вращения на половину радиуса. Тогда указанный момент будет равняться $M = PR/2$, где P — вес экипажа,

R — радиус колеса. Этот момент может вызывать ускоренное движение или торможение транспортного устройства. Пренебрегая весом колеса по сравнению с весом человека и механизма, который мы обозначили буквой P , можем написать для момента, вызванного силами инерции:

$$M_1 = aPR/g.$$

Здесь a — ускорение центра масс, g — ускорение свободного падения, равное 9,8 м/с.

Так как $M \geq M_1$, для допустимого ускорения или разгона мы получим ограничение $a \leq g/2$. Отсюда следует, что для разгона до скорости 72 км/ч или для торможения до этой скорости путь должен превосходить 50 м. Нужно сказать, что такое ограничение не является чрезмерным. Педальная машина вообще не может разогнаться с таким ускорением. Но и в машине с достаточно мощным мотором коэффициент трения проскальзывающего колеса не позволит достичь указанного ускорения.

Аналогичное положение возникает при езде по крутым склонам. При указанном расположении центра масс нельзя выехать и спуститься без разгона на гору круче тридцати градусов. Но такой крутизны склон не может преодолеть и автомобиль по той же причине малого коэффициента трения скольжения колес по грунту.

Смещение центра масс на половину радиуса колеса можно осуществить только при большом диаметре колеса и только для моторного варианта, так как в этом случае мотор и бензобак можно расположить под сидением близко к поверхности земли. В педальной же машине центр масс можно расположить только на одну четверть ра-

диуса ниже оси колеса. В этом случае предельным склоном будет склон с углом наклона пятнадцать градусов. Подчеркнем, что речь идет о длинном склоне, который преодолевается или с которого спускаются без разгона. Короткий склон может преодолеваться с разгоном, и поэтому крутизна его может быть больше.

Интересно посмотреть, что произойдет при столкновении описываемого мотоцикла с препятствием. Прежде всего водитель, как маятник, повернется вокруг оси, занимая горизонтальное положение ногами вперед (а не головой, как на обычном мотоцикле). Затем колесо начнет сплющиваться, амортизируя удар. Если препятствие окажется ниже оси колеса, как, например, легковой автомобиль, то мотоцикл может переехать его и покатиться дальше.

КОРАБЛЬ ПУСТЫНИ

Читатель, конечно, согласится, что если верблюд и может называться кораблем пустыни, то только кораблем устаревшей конструкции. В наш век животные все больше уступают место машинам. Однако сами машины пока крепко привязаны к узким полоскам земли, называемым дорогами. Наверное, именно этим объясняется то высокое, с которым верблюды проходят мимо увязших в песке машин. Мы, люди, можем понять и простить презрение верблюда к машинам, но мы не можем себе простить, что творению наших рук так далеко до творения природы.

Описанный выше мотоцикл может послужить прототипом нового транспортного средства, способного двигаться по пустыням (рис. 8). Надувные колеса для этих

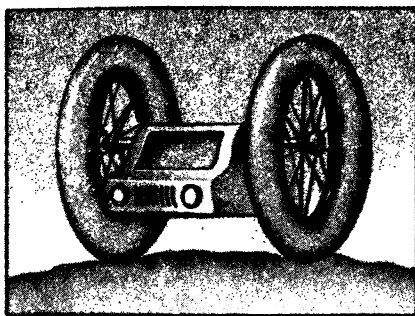


Рис. 8

целей должны быть, конечно, выше, большей толщины и для большей устойчивости расставлены пошире.

Для примера рассмотрим транспортное средство, опирающееся на два колеса высотой пять метров и шириной шин один метр. Пусть его общий вес будет равен двум тоннам (это может быть многоместный автобус или грузовой автомобиль).

Необходимое давление в шинах

$$p = 2 \cdot 10^4 / (\pi d^2) \approx 7000 \text{ Н/м}^2 = 0,7 \text{ Н/см}^2.$$

Такое же давление будут оказывать колеса на песок. Эта величина примерно в пять раз меньше давления, создаваемого человеком, и во много раз меньше давления под копытами верблюдов. В этом отношении нам удалось их превзойти! К малому удельному давлению добавятся другие достоинства колес, о которых мы говорили выше. Все это обеспечит высокую проходимость рассматриваемого транспортного средства.

Описанный экипаж, особенно если его оборудовать установкой кондиционирования воздуха и холодильником с прохладительными напитками, по достоинству будет носить гордое имя корабля пустыни современной конструкции.

АЭРОСТАТИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ ГАЗА

Природный газ при атмосферном давлении легче воздуха. Это обстоятельство наводит на мысль использовать аэростаты, наполненные природным газом, для транспортировки этого же газа. При больших размерах таких аэростатов (с объемом в несколько миллионов кубометров) можно обеспечить производительность транспортной системы в сотни миллиардов кубометров в год.

Однако этот способ имеет свои недостатки. Нарушение аэростатического равновесия в полете, большие ветровые нагрузки, опасность загорания от молний и статического электричества — все это делает аэростат малонадежным средством транспорта. Тем не менее аэростатические свойства природного газа и дешевый пленочный материал можно использовать для создания иной транспортной системы, свободной от указанных недостатков.

Представьте себе, что мы собрали все аэростаты и установили их в одну цепочку от месторождения газа до места его потребления. Соединив аэростаты открытыми концами друг с другом, получим своеобразный газопровод. Сами же аэростаты будут неподвижно закреплены на высоте 100—200 м с помощью косых растяжек. При равной производительности на аэростатический газопровод расходуется всего лишь в два раза больше пленки, чем на отдельные аэростаты, предназначенные для транспортировки газа.

Увеличение расхода пленки полностью окупается повышением надежности такой транспортной системы.

Полезно привести формулы и расчет такого не совсем обычного трубопроводного транспорта.

Введем следующие обозначения: $\Delta p = p_2 - p_1$ — разность давлений на входном p_2 и выходном p_1 участках трубопровода, L и d — длина и диаметр трубопровода соответственно, U_{cp} — средняя скорость движения газа, ρ — его плотность.

Эти величины связаны между собой формулой

$$(5) \quad \Delta p = \frac{\lambda L \rho U_{cp}^2}{2d},$$

где λ — безразмерный коэффициент сопротивления, определяемый экспериментальным путем.

Откуда взять значение этого коэффициента, если газопровода такого большого размера, какой нас интересует, еще никто не изготавливал? Ценность формулы (5) состоит в том, что коэффициент λ может быть определен на трубах другого диаметра и при другой скорости течения газа. Это представляет нам возможность воспользоваться существующими экспериментальными данными.

Вычислим из формулы (5) скорость и массу транспортируемого в единицу времени газа

$$U_{cp} = \sqrt{\frac{2d\Delta p}{\lambda L \rho}},$$

$$G = \frac{\pi d^2}{4} \rho U_{cp} = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{2d^5 \Delta p \rho}{\lambda L}}.$$

В полученной формуле обращает на себя внимание большая степень зависимости массы G от диаметра трубопровода d .

Действительно, увеличение диаметра всего в 4 раза при сохранении прочих равных условий приводит к 32-кратному увеличению производительности газопровода. Именно по пути увеличения диа-

метра труб шла до сих пор газовая промышленность. Однако дальнейшее увеличение диаметра по сравнению с достигнутым размером, равным 1440 мм, вызывает большие трудности при изготовлении труб и при их укладке. Другое дело в воздухе. Аэростатический газопровод можно спроектировать на очень большую производительность.

Для примера рассмотрим газопровод диаметром $d = 16$ м. Из условий прочности пленки мы выберем очень малый перепад давления $\Delta p = 0,05$ атм = 5000 Н/м^2 . При таком давлении плотность природного газа будет равняться приблизительно $0,5 \text{ кг/м}^3$. Расстояние между насосными станциями, которые обеспечивают заданный перепад давления, примем равным $L = 200 \text{ км} = 2 \cdot 10^5 \text{ м}$.

При таких технических данных газопровод способен перекачать в год 150 млрд м^3 газа. Это в пять раз больше, чем самый крупный газопровод Оренбург — западная граница СССР.

Аэростатический газопровод будет подвергаться действию большой ветровой нагрузки, которая может вызывать колебания и, следовательно, быстрый износ оболочки или в крайнем случае прижмет оболочку к земле и нарушит ее целостность.

Действию ветра можно воспрепятствовать косыми, предварительными натянутыми растяжками. Вычислим, какое максимальное натяжение можно допустить в растяжках, не вызвав прижатия газопровода к земле. Природный газ легче воздуха примерно на $0,5 \text{ кг}$ на кубический метр объема. Следовательно, погонный метр газопровода обладает аэростатической силой

$$P = \frac{\pi d^2}{4} 5 \approx 1000 \text{ Н/м}.$$

Внутреннее давление 5000 Н/м^2 создает подъемную силу

$$P = 2 \frac{\pi d^2}{4} \cdot 5000 \approx 2 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Если длину пролета между опорами примем равной 500 м, то эта подъемная сила, будучи распределенной на всю длину, даст на каждый метр дополнительную силу

$$p_1 = 4 \cdot 10^3 \text{ Н/м.}$$

Угол наклона растяжек примем равным 45° . В этом случае их натяжение в пересчете на метр длины газопровода будет равняться

$$p_2 = \frac{5}{\sqrt{2}} \cdot 10^3 \text{ Н/м.}$$

Растяжки не позволят сместиться газопроводу под действием бокового ветра до такой скорости, при которой давление ветра не превосходит

$$p_3 = 2,5 \cdot 10^3 \text{ Н/м.}$$

Теперь мы можем определить предельную скорость ветра. Как известно, сила давления ветра связана со скоростью следующим образом:

$$p_3 = \frac{\xi}{2} \rho U^2 d.$$

Здесь ξ — экспериментальный коэффициент, равный в нашем случае 0,3, ρ — плотность воздуха. Отсюда найдем

$$U = \sqrt{\frac{2p_3}{\xi \rho d}} \approx 28 \text{ м/с.}$$

Таким образом, только ураганный ветер, превосходящий скорость 100 км/ч, способен наклонить аэростатический газопровод.

И тем не менее недостаточная надежность такого газопровода является его главным недостатком. Хотя и редко, но и ветер может дуть с большей, чем 100 км/ч,

скоростью, может вспыхнуть пожар, да и срок службы пленки невелик. И дело даже не в стоимости восстановления поврежденных участков. Пленка дешевая, и ее всегда можно заменить новой. Дело в надежности обеспечения потребителя газом. Однако и тут можно найти выход. В европейской части СССР имеется большое число истощенных месторождений газа, которые могут служить отличными хранилищами и распределителями газа. Рассчитанный нами газопровод, даже если он будет работать только 180 дней в году, способен перекачать 75 млрд м^3 газа и заполнить огромное хранилище, из которого газ по уже лежащим в земле трубам будет транспортироваться непрерывно и в нужном количестве всем потребителям.

Малая стоимость, малая металлоемкость аэростатического газопровода делает его очень привлекательным, несмотря на наличие некоторых недостатков.

Для транспортировки природного газа вопрос надежности играет большую роль. Но можно указать такое применение пневмоарочного пленочного трубопровода, для которого этот критерий не играет особой роли. Речь пойдет о принудительной вентиляции больших воздушных бассейнов.

Наиболее дешевый способ добычи угля, руды — открытый, когда полезные ископаемые добываются высокопроизводительными роторными и шаговыми экскаваторами непосредственно с поверхности земли. И вскрышные работы, и последующая добыча приводят к образованию огромного и глубокого котлована — карьера. В летнее время года или при наличии ветра естественная циркуляция обеспечивает удовлетворительную вентиля-

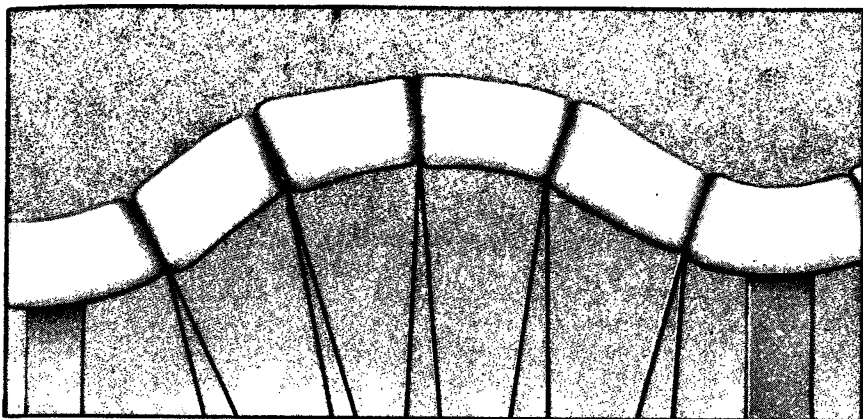


Рис. 9

цию карьера. Иное положение складывается в безветренную зимнюю пору. Холодные массы воздуха опускаются вниз и остаются там на длительный срок в неподвижном состоянии. В это время карьер оказывается замкнутой ловушкой для всех газообразных отходов производственного процесса. Загрязненность воздуха достигает такой величины, что не только люди не выдерживают создавшихся условий, но и автомобильные двигатели перестают работать.

Вот здесь-то и может оказать неоценимую услугу пневмоарочный трубопровод (рис. 9). Один конец трубы находится за пределами карьера, а другой опускается на нижнюю отметку карьера. Даже не очень большой турбовентилятор, установленный на верхнем конце трубопровода, обеспечит полную вентиляцию карьера.

Аналогичная ситуация складывается в воздушных бассейнах городов, окруженных высокими горами. Выхлопные газы автомобилей, дым из заводских труб и другие отходы в течение длительного времени накапливаются в атмосфере

города, вызывая массовые респираторные заболевания. Это обстоятельство тем более нетерпимо, что рядом, всего 500—1000 м выше уровня города находится чистый воздух, спускающийся со снежных горных вершин. Сравнительно короткий пневмоарочный трубопровод, начинающийся на склоне горы выше загрязненности, может снабдить свежим воздухом не только учреждения и предприятия, но и вытеснить грязный воздух с улиц и площадей города. Действительно, рассмотренный выше трубопровод диаметром 16 метров способен перекачать в сутки 0,4 млрд м³, т. е. заполнить площадь 20×20 км² слоем высотой 10 м. А поскольку совсем необязательно полную смену воздуха осуществлять в течение одних суток, можно обойтись трубопроводом меньшего диаметра.

Читатель может задаться вопросом, почему для вентиляции города не воспользоваться обычным стальным трубопроводом.

Дело в том, что для передачи воздуха по трубе 1440 мм потребуются его первоначально сжать до давления в 70—100 атм. Это требует строительства огромной

насосной станции мощностью в несколько миллионов кВт, в то время как по аэростатическому трубопроводу воздух транспортируется практически при атмосферном давлении.

ВЕРТОСТАТ

Таким странным именем называют гибрид, который получается из объединения дирижабля (или аэростата) с вертолетом.

Как возникла идея вертостата?

Человек всегда хотел оторваться от земли. И его первые успешные попытки связаны с аппаратами легче воздуха. Сначала шары братьев Монгольфье, наполненные горячим воздухом, а затем дирижабли с водородом позволили человеку осуществить свою многовековую мечту.

Появление в последние годы легких и прочных пленок послужило толчком к развитию спортивного воздухоплавания на шарах Монгольфье. Вместо плетеной корзинки нынешние спортсмены используют миниавтомобиль. В полете он служит гондолой и источником горячего воздуха, а на земле позволяет транспортировать шар в сложенном виде.

А дирижабли после многих крупных и трагических катастроф уступили свое место аппаратам тяжелее воздуха — самолетам, а позднее вертолетам.

Дирижабль обладает некоторыми органически присущими ему недостатками, которые обусловили его судьбу. Первый — это большие размеры, вызванные малой удельной грузоподъемностью. Отсюда большие ветровые нагрузки, малая прочность, которые в сочетании привели к гибели многих дирижаблей. Второй — это аэростатическая неустойчивость, которая за-

ставляет возить с собой большое количество балласта и тем самым уменьшает полезную грузоподъемность. И третий недостаток, послуживший причиной гибели многих дирижаблей, наполненных водородом, — это их пожароопасность.

Что касается последнего недостатка, то в наше время появилась возможность заменить горючий газ — водород — негорючим гелием, так как объемы его добычи сильно возросли, а цена стала меньше.

Объединение дирижабля с вертолетом позволяет уменьшить его размеры и снять проблемы аэростатической неустойчивости. По сравнению с вертолетом такая система позволяет увеличить грузоподъемность и экономичность аппарата. Существует несколько различных компоновок вертостата. Мы сейчас рассмотрим еще одну (рис. 10), которая обладает рядом преимуществ.

Подъемную силу, создаваемую винтом вертолета, можно представить в виде

$$P_v = \Delta p \pi R_v^2,$$

где Δp — разность давления, сверху и снизу от плоскости вращения несущего винта, а R_v — радиус винта. С достаточной степенью приближения можно принять, что на верхней поверхности тороидального аэростата в пределах от $r = R_v$ до $r = R_a$ (см. рис. 10) будет поддерживаться пониженный уровень внешнего давления на величину $0,5\Delta p$. Это давление на стенках аэростата создаст дополнительную подъемную силу, равную

$$P_d = 0,5\Delta p \pi (R_a^2 - R_v^2).$$

Общую динамическую подъемную силу можно представить следующим образом:

$$P_{\text{об}} = (1 + k)P_v,$$

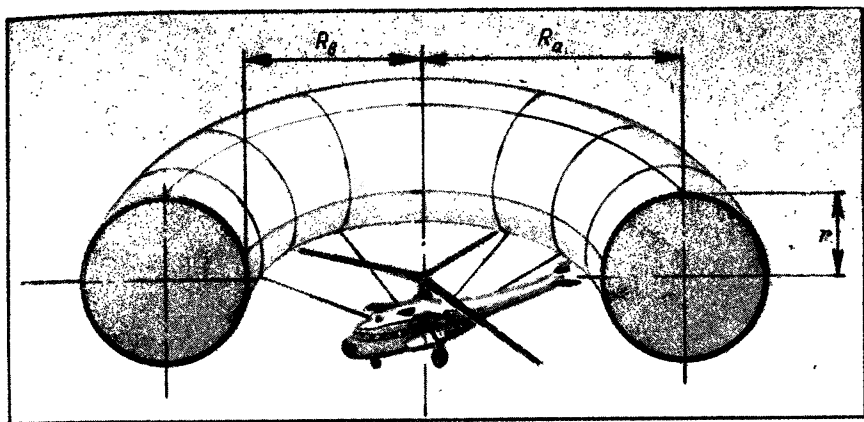


Рис. 10

где

$$k = 0,5 \left[\left(\frac{R_a}{R_b} \right)^2 - 1 \right].$$

Так как $k = (P_{об} - P_v) / P_v$, то коэффициент k определяет относительное увеличение подъемной силы за счет взаимодействия несущего винта с оболочкой.

Полная подъемная сила будет складываться из $P_{об}$ и аэростатической подъемной силы P_a , равной

$$P_a = (q_b - q_r) V g,$$

где q_b , q_r — плотности воздуха и гелия, а V — объем аэростата,

$$V = 2\pi^2 R_a r^2.$$

Радиус r можно выбрать, например, из условия, что подъемная сила аэростата уравновешивает собственный вес конструкции.

Для примера рассмотрим советский вертолет МИ-6. Его собственная масса равняется $G = 28\,500$ кг, а радиус несущего винта равен $R_b = 17,5$ м.

Получим уравнение для радиуса r :

$$28\,500 = 2\pi^2 (q_b - q_r) (R_b + r) r^2.$$

С учетом дополнительного веса оболочки аэростата можно принять

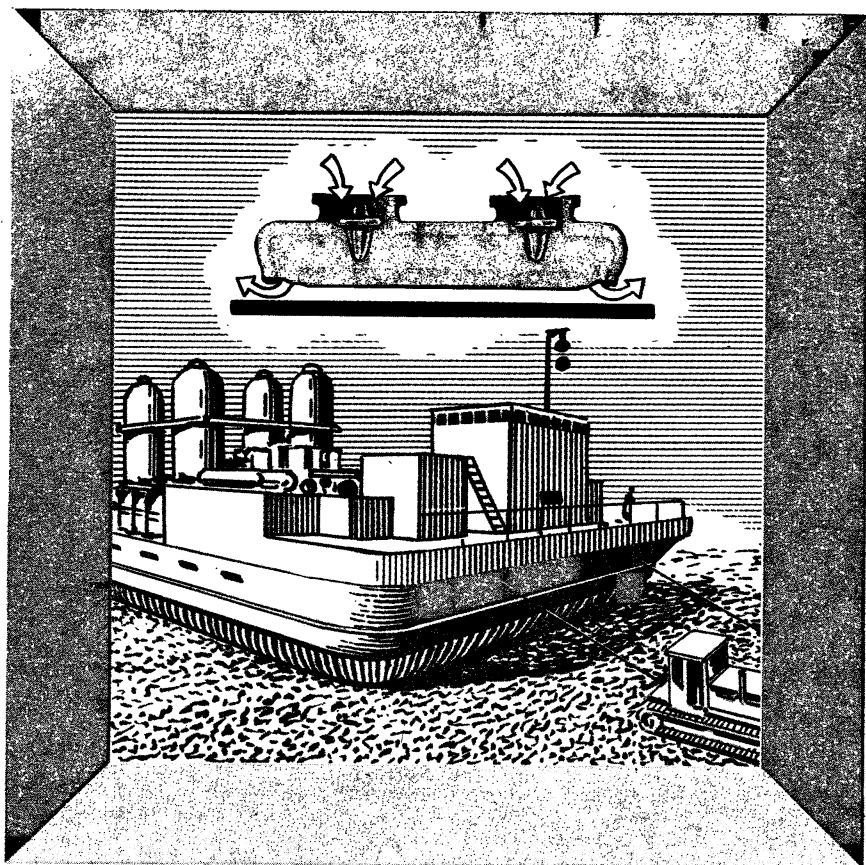
$r = 7,30$ м. Так как $R_a = R_b + r = 24,8$, то $k = 1,5$.

Несущий винт вертолета без оболочки создает подъемную силу, равную $P_v = 400$ кН.

Благодаря взаимодействию с оболочкой эта сила достигает значения $P_{об} = 600$ кН.

И поскольку вес аппарата уравновешен аэростатической подъемной силой, вся эта сила равняется полезной грузоподъемности, которая в этом случае увеличивается в 5 раз. Сравним теперь эти параметры с параметрами дирижабля.

Объем дирижабля такой же грузоподъемности будет равняться 130 тыс. m^3 , в то время как объем тороидальной оболочки вертостата всего 26 тыс. m^3 . Отсюда, как следствие, получаем не только уменьшение объема рабочего газа, но и уменьшение ветровой нагрузки, уменьшение веса оболочки, увеличение жесткости конструкции, т. е. улучшение всех параметров, которые характеризуют дирижабль. Что касается аэростатической устойчивости, то при наличии винта с несущей и регулируемой силой в пределах от 0 до 600 кН этот вопрос даже не возникает.



ВОЗДУШНАЯ ПОДУШКА

КАК ПЕРЕДВИНУТЬ ХОЛОДИЛЬНИК?

Чтобы передвинуть холодильник, несгораемый шкаф, да еще при этом не поцарапать пол, требуются большие усилия.

В печати появилось сообщение о том, что некоторые зарубежные фирмы начали выпускать холодильники, которые могут перемещаться с помощью домашнего пылесоса. Чтобы понять, как это делается, позна-

комимся с устройством, именуемым воздушной подушкой.

На рис. 11 изображена схема такой подушки. Вентилятор накачивает воздух в некоторый объем — камеру, давление в которой и создает поддерживающую силу. Боковые стенки камеры образуются гибкой завесой различной конструкции.

Для судов на воздушной подушке продольные стенки камеры иногда выполняют в виде жестких килей — скегов, которые частично по-

гружаются в воду. Чем меньше утечки воздуха из «подушки», тем меньшая мощность требуется для ее образования. Но это обстоятельство противоречит условиям движения, по которым гибкая завеса не должна касаться поверхности, чтобы не происходило ее разрушение.

С холодильником это условие легко выполняется. Воздушная камера под холодильником по линии контакта с полом уплотняется резиновой прокладкой. Камера снабжается патрубком, который позволяет подключить пылесос со стороны нагнетания. Работая пылесос создает давление, которое частично или полностью уравнивает вес холодильника. При этом резиновый манжет уплотнения может немного оторваться от пола, но производительность компрессора пылесоса будет достаточной, чтобы компенсировать возникающие при этом утечки воздуха из камеры. Трение о пол при этом практически исчезает, и для перемещения холодильника требуется очень малое усилие. Именно гладкая поверхность, по которой осуществляется движение, позволяет экономить на мощности компрессора.

Вызывает удивление, что для подъема холодильника требуется ничтожное давление.

Произведем простой расчет. Вес холодильника положим равным 50 кгс, или в современных единицах 500 Н, а площадь воздушной камеры 0,25 м². Из этих данных найдем необходимое давление $p = 2000 \text{ Н/м}^2$, или в более привычных единицах $p = 0,02 \text{ атм}$. Заметим, что это примерно столько, сколько требуется, чтобы надуть воздушный шарик.

Таким же экономичным может быть внутрицеховой транспорт на воздушной подушке, который позволяет перемещать тяжелые грузы по территории цеха. Однако когда нужно двигаться по земле, промежуток между гибкой завесой приходится увеличивать. Это приводит к утечке воздуха из камеры. Для поддержания требуемого давления приходится нагнетать много воздуха и расходовать много энергии.

Вместо упругой завесы можно использовать струи воздуха, которые хотя и требуют дополнительной мощности, но зато не боятся непосредственного контакта с землей или водой (рис. 12). Под днищем

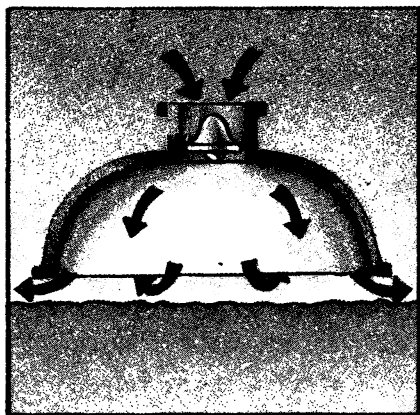


Рис. 11

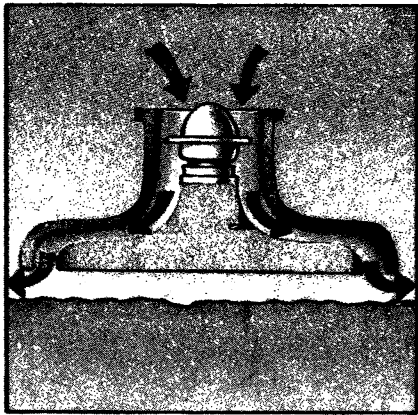


Рис. 12

аппарата, как и обычно, создается область повышенного давления, которая и поддерживает аппарат в воздухе. На конструкцию аппарата на воздушной подушке по сопловой схеме советский изобретатель Н. А. Косоруков еще в 1950 г. получил авторское свидетельство.

Сопловая схема позволила создавать аппараты, которые отрываются от поверхности на тридцать и более сантиметров.

Так как этим устройствам посвящено много работ, часть которых упоминается в списке, приведенном в конце книги, то мы остановимся только на новых возможных применениях.

ЛЫЖИ СКОЛЬЗЯТ ПО ВОЗДУХУ

В описанном случае компрессор, подающий воздух, должен двигаться вместе с транспортируемым предметом. Возможны и другие способы использования воздушной смазки, когда транспортируемые предметы, например ящики, чемоданы, тюки, мешки, не связаны с компрессором, а воздух подается снизу через щели в поверхности, по

которой эти предметы скользят. Так можно делать транспортеры, предназначенные для перемещения грузов в аэропортах, на железнодорожных станциях, в складских помещениях.

Эту идею можно применить для постройки лыжного трамплина, который будет отличаться от трамплина со снежным покрытием не только возможностью круглогодичной работы, но и очень малым сопротивлением трения лыж о покрытие (рис. 13).

Конструкцию такого трамплина можно себе представить следующим образом. Пластиковое покрытие горы разгона должно иметь две неглубокие канавки — лыжни, по которым и будут скользить лыжи. При этом сама лыжня должна иметь перфорацию. Через эти отверстия снизу и должен поддуваться воздух. Что касается горы приземления, трение которой не влияет на дальность прыжка, то она может быть покрыта обычным пластиком, как это сделано, например, в Москве на Ленинских горах, где лыжники тренируются и летом.

Подсчитаем давление, которое оказывает лыжник на каждый

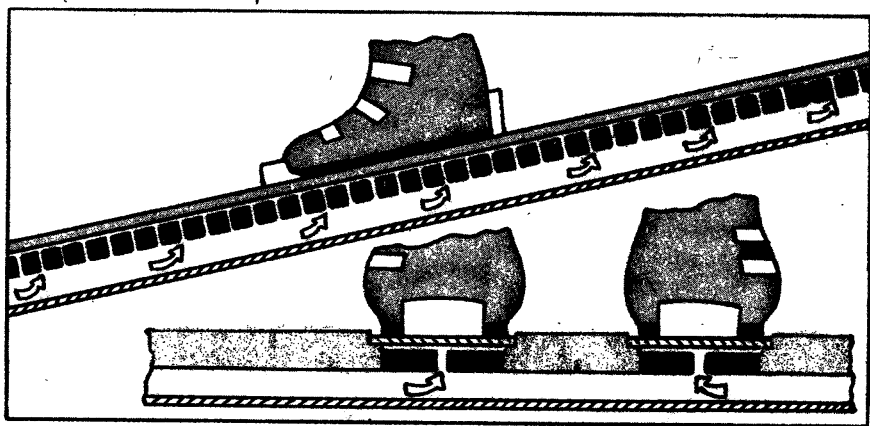


Рис. 13

квадратный сантиметр лыжи. Длина прыжковых лыж в среднем равна 2,5 м, ширина — 0,1 м. Вес лыжника с лыжами примем 750 Н. Тогда давление

$$p = \frac{750}{2 \cdot 2,5 \cdot 0,1} = 1500 \text{ Н/м}^2.$$

Как видно, для того чтобы оторвать спортсмена от лыжи, нужно создать под лыжами совсем небольшое давление, равное 0,015 атм. Однако при определении производительности необходимо учесть нестационарный характер процесса заполнения зазора воздухом.

Действительно, пока лыжа не накроет струи воздуха, давление в них будет равняться атмосферному. Следовательно, в первый момент, когда передний конец лыжи наедет на эти струи, они еще не будут обладать избыточным давлением и поддерживать лыжу. Лишь с течением времени воздушные струи заполнят зазор под лыжей и создадут в нем необходимое давление. Чтобы этот процесс становления был достаточно кратковременным, нужно, чтобы давление воздуха в подводящем трубопроводе значительно превосходило подсчитанное и обеспечивало быстрое заполнение воздухом зазора под лыжей.

Определим, какие поры должны быть в пластмассе и какой производительностью должна обладать воздушная система. Скорость лыжника примем равной 25 м/с; длину участка лыжи, на котором должен закончиться переходный процесс, равным 25 см; величину зазора под лыжами — 1,0 мм; ширину лыжи — 0,1 м.

Из этих данных находим объем, подлежащий заполнению:

$$V = 2 \cdot 0,25 \cdot 0,1 \cdot 0,001 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

Время заполнения определяется

отношением пути к скорости:

$$t = \frac{0,25}{25} = 0,01 \text{ с.}$$

Следовательно, количество воздуха, которое необходимо подавать в одну секунду на участке одной лыжи длиной 25 см, равно

$$q = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{0,01} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с.}$$

На каждом квадратном метре это количество должно равняться

$$q = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 0,1} = 0,2 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Теперь мы можем определить общий расход воздуха через поры горы разгона, длину которой мы примем равной 50 м. При ширине лыж 0,1 м общая площадь лыжи равна

$$S = 50 \cdot 0,1 = 5 \text{ м}^2.$$

Значит, система подачи воздуха должна обеспечивать расход

$$Q = 0,20 \cdot 5 = 1,0 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Из этих расчетов следует, что для воздушной смазки трамплина не понадобится мощных технических средств.

Кроме возможности круглогодичной работы и малого трения, трамплин с воздушной смазкой обладает и еще одним достоинством, весьма важным в процессе обучения. Представьте себя на месте начинающего лыжника. Вы еще не умеете прыгать и поэтому рискуете сломать себе шею. Но если вы не будете прыгать, то никогда этому не научитесь. Выход из этого положения находят в том, что начинают прыгать с малого трамплина, с малой дальностью полета. Но ни в одном учебном центре нет набора все возрастающих трамплинов. Обычно ограничиваются двумя.

Регулируемая воздушная смазка позволяет заполнить этот пробел между трамплинами и обеспечить все возрастающую дальность полета.

ЭКОНОМИЧНЫЕ АППАРАТЫ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ

Проанализируем, из чего складывается мощность, необходимая для движения аппарата. Как известно, мощность компрессора пропорциональна произведению производительности на давление нагнетаемого воздуха. Для экономичности нужно иметь либо малое давление, либо малую производительность.

Малое давление требует больших размеров аппарата. Поэтому рассмотрим второй вариант. Расход воздуха существенно уменьшают гибкими завесами, расположенными по периметру аппарата. Очевидно, что если мы поставим несколько концентрически расположенных завес, то еще уменьшим утечку воздуха из-под днища аппарата. Для большей гибкости завес сделаем в них множество вертикальных надразов. В итоге получим сплошную щетку, разделяющую

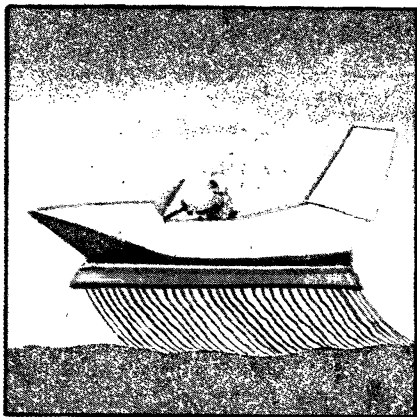


Рис. 14

аппарат и поверхность Земли (рис. 14). Такая щетка удовлетворяет одновременно двум противоречивым требованиям. Почти касаясь земли, она сильно замедляет течение воздуха и в то же время легко огибает всевозможные неровности поверхности. Расчеты показывают, что при такой подушке компрессор мощностью 30—50 кВт обеспечивает подъемную силу в 10 кН.

Кроме уменьшения мощности, щеточная воздушная подушка позволяет уменьшить размеры компрессоров, воздухопроводов и опорную площадь. По-видимому, в этом ее главное достоинство. Действительно, почему самолеты осуществляют посадку на колеса, а не на воздушную подушку? Разве у них не хватает для этого мощности? Оказывается, все дело в том, что для подвода воздуха от компрессоров к днищу требуются воздухопроводы большого сечения. Щетки на днище позволяют создать подушку высокого давления, при котором объемный расход воздуха мал и его можно подвести по трубам, спрятанным в крыльях. Уменьшая или полностью прекращая подачу воздуха, можно регулировать силу трения щеток о взлетную полосу. Воздушная подушка может оказаться более легкой и надежной, чем колесное шасси.

Чтобы лучше судить об эффективности воздушной подушки со щеточной завесой, выведем расчетные формулы и приведем некоторые примеры.

Длину прямоугольного аппарата обозначим L , а полуширину — l . Будем считать, что $L \gg l$. Предполагаем, что воздух подается в сплошную щель, расположенную по оси симметрии. Высоту щетины обозначим $h \ll l$. Течение воздуха

в такой подушке можно считать одномерным и удовлетворяющим уравнению

$$(6) \quad \frac{dp}{dx} = -\xi Q \frac{V^2}{2\Delta S}.$$

Здесь x — координата, направленная поперек аппарата, p — давление и Q — плотность воздуха, V — скорость, ΔS — расстояние между отдельными щетинками, ξ — коэффициент гидравлического сопротивления.

Запишем условие неизменности массового расхода воздуха Q :

$$\frac{2Lh_0V}{k} = Q.$$

Здесь k — коэффициент загромождения щетки. Исключая скорость из уравнения (6), получим

$$\frac{dp}{dx} = -\xi \frac{Q^2 k^2}{8L^2 h^2 Q \Delta S}.$$

Для рассматриваемого процесса медленного дросселирования воздуха через густую щетку уравнение состояния можно взять в виде

$$Q = \frac{Q_0 p}{p_0},$$

где Q_0 и p — параметры атмосферы. Тогда

$$2p \frac{dp}{dx} = -\xi \frac{Q^2 p_0 k^2}{4L^2 h^2 Q_0 \Delta S}.$$

Интегрируя это уравнение, получим

$$p^2(x) = -\xi \frac{Q^2 p_0 k^2 x}{4L^2 h^2 Q_0 \Delta S} + C.$$

Используя условия $p(0) = p$, $p(l) = p_0$, найдем константу C и расход Q :

$$C = p_0^2, \\ Q = \frac{2Lh}{k} \sqrt{\frac{Q_0 p_0 \Delta S (\chi^2 - 1)}{\xi l}},$$

где $\chi = p_1/p_0$.

С учетом этих значений констант функция давления может быть записана так:

$$p(x) = p_0 \sqrt{\chi^2 - (\chi^2 - 1) \frac{x}{l}}.$$

Несущая способность подушки вычисляется с помощью интеграла

$$P = 2L \int_0^l p(x) dx - 2Llp_0 = \\ = 2Llp_0 \left[\frac{2(\chi^2 + \chi + 1)}{\chi + 1} - 1 \right].$$

Мощность компрессора для малых давлений определяется произведением разности давления на объемный расход:

$$N = \frac{Qp_0}{Q_0} (\chi - 1).$$

Важными характеристиками являются мощность и расход, приходящийся на единицу веса аппарата:

$$n = \frac{N}{P} = \frac{3(\chi^2 - 1)h\sqrt{Q_0 p_0 \Delta S (\chi^2 - 1)}}{klQ_0 \sqrt{\xi l} (2\chi^2 - \chi - 1)}, \\ q = \frac{Q}{P} = \frac{nQ_0}{p_0(\chi - 1)}.$$

Для малых степеней сжатия удобно ввести малую величину $\varepsilon = \chi - 1$, квадратом которой можно пренебречь. Тогда приведенные ранее формулы приобретают вид

$$n = \frac{2}{k} \left(\frac{h}{l} \right) \sqrt{\frac{p_0}{Q_0} \left(\frac{\Delta S}{l} \right) \frac{2\varepsilon}{\xi}}, \\ q = \frac{nQ_0}{2p_0\varepsilon}.$$

Если d — диаметр одиночной щетинки, то $\frac{1}{k} = 1 - \frac{d}{\Delta S}$.

Таким образом, для редкой щетки $1/k \sim 1$, а для $d = 0,5\Delta S$ $1/k = 0,5$.

Коэффициент гидравлического сопротивления можно найти в справочниках. Для редкой щетки

$\xi = 0,1$ и не зависит от скорости потока. Для густой щетки его можно принять равным $0,2—0,25$.

Рассмотрим такой пример:

$$\varepsilon = 0,02, \quad \xi = 0,1, \quad h/l = 0,1, \\ \Delta S/l = 0,005, \quad k = 1.$$

При этих данных

$$n = 2,5 \text{ кВт/кН}, \\ q = 0,8 \text{ кг/(кН} \cdot \text{с)}.$$

Несущая способность $P =$
 $= 1000 \text{ Н/м}^2$.

АЭРОСАНИ И САМОЛЕТНОЕ ШАССИ С ВОЗДУШНОЙ СМАЗКОЙ

Как показывают расчеты и проведенные эксперименты, щеточная завеса особенно эффективна, если щетина короткая. В этом случае значительно уменьшаются потребная мощность, объемный расход воздуха и увеличивается несущая способность аппарата. Однако короткая щетина не будет огибать высокие неровности. Этот недостаток можно устранить, если воздушную подушку использовать на лыжах, которые устанавливаются на аэросанях или на самолетных шасси. Упруго-демпфирующая подвеска лыж компенсирует в широких пределах вертикальные колебания,



Рис. 15

вызываемые неровностями почвы (рис. 15).

Чтобы оценить преимущество такого технического решения, опять обратимся к расчетным формулам.

Положим теперь $h/l = 0,01$, а относительное давление увеличим до величины $\varepsilon = 0,05$. При этих данных получим

$$n = 0,4 \text{ кВт/кН}; \quad q = 0,05 \text{ кг/(кН} \cdot \text{с)}.$$

Несущая способность лыжи равняется $P = 2500 \text{ Н/м}^2$.

Как видно из этих цифр, площадь лыж и требуемая мощность оказываются умеренными. Малый расход воздуха может осуществляться через трубчатые стойки лыж.

ПОЧЕМУ БУКСУЕТ КОЛЕСО?

Инженеры использовали термин «воздушная подушка» для изобретения, которое мало напоминает подушку. По житейскому понятию надувная подушка прежде всего не должна пропускать воздух и, следовательно, не должна требовать постоянной подкачки. Обычные пневматические шины, применяемые в настоящее время на автомобилях и тракторах, куда больше отвечают этому названию. По-видимому, прибегая к понятию подушки, авторы хотели подчеркнуть ее мягкость или, в технических терминах, малое удельное давление и податливость, позволяющую приобретать различную форму. Но этого же свойства, кажется, можно добиться, используя надувные шины с малым внутренним давлением. Такой путь увеличения проходимости колесного транспорта в настоящее время применяется достаточно широко. Можно упомянуть обычные автомобили, у которых давление в колесах может изменяться во время движения, спор-

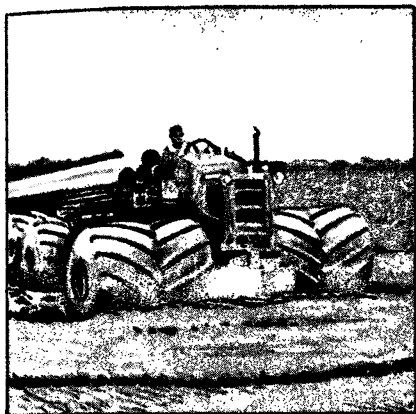


Рис. 16

тивные автомобили «багги» с шинами малого давления.

В наибольшей степени этот путь реализован на вездеходах американской фирмы «Роллегон» (рис. 16).

Прежде всего ответим на вопрос, что значит малое давление. Если мы хотим двигаться по непроходимому болоту, то давление в колесах не должно превосходить 0,05—0,1 атм. Заметим, что это в 20—40 раз меньше, чем у автомобиля. В этом случае большая грузоподъемность достигается увеличением диаметра колеса и приданием ему цилиндрической формы.

Проанализируем более внимательно взаимодействие такого колеса с грунтом. На плоской поверхности пятно контакта будет плоским и давление на грунт будет равняться внутреннему давлению в колесе. Малое давление — следовательно, малая реакция. Но транспорт такого рода предназначается для движения не по дорогам, а по неподготовленному грунту, на котором могут встречаться камни, пни, лежащие деревья и т. д. Каково окажется давление на выступающее препятствие? Чтобы пра-

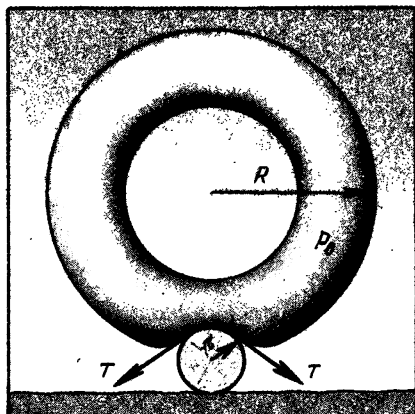


Рис. 17

вильно ответить на этот вопрос, мы должны учесть не только внутреннее давление, но и натяжение бандажа, вызываемое этим давлением (рис. 17).

Для цилиндрической геометрии, когда кривизна оболочки характеризуется одним радиусом R , ее натяжение определится формулой

$$(7) \quad T = p_{\text{в}} R,$$

где $p_{\text{в}}$ — внутреннее давление.

Пусть колесо въезжает на лежащее дерево, радиус которого равняется r . Давление, которое будет оказывать колесо на дерево, представится суммой

$$p_{\text{д}} = p_{\text{в}} + \frac{T}{r} = p_{\text{в}} \left(1 + \frac{R}{r} \right).$$

Так как радиус шины может в десятки раз превосходить радиус препятствия, то и удельное давление окажется в десятки раз больше внутреннего давления.

Это обстоятельство прежде всего предъявляет высокие требования к прочности материала, из которого должна изготавливаться шина. Если внутреннее давление равно 0,1 атм, как в рассмотренном примере, а давление на препятствии

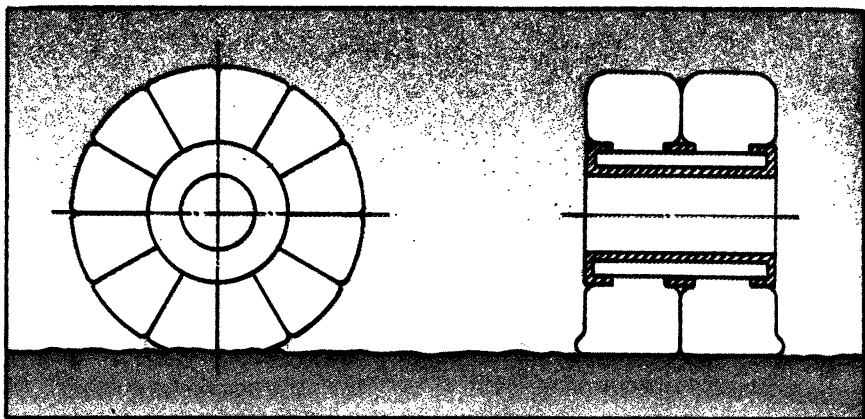


Рис. 18

окажется 2—3 атм, то такое давление не приведет к разрушению материала или к сокращению срока его службы.

Но вот другой пример. Колеса белорусских карьерных самосвалов большой грузоподъемности имеют радиус 1,5 м, внутреннее давление 7 атм. Когда такое колесо наезжает на бревно радиусом 0,15 м, то на нем будет создаваться давление 77 атм. Такое давление хотя и не приведет к немедленному разрушению шины, тем не менее сильно сократит ее пробег.

Большое удельное давление, вызываемое натяжением, объясняет, почему колеса подпрыгивают на препятствиях вместо того, чтобы принимать форму препятствия.

Пусть нагрузка на одно колесо равняется G , площадь пятна контакта $S = 0,1Rb$, где b — ширина шины. Из условия равновесия следует равенство

$$G = 0,1Rbp_a.$$

Подсчитаем, какую нагрузку нужно приложить к колесу, чтобы оно приняло форму препятствия:

$$G_1 = 2rbp_d = 2p_arb \left(1 + \frac{R}{r}\right) \approx 20G.$$

В 20 раз больше!

Теперь нам становится понятным, почему колеса с «мягкими» пневматическими шинами нуждаются в мягкой рессорной подвеске. Но рессоры сильно утяжеляют и усложняют транспортное средство.

Каким путем можно уменьшить давление колеса на препятствие, увеличить его податливость?

Обычные шины имеют не цилиндрическую, а тороидальную форму с радиусами R_1 и R_2 . При радиальном расположении корда натяжение будет определяться той же формулой (7), но в качестве радиуса будет стоять не радиус колеса, а поперечный радиус шины R_2 , который меньше R_1 . Это отличие особенно велико у велосипедного колеса. Сравните: $R_2 = 0,02$ м, а $R_1 = 0,35$ м. Для самосвалов отношение радиусов не так велико.

Чтобы уменьшить натяжение шины, нужно разбить ее на секции малых размеров. На рис. 18 приведена схема такого колеса.

При наезде такого колеса на препятствие секция будет укорачиваться, воздух из нее будет уходить в другие секции и до тех пор, пока препятствие не коснется диска ко-

леса, давление в нем практически сохраняется.

Мы не можем закончить рассказ о колесе, не коснувшись вопроса, почему и когда колесо буксует.

Если колесо преодолевает подъем или тянет за собой груз, например такое же, но пассивное колесо, то легко себе представить условия, когда колесо начнет буксовать. Сила тяги P не может превосходить силу трения, равную kG . Здесь, как и выше, G — нагрузка на колесо, а k — коэффициент трения. Если $P < kG$, то колесо буксовать не должно. Рассмотрим случай движения по горизонтальному участку транспортного средства, у которого все колеса ведущие.

Горизонтальная составляющая веса равна нулю, на прицепе ничего нет. Откуда берется сопротивление? От колес. А тяга? Тоже от колес. Так что же делают колеса, тянут или тормозят?

Колесо может буксовать только при движении по рыхлому грунту, песку, снегу и т. д. с образованием глубокой колеи.

Рассмотрим схему (рис. 19) такого движения.

Несущая способность грунта меньше давления в колесе, и равновесие наступает только после уплотнения грунта под действием колеса с образованием более или менее глубокой колеи.

Легко видеть, что взаимодействие колеса с грунтом складывается из двух составляющих разной природы: из касательного трения, которое дает тягу, и из нормального давления передней части колеса на грунт, которое дает сопротивление. Первая сила ограничивается коэффициентом трения, а вторая прочностными свойствами грунта.

В песке, разжиженном грунте или снеге вполне могут возникнуть

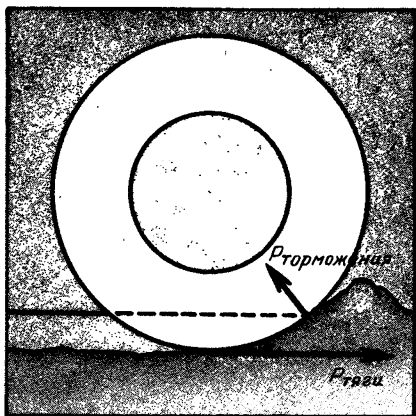


Рис. 19

условия, когда сила тяги станет меньше силы сопротивления, и колеса начнут буксовать.

Указанный эффект присутствует у гусеничного транспорта и отсутствует только у шагающих механизмов, так как ноги нажимают на грунт только вниз и назад и не упираются в препятствие, лежащее впереди.

Поставим вопрос о силах и работе, совершаемой шагающим механизмом.

Вертикальная сила совершает работу по уплотнению грунта. Что касается горизонтальной силы, то при равномерном движении по горизонтальному участку пути она может быть сколь угодно малой.

То, что шагающий механизм обладает исключительными особенностями, нам хорошо известно. Однако техническая реализация такого способа передвижения всегда упиралась в сложность кинематики и управления шагающим механизмом.

Лет 20 назад чешский инженер Ю. Мацкерле предложил оригинальное техническое решение, которое реализует шагающий прин-

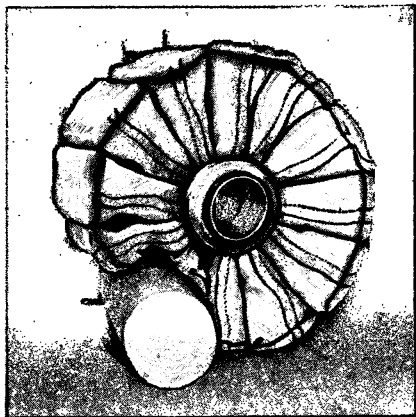


Рис. 20

тип простыми средствами,— ротопед (рис. 20).

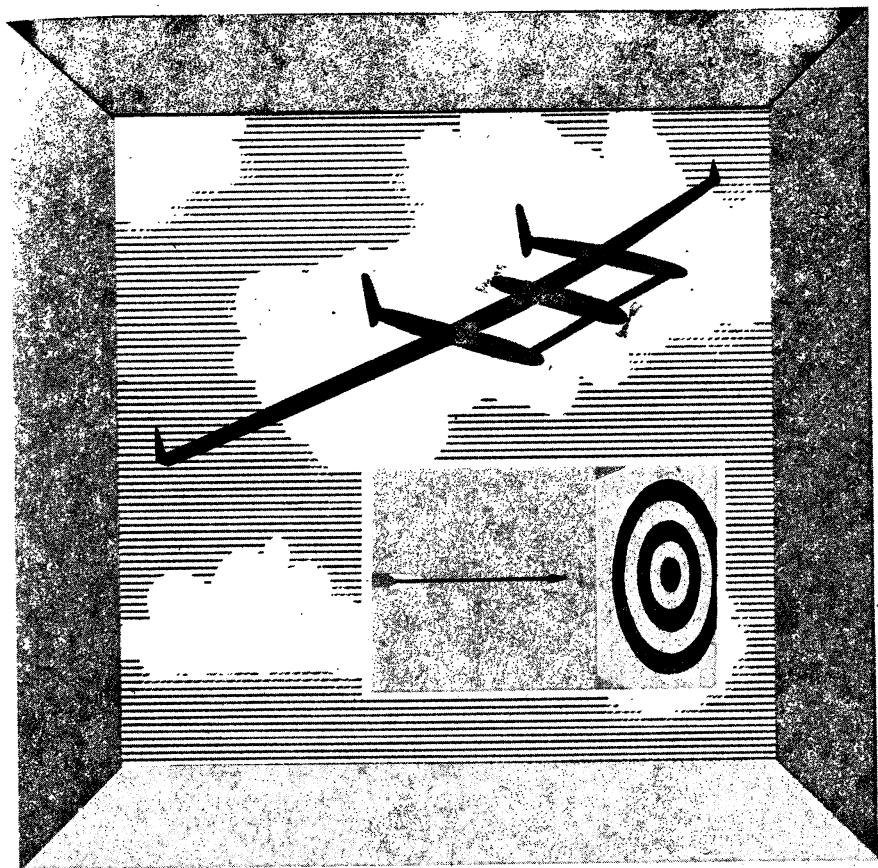
Само название, которое в переводе означает «вращающиеся ноги», хорошо характеризует конструкцию и работу устройства. Так называемые «ноги» представляют собой воздухонепроницаемые камеры, изготовленные из гибкого материала.

Восемь или двенадцать таких камер устанавливаются на общей

ступице. Через полую ось и окна в ступице воздух попадает в камеры, расположенные в данный момент позади оси, и выпускается в атмосферу из камер, расположенных впереди оси. Таким образом, передние камеры без усилия ложатся на препятствие, а по мере перемещения оси вперед они наполняются воздухом, создавая подъемную и отталкивающую силу, направленную вперед. Такая работа камер ничем не отличается от шагающего механизма.

Ротопед не нуждается в приводе, так как сам является пневматическим двигателем, в котором энергия сжатого воздуха преобразуется в работу поворота и перемещения колеса.

Автор изобретения не преследовал целей высокой проходимости. Ноги-камеры в его колесе имели сферическую форму малого диаметра, воздух подавался под большим давлением. Однако сам принцип может быть использован для создания бездорожного транспортного средства высокой проходимости.



АЭРОУПРУГОСТЬ

СТРЕЛА ПОПАДАЕТ В ЦЕЛЬ

Аэроупругость — научная дисциплина, возникшая на стыке аэродинамики и теории упругости. Движущееся в воздухе тело подвергается действию сил аэродинамического происхождения, которые вызывают деформацию тела, что является предметом исследования теории упругости. Процесс осложняется тем, что сами силы зависят от деформации и не могут

быть определены в рамках аэродинамики.

Аэроупругость и занимается исследованием такого рода процессов. Для иллюстрации специфики и возможностей этой науки выберем такой на первый взгляд простой процесс, как полет стрелы.

Тонкая длинная стрела представляет хороший пример гибкого тела. И сама стрела, и тем более хвостовое оперение подвергаются в полете действию аэродинамических

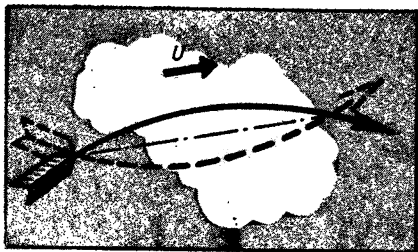


Рис. 21

сил. В момент выстрела стрела не только приобретает начальную поступательную скорость, но и начальный изгиб. В полете стрела может колебаться. Основной вопрос, который при этом возникает, будут ли эти колебания быстро затухать или будут постоянно поддерживаться. По-видимому, такие два режима по-разному влияют на точность полета стрелы и ее долговечность.

Попробуем описать механизм возникающих в полете колебаний стрелы (рис. 21).

Прежде всего мы должны допустить флюгерные колебания стрелы во встречном потоке. Как явствует из названия, это такие же колебания, которые может совершать обычный флюгер в форме стрелы, шарнирно закрепленный в центре масс стрелы. Начальное отклонение оси стрелы от направления полета приводит к появлению на хвостовом оперении поперечной силы, которая стремится восстановить положение. Однако по инерции стрела проходит положение равновесия, что приводит к появлению восстанавливающей силы противоположного знака, и процесс повторяется.

Для последующего важно знать частоту этих колебаний ω_1 , которая может быть определена как теоретическим, так и экспериментальным путем.

Летящая стрела отличается от флюгера, во-первых, тем, что центр масс хотя и является центром флюгерных колебаний, однако он ничем не закреплен, и, во-вторых, стрела может изгибаться под действием поперечных аэродинамических и инерционных сил. Упругие колебания имеют свою частоту ω_2 , которая определяется жесткостными и массовыми характеристиками стрелы.

В том случае, если частоты ω_1 и ω_2 заметно различаются, описанные выше два типа колебаний протекают независимо и обязательно затухают при любых аэродинамических и конструктивных параметрах.

В том исключительном случае, когда $\omega_1 = \omega_2$, упругие колебания возбуждают флюгерные, а те в свою очередь поддерживают изгибные колебания. И здесь возможен режим, при котором малые начальные возмущения будут расти, а большие поддерживаться на некотором уровне.

Какой из режимов реализуется, зависит от конструкции стрелы, от ее аэродинамических и упругих свойств.

ФЛАТТЕР

Времена Робина Гуда и Вильгельма Теля прошли, и стрела потеряла свое военное и промышленное значение. Однако появились другие летающие тела, которые подвергаются аэроупругим колебаниям.

Речь пойдет о колебаниях крыльев самолетов — о флаттере.

В силу специальной геометрии поперечного крыла его ось жесткости проходит ближе к передней кромке, чем ось, соединяющая центры тяжести. По этой причине свободные изгибные колебания крыла

всегда сопровождаются кручением крыла вокруг его оси и, в свою очередь, кручение крыла вызывает изгиб его оси.

Порыв ветра, «воздушная яма» вызывают случайный изгиб крыла вверх или вниз. Но при этом оно закрутится и изменит угол атаки, следовательно, аэродинамическую подъемную силу. Теперь крыло будет возвращаться к нейтральному положению не только под действием упругих сил крыла, но и под действием дополнительной подъемной силы, которая возникла благодаря кручению крыла. Понятно, что при этом крыло не только пройдет положение равновесия, но и может отклониться от этого положения в противоположную сторону на большую амплитуду, чем начальное возмущение.

В этом процессе энергия внешнего потока перекачивается в энергию собственных колебаний. Эта энергия рассеивается и благодаря конструкционному демпфированию, и благодаря силам трения в воздухе. Но при некоторой скорости полета приток энергии превосходит рассеивание и амплитуда колебаний начинает нарастать. Такая скорость называется критической.

Очевидцы рассказывают, что при такой скорости крылья самолета начинают трепетать, как белье на ветру. Такие колебания даже при кратковременном действии приводят к разрушению крыльев и совершенно недопустимы в эксплуатации самолета.

В спутном следе позади крыльев, мотогондол, выступов фюзеляжа и других элементов самолета в некоторых режимах полета возникают неустановившиеся колебания, которые могут вызывать колебания упругой конструкции самолета. Такой процесс получил название

баффтинг, который тоже является предметом изучения аэроупругости.

Порывы ветра, тряска при взлете и посадке, вызываемая неровностью взлетной полосы,— все это сопровождается динамической реакцией упругих элементов самолета, и даже в том случае, если они не сопровождаются явлением автоколебания и по амплитуде не выходят за пределы разрушения, являются вредными, так как значительно уменьшают ресурс самолета.

Современные самолеты, особенно большие дозвуковые пассажирские и транспортные гиганты, под действием аэродинамических нагрузок очень сильно меняют свою форму. Достаточно сказать, что концы крыльев самолета АН-22 после взлета отгибаются вверх на 1,5 метра. При этом, как мы уже отмечали, изменяется и угол атаки крыла в каждом сечении, а это, в свою очередь, приводит к изменению распределения аэродинамических нагрузок по сравнению с недеформированной конструкцией.

Очень важным является эффект, который в научной литературе получил наименование дивергенции. Для поворота самолета нужно наклонить его в ту или иную сторону. Для этой цели служат элероны. Опушенный на крыле элерон по идее должен увеличить подъемную силу этого крыла. Однако при этом возникает крутящий момент, который закручивает крыло самолета в сторону уменьшения угла атаки, что сопровождается уменьшением подъемной силы крыла. В таком режиме элероны перестают эффективно работать или работают с противоположным эффектом. Этот эффект называется также реверсом органов управления.

СТАТИЧЕСКАЯ И ДИНАМИЧЕСКАЯ ЖЕСТКОСТЬ КОНСТРУКЦИИ

Если буквой A обозначить амплитуду колебаний упругой конструкции, буквой f — амплитуду приложенной к единице массы силы, то в общем случае периодических колебаний связь между ними запишется так:

$$A = \frac{f}{|\omega_0^2 - \omega^2 + \alpha \omega i|}.$$

Здесь ω_0 — частота собственных колебаний, ω — частота, с какой действует внешняя сила, α — коэффициент, характеризующий рассеивание энергии в упругой конструкции.

В частном случае постоянной внешней силы $\omega = 0$, и тогда

$$A_0 = \frac{f_0}{\omega_0^2}.$$

Чем больше собственная частота, тем меньшие эффекты деформации возникают в конструкции под действием той же силы. Квадрат частоты можно назвать статической жесткостью. Эта жесткость будет определять поведение конструкции и для переменной внешней силы, если только ее частота ω будет значительно меньше собственной частоты ω_0 . Иное положение складывается в резонансном случае, когда эти частоты совпадают. При этом предыдущая формула приобретает вид

$$A = \frac{f_0}{\omega_0^2} \left(\frac{\omega_0}{\alpha} \right).$$

Отношение ω_0/α почти во всех случаях очень большая величина. Чисто упругое демпфирование крыла самолета характеризуется числами $\omega_0/\alpha = 20-30$.

Таким образом, в резонансном случае жесткость конструкции, так

называемая динамическая жесткость, оказывается в 20—30 раз меньше статической жесткости той же конструкции. Даже если амплитуда резонансной силы будет во столько же раз меньше, она будет вызывать большие амплитуды деформаций и, следовательно, большие внутренние напряжения. Если же к этому добавить знакопеременный характер нагрузки, к которым конструкции особенно чувствительны, то становится понятным особый интерес конструкторов к такого рода нагрузкам.

ДЕМПФИРОВАНИЕ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ

Из предыдущих рассуждений видно, что увеличение коэффициента демпфирования α может служить эффективным средством увеличения динамической жесткости конструкции и, следовательно, ее ресурса.

При решении этой задачи кардинальным оказывается вопрос о технических средствах, с помощью которых можно увеличить коэффициент демпфирования. Новым и перспективным направлением на этом пути является демпфирование с помощью автоматически управляемых сил. Исследования причин колебаний крыльев показали, что большая часть их связана с передаваемыми крыльям ударами шасси самолета о неровности аэродромного покрытия.

Таким образом, встает вопрос о демпфировании упругих колебаний с помощью внутренних автоматически управляемых сил.

Какие это могут быть силы?

Прежде всего это могут быть силы инерции, возникающие при колебании вдоль оси, крыла некоторых масс. Чтобы понять, как та-

кое движение может демпфировать колебание крыла, вспомним, каким образом человек, качающийся на качелях, останавливает их колебания, ни на что не опираясь, используя только внутренние силы. Для этого он приседает и поднимается с частотой, в два раза превосходящей частоту колебания качелей. Такое движение можно использовать и для раскачки качелей, и для их остановки, все зависит от выбора сдвига фазы между колебаниями качелей и приседанием человека.

Если нижнее положение человека совпадает с нижним положением качелей, то они раскачиваются, в противоположном случае качели останавливаются.

Сравнительно просто приложить к крылу внутренние крутящие моменты. Действительно, тонкий гибкий вал — торсион, проходящий вдоль оси крыла, позволяет передавать крутящий момент на конец крыла. А так как крыло совершает связанные изгибно-крутильные колебания, у нас появляется возможность управлять этими колебаниями. В чем особенность автоматически управляемого момента? Если такой вал закреплен одним концом с фюзеляжем, а другим концом с внешним краем крыла, то он будет препятствовать кручению и изгибу крыла без всякого автоматического управления. Здесь мы должны выделить два обстоятельства. Во-первых, крыло закручивается на очень малый угол, порядка нескольких градусов. При такой закрутке в вале создаются очень малые моменты, которые слабо повлияют на амплитуду колебания крыла. Управляющий момент создается за счет закрутки вала на десятки градусов до предела, диктуемого его прочностью. Соответственно этот

момент в десятки раз будет больше при том же весе вала. Второе обстоятельство связано с тем, что пассивная конструкция изменяет на малую величину собственную частоту, в то время как автоматически управляемый момент изменяет, пусть даже на малую величину, коэффициент демпфирования α . Но так как α мало, то относительное изменение оказывается большим. Именно эти обстоятельства приводят к большой эффективности управляющих сил. Так расчет показал, что вал, вес которого составляет 4% от веса крыла, увеличивает на порядок коэффициент демпфирования.

Другая возможность создания управляющего момента может быть реализована с помощью гироскопических моментов. Чаще всего быстро вращающийся ротор, способный сохранять неизменным положение оси вращения, ассоциируется у нас с гироскопом — датчиком угловых положений. Как всякий датчик, он должен иметь минимальные размеры. Крупные роторы — маховики — используются как аккумуляторы вращательного движения.

Маховик средних размеров может быть использован одновременно и как датчик угловых перемещений, в данном случае кручения крыла, и как исполнительный элемент для уменьшения кручения крыла или поворота закрылка. Гироскопический момент, как известно, пропорционален кинетическому моменту маховика и угловой скорости поворота его оси. Большое число оборотов позволяет реализовать большой кинетический момент при умеренном весе маховика. А зависимость управляющего момента от скорости кручения позволяет реализовать закон управле-

ния, при котором меняется коэффициент демпфирования, что, как мы знаем, в наибольшей степени влияет на амплитуду резонансных колебаний.

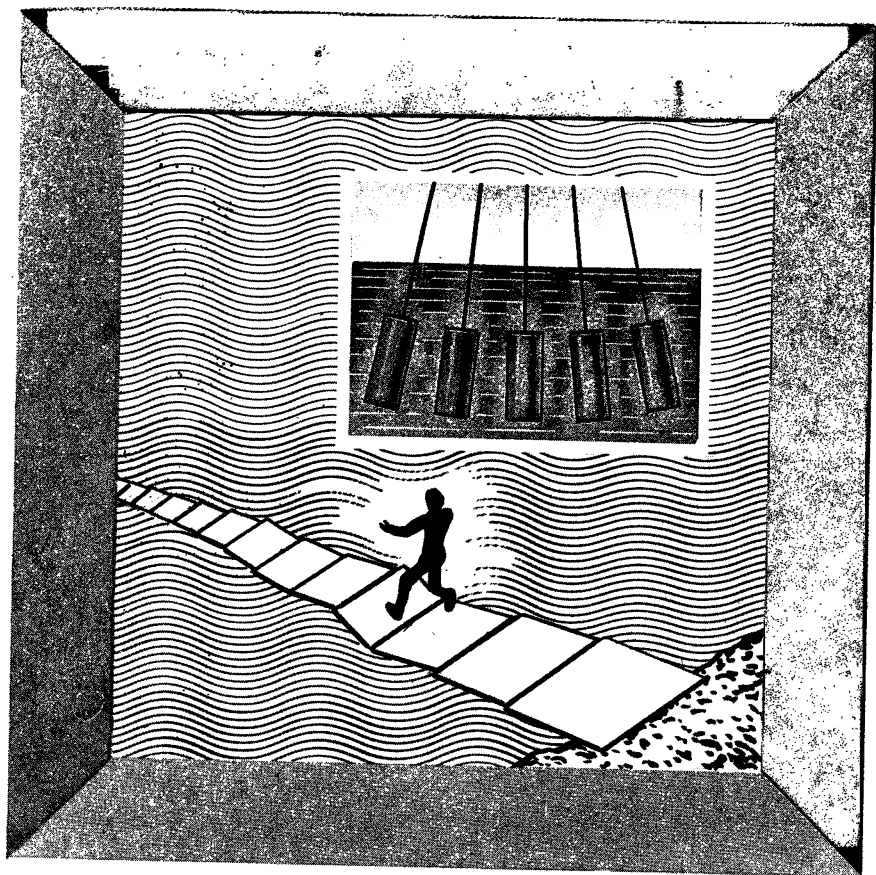
В тех случаях, когда двигатели самолета расположены достаточно далеко от фюзеляжа и участвуют в изгибно-крутильных деформациях крыла, роторы двигателей могут быть использованы для целей демпфирования колебаний крыльев. Это особенно выгодно потому, что мы получаем для управления маховик с большим кинетическим моментом без увеличения веса аппарата и без заметного усложнения его конструкции.

Чтобы ротор двигателя выполнял функцию демпфирования, двигатель должен быть так соединен с крылом самолета, чтобы он без отставания участвовал в крутильных колебаниях крыла. Как следует из свойств гироскопа, он будет испытывать момент, стремящийся повернуть двигатель в плоскости крыла.

Соединение двигателя с крылом должно допускать поворот двигателя в горизонтальной плоскости на несколько градусов. Однако это движение должно тормозиться гидравлическими демпферами, усилия в которых пропорциональны ско-

рости перемещения. Легко понять, что поворот двигателя в плоскости крыла приведет к появлению момента, который будет препятствовать кручению крыла. К такому же выводу можно прийти, оценивая энергии системы: именно энергия изгибно-крутильных колебаний будет превращаться в тепло в гидравлическом демпфере.

В тех случаях, когда двигатели расположены на фюзеляже или в непосредственной близости к нему, нужно ставить специальные маховики — гиромоторы. Оси их могут располагаться вертикально, а сами маховики, имеющие форму плоских дисков, должны располагаться в плоскости крыльев. Вес такого гиромотора, как показывают расчеты, составляет малую часть веса крыла. Такой результат обусловливается следующими факторами. Число оборотов гиромотора может достигать 20—25 тыс. оборотов в минуту, т. е. значительно больше, чем у двигателя. Гиромотор располагается близко к концу крыла, где его эффективность особенно велика. Свободный ход в данном случае в вертикальной плоскости может составлять 30—45°, а не 3—4°, как у двигателя. При таком угле велика и рассеиваемая на демпфере энергия.



ЧЕЛОВЕК ИДЕТ ПО ВОДЕ

ТИХИЕ АПЛОДИСМЕНТЫ ПОД ВОДОЙ

Можно ли ходить по воде? Как ни велико желание человека пройти по поверхности воды, ему это, как правило, не удавалось. Если не принимать во внимание историю, приведенную в Евангелии, человеку удастся только бродить по мелкой воде. Причем именно не ходить, а всего-навсего бродить, т. е. едва плестись.

Когда мы бредем по воде, то сталкиваемся с двумя противоречивыми обстоятельствами. С одной стороны, вода оказывает большое сопротивление движению ног вперед (эта сила особенно велика, когда мы пытаемся идти быстрее), а с другой стороны, эта же самая вода мало сопротивляется опусканию ступни на дно, так что постоять на воде нам никогда не удастся. Попробуем объяснить эти факты.

Прodelайте следующий эксперимент. Опустите ладони в воду и не спеша сведите их вместе. Такое движение потребует от вас небольших усилий. Попробуйте теперь часто похлопать ладонями. И хотя максимальная скорость движения ладоней теперь будет меньше, от вас потребуются очень большие усилия.

В первом случае ладони двигались почти с постоянной скоростью и испытывали только гидродинамическое сопротивление воды, которое при небольшой скорости совсем невелико. Во втором случае ладони меняли направление движения и величину скорости, т. е. двигались с ускорением и испытывали не только гидродинамическое сопротивление, которым можно в этом случае пренебречь, но и силу, вызванную инерцией окружающей воды. Эта сила, как и любая другая, подчиняется закону Ньютона, т. е. пропорциональна ускорению и массе, участвующей в движении.

Какая же масса участвует в движении, когда тело движется в воде? Тело приводит в движение всю окружающую его массу воды. Причем близлежащие слои движутся со скоростью самого тела, более удаленные в меньшей степени вовлекаются в движение. И только бесконечно далекие от тела частицы жидкости остаются неподвижными.

ПРИСОЕДИНЕННАЯ МАССА

Для того чтобы пользоваться законом Ньютона, удобно ввести понятие присоединенной массы. Это такая фиктивная масса, которая, будучи добавлена к массе тела, заменит инерционное воздействие всей жидкости. Особенностью присоединенной массы является то,

что она зависит не только от геометрии тела, но и от направления его движения.

Возьмите простую линейку. Обычная ее масса не зависит от того, в каком направлении она будет двигаться. Если же опустить линейку в воду, то при поперечном движении она будет увлекать большую массу воды, а при движении в своей плоскости оставит жидкость почти неподвижной.

Вычисление присоединенной массы для тел различной формы представляет довольно сложную задачу математической физики. Однако имеется простой и очень точный способ экспериментального определения присоединенной массы любого тела.

Если тело подвесить на тонкой и длинной нити, то получится физический маятник, частота колебаний которого, вообще говоря, зависит от длины маятника l , его массы и веса. В обычной формуле для частоты колебаний математического маятника, которая равна

$$n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}},$$

масса в явном виде не фигурирует, но она, с одной стороны, содержится в числителе, образуя в произведении с ускорением свободного падения g вес, а с другой — стоит в знаменателе уже как масса маятника. Таким образом, частота колебаний маятника в вакууме не зависит от массы. Если же этот маятник поместить в жидкость, например в воду, то частота колебаний уменьшится.

Теперь формулу для частоты можно приблизительно записать в следующем виде:

$$n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_1 g - P}{l(m_1 + m_2)}}$$

Здесь m_1 — масса тела; P — архимедова сила, направленная вверх; $m_1g - P$ — вес тела в воде; m_2 — присоединенная масса жидкости; $m_1 + m_2$ — полная масса маятника.

Формула эта приближенная, так как в реальной жидкости на маятник будут действовать еще и силы вязкости. Но если амплитуда колебаний маятника будет малой, а частота достаточно высокой, то этим влиянием можно пренебречь.

Для повышения точности определения присоединенной массы можно подвесить тело на упругой пружине.

Массу самого тела m_1 можно определить по весу тела в вакууме. Разность $m_1g - P$ равна весу этого же тела в жидкости. Частота колебаний n с большой точностью определяется в процессе эксперимента.

Из этой формулы можно найти искомую присоединенную массу. Подвешивая тело по-разному, можно определить присоединенную массу при разных направлениях движения тела.

Бредущий по воде человек является не очень хорошим примером проявления присоединенной массы, однако даже в этом случае можно видеть ее влияние. Медленно опускающаяся ступня почти не испытывает сопротивления, в то время как для передвижения ноги вперед с ускорением требуется большое усилие. Попытка же аплодировать под водой вообще окажется безуспешной, как ни сильны были бы эмоции, вызвавшие эти аплодисменты. Это обстоятельство объясняется присоединенной массой раскрытых ладоней, которая увеличивается по мере сближения ладоней.

ПО ВОДЕ МОЖНО БЕЖАТЬ

Однако пора вернуться к вопросу, поставленному в начале главы. Можно ли ходить по воде? Оказывается, что при определенных условиях можно. Например, некоторые болотные птицы бегают если не по самой воде, то по плавающим на ней листьям. При этом нужно, конечно, иметь в виду, что сами листья очень тонкие, тяжелые и обладают очень малой плавучестью, так что, если птица задержится на одном из них хотя бы на несколько секунд, лист опустится в воду и дальше птице уже придется не бежать, а плыть.

Бегущая птица толкает лист с силой, превосходящей ее собственный вес в несколько раз. При этом лист почти не успевает погрузиться в воду. В создании силы реакции участвует присоединенная масса листа, которая может в сотни раз превосходить реальную массу самого листа. Порывистые движения ног и широко расставленные длинные пальцы птиц весьма подходят для такого перемещения.

В большой степени используется присоединенная масса человеком, пересекающим реку во время ледохода. Правда, он старается выбирать льдины покрупнее, запас плавучести которых достаточен, чтобы удержать человека, пока он будет выбирать новую льдину. Однако нередко приходится использовать льдины, которые слишком малы, чтобы на них стоять, но вполне достаточны, чтобы от них оттолкнуться. Толчок, который они способны выдержать, зависит не столько от их плавучести, сколько от их собственной и присоединенной масс.

В книгах о жизни гренландских эскимосов описывают прием, с

помощью которого они перебираются через крупные трещины в ледяных полях. Эскимосы убивают медведя (разумеется, белого), сбрасывают его в трещину. А затем двойным прыжком, отталкиваясь от плавающего в воде медведя, перепрыгивают через трещину. Удельный вес медведя мало отличается от удельного веса воды. Поэтому, если встать на него, он быстро пойдет под воду. Но для толчка это никакого значения не имеет. Важна только масса медведя и его присоединенная масса. Вот этим и пользуются эскимосы.

Еще больший вклад присоединенной массы наблюдается в случае деформации упругой поверхности, опирающейся на жидкость. Например, это важно учесть при исследовании колебаний упругой оболочки ракеты, наполненной жидким топливом. Однако ракета — это слишком специальная проблема. Выберем что-нибудь более общеизвестное.

В книге замечательного русского дипломата А. А. Игнатьева «Пятьдесят лет в строю» есть живописное описание скачек по тонкому льду Ботнического залива,

в которых он принимал участие. Особенность этих скачек состояла в том, что тонкий лед не мог удерживать лошадь и седока. Спасение их было только в движении, только в скорости. Дело в том, что при прогибе льда происходит перемещение воды. Резкий прогиб требует большой силы для преодоления инерции присоединенной массы воды. Вот эта сила и позволяла лошади отталкиваться от тонкого льда.

БЕГ ПО ТОНКОМУ ЛЬДУ

Понимание этого явления не уменьшает опасности такого вида спорта. Однако мы можем предложить спортивное состязание, которое не содержит никакой опасности. Для этого нужно взять фанеру, разрезать ее на все сужающиеся полосы. Уложенные последовательно, они должны образовать дорожку длиной 40—50 м с начальной шириной 2 м и конечной шириной 0,5 м. По краям натягивают две веревки, к которым и прикрепляют листы фанеры. Затем эту дорожку выводят на воду и с помощью якоря укрепляют перпен-

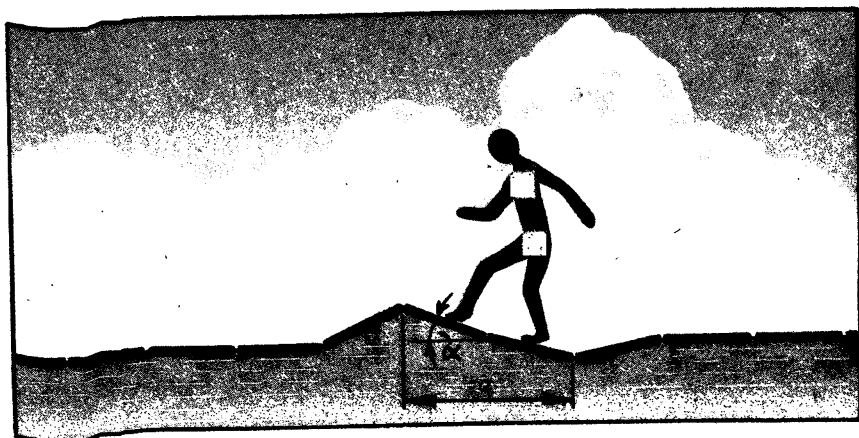


Рис. 22

дикулярно к берегу, так что первый и самый большой лист почти касается берега.

Состязание будет состоять в том, чтобы пробежать по этой дорожке, по «тонкому льду», как можно дальше. Можно с уверенностью сказать, что в жаркие летние дни на берегах морей, рек и озер такой вид состязания будет пользоваться большой популярностью.

Попытаемся определить, с какой скоростью должен бежать человек по гибкому помосту, чтобы не погружаться в воду. Помост под бегущим человеком прогнется на некоторую глубину. Часть помоста, расположенного перед ним, займет наклонное положение (рис. 22). Этот участок будет перемещаться вперед со скоростью движения человека. При этом давление воды на помост оказывается почти таким же, как и при скольжении по воде наклонной поверхности. Отличие будет только в том, что в рассматриваемом случае отсутствует касательное движение плоскости относительно воды, и следовательно, трение о воду. Вода давит на глиссирующую поверхность с силой

$$R = \frac{1}{2} \rho k v^2 a b a.$$

В этой формуле использованы следующие обозначения: R — суммарная сила давления на поверхность, направленная вверх, Н; v — скорость движения поверхности, м/с; a — продольный размер глиссирующей поверхности, м; b — ее поперечный размер, м; ρ — плотность воды, кг/м³; α — угол наклона, рад; k — экспериментальный коэффициент, который с достаточной для практики точностью можно вычислять по формуле $k =$

$$= \frac{1}{1 + 2a/b}.$$

Будем считать, что ширина помоста равна длине его наклонного участка, т. е. $a = b$. Тогда $k = 0,3333$; $\rho k \approx 1$.

Угол наклона α определим через величину a и допустимую глубину прогиба помоста h :

$$\alpha = \frac{h}{a}.$$

Учитывая, что плотность воды $\rho = 1000$ кг/м³, получаем окончательную формулу для силы R :

$$R = 500 v^2 a h.$$

Для примера зададимся скоростью 5 м/с, шириной помоста $a = 1$ м и весом бегуна 700 Н. Тогда прогиб h будет равен примерно 6 см. Исходя из этих расчетов, мы и выбрали начальную ширину гибкого помоста, предназначенного для состязаний.

ПЕРЕПРАВА БЕЗ МОСТА

Рассмотрим возможность использования гибкого помоста для создания переправы через реку. Представим себе переправу, состоящую из ряда досок, лежащих на воде и связанных между собой тросом, так что они образуют сплошной помост. Ясно, что если грузовая машина выедет на такой помост, то она затонет. Однако при достаточно быстром движении машины доски под ней будут испытывать со стороны воды достаточно большую реакцию, чтобы поддерживать ее (рис. 23).

При расчете необходимой скорости машины будем пренебрегать плавучестью и массой досок, а также зазорами между ними. Воспользуемся предыдущими формулами и такими данными: $P = 30\,000$ Н, $h = 0,2$ м, $a = 5$ м.

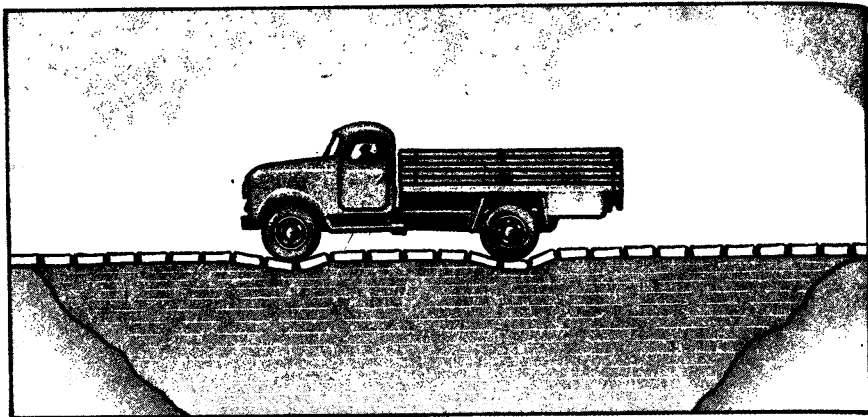


Рис. 23

Тогда мы найдем, что скорость движения машины должна быть не меньше 36 км/ч.

Нашими расчетами едва ли воспользуется какой-либо шофер. Он предпочтет сделать большой крюк, чем переехать по такой переправе. Хотя не следует исключать такого стечения обстоятельств, когда другой возможности вообще не будет. Чтобы проверить правильность расчетов, не дожидаясь таких исключительных обстоятельств, вычислим, каким должен быть помет, чтобы по нему можно было проехать на велосипеде. Примем вес велосипедиста с велосипедом равным $P = 1000$ Н, скорость его движения $v = 5$ м/с, допустимую глубину погружения 0,1 м. Тогда ширина помоста будет равна $a = 0,8$ м.

«СЕКРЕТЫ» ПЛАВАНИЯ КАЛЬМАРА

Присоединенная масса имеется у каждого плавающего под водой тела. И как всякая масса, она проявляет себя только при неравномерном движении. Для плавания подводной лодки с постоянной

скоростью нужно уравновесить только силы гидродинамического сопротивления, которые от массы лодки и от ее присоединенной массы не зависят. В то же время длина пути разгона и торможения будет определяться кинетической энергией, которая, кроме скорости, зависит от общей массы лодки. Криволинейное движение всегда сопровождается изменением скорости в зависимости от направления. При этом возникает центробежная сила, пропорциональная сумме массы подводной лодки и ее присоединенной массы. Это обстоятельство, конечно, сильно сказывается на маневренности лодки.

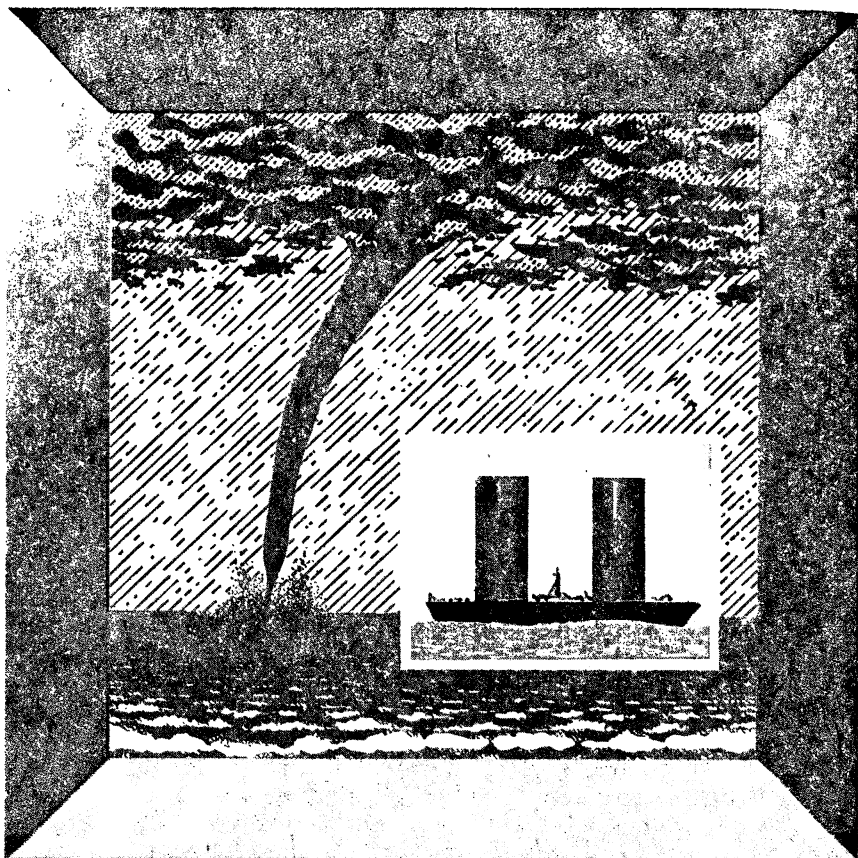
Если при движении лодки изменяется только скорость, а масса остается постоянной, то у кальмара меняется и скорость, и масса. Кальмар, как известно, пользуется гидрореактивным двигателем. В отличие от водометных судов, которые работают в непрерывном режиме, двигатель кальмара работает в импульсном режиме. В начале цикла кальмар набирает воду в свой мускульный мешок, а затем энергично выбрасывает ее через узкую воронку, которая выполняет

функцию сопла реактивного двигателя.

При выталкивании воды масса кальмара и его присоединенная масса уменьшаются в несколько раз. А так как ускорение при неизменной силе обратно пропорционально массе, то при движении кальмара оно возрастает и достигает в конце цикла большого значения. Выбросив всю воду из мешка и достигнув значительной скорости, кальмар некоторое время движется по инерции, теперь уже с отрицательным ускорением. По-

скольку в этот момент он имеет минимальный объем, то и гидродинамическое сопротивление его оказывается минимальным.

Новый цикл, начинающийся с набора воды, сопровождается увеличением общей массы и, следовательно, резким уменьшением скорости движения. Этот момент является весьма подходящим для любого изменения направления движения. Таким образом, становятся понятными секреты скорости и удивительной маневренности кальмаров.



ДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ЖИДКОСТИ И ГАЗЕ

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

В первой главе мы рассмотрели эффекты, вызываемые статическими силами, которые возникают в неподвижном или медленно движущемся воздухе или воде. Более интересны и более часто встречаются процессы, при которых жидкость или газ быстро движется или же быстро перемещаются тела в этой среде. В этих процессах главную роль играют силы динами-

ческого происхождения. К изучению таких процессов мы и приступим.

Основное уравнение гидростатики (2), приведенное на с. 8, содержит составляющую qgz , которая представляет потенциальную энергию единичного объема жидкости, отсчитываемую от уровня $z = 0$, где давление равно известной величине p_0 . Естественно величины p и p_0 тоже интерпретировать как энергию статического напора.

Так как справа от знака равенства стоит постоянная величина, уравнение (2) на с. 8 выражает собой закон сохранения энергии.

В том случае, если жидкость движется с некоторой постоянной скоростью v , единичный объем ее будет обладать кинетической энергией

$$\frac{1}{2} \rho v^2,$$

а закон сохранения энергии запишется следующим образом:

$$p + \rho g z + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{const.}$$

Полученное выражение является основным уравнением гидродинамики и называется уравнением Бернулли.

Следует отметить, что закон сохранения энергии в таком виде, как мы его записали, точно выполняется только для жидкости, полностью лишенной вязкости (идеальной жидкости). Реальная жидкость всегда обладает вязкостью, благодаря которой часть механической энергии превращается в тепловую, нарушая этим справедливость уравнения Бернулли. Однако в том случае, если вязкость среды мала, как, например, у воды, воздуха, это уравнение выполняется достаточно точно. Легко понять, что уравнение Бернулли, выражающее закон сохранения энергии, одинаково справедливо как в неподвижной системе координат, так и в любой равномерно движущейся системе.

ВОДА ВЫТЕКАЕТ ИЗ СОСУДА

Прежде всего определим скорость истечения жидкости из отверстия в резервуаре (рис. 24). Давление под крышкой резервуара

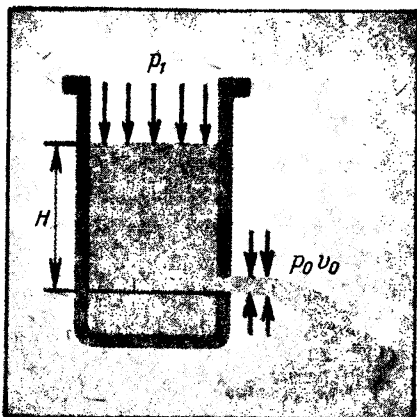


Рис. 24

на уровне свободной поверхности обозначим p_1 , а атмосферное давление — p_0 . В общем случае эти давления будут различными. Расстояние от отверстия до свободной поверхности обозначим H . Допустим, что площадь поперечного сечения резервуара во много раз больше отверстия. Это условие позволяет нам считать, что скорость опускания свободной поверхности $v_1 = 0$. Давление на уровне свободной поверхности равно p_1 . Сам уровень обозначим z_1 . У самого отверстия давление равно p_0 , искомая скорость истечения v_0 , а уровень z_0 . Очевидно, что $z_1 - z_0 = H$. Тогда

$$p_1 + \rho g z_1 = p_0 + \rho g z_0 + \frac{1}{2} \rho v_0^2,$$

откуда

$$v_0 = \sqrt{2gH + \frac{p_1 - p_0}{\rho}}.$$

В том случае, если давление под крышкой равно внешнему давлению, т. е. $p_1 = p_0$, эта формула упрощается и принимает следующий вид:

$$v_0 = \sqrt{2gH}.$$

В этом случае скорость истечения жидкости совпадает со скоростью тела при его свободном падении с высоты H .

Мы уже говорили о приближенном характере уравнения Бернулли. Чтобы учесть возникающую из-за вязкости погрешность, формулу для скорости истечения записывают таким образом:

$$v_0 = \zeta \sqrt{2gH + \frac{p_1}{\rho} - \frac{p_0}{\rho}},$$

где ζ — экспериментально определяемый коэффициент, зависящий от величины H и p_1 . Для круглого отверстия этот коэффициент лежит в пределах 0,95—0,99, т. е. мало отличается от единицы.

КИПИТ ХОЛОДНАЯ ВОДА

Рассмотрим течение жидкости (воды) в горизонтально расположенном трубопроводе переменного сечения. В этом случае потенциальная энергия $\rho g z$ будет мало меняться для всех точек жидкости и уравнение Бернулли несколько упростится:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2.$$

Первую точку отсчета выберем в широкой части трубы, где площадь поперечного сечения S_1 велика. Вторую точку выберем в самом узком сечении площадью S_2 . Если через трубу протекает в секунду некоторое количество жидкости Q , то скорости соответственно равны

$$v_1 = \frac{Q}{S_1}, \quad v_2 = \frac{Q}{S_2}.$$

Запишем уравнение Бернулли

$$p_1 + \frac{\rho Q^2}{2S_1^2} = p_2 + \frac{\rho Q^2}{2S_2^2}$$

и определим давление в узкой части:

$$p_2 = p_1 - \frac{\rho Q^2}{2} \left[\frac{1}{S_2^2} - \frac{1}{S_1^2} \right],$$

откуда следует, что давление уменьшается по мере сужения трубопровода и может обратиться в нуль. Это приведет к кипению холодной воды. Такое явление наблюдается не только в трубах, но и при работе многих гидравлических машин. Когда мы будем рассказывать о работе гидротурбины, то остановимся на этом явлении более подробно. Здесь же только отметим, что эффект снижения давления в узкой части трубопровода используется при создании эжекционных насосов, в пульверизаторах. Кроме того, измеряя давления p_1 и p_2 , легко вычислить расход воды Q . На этом принципе построены некоторые конструкции расходомеров.

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПОТОКА

Наиболее широко применяемые приборы для измерения скорости движения жидкости также основаны на использовании связи между давлением и скоростью, которая следует из уравнения Бернулли.

Поставим в поток соосно вставленные друг в друга две трубки, как это изображено на рис. 25.

Записав уравнение Бернулли для двух точек, одна из которых находится в отверстии внешней трубки, а другая — на срезе внутренней трубки, где жидкость останавливается и скорость становится равной нулю, получаем

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = p_2.$$

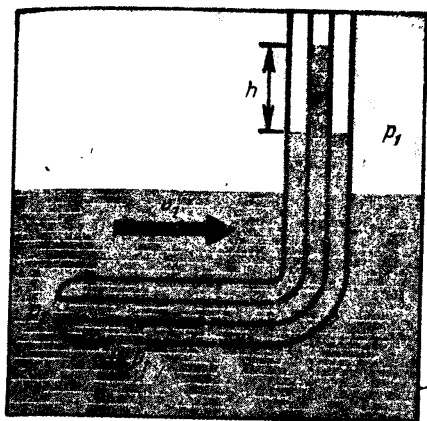


Рис. 25

Уровень водяного столба в первой трубке будет равняться давлению P_1 , а во второй трубке — P_2 . Разность уровней h равна кинетической энергии потока, по которой и вычисляется скорость потока.

СТОЛКНОВЕНИЕ КОРАБЛЕЙ

Приведем здесь описание трех крупных морских катастроф, объяснение которым можно найти опять-таки с помощью уравнения Бернулли.

В октябре 1911 г. на внешнем рейде Саутгемптона в Англии произошла одна из крупнейших аварий. Катастрофа произошла следующим образом. Пассажирский пароход «Олимпик» водоизмещением 52 тыс. т, длиной 260 м, шириной около 30 м, с осадкой 10 м шел в одном направлении с английским крейсером «Хаук» (водоизмещение 7500 т, длина 110 м, ширина 18,3 м, осадка 7,2 м). «Хаук», обгоняя «Олимпик», имел скорость около 34 км/ч, а «Олимпик» — 25 км/ч. Расстояние между судами не превышало 110 м. После того как передняя часть крейсера «Хаук» сравнялась с кормой

«Олимпика», крейсер быстро отклонился в сторону парохода и ударил его в правый борт, несмотря на то, что руль должен был повернуть его в противоположную сторону. Оба корабля получили серьезные повреждения.

На маневрах французского военного флота тоже в начале XX века в Средиземном море с эскадренного броненосца «Бреннус» (водоизмещение 11 395 т, скорость 35 км/ч) вызвали флажными сигналами один из миноносцев, чтобы дать ему словесные указания. Миноносец, проходя на большой скорости и на небольшом расстоянии от «Бреннуса» с правого его борта, вдруг неожиданно резко изменил направление движения в сторону броненосца и, попав под форштевень, был разрезан пополам и утонул.

В октябре 1942 года лайнер «Куин Мери» (водоизмещение 81 тыс. т, длина 314 м) шел из США в Англию, имея на борту около 15 тысяч американских солдат. Лайнер следовал под конвоем крейсера «Кюрасоа» (водоизмещение 4290 т, длина 137 м) и шести эскадренных миноносцев. Внезапно крейсер «Кюрасоа», шедший параллельным курсом, резко повернул влево, подставил себя под форштевень лайнера, и был разрезан на две части.

На всех этих судах плавали очень опытные капитаны и стояли внимательные штурвалы, так что искать объяснение этим катастрофам в их поведении нельзя. Причину следует искать в законах гидромеханики.

Рассмотрим картину течения воды возле двух кораблей (рис. 26). Что видит наблюдатель, стоящий на одном из них? Вдали от кораблей скорость воды всюду

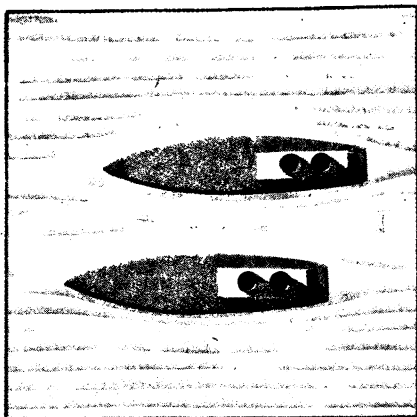


Рис. 26

постоянная, неизменным будет и давление в любой горизонтальной плоскости. Между кораблями жидкость, стесненная бортами, будет вынуждена двигаться быстрее. Запишем уравнение Бернулли для двух точек, лежащих вблизи свободной поверхности жидкости. В обеих точках давление будет одинаково и равно атмосферному давлению. Поэтому

$$gz_1 + \frac{v_1^2}{2} = gz_2 + \frac{v_2^2}{2}.$$

Следовательно, в той точке, где скорость больше, уровень воды будет меньше. Разность уровней с внешней и внутренней сторон кораблей и вызовет их стремительное сближение.

Пусть средний уровень воды между кораблями понизился всего на 20 см. При длине корабля 137 м это приведет к появлению боковой силы, равной 274 000 Н. Ясно, что попытка отвернуть нос корабля с помощью рулей в этом случае приводит к появлению дополнительной силы, сближающей корабли. Поэтому представляет интерес рекомендация, содержащаяся в старинных руководствах по мореплава-

нию: если нельзя избежать столкновения, то толкай первым.

Конечно, авторы этой рекомендации исходили прежде всего из того факта, что именно тот корабль, который толкает своим форштевнем борт другого корабля, имеет наибольшие шансы сохраниться. С точки зрения гидромеханики интересно то обстоятельство, что выполнить рекомендацию старинного руководства легче, чем избежать столкновения. При сильном сближении двух кораблей соотношение гидродинамических сил таково, что корабль послушается руля, если его разворачивать носом к борту другого корабля.

Что касается новых руководств для капитанов, то они, конечно, не отменяют законов гидромеханики, а исходят из них, накладывают ограничения на скорость и допустимое сближение идущих параллельным курсом кораблей.

ШАРИК ВИСИТ В ВОЗДУХЕ

С помощью уравнения Бернулли можно дать объяснение еще одному любопытному факту. Предлагаем читателю проделать следующий опыт, для которого ему не понадобится ничего, кроме куска аптекарской резиновой трубки длиной 20—25 см и шарика для игры в пинг-понг.

Наденьте один конец трубки на водопроводный кран, частично зажмите другой ее конец и поднимите его вверх. Постепенно открывая кран, добейтесь, чтобы у вас получился небольшой фонтанчик, подобный питьевому. На струйку фонтана осторожно опустите шарик. Что с ним произойдет? Можно ожидать, что шарик не удержится на вершине струи, соскользнет вбок и упадет.

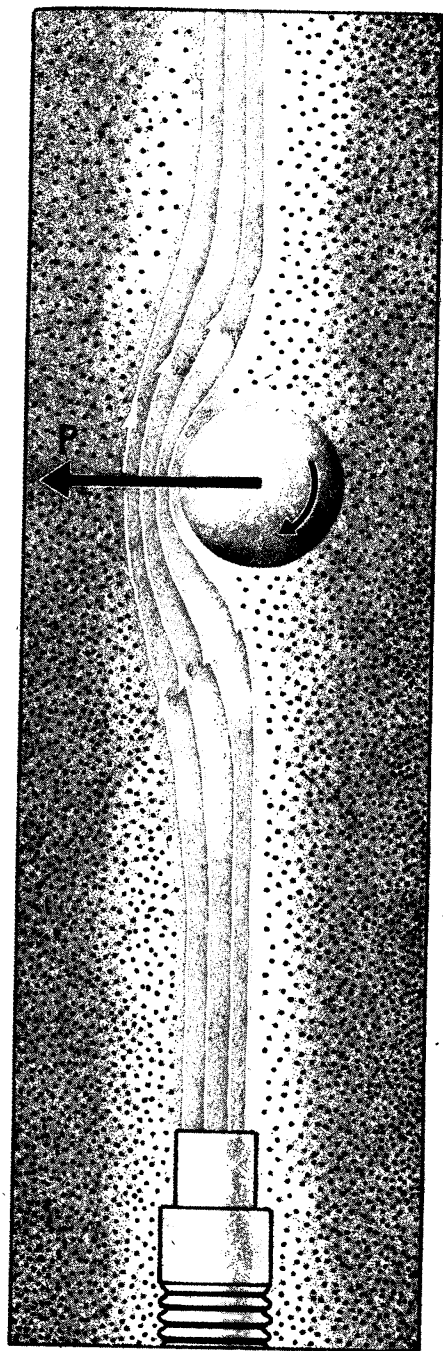


Рис. 21

На самом деле какая-то, непонятная пока сила не позволяет шарiku отклоняться в сторону от струи. А располагаясь над струей, он не может ни опуститься вниз, так как подпирает струя, ни подняться вверх, так как его тянет вниз сила тяжести. Так и висит этот шарик, медленно вращаясь вокруг своей оси.

Этот опыт будет еще более эффектным, если воспользоваться узкой струей воздуха, направленной вертикально вверх. Таковую струю можно получить, например, с помощью пылесоса, на котором предварительно нужно переставить шланг со стороны всасывания на сторону нагнетания, а отверстие в шланге частично закрыть пальцем. Вначале шарик нужно положить на струю воздуха, направленную вертикально вверх. После этого вы можете раскачивать струю в довольно широких пределах — шарик, как привязанный, будет следовать за струей. Чтобы понять, какие силы удерживают шарик в воздухе, рассмотрим картину течения воздушной струи при несимметричном расположении шарика (рис. 27). Шарик стесняет поток со своей левой стороны и вызывает увеличение скорости струи. Увеличение скорости приводит к уменьшению давления в этом месте по сравнению с остальными участками струи, где оно равно атмосферному. Благодаря этому и появляется сила, направленная к оси струи, которая не дает шарiku оторваться от воздушной струи.

ЭФФЕКТ МАГНУСА

Все теннисисты и игроки в пинг-понг хорошо знают, что закрученный мяч подвергается действию значительной аэродинамиче-

ской силы, которая сильно изменяет траекторию полета мяча, затрудняя игру противника. Этот эффект носит имя Магнуса. Указанное явление можно наблюдать на следующем простом опыте. Возьмите лист плотной бумаги, сверните его в трубку и заклейте край. Если теперь такую трубку заставить скатиться с наклонной поверхности, то можно заметить, что при падении трубка значительно отклонится от обычной траектории и совершит планирующий полет в направлении, противоположном ожидаемому.

Рассмотрим картину течения воздуха, обусловленную падением вращающейся трубки. Движение воздуха удобно рассматривать в системе координат, связанной с цилиндром. В такой системе ось цилиндра будет неподвижна, а воздух будет набегать на него.

В качестве иллюстрации можно воспользоваться тем же рис. 27, который пояснял течение возле шарика.

Левая сторона цилиндра вращается в сторону движения воздуха и тем самым увеличивает его скорость. Правая сторона цилиндра вращается навстречу основному потоку, и в этом месте скорость течения уменьшается. Согласно уравнению Бернулли давление слева будет меньше, чем справа. Это и приведет к появлению силы, которая обуславливает эффект Магнуса. Величина этой силы определяется следующей формулой:

$$P = \frac{1}{2} \pi d v_{\text{ц}} \rho l,$$

где d — диаметр цилиндра, l — его длина, v — скорость набегающего потока, $v_{\text{ц}}$ — окружная скорость вращения цилиндра, ρ — плотность среды.

Эта формула получена в предположении, что окружающая среда лишена вязкости. Однако экспериментальные результаты оказываются близкими друг к другу для значений скорости вращения цилиндра, не превышающей четырех скоростей набегающего потока. В этом предельном случае, подъемная сила

$$P = 2\pi d l v^2 \rho.$$

Для воздуха эта формула примет вид

$$P = 8,1 v^2 d l,$$

где сила измеряется в ньютонах, длина — в метрах.

Интересно сравнить подъемную силу, создаваемую обычным крылом и вращающимся цилиндром. Подъемная сила крыла определяется по формуле

$$Y = \frac{1}{2} c_y \rho v^2 S,$$

где S — площадь крыла, c_y — экспериментальный коэффициент (для наиболее совершенных крыльев этот коэффициент не превосходит 1,2). Для сравнения выберем цилиндр с той же площадью диаметального сечения. Тогда получим

$$\frac{P}{Y} = \frac{4\pi}{c_y} \approx 10.$$

т. е. оказывается, что вращающийся цилиндр при равных условиях создает силу в 10 раз большую, чем крыло.

ПАРУС ФЛЕТТНЕРА

Первая попытка использовать описанное преимущество ротора была сделана Флеттнером, который предложил использовать вращающиеся цилиндры вместо парусов. Для этой цели он переобору-

довал большой парусный корабль водоизмещением 778 т. Вместо парусов были поставлены две роторные башни высотой 18,5 м и диаметром 2,8 м. Общая площадь их диаметральных сечений была в 10 раз меньше площади снятых с корабля парусов. Как показали ходовые испытания, роторы Флеттнера по своим динамическим качествам не уступали парусам. В то же время по простоте обслуживания они значительно превосходили последние. Измерения показали, что на вращение роторов расходовалось в 50 раз меньше энергии, чем получалось от ветра (рис. 28).

Чем же объяснить, что несмотря на такие большие достоинства, корабли с парусами Флеттнера не получили до сих пор распространения? Это объясняется тем, что парусный корабль был вытеснен теплоходом, движение которого в меньшей степени зависит от капризов природы. Хотя в последнее время в печати появляются сообщения о целесообразности использования энергии ветра для движения кораблей. И при этом вновь вспоминают об удачных опытах Флеттнера.

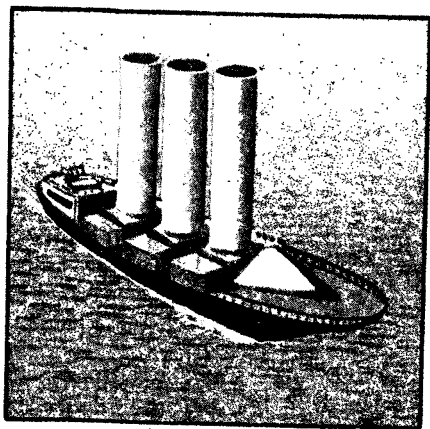


Рис. 28

ЛЕТАЮЩИЙ АВТОМОБИЛЬ

Укажем еще на одно возможное применение вращающегося цилиндра. Расположенный горизонтально, такой цилиндр во встречном потоке воздуха создает большую подъемную силу.

Кто из нас не мечтал об автомобиле, который мог бы подниматься в воздух? Такой автомобиль обладал бы неоценимыми преимуществами как перед обычными «земными» автомобилями, так и перед современными самолетами. Стоял бы такой автомобиль не на специальном аэродроме, а во дворе дома или в гараже. В любой момент вы можете сесть в него и влиться в уличный поток машин. Но вот вы разгоняетесь до скорости 60—70 км/ч и отрываетесь от дороги. Теперь вам не нужна дорога, вы можете свернуть в поле, перелететь через реку, снега и болота.

Произведем расчет роторного крыла для такого автомобиля. Вес автомобиля примем равным 16000 Н, минимальную скорость $v=18$ м/с, диаметр ротора 2 м. Подставляя эти данные в формулу для подъемной силы, найдем длину цилиндрического крыла $l \approx 2$ м. Таким образом, размер цилиндра получается вполне приемлемым для конструирования автомобиля.

Мы намеренно выбрали небольшую скорость движения (18 м/с), что соответствует 65 км/ч. Так как расходуемая мощность, необходимая для движения, пропорциональна кубу скорости, для нашего автомобиля не понадобится большей мощности. Кроме того, автомобиль не будет нуждаться в специальном средстве создания тяги.

Конечно, такой автомобиль можно применять только для полетов на малой высоте.

Поскольку несущий цилиндр имеет большие поперечные размеры, его внутренность можно использовать как фюзеляж для размещения пассажиров, двигателя и багажа. В этом случае приводить во вращение можно не сам ротор, а цилиндрическую решетку, охватывающую несущий цилиндр.

МЕТЕОР СГОРАЕТ В ВОЗДУХЕ

Августовскими вечерами часто можно видеть «падающие звезды». На черном бархате неба, усеянном алмазными блестками, вдруг появляется ослепительная огненная точка. Прочертив на небосводе короткую яркую полосу, она исчезает. Теперь каждый школьник знает, что это не звезды, а метеоры или метеориты, которые на своем пути встречают атмосферу Земли.

Что же происходит, когда метеор с большой скоростью входит в плотные слои атмосферы? До сих пор мы рассматривали течение несжимаемой жидкости или такие движения в воздухе, которые почти не приводят к его сжатию. Чтобы ответить на поставленный вопрос и дать объяснение многим другим явлениям, нужно учесть свойство воздуха сжиматься, которое в этих случаях играет существенную роль.

Рассмотрим течение воздуха в сужающейся трубе. Так как через любое сечение за единицу времени протекает одно и то же количество воздуха, то по мере сужения трубы скорость воздуха увеличивается. В воде увеличение скорости приводит к понижению давления и кипению холодной воды. Воздуху эта опасность не угрожает. До какой величины можно увеличить скорость в окружающей трубе? Оказывается, только до величины, с кото-

рой распространяется звук в самом узком сечении трубы. Никакое увеличение давления не позволяет превзойти этот рубеж.

Самое удивительное, что нарастив трубу расширяющимся участком, можно без дополнительных усилий получить сверхзвуковую скорость газа. Такое устройство, полученное шведским инженером Лавалем в результате теоретических и экспериментальных исследований, называется «соплом Лавала».

Когда какое-либо тело движется медленно, то воздух, как и вода, расступается перед ним, плавно обгибает тело и за кормой смыкается в сплошной поток. А если тело движется со сверхзвуковой скоростью? Тогда возмущения, вносимые телом, не успевают отойти от него и воздух в носовой части сжимается. В этом процессе важную роль играет отношение скорости движения к скорости звука, которая при обычных условиях равна 340 м/с. Это отношение названо числом Маха, по имени немецкого исследователя.

При сжатии воздух, как известно, нагревается. Вычисления показывают, что при движении тела со скоростью звука температура воздуха повышается на 60° С. Для советского сверхзвукового самолета ТУ-144 нагрев воздуха достигает 400° С. А в том случае, если число Маха равно 10, нагрев достигает до 6000° С, т. е. до температуры, при которой испаряются все известные в природе вещества.

Эти цифры позволяют представить, что происходит, когда космические тела и корабли входят в плотные слои атмосферы. Малые метеоры сгорают, не достигнув поверхности Земли. Крупные (их тогда называют метеоритами) — рас-

плачиваются тем, что оставляют в воздухе свою большую часть.

Как же спасти космический корабль от действия столь высокой температуры? Напомним читателю, что эта проблема являлась серьезным препятствием на пути освоения космоса. Все первые искусственные спутники Земли существовали до тех пор, пока они находились достаточно далеко от границы атмосферы. Как только они приближались к Земле с намерением вернуться туда, откуда они вышли, Земля принимала их в свои настолько горячие объятия, что они тут же сгорали, послав свои последние радиосигналы: «бип, бип, бип, ...».

Вход в атмосферу стал возможен только после того, как были созданы настолько мощные ракеты, что они могли послать на круговую орбиту спутник большого веса, который имел на борту тормозные двигатели и запас топлива к ним. Кроме того, на корабле должна быть сложная система ориентации и система автоматического управления. По сигналу с Земли или по команде космонавта корабль поворачивается так, что сопла его тормозных двигателей направляются в сторону движения. После включения эти двигатели начинают затормаживать корабль. Так как для полной остановки корабля понадобилось бы столько же топлива, сколько и для разгона, то торможение осуществляется только на некоторую величину. При этом корабль сходит со своей околоземной орбиты и входит в атмосферу, имея уже несколько меньшую скорость. Однако космический корабль или капсула, отделившись от него, все равно подвергаются аэродинамическому нагреву до температур, превосходящих тем-

пературы испарения всех известных на Земле веществ.

Чтобы понять, как же все-таки сохраняется корабль в таких условиях, сделайте следующий опыт. На слегка нагретый утюг капните водой. Капля плотно ляжет на поверхность утюга и через несколько секунд испарится. Теперь нагрейте утюг до самой высокой температуры, намного превосходящей температуру кипения воды. Казалось бы, что теперь капля испарится, едва коснувшись утюга. На самом деле она будет долго «бегать» по его поверхности.

Этот эффект объясняется тем, что между горячей поверхностью утюга и каплей воды появляется слой пара, который и защищает каплю от действия высокой температуры. Такой же способ защиты принят и для космических кораблей. Носовую часть корабля покрывают толстым слоем какого-либо вещества с малым коэффициентом теплопроводности, высокой температурой испарения и большой скрытой энергией испарения. Применяемые покрытия при высоких температурах переходят из твердого состояния в газообразное, минуя жидкую фазу. Такое испарение называется абляцией. Покрытие своими испарениями защищает корабль от действия высокой температуры.

СМЕРЧ-ТОРНАДО

Знает ли читатель, что такое смерч-торнадо?

Здесь нужно сказать несколько слов по поводу терминологии. В советской научной литературе употребляется термин «смерч» применительно к двум разным физическим процессам, которые имеют, правда, некоторое сходство. Пер-

вый — это процесс, вызываемый восходящими потоками воздуха над сильно нагретой поверхностью Земли. Некоторая начальная циркуляция воздуха на периферии смерча приводит к заметному вращению вблизи центра, создавая общее винтовое течение, направленное вверх. При этом воздух захватывает с земли пыль, что и обусловило его английское название *dust devil* (пыльный дьявол).

«Пыльный дьявол», несмотря на свое грозное имя, представляет собой безобидное явление, которое имеет хорошее физическое и математическое описание. Этого не скажешь о другом смерче, который в западной литературе называется «торнадо». О нем-то и пойдет речь ниже.

Торнадо зарождается из материнского или смерчевого облака, спускается вниз до Земли в виде длинного хобота, внутри которого воздух совершает быстрое вращательное движение со скоростью, иногда достигающей скорости звука.

Материнское облако, представляющее собой маленький тропический ураган, как и настоящий ураган, имеет так называемый глаз, в котором стоит мертвая тишина, и обладает спиральным строением. Если смерчевое облако имеет большие размеры, оно практически ложится на Землю, и мало отличается от циклона. Очень часто циклон приводит к появлению торнадо.

Средние размеры смерчевого облака невелики: в поперечнике 5—10 км, высота 4—5 км. Расстояние между Землей и верхним краем облака порядка нескольких сот метров, реже больше.

В смерчевом облаке, как правило, наблюдается горизонтальное

вихревое облако с наклонным или вертикальным столбом самого смерча-торнадо.

Детальное описание внутренней полости смерча дал один фермер из штата Канзас [11]. Стоя во входе в убежище, он наблюдал за приближающимся по равнине смерчем. Вблизи от убежища конец воронки смерча поднялся над землей и прошел над фермером. «Большой лохматый конец воронки повис прямо над моей головой. Кругом все неподвижно. Из конца воронки шел скрипящий, шипящий звук. Я взглянул вверх и, к своему удивлению, увидел само сердце смерча. В его середине была полость диаметром 30—70 м, шедшая кверху на расстояние около километра. Стены полости были образованы вращающимися облаками, а сама она была освещена непрерывным блеском молний, зигзагом перескакивавших с одной стены на другую. Полость была совершенно пустой, и только туманные образования двигались вверх и вниз. Смерч двигался медленно, и у меня было время хорошо увидеть все внутри и снаружи».

Внутренняя полость смерча, как это показали многочисленные наблюдения и измерения, обладает резко пониженным давлением. Поэтому, когда она соприкасается с запертым домом с закрытыми окнами, дом буквально взрывается, и целые стены вываливаются наружу.

Резко ограниченные почти гладкие плотные стенки воронок представляют одно из важнейших и своеобразных свойств смерча. По видимому, именно этим свойством смерча объясняются некоторые его проявления.

В Канзасе, этой стране смерчей, 9 октября 1913 г. смерч прошел по небольшому саду. Он выр-

вал с корнем большую яблоню и разорвал ее на отдельные куски. В метре от яблони стоял улей с пчелами,— он остался невредим.

Фермер ехал по проселочной дороге в телеге, запряженной двумя лошадьми. День был душный, жаркий, надвигалась гроза. Лошади шли шагом и фермер задремал. Проснулся он, когда раздался страшный грохот, налетел ужасный вихрь. Через несколько секунд вихрь ушел вперед, все прояснилось, стало тихо и солнечно. Телега и фермер на ней остались на месте, но оглобля и две лошади исчезли. Они были унесены смерчем.

В штате Небраска на ферме в коровнике сидела хозяйка и доила корову. Вдруг коровник и корова поднялись в воздух и улетели. Хозяйка осталась сидеть на стуле, рядом с ней ведро с молоком.

В штате Оклахома четырехкомнатный двухэтажный деревянный дом был унесен смерчем вместе с семьей фермера. Дом был разломан на мелкие куски, вся семья убита. В дом вела невысокая трехступенчатая лестница. Рядом с ней к дому была прислонена скамейка. И лестница, и скамейка остались на месте. Мало этого: недалеко от лестницы стоял старенький фوردик и под деревом на столе горевшая керосиновая лампа. У автомашины смерч вырвал два задних колеса, но кузов остался. Керосиновая лампа продолжала гореть, как будто рядом никакого бешеного вихря и не было.

В СССР во время смерча 23 августа 1953 г. в г. Ростове (Ярославской области) во дворе дома № 37 по Февральской улице у колодца снесло деревянный сруб, а стоявшее рядом ведро и деревянная кадка остались на месте.

Скорости движения воздуха в смерче столь велики, что ни один из существующих приборов для измерения скоростей не выдерживает, ломается, а чаще всего исчезает бесследно. Однако специалисты довольно точно высчитывали эти скорости по косвенным измерениям.

Далласский смерч 2 апреля 1957 г., пересекая железную дорогу, опрокинул несколько груженных, очень тяжелых вагонов. По их весу и форме специалисты определили, что скорость ветра достигала 210—225 км/ч, а порывами до 350 км/ч. Немного дальше от дороги была разрушена громадная и прочная подставка для объявлений: в этом месте скорость достигала 480 км/ч.

Американский метеоролог Файнли, детально изучивший многие сотни смерчей, еще в 1884 г. приводил цифру 1300 км/ч. Эту цифру он получил на основании следующего зарегистрированного факта: мелкая галька, увлекаемая смерчем, пробивала оконные стекла так же, как револьверные пули,— образуя круглые отверстия в целом стекле.*

Знаменитый в Америке Ирвингский смерч, который появился 30 мая 1879 г. в штате Канзас, среди многих разрушений уничтожил новый железный мост длиной 75 м. Подняв громадное стальное сооружение, воронка в воздухе изогнула и закрутила его с невероятной силой. Вся структура моста превратилась в плотный сверток диаметром 1,5—2 м.

Перечисленные примеры свидетельствуют о сверхзвуковой скорости движения воздуха в воронке (1200 км/ч).

О большой скорости смерча свидетельствуют другие многочисленные факты.



Рис. 25

После смерча стена одного деревянного дома оказалась проткнутой насквозь доской. Имеется много зарегистрированных случаев, когда соломинки протыкали толстые доски, щепки протыкали деревья (см. сделанный с фотографии рис. 29), а сосновая палка пробила лист железа толщиной около сантиметра.

Точные измерения скорости вращения редки и дают разные результаты. Американский исследователь Брукс (Brooks, 1951) в своем обзоре смерчей называет максимальную скорость 720 км/ч. В более поздней работе (Abdullah, 1955) на основании кинограмм определяется скорость 1200 км/ч, равная скорости звука и выше. Интересны случаи, когда материнское облако опускается на Землю, воронка отсутствует совсем и облако медленно ползет по Земле.

Формы смерчей очень разнообразны, но при всем этом разнообразии можно выделить устойчивые особенности: четкая граница между смерчем и неподвижной атмосферой, что сильно отличает смерч от других воздушных обра-



Рис. 36

зований; значительная длина и малый диаметр; преимущественно вертикальное положение. Тонкие изогнутые формы обычно характеризуют конечный период существования смерча.

Колонноподобные и воронкообразные смерчи наиболее многочисленны и типичны. Хотя и реже, но бывают смерчи с очень короткой колонкой, когда материнское облако практически катится по земле. Такой смерч отличается от циклона разве что размером, но в отличие от циклона обладает большей плотностью энергии (см. сделанный с фотографии рис. 30).

Раньше считалось, что смерч является чем-то обособленным, существующим независимо от материнского облака. Сейчас доказано, что смерч и облако представляют элементы единого вихревого движения.

Когда воронка касается Земли, у ее подножья почти всегда образуется облако или столб пыли или водяных брызг. Этот столб называют каскадом. Один из наблюдателей отметил, что пыль и мелкие предметы в каскаде поднимаются совершенно так же, как и

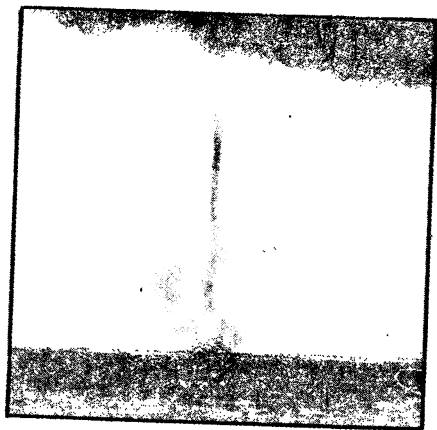


Рис. 31

при ударе воды из шланга при поливке улицы. Иногда каскад поднимается на несколько сот метров, как на воспроизводящем фотографии рис. 31. Только наличие внешнего вихревого течения может объяснить подъем воды в каскаде. Скорость перемещения и время существования смерчей весьма отличны от поведения материнского облака. Средняя скорость перемещения смерча равняется 40—60 км/ч. Время существования смерчей, зарегистрированных в Соединенных Штатах, колеблется от нескольких минут до 7 часов.

Змееподобные смерчи обладают наименьшей шириной, иногда несколько метров. Средняя ширина воронкообразных смерчей равняется 350—400 м, а высота достигает несколько сот метров, иногда 1,5 км.

Интересно влияние смерчей на небольшие водные массы. Описывается ряд случаев, когда смерч высасывал до дна колодцы озера и, болота осушались полностью. Их вода вместе с фауной и флорой поднимались в смерчевое

облако и в горизонтальном вихре переносились на десятки километров и больше.

Пересекая большие реки или озера, смерч-торнадо образует в толще воды глубокую траншею. Именно такую картину наблюдали свидетели московского смерча 1904 года.

Своеобразной особенностью смерчей является их «прыгание». Пройдя некоторое расстояние по Земле, они поднимаются и перемещаются по воздуху, не касаясь Земли и не вызывая движения воздуха на поверхности. Именно в такие моменты проводились наблюдения и фотографирование внутренней полости смерча. Затем смерчи снова опускаются и продолжают движение, оставляя после себя пунктирную линию, образованную разрушениями.

Наиболее тщательная регистрация и изучение смерчей проводится в Соединенных Штатах. За период с 1916 по 1950 годы наблюдалось 5204 смерча. От них погибло 7961 человек. Материальные убытки составляют 0,5 миллиарда долларов. В более позднем обзоре приводятся данные вплоть до 1961 г. Количество зарегистрированных смерчей равняется 11 053. Среднегодовое количество смерчей в период с 1953 по 1963 годы равняется 595. Однако в 1957 г. их было 864, а в 1965 г.—927.

В странах, лежащих в более высоких широтах, в том числе в европейских и СССР, смерчи образуются реже, обладают меньшей разрушительной силой и регистрация их осуществляется не столь тщательно, как в США.

Даже из приведенных выше описаний можно видеть, что некоторые физические эффекты, со-

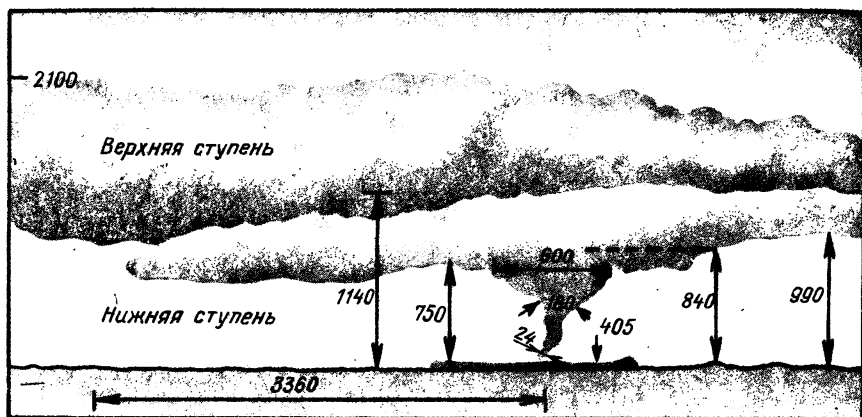


Рис. 32

проводящие торнадо, не укладываются в привычные представления механики жидкости и газа.

Действительно, каков механизм вращения воздушного столба с большой скоростью? Почему хобот спускается вниз, с силой ударяется о землю и воду и в то же время сосет эту же воду вверх? Почему существует резкая граница между вращающейся и неподвижной массой воздуха? Почему смерч «прыгает»?

Качественное объяснение этих эффектов на основе известных нам законов гидродинамики кажется совершенно необходимым для душевного комфорта всякого специалиста. Человеку, далекому от науки, по-видимому, следует объяснить, что душевный комфорт ученого является таким же побудительным мотивом научных исследований, как и потребности практики. Кстати, о последних. Выявление механизма торнадо, быть может, позволит найти средства воздействия для уменьшения его разрушительного действия. Искусственно созданный управляемый воздушный вихрь, способный всасывать и транспортировать

сыпучие материалы, по-видимому, мог бы найти применение и в человеческой практике.

Попытаемся разобраться в механизме смерча-торнадо. Для этого обратимся к рис. 32, который мы взяли из книги Д. В. Наливкина [11].

Материальным и энергетическим источником смерча является смерчевое или, как его еще называют, материнское облако. Как и всякое облако, оно возникает благодаря восходящему потоку, который поднимает теплый влажный воздух. Отличие состоит лишь в том, что смерчевое облако обязательно вращается. Центральная часть его движется вверх, доходит до инверсионного слоя и растекается по горизонтали. Благодаря охлаждению и конденсации влаги плотность воздушных масс быстро увеличивается, и они начинают опускаться вниз. Так возникает нисходящий поток, который, встречаясь с восходящим, образует вращающиеся кучевые облака. Движение и форма смерчевого облака таковы, что некоторые исследователи их называют маленькими ураганами.

Вращающаяся тороидальная масса воздуха обладает достаточной устойчивостью, чтобы сохранять свою форму и положение. Однако обильная конденсация влаги может настолько увеличить плотность, что из облака начнут «проливаться» огромные струи. Естественно, что эти струи, как материальные носители завихренности, будут вращаться теперь уже вокруг вертикальной оси. Так возникает воронка смерча. В соответствии с законом сохранения момента количества движения окружная скорость в воронке растет по мере течения воздуха из ее широкой части в узкую обратно пропорционально диаметру. В соответствии с рис. 31, если скорость вращения в облаке равнялась 10 м/с, то у основания воронки она могла достигать 240 м/с. Таким образом, экстенсивный источник энергии восходящих потоков благодаря воронке вызывает интенсивное вращение некоторой части исходной массы.

Большая центробежная сила уравнивается разрежением воздуха, возникающим на оси смерча. Это условие естественным образом выполняется на всей длине смерча, кроме его конца, если он не лежит на земле. А как выполняются условия равновесия на нижнем конце воронки, почему она удлинняется?

Чтобы ответить на этот и другие вопросы, мы должны привлечь к рассмотрению один интересный факт, наблюдаемый в вихревых камерах. Такие камеры подвергаются интенсивному исследованию по причине особого практического интереса. На их основе делаются циклонные топки, центробежные сепараторы, вихревые холодильники и т. д. Условия движения

в вихревой камере весьма близки к тем условиям, которые нас интересуют.

Подробные исследования структуры течения в вихревой камере позволили установить, что весь поток воздуха образован тонкими вихревыми нитями, вытянутыми вдоль основного течения. Однородной изотропной среде, какой является воздух, структурные образования в виде вихревых нитей придают новые неожиданные свойства.

Всем хорошо известно, что вращающееся тело обладает свойством сохранять направление оси вращения и препятствовать силам, которые пытаются наклонить ось. На этом принципе основаны гироскопические компасы, датчики угловых перемещений и детские волчки.

Вихревая нить представляет собой вытянутый объем быстровращающейся массы воздуха. Каждый отрезок нити можно рассматривать как маленький гироскоп, оба конца оси которого гибко соединены с осями смежных гироскопов.

Такая схема позволяет объяснить наблюдаемое поведение одиночной вихревой нити, когда она под действием боковых сил приобретает винтовую геометрию и вращается как твердое целое. Две или больше вихревых нитей благодаря взаимодействию вращаются вокруг общей оси — водят хоровод.

Подробные вычисления показывают, что воздушный столб, образованный набором отдельных вихрей, обладает упругостью и ведет себя как резиновый жгут. Момент, приложенный к одному концу, благодаря закрутке передается без изменения на другой

конец, угловая скорость тоже сохраняется. Граница раздела между быстро вращающейся массой смерча и неподвижной окружающей средой, обычно неустойчивая, будет сохраняться.

Сделав предположение, что столб смерча-торнадо состоит из набора вихревых нитей, мы можем дать объяснение некоторым его физическим особенностям, которые не поддавались объяснению.

Хотя мы ограничились рассмотрением смерча-торнадо, есть необходимость коснуться и смерча—пыльного дьявола. Дело в том, что исследователи торнадо неоднократно наблюдали, как навстречу опускающейся воронке, видимой благодаря конденсированной влаге материнского облака, поднимался от земли другой смерч—пыльный дьявол, видимый благодаря захваченной им пыли. Тем более такой смерч должен возникать при периодических отрывах торнадо от земли. Весь тот механизм торнадо, который мы описали выше, сохраняется и при наличии пыльного дьявола. Постоянное или периодическое присутствие пыльного дьявола в нижней части торнадо, по-видимому, является типичным состоянием. Именно этим можно объяснить каскад и чехол из пыли, в который иногда одевается столб. Некоторые изменения окружной и радиальной скоростей вблизи торнадо находятся в противоречии с другими данными о скачке окружной скорости, но хорошо объясняются, если принять, что нижняя часть была дополнена пыльным дьяволом.

Итак, мы нашли объяснение почти всем видимым проявлениям торнадо, используя известные нам законы гидромеханики. Мы гово-

рим «почти», так как совершенно не остановились на термодинамических, электростатических и других возможных процессах, сопровождающих торнадо. Более того, мы молчаливо предполагали, что неучтенные процессы не влияют на сделанные выводы.

Теперь самое время обратиться к возможному практическому применению наших знаний. Для людей, которые живут в зоне возникновения смерчей и подвергаются их разрушительному действию, по-видимому, самым главным практическим результатом было бы предотвращение или уничтожение торнадо.

Поскольку материальным и энергетическим источником торнадо является смерчевое облако, то его уничтожение предотвратило бы и возникновение смерча.

Обработка смерчевого облака подходящим реагентом, вызывающим конденсацию влаги и выпадение дождя, обеспечит достижение цели. Потребность в обработке больших объемов облаков, потенциальных родоначальников смерча, может оказаться существенным недостатком предлагаемого способа. Поэтому следует рассмотреть возможность воздействия на смерч после его формирования.

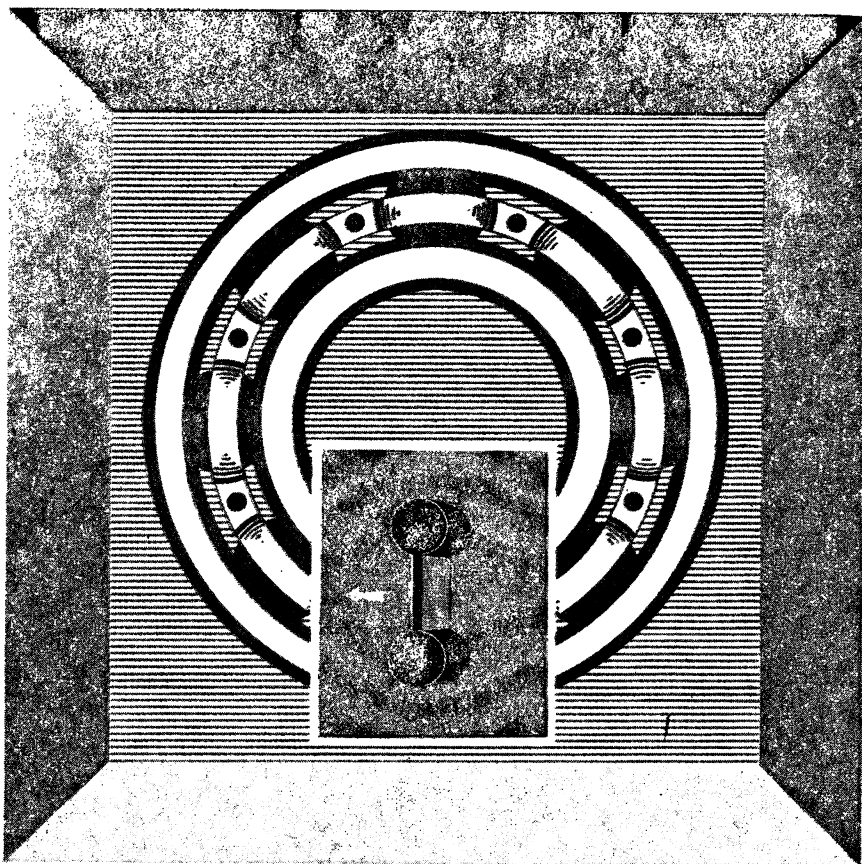
Из рассмотренного описания видно, что воронка смерча, через которую осуществляется передача энергии смерчевого облака, является самой нагруженной частью смерча.

Разрушение воронки смерча приведет к ликвидации крутящего момента и к остановке и исчезновению вихря. Такое разрушение можно обеспечить путем нарушения равновесия между центро-

бежными силами и градиентом давления. Для этого достаточно в центре воронки выпустить какое-то количество массы, тепла и радиального импульса путем сжигания топлива или взрыва. Для доставки топлива и взрывчатого вещества в устье воронки можно воспользоваться транспортирующей способностью смерча. Он сам всосет и поднимет нужное вещество, нам достаточно только осуществить дистанционное воспламенение или взрыв.

Физическая реализация механизма торнадо в малых масштабах позволила бы, по-видимому, сконструировать новый тип пылесоса, погрузочное и разгрузочное устройство для сыпучих материалов, хлопоуборочную машину большой производительности и тому подобные машины.

Даже одного рассмотренного смерча-торнадо достаточно, чтобы убедиться в бесконечном разнообразии физических эффектов в природе.



ВЯЗКАЯ ЖИДКОСТЬ

**НЕ ПОМАЖЕШЬ —
НЕ ПОЕДЕШЬ**

За давностью лет трудно установить, кто первый ввел в употребление это правило. Это могли быть русские купцы, которые на пути из варяг в греки волоком преодолевали водораздел между северными реками и Днепром. Чтобы уменьшить силу трения, они смазывали деревянные брусья, служившие рельсами, салом.

Обязательной принадлежностью старинных телег было ведро с колесной мазью. Оси в то время делались деревянными, и без обильной смазки быстро перетирались. Легко представить, как старый, умудренный опытом возница, смазывая очередной раз ось телеги, говорит своему более молодому товарищу: не помажешь — не поедешь.

Так или иначе, эта пословица появилась давно, но она не поте-

рjala своего значения и сейчас. Всякое сопряжение подвижных и неподвижных деталей требует смазки трущихся поверхностей. Каким требованиям должна удовлетворять смазочная жидкость? Процессы, протекающие в зазоре между подвижными деталями, можно условно разбить на физические и гидромеханические процессы.

Так, образование и сохранение на твердой поверхности тонкой масляной пленки, которая не исчезает даже под давлением в 1000 Н/см^2 , относится к физике поверхностного слоя. Легко понять, что присутствие такого слоя уменьшает износ сопряженных поверхностей в момент трогания и остановки механизмов. Отметим, что вода, керосин или воздух такого слоя не образуют. К физическим же явлениям следует отнести и процесс восстановления трущихся поверхностей за счет металлических присадок, вносимых в смазочную жидкость. Здесь будет уместно заметить, что такой прием давно и успешно использует живая природа. Жидкость, которая смазывает суставы, и материал самих суставов имеют одинаковый состав. В процессе износа поверхность сустава восстанавливается за счет смазочной жидкости. Этим в значительной степени объясняется большой ресурс живых механизмов и такой общий для живой природы принцип: чем больше движения, тем лучше для организма.

Однако в рамках этой книги мы должны ограничиться рассмотрением только гидродинамических процессов, т. е. рассмотрением движения жидкости и возникающих при этом сил инерционного и вязкого происхождения.

Строго говоря, все реальные жидкости и газы являются вязкими, хотя до сих пор мы обходили молчалим этот факт. Дело объясняется тем, что во всех предыдущих примерах роль вязкости была невелика. Однако в задачах гидродинамики есть процессы, в которых главную роль играет именно вязкость. О них-то сейчас и пойдет речь.

Проявление вязкости проще всего обнаружить простым прибором, который изображен на рис. 33. Внутри вертикально расположенного цилиндра вложен другой. Между ними имеется небольшой зазор. Внутренний цилиндр подвешивается к горизонтальной перекладине на тонкой проволоке, а внешний цилиндр укрепляется с помощью подшипников и имеет привод от электромотора. В зазор между цилиндрами наливается какая-либо жидкость. Если внешний цилиндр привести во вращение с некоторой постоянной скоростью, то внутренний цилиндр будет увлекаться жидкостью в ту же сторону. Однако, удерживаемый закрученной проволокой, он остановится в некотором положении.

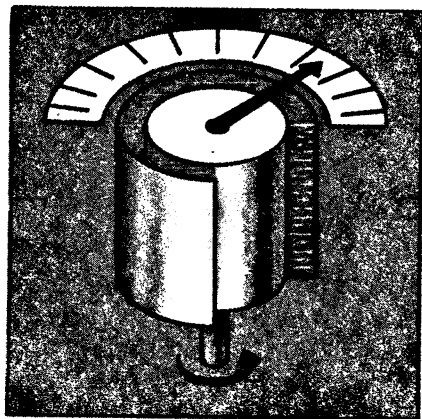


Рис. 33

Рассмотрим течение жидкости в малом зазоре между цилиндрами. Основной чертой вязкой жидкости является ее способность прилипать к стенке даже в том случае, если цилиндр изготовлен из водоотталкивающего материала. Прилипшие слои, с одной стороны, увлекаются движущимся цилиндром, а с другой — тормозятся неподвижным цилиндром. В результате устанавливается для малого зазора распределение скоростей, мало отличающееся от линейного.

По углу закручивания внутреннего цилиндра можно определить действующий на него момент. Если этот момент разделить на радиус цилиндра и на его площадь, то мы получим величину силы касательного трения, которую обозначим буквой τ . Кроме того, введем обозначение h для зазора между цилиндрами и v_n для окружной скорости вращения наружного цилиндра.

Ньютон сформулировал гипотезу, согласно которой сила касательного трения определяется по следующей формуле:

$$\tau = \mu \frac{v_n}{h},$$

где μ — константа, не зависящая ни от скорости, ни от величины зазора. Она характеризует физические свойства жидкости и называется динамической вязкостью.

Гипотеза Ньютона оказалась справедливой почти для всех жидкостей. Описанным прибором, который называется вискозиметром Куэтта, можно определить вязкость различных жидкостей.

Весьма похожее течение возникает в зазоре между шипом и подшипником в подшипнике скольжения. Отличие появляется из-за того, что поперечная нагрузка прижимает шип к нижней стороне

и он начинает катиться по изогнутой стороне подшипника, стараясь подняться вверх, чему препятствует нагрузка. Шип как бы буксует по поверхности подшипника и при этом подминает под себя смазочную жидкость.

Несущая способность или допустимая нагрузка такого подшипника определяется формулой

$$F = 12\mu R^3 \omega / h,$$

где μ — динамическая вязкость смазочной жидкости, ω — угловая скорость вращения шипа, h — зазор между шипом и подшипником в ненагруженном состоянии, R — радиус шипа.

Анализ этой формулы может дать очень много для понимания конструкции и механики процесса смазки.

Первый вопрос, который можно поставить: какой вязкостью должна обладать смазочная жидкость? Чем больше μ , тем большую нагрузку выдержит подшипник. Однако увеличение вязкости приведет к большому моменту, который тормозит вращение шипа, как это следует из формулы

$$M = 2\mu R^2 \omega / h.$$

Тогда, может быть, следует идти по пути уменьшения зазора h ? Действительно, машиностроение выбрало именно этот путь. Гладкие шейки коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания, зажатые между баббитовыми вкладышами, образуют подшипник с чрезвычайно малым зазором, так что даже малой вязкости горячего масла оказывается достаточно, чтобы обеспечить необходимую несущую способность подшипника.

В то же время телега, у которой и зазор h велик, и скорость ω мала, должна смазываться

густой, так называемой тележной мазью.

Как уменьшить сопротивление подшипника скольжения и сохранить при этом его нагрузочную способность?

Попытаемся ответить на этот вопрос.

Предыдущие формулы и выводы, которые из них следуют, получены в предположении, что зазор h мал, а вязкость μ велика настолько, что инерционные силы пренебрежимо малы по сравнению с силами вязкости.

Рассмотрим другую крайность. Будем считать, что зазор и смещение осей велики, а вязкость мала, так что инерционные силы могут превосходить вязкие силы.

На рис. 34 показана картина течения, возникающая в таком подшипнике, полученная расчетным путем.

Замкнутое вторичное течение, возникающее в большом несимметричном зазоре между шипом и подшипником, приводит к появлению силы инерционного происхождения. Эта сила пропорциональна квадрату скорости течения жидкости, пропорциональна плот-

ности жидкости и совсем не зависит от ее вязкости. Последнее обстоятельство позволяет применять для смазки такую маловязкую и доступную жидкость, как вода. При этом момент сопротивления, пропорциональный вязкости и обратно пропорциональный зазору, оказывается пренебрежимо малым.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Одной из наименее исследованных задач является задача гидродинамического сопротивления. Говоря о сопротивлении, необходимо ввести хотя бы простейшую классификацию.

Когда водоизмещающее тело движется по поверхности воды, то от его корпуса расходятся две волны — носовая и кормовая. Они создают сопротивление, называемое волновым. На образование этих волн расходуется мощность двигателей. По мере увеличения скоростей плавания энергия этих волн и, следовательно, потребляемая мощность быстро растут. Именно поэтому судостроители стремятся вырвать корабль из объятий воды либо с помощью воздушной подушки, либо с помощью подводных крыльев.

Помимо волнового сопротивления, смоченная поверхность судна испытывает сопротивление, обусловленное вязкостью воды. В чистом виде это сопротивление проявляется для подводной лодки, когда она плывет на значительной глубине.

Каждая точка поверхности движущегося под водой тела испытывает действие силы, которая имеет две компоненты — нормальную и касательную к поверхности тела. Касательная компонента возникает



Рис. 34

благодаря относительному скольжению частиц жидкости. Равнодействующая этих сил, называемая сопротивлением трения, зависит от площади смоченной поверхности.

В неподвижном состоянии равнодействующая сил давления не имеет горизонтальной компоненты. Если бы жидкость была лишена вязкости, то такое положение сохранилось бы и при движении. Однако тормозящее действие касательных сил трения снижает давление в кормовой части судна по сравнению с давлением в носовой части. Это обстоятельство приводит к появлению сопротивления давления, которое иногда называют профилным.

ПАРАДОКС ДАЛАМБЕРА

В том гипотетическом случае, когда жидкость лишена вязкости и, следовательно, свободно проскальзывает вдоль стенок обтекаемого тела, исчезает как сопротивление трения, так и сопротивление давления. Сопротивление невязкой жидкости равно нулю. Размышляя здраво, следовало бы ожидать, что сопротивление маловязкой жидкости будет столь же мало, как сама вязкость.

К сожалению, в этом случае здравый смысл нас подводит. Такие распространенные среды, как вода и воздух, обладают весьма малой вязкостью. С ростом скорости и размеров движущихся тел влияние вязкости становится еще меньше. Тем не менее сопротивление оказывается очень большим. Это явление называют парадоксом Даламбера.

Подчеркивая, что из всех проблем гидродинамики проблема сопротивления изучена в наименьшей степени, мы имели в виду отсут-

ствие полного объяснения парадокса Даламбера. Почему важно иметь такое объяснение? Представьте себе, что объединенными усилиями теоретиков и экспериментаторов будет доказана ограниченность парадокса и будут указаны условия, когда парадокс Даламбера не имеет места. Это значит, что инженеры-судостроители получают в руки способ сильного уменьшения гидродинамического сопротивления.

Как известно, вязкая жидкость прилипает к неподвижным стенкам обтекаемого тела, это приводит к торможению движущейся жидкости, к отрыву потока в кормовой части тела и, как следствие, к увеличению сопротивления трения и давления. А что если сконструировать тело, каждая точка поверхности которого может перемещаться вниз по потоку в касательной плоскости? При достаточной скорости движения мы не только устраним торможение жидкости на границе обтекаемого тела, но можем даже создать тягу. Вот только конструкция будет сложной. Легче создать модель, в которой движется с постоянной скоростью только часть граничных точек.

На рис. 35 показана такая модель, которая состоит из пластинки, расположенной перпендикулярно потоку, и двух цилиндров по краям пластинки. Эксперименты с такой моделью показали следующее. Пока цилиндры были неподвижны, их присутствие не влияло на течение и на силу сопротивления. Когда цилиндры привели во вращение, сопротивление уменьшилось в пять раз. С ростом размеров вращающихся цилиндров и скорости потока сопротивление уменьшалось обратно пропорционально корню квадратному из этих величин.

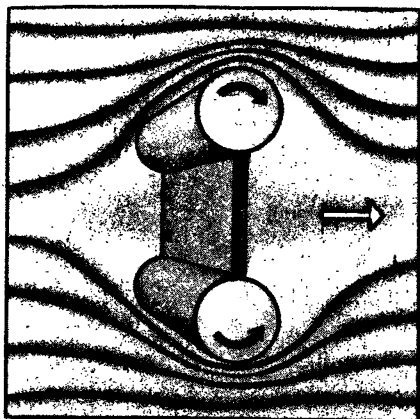


Рис. 35

Естественно задать вопрос, какой энергетической ценой было достигнуто такое уменьшение сопротивления. Ведь на вращение цилиндров расходовалась какая-то мощность. Ответ на этот вопрос определяется двумя обстоятельствами. Во-первых, для вращении гладких цилиндров в воде требуется мощность, пропорциональная вязкости. А так как вязкость воды мала, то мала и потребляемая мощность. Во-вторых, цилиндры вращались по потоку. Их окружная скорость в точности равнялась средней скорости движения жидкости вблизи цилиндров, т. е. цилиндры не подгоняли и не тормозили жидкость. В силу этих двух причин мощность, расходуемая на вращение цилиндров, была много меньше выигрыша по сопротивлению.

Уменьшения гидродинамического сопротивления можно добиться также с помощью упругого покрытия, на котором должна генерироваться бегущая волна. Но поскольку прототип такого механизма уменьшения сопротивления имеется у водных животных, об этом речь пойдет в главе «Гидро-

динамика животных». В главе «Гидродинамические машины» будет рассказано, как рационально выбранная компоновка корпуса и двигателя тоже обеспечивает уменьшение сопротивления.

НЕНЬЮТОНОВСКИЕ ЖИДКОСТИ

В связи с бурным развитием химии полимеров инженерам все чаще приходится сталкиваться с растворами, свойства, которых сильно отличаются от привычных нам жидкостей. Такие жидкости принято называть неньютоновскими, так как для них не справедлив закон Ньютона, связывающий скорость сдвига, вязкость и касательное трение. С одним примером такой жидкости мы познакомились в главе «Гидростатика», когда говорили о тиксотропных глинистых растворах. Вязкость таких растворов не является постоянной величиной, а зависит от характера движения. Там же был приведен пример, как можно использовать специфическое свойство этих растворов.

В типографском деле давно используется тиксотропное свойство раствора краски. В процессе движения, когда краска наносится на клише или выжимается через тончайшее нейлоновое сито, она ведет себя как жидкость с умеренной вязкостью. В тот момент, когда краска, нанесенная на бумагу, перестает двигаться, она превращается в твердое тело. Обычная жидкость в этих условиях продолжала бы растекаться, фильтроваться. При этом изображение соседних точек сливалось бы. Качество печати во многом обусловлено тиксотропным свойством применяемой краски.

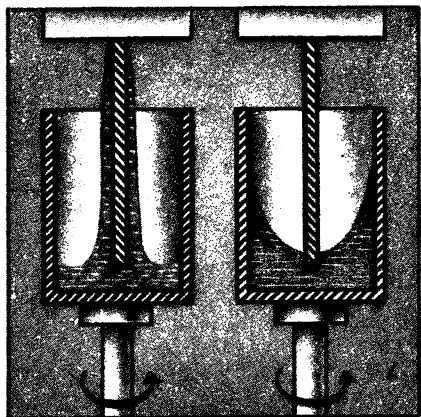


Рис. 36

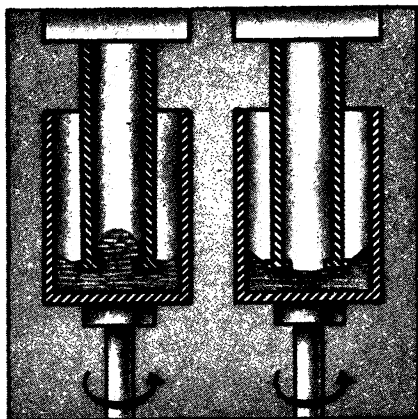


Рис. 37

Особенности поведения вязкоупругих жидкостей можно продемонстрировать на опыте с резиновым клеем. Перелейте клей в сосуд с широким горлышком, например, в стакан. Наклоните стакан и начните переливать клей в другую посуду. После того как клей достигнет нижнего сосуда, поднимите край стакана. Течение обычной жидкости при этом прекратилось бы. Не так ведет себя упругая жидкость. Она будет вытекать из стакана через край, который расположен выше уровня клея в нем. Теперь налейте на дно стакана немного клея. Опустите туда карандаш и начните его вращать. Клей будет наматываться на карандаш и подниматься вверх. Необычное поведение

вязкоупругих жидкостей известно как эффект Вайссенберга, по имени исследователя, который обнаружил и изучил это явление.

На рис. 36, 37 показаны схемы его экспериментов. Рядом для сравнения дается картина поведения обычной жидкости в таком же приборе. Рис. 36 изображает опыт, подобный проведенному нами с карандашом. Однако в этом случае центральный стержень закреплен неподвижно, а сосуд с жидкостью вращается. На рис. 37 показано поведение жидкости, когда в нее опущена трубка, открытая сверху.

Описанные свойства растворов полимеров очень важно знать и уметь использовать при разработке технологических процессов.



ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

ВОЗДУШНЫЙ ВИНТ

Рассматривая различные транспортные средства, мы останавливали свое внимание только на принципе действия этих аппаратов. Но ведь в каждом из них используется либо воздушный (или гребной) винт для создания тяги, либо компрессор для создания воздушной подушки или смазки. Машины, совершающие работу над жидкостью или газом,— это

специальная область гидродинамики.

Как создается подъемная сила крыла самолета, читатель, конечно, знает, и потому ему легко представить работу воздушного винта. Остановимся на анализе эффективности винта, на величине его тяги, на той мощности, которой эта тяга создается.

В отличие от крыла, воздушный винт совершает работу и сам потребляет некоторую мощность

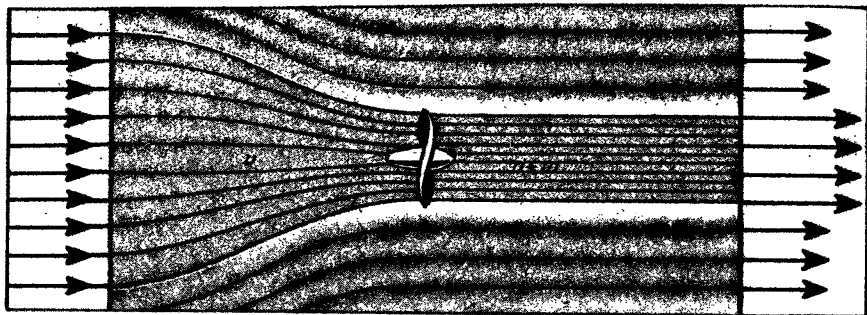


Рис. 38

(рис. 38). Полезную мощность винта можно определить как произведение

$$N_{\text{п}} = P v,$$

где P — сила тяги винта, v — скорость перемещения аппарата.

А какую мощность нужно израсходовать, чтобы обеспечить работу винта? Так как скорость воздушной струи до винта равнялась v , то ее энергия будет равняться $\frac{1}{2} M v^2$. Получив от винта приращение продольной скорости w , струя унесет энергию $\frac{1}{2} M (v + w)^2$.

Разность этих энергий создает-ся за счет работы винта

$$N_{\text{в}} = M v w + \frac{1}{2} M w^2.$$

Сила тяги винта по закону импульса выражается через те же величины следующим образом:

$$P = M w.$$

Следовательно, мощность винта может быть записана так:

$$N_{\text{п}} = M v w.$$

Отношение полезной мощности к общей составит коэффициент полезного действия винта

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{w}{v}}.$$

Массу воздуха можно выразить через скорость и ометаемую площадь $S_{\text{в}}$

$$M = \rho v S_{\text{в}},$$

а потребную тягу — через сопротивление

$$P = c_x \frac{\rho v^2}{2} S.$$

Здесь c_x — коэффициент сопротивления, а S — площадь той поверхности, которая это сопротивление создает.

Теперь мы можем написать

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{c_x}{4} \frac{S}{S_{\text{в}}}}.$$

Как видно из этой формулы, КПД винта тем больше, чем больше площадь, ометаемая винтом. Увеличения площади можно достичь за счет диаметра винта, но такой путь ограничивается окружной скоростью концов лопастей. Поэтому обычно увеличивают количество двигателей и воздушных винтов.

ГРЕБНОЙ ВИНТ

Между воздушным винтом и гребным, являющимся двигателем кораблей, нет принципиальной разницы, и имеющееся конструк-

тивное различие вызывается тем, что вода в 800 раз плотнее воздуха. А так как динамические силы пропорциональны плотности, сила тяги и потребляемая мощность при прочих равных условиях у гребного винта в 800 раз больше, чем у пропеллера. Именно этим объясняются сравнительно малые размеры гребных винтов.

В популярной литературе время от времени появляются предложения использовать винт Архимеда (рис. 39) в качестве гребного винта, так как, по предположению авторов, он должен обладать большей эффективностью, т. е. большой удельной тягой и высоким КПД.

Мы с вами уже знаем, что тяга создается благодаря разности скоростей потока до винта и после него. В идеальном винте Архимеда жидкость перемещается между витками винта с постоянной скоростью. Таким образом, все витки, кроме первого и последнего, ничего не меняют в потоке и не создают тяги. А так как они все-таки вызывают перемещение жидкости, на их вращение расходуется значительная мощность. Поэтому винт Архимеда не применяют в судостроении.

Несмотря на совершенство существующих гребных винтов,

нельзя считать, что здесь все проблемы решены и ничего нового придумать нельзя. Рассмотрим, например, вопрос о взаимодействии винта и корпуса судна. При обычной компоновке гребной винт находится в корме корабля. Работающий винт понижает давление в кормовой части корабля и тем самым не только создает тягу, но и увеличивает гидродинамическое сопротивление.

Возникает естественный вопрос, куда нужно переставить винт и как его спроектировать, чтобы этого отрицательного явления не было. Применительно к надводным двухкорпусным кораблям можно предложить следующую компоновку: судовой движитель — это может быть гребной винт или гребное колесо — между корпусами в самом узком сечении межкорпусного пространства. Рассмотрим, как гребной винт будет взаимодействовать с корпусами.

Работающий движитель понижает уровень воды впереди и повышает его сзади. Это обстоятельство приведет сразу к двум положительным эффектам. Во-первых, исчезнет носовая волна, так как вся вода, поступающая в межкорпусной промежуток, будет откачиваться движителем и перебрасываться в кормовую часть.

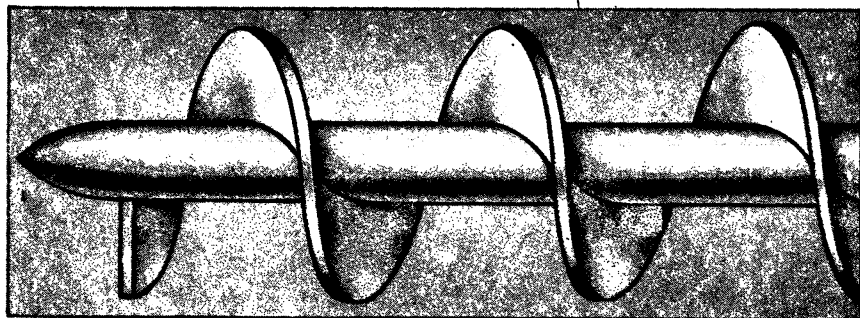


Рис. 39

Во-вторых, появится тяга на корпусе. Действительно, снижение уровня воды в носовой части приведет к уменьшению гидростатического давления в этом месте. В то же время увеличение уровня в кормовой части приведет к повышению гидростатического давления на корму. Эта разность давлений и приведет к образованию тяги на корпусе. И поскольку площадь поперечного сечения подводных частей корпусов, как правило, много больше площади, ометаемой движителем, тяга, создаваемая на корпусе, будет во столько же раз больше тяги движителя.

Чтобы понять, какой энергетической ценой окупается корпусная тяга, рассмотрим поперечное сечение судна в месте расположения движителя и во входном сечении. Площадь входного сечения обозначим $S_{вх}$, площадь, ометаемую движителем, $S_{дв}$. Скорость движения судна обозначим U , а перепад давления на движителе, как и выше, Δp .

Традиционную конструкцию двухкорпусного судна дополним днищем, которое соединяет между собой оба корпуса. В этом случае вся вода, прошедшая входное сечение, пройдет и через движитель. Следовательно, продольная скорость потока в этом сечении будет равняться

$$U_{дв} = U \frac{S_{вх}}{S_{дв}}.$$

Потребная работа движителя будет равняться, как обычно, силе тяги, равной $P_{дв} = \Delta p S_{дв}$, умноженной на скорость $U_{дв}$:

$$N_{дв} = P_{дв} U_{дв} = U S_{вх} \Delta p.$$

Как видно из этой формулы, потребная работа не зависит от

площади, ометаемой движителем. В этом случае, как и всегда в механике, уменьшение нагрузки на движитель требует увеличения скорости $U_{дв}$.

Рассмотренная компоновка корпуса и движителя не позволяет нам нарушить закон сохранения энергии, а вот уменьшить потери энергии может.

Обратимся к формуле, определяющей КПД движителя. В рассмотренном случае под площадью $S_{в}$ следует понимать площадь выходного сечения межкорпусного пространства, которая в несколько раз превосходит площадь, ометаемую движителем. Следовательно, непроизводительные потери энергии будут в несколько раз меньше.

ГИДРОТУРБИНА

В механике известен так называемый принцип обратимости движения, согласно которому при обратном приложении сил будет осуществляться обратное движение. Таким образом, пропеллер можно обратить в ветряк, а гребной винт — в гидротурбину. На рис. 40 показано колесо пропел-

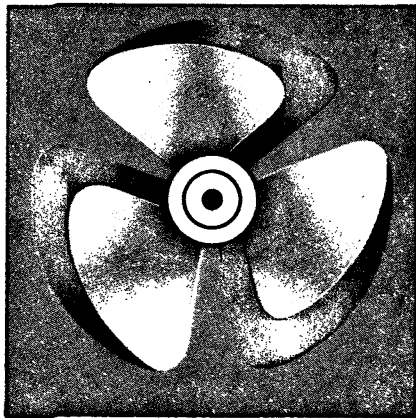


Рис. 40

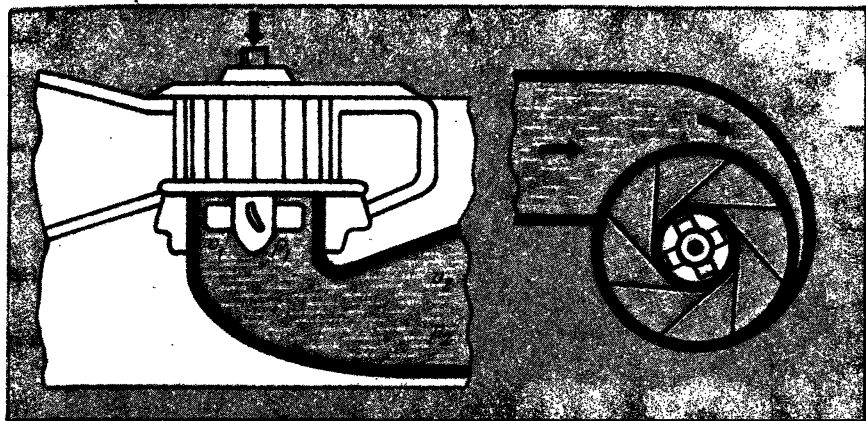


Рис. 41

лерной турбины. Ее отличие от гребного винта определяется условиями работы. Гребной винт изменяет осевую скорость набегающего на него потока. Турбина работает в туннеле, и расход воды до и после нее не меняется. Следовательно, не меняется и осевая скорость потока. Какую же энергию отнимает турбина у воды?

Вода, перед тем как поступить на рабочее колесо турбины, закручивается. Этому способствует и подводящий канал, выполненный в виде спирали (улитки), и лопатки направляющего аппарата, расположенные по спирали. Потенциальная энергия, которой обладает вода, расположенная выше турбины, превращается в кинетическую энергию вращения и энергию давления. Эту энергию отнимает турбина. После турбины вода вытекает без всякого вращения и с меньшим давлением. Чтобы вытекающая вода обладала меньшей энергией, участок трубы после турбины, который называют всасывающей трубой, делают расширяющимся (рис. 41). Благодаря увеличению площади сечения уменьшаются скорость и кинетическая

энергия воды, вышедшей из турбины. Может возникнуть вопрос: как вода, миновавшая турбину, отдает ей свою энергию? Для объяснения обратимся к уравнению Бернулли. Рассмотрим две точки: сразу после турбины, где скорость будет равна v_1 , а давление p_1 , и точку на выходе из всасывающей трубы, где скорость и давление будут равны v_2 и p_2 .

Согласно уравнению Бернулли

$$\frac{1}{2} v_1^2 \rho + p_1 = \frac{1}{2} v_2^2 \rho + p_2,$$

откуда

$$p_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + p_2 - \frac{1}{2} \rho v_1^2.$$

Скорость на выходе мала и ею можно пренебречь. Давление p_2 равно атмосферному. Значит, давление p_1 после турбины будет ниже атмосферного. Этим объясняется название всасывающей трубы.

Понижение давления после турбины эквивалентно увеличению на такую же величину давления сверху. Таким образом, независимо от того, на каком уровне стоит турбина, она перерабатывает всю потенциальную энергию воды, определяемую разностью уровней воды до плотины и после нее.

Современные турбины имеют КПД, равный 95—96%, т. е. превращают в электроэнергию 95—96% всей энергии, запасенной водой.

Тем не менее встречаются еще «проекты», обещающие увеличить КПД в два-три раза. Один из них состоит в том, что вода должна свободно падать до нижнего уровня и здесь, достигнув максимальной скорости, обрушиваться на турбину. Можно было бы много говорить о ложности этого проекта. Однако достаточно сказать, что в соответствии с законом сохранения энергии КПД любой установки не может быть больше 100%, и ни о каком трехкратном его увеличении не может быть и речи.

Тем не менее энергию падающей струи можно использовать. Раньше это делали с помощью водяных колес. Но у них был низкий КПД. Сейчас энергию струи высокого напора используют с помощью ковшовой турбины, общий вид которой показан на рис. 42. Струя воды, поступающая из сопла 1, с большой скоростью ударяется в ковши рабочего колеса 2,

которые похожи на сложенные вместе ладони рук.

КПД такой турбины трудно довести до 60%. Однако, когда напор воды превосходит 100 м (например, в горных реках), применить турбину другого типа невозможно. При напоре меньше 40 м обычно применяют пропеллерные турбины с поворотными лопастями. При напорах воды от 40 до 100 м применяют так называемые радиально-осевые турбины. Такая турбина, как и пропеллерная, ставится после направляющего аппарата, который предварительно закручивает воду. Закрученная вода входит в турбину сначала в радиальном направлении, а затем поворачивает и выходит из турбины в осевом направлении. Отсюда и происходит ее название.

Такого типа турбины стоят на самой крупной в мире Красноярской ГЭС. Один агрегат этой станции обладает мощностью 500 тыс. кВт. Для сравнения напомним, что все агрегаты знаменитого Днепрогэса обладают мощностью 600 тыс. кВт.

ГИДРОТРАНСФОРМАТОР

Чтобы закончить рассказ о гидродинамических машинах, опишем еще одно интересное устройство — гидротрансформатор.

Рассказывают, что первые образцы автомобилей, созданные в начале этого века, могли передвигаться лишь по горизонтальным участкам хорошей дороги. Попадая в песок, грязь или на крутой склон, эти автомобили останавливались. Как же так, две лошади могут катить экипаж не только по ровной дороге, но и втащить его на гору, а мощный стальной

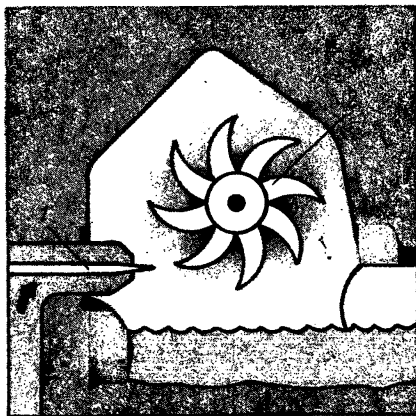


Рис. 42

мотор этого сделать не может! Дело в том, что на трудных участках дороги лошади уменьшают скорость движения и в несколько раз увеличивают тяговые усилия. В механической конструкции такого же эффекта можно достичь с помощью редуктора, который связывает быстро вращающийся вал с медленно вращающимся. При этом момент на втором валу будет, естественно, больше. Набор таких редукторов с различными передаточными числами образует коробку передач, которая и позволяет автомобилю выиграть соревнование с конным экипажем.

Те, кто управлял автомобилем, знают, сколько хлопот связано с переключением одной пары шестерен на другую. Для одного переключения требуется отсоединить мотор от коробки передач; выжав муфту сцепления, вывести шестерни редуктора из сцепления; отпустить муфту сцепления, чтобы синхронизировать вращение шестерен коробки передач; вновь выжать сцепление; ввести в зацепление соответствующую пару шестерен и только затем отпустить муфту сцепления.

Водителю городского транспорта приходится проделывать такие операции сотни раз в течение одного часа. Эти движения отвлекают внимание шофера, приводят к сильному утомлению. Вот почему конструкторы работают над созданием нового способа преобразования моментов вращения, лишенного недостатков механической коробки передач. Эту проблему помогает решать гидротрансформатор, который представляет собой сочетание гидротурбины и гидронасоса, объединенных в одном корпусе, и предназначен для передачи вращения

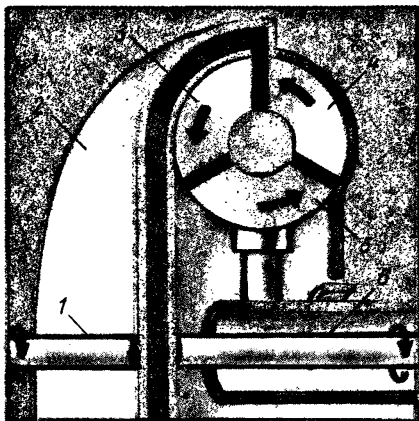


Рис. 43

с одного вала на другой, соосный с ним, с одновременным преобразованием моментов и числа оборотов.

На рис. 43 показан разрез гидротрансформатора. Вал насоса 1 приводится во вращение двигателем. Насосное колесо 4, которое связано с помощью кожуха 2 с валом 1, заставляет вращаться заполняющую насос жидкость. Центробежная сила вызывает перетекание масла от центра к стенкам, как показано на рисунке стрелками. Благодаря такому течению масло попадает в полость турбинного колеса 3. Ударяя по его лопаткам, жидкость заставляет вращаться и турбинное колесо, и связанный с ним турбинный вал 6. Заторможенная турбиной жидкость вытесняется к центру колеса и попадает на реактивное колесо 5, которое напоминает собой колесо турбины, но отличается от него тем, что оно в обычном режиме жестко связано с неподвижным картером.

Так как турбинное и насосное колеса в общем случае вращаются с разными скоростями, то жидкость в них будет вращаться с различной скоростью. Реактивное

колесо с его лопатками является направляющим аппаратом и обеспечивает согласование окружной скорости жидкости, поступающей с турбинного на насосное колесо. При этом оно испытывает реактивную силу, откуда и происходит его название.

Передача энергии от насосного колеса к турбинному осуществляется в различных условиях поразному. Если колеса автомобиля, а следовательно, и вал турбинного колеса крутятся медленно, то жидкость в турбинном колесе почти полностью теряет свою скорость вращения. Это вызывает большое усилие на турбинном колесе и на ведущих колесах автомобиля. Такой режим характерен для момента трогания с места, преодоления крутых подъемов и т. д. На ровных участках дороги и после разгона турбинное колесо вращается быстрее и, следовательно, испытывает меньшую реакцию от перетекающей через него жидкости. Этой реакции как раз хватает для преодоления уменьшившихся усилий на колесах автомобиля.

Таким образом, гидротрансформатор служит автоматическим редуктором, который меняет передаточное число между двигателем и колесами так, чтобы, с одной стороны, двигатель работал в оптимальном режиме, а с другой стороны, усилия на колесах были достаточны для преодоления переменного сопротивления. И все это без всякого участия водителя. Кроме того, гидротрансформатор обеспечивает и некоторые дополнительные преимущества. В автомобильной трансмиссии исчезают ударные нагрузки, характерные для механической коробки передач. Это обстоятельство в полтора-

два раза увеличивает срок службы двигателей, карданных валов, редукторов, ведущих мостов и полуосей.

Однако гидротрансформатор, кроме преимуществ, обладает и определенными недостатками. Это прежде всего его большие размеры, особенно если учесть всю систему охлаждения и перекачки масла, обязательную для гидротрансформатора. Кроме того, применение гидротрансформатора приводит к большим потерям мощности, чем использование механической коробки передач. Тем не менее в некоторых случаях, например для городских автобусов, преимущества, создаваемые гидротрансформаторами, намного превосходят их недостатки.

В настоящее время на улицах наших городов все чаще можно видеть автобусы, которые не имеют коробки передач, а снабжены гидротрансформаторами.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ УДАР

Не задавались ли вы вопросом, почему все водопроводные краны имеют такую конструкцию, что их нельзя быстро закрыть? Особенно краны на больших трубопроводах, например, пожарные, приходится крутить очень долго. Не лучше сделать так, как в самоваре? Четверть оборота — и сквозное отверстие в хорошо притертой бронзовой пробке совмещено с трубопроводом. Еще четверть оборота — и кран закрыт.

Оказывается, все дело в гидравлическом ударе.

Представьте себе, что по какому-либо промышленному водопроводу диаметром 0,1 м и длиной $L = 1000$ м течет вода со скоростью $v = 10$ м/с. И в конце

водопровода стоит кран, который можно закрыть в течение одной секунды.

Подсчитаем количество движения, которым обладает текущая по трубе вода:

$$K = Mv = \pi r^2 L \rho v,$$

где πr^2 — площадь сечения водопровода, равная в нашем случае $0,0078 \text{ м}^2$. Объем воды в водопроводе будет равняться $7,8 \text{ м}^3$. Ее масса $M \approx 8000 \text{ кг}$. Тогда количество движения

$$K = 80\,000 \text{ кг} \cdot \text{м/с}.$$

Если считать, что стальные стенки водопровода не могут растягиваться, а вода не может сжиматься, то, закрыв кран за 1 с, мы вызываем внезапную остановку всей массы движущейся воды, что приведет к удару силой 80 кН . Конечно, при таком давлении и сталь будет податлива, и вода слегка сожмется. Это обстоятельство немного растянет процесс остановки воды, и следовательно, уменьшит максимальную силу. Но даже если сила уменьшится в два-три раза, все равно беды не избежать. Разрыв трубопровода из-за гидравлического удара был частой причиной аварий в системе водоснабжения до тех пор, пока не перешли к вентилям и кранам, исключающим возможность быстрой остановки воды в трубопроводе.

Действие гидравлического удара можно проиллюстрировать историей, которая произошла на одной из днепровских гидроэлектростанций. Как устроен агрегат такой станции, мы уже рассказывали. В агрегате имеется трубопровод. Правда, он не очень длинный, зато в поперечном сечении достигает нескольких метров, да и скорость

воды немалая. Лопатки направляющего аппарата, которые служат для закручивания потока, одновременно позволяют регулировать расход воды вплоть до его полного прекращения. Необходимость в такой регулировке связана с тем, что в течение суток несколько раз меняется количество потребляемой электроэнергии. Погрузился город в ночной сон, все лампочки выключены, остановились трамваи, троллейбусы — и сразу уменьшалось количество потребляемой энергии. Если не уменьшить расход воды, то турбина начнет крутиться все быстрее и быстрее. Это недопустимо по двум причинам. Во-первых, генератор, связанный с турбиной, будет вырабатывать ток частотой не 50 Гц , а больше, а во-вторых, турбина и генератор могут не выдержать возникающих центробежных сил.

В тот день, о котором идет речь, какой-то завод, потреблявший большое количество электроэнергии, отключился от сети. Генераторы и турбины, вращавшиеся теперь вхолостую, начали увеличивать скорость вращения. Это обнаружили автоматы и быстро закрыли доступ воды в турбину. Находившаяся там вода, обладавшая большой скоростью, ничем не удерживаемая, продолжала двигаться. Естественно, что при этом она оторвалась от направляющего аппарата и там образовался вакуум. Вода опустилась настолько, сколько хватило энергии противодействовать вакууму. Затем она двинулась вспять и со всей мощью ударила по турбине, по лопаткам направляющего аппарата. Действие такого мощного удара можно сравнить только с действием взрыва. Один агрегат был полностью разрушен.

Разумеется, такой эффект можно было предвидеть заранее и принять меры, исключаяющие его. В крышке турбины, отделяющей турбину от помещения, где находится генератор, ставят специальный клапан, который называется клапаном срыва вакуума. Когда под крышкой появляется вакуум, превышающий норму, клапан открывается, выпускает в образовавшееся пространство воздух, и обратный гидравлический удар предупреждается. В описанной истории клапан был неисправен. Это вызвало аварию.

Мы не напрасно проводим аналогию между взрывом и гидравлическим ударом. Во время Великой Отечественной войны у нас появились кумулятивные снаряды, которые пробивали броню «тигров», «леопардов» и других фашистских чудовищ. Действие этих снарядов также основано на гидравлическом ударе. Корпус снаряда начинен взрывчаткой, в головной части имеется взрыватель и воронкообразное углубление, покрытое специальным металлом (рис. 44). Когда происходит взрыв заряда, горячие газы и металл, который при этом давлении ведет

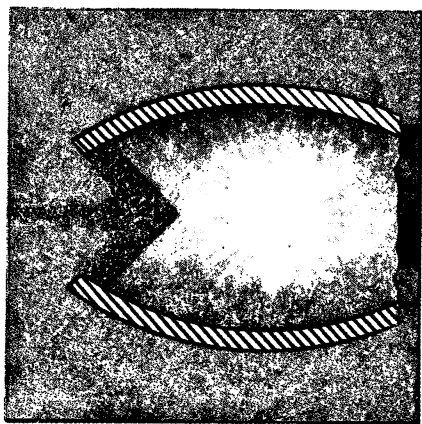


Рис. 44

себя как жидкость, фокусируются в узкую струю, направленную вперед. Вот эта струя и пробивала броню немецких танков.

В мирное время гидравлический удар тоже нашел применение. Речь идет о гидропушке. Что такое гидромонитор, знают, наверное, все. Струя воды, которую непрерывно качает мощный насос, может найти различное применение. Можно потушить пожар, находясь на безопасном расстоянии от огня; можно разрушить породу, если она не очень прочная. Если бы создать струю с давлением, в десятки, сотни раз большим, то она могла бы разрушить даже гранит, пробить отверстие в стальной плите. Но такого насоса, работающего непрерывно, не создать. Вот если энергию накапливать долго, а расходовать быстро, то можно получить большую мгновенную мощность. Так родилась идея гидропушки.

Небольшой компрессор в течение нескольких секунд накачивает воздух в замкнутый объем. Энергию этого воздуха используют для того, чтобы разогнать тяжелый поршень. В тот момент, когда поршень достигает максимальной скорости, он ударяет по небольшому объему воды. Это давление может достичь такой величины, что вода вырвется через узкое сопловое отверстие со скоростью пушечного снаряда. Такая пушка может разрушить самую крепкую породу, пробить стальной лист.

Существующие гидропушки имеют тот недостаток, что делают лишь два-три выстрела в минуту. Если объединить в одну конструкцию двигатель, который обеспечивает пушку энергией, компрессор и пушку, то можно значительно упростить всю установку и увеличить ее скорострельность. За

основу такой пушки можно взять хорошо известный свободнопоршневой дизель-компрессор.

У свободнопоршневого дизель-компрессора, в отличие от обычного двигателя с компрессором, нет кривошипно-шатунного механизма и поршни двигателя непосредственно связаны с поршнями компрессора. Такая конструкция динамически уравновешена и потому допускает большие внутренние усилия и движений с большой частотой.

Дизель-компрессор работает так. Вспышка топлива в рабочем объеме вызывает перемещение поршней двигателя и компрессора. Сжатый воздух сквозь клапан частично уходит в трубопровод для использования, частично идет на продувание цилиндра, а оставшая часть возвращает в исходное положение оба поршня. Затем цикл повторяется.

Если уменьшить рабочий объем компрессора до размеров, необходимых для обеспечения работы двигателя, то мы получим избыток энергии в каждом цикле. Это позволяет глухую донную часть компрессора заменить тяжелым поршнем, который будет разгоняться под действием давления в компрессоре и ударять по воде. Скорострельность такой пушки можно довести до 60 выстрелов в минуту. Учитывая, что объем выстреливаемой каждой раз воды будет небольшим, это устройство следует скорее назвать гидропулеметом.

ПУЛЬСИРУЮЩИЙ ВОДОМЕТ

Для тушения пожара, для орошения почвы или для разрушения породы применяют водометы различной конструкции. Чем дальше

летит струя воды, тем более эффективной является конструкция водомета. Пожарникам такая струя позволяет тушить огонь с безопасного расстояния, оросительная система не требует густой сети труб.

Чем определяется дальность действия струи?

Прежде всего, конечно, начальной скоростью истечения воды из водомета. Чем с большей скоростью выбрасывается вода, тем дальше она должна улететь. Однако вода тормозится воздухом. А интенсивность торможения зависит от разрушения струи и от размера капель.

Чем толще струя воды, тем меньше она подвергается тормозящему действию воздуха. Однако мощность струи — скорость и поперечный размер — ограничиваются мощностью насосной станции и диаметром подводящих труб.

И вот здесь кажется естественным обратиться к импульсному режиму работы водомета, при котором можно в малые промежутки времени располагать большой мощностью.

Обратимся к рисунку 45, на котором приведена схема возможной технической реализации такого водомета.

Вода подводится по трубопроводу 1, который заканчивается коническим соплом 2. Сопло закрывается затвором 3, который может совершать горизонтальные перемещения. Такие перемещения задаются кулачком 4 в сочетании с пружиной 5. Форма кулачка и скорость его поворота определяют закон открывания и закрывания сопла. При медленном закрывании выходного отверстия давление в трубе и, следовательно,

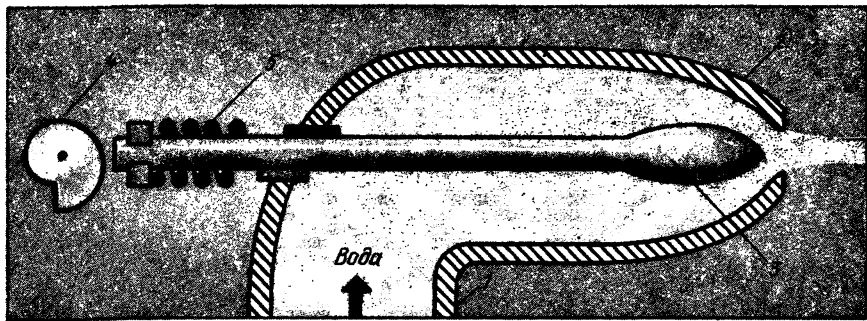


Рис. 45

скорость истечения остаются неизменными, уменьшается только диаметр струи. При достаточно быстром закрытии сопла происходит контролируемый гидравлический удар, давление в трубопроводе многократно увеличивается, соответственно увеличивается и скорость истечения. При этом происходит один любопытный процесс — продольная фокусировка струи.

По мере закрывания затвора каждый объем воды, выходящий позже, имеет большую скорость, чем предыдущий объем, который улетел чуть раньше. В этих условиях задние частицы на некотором расстоянии догоняют передние и объединяются в общий объем.

Таким образом, импульсный режим работы водомета позволяет, во-первых, увеличить скорость истечения струи и, во-вторых, собрать ее в некоторый объем, время разрушения которого должно быть больше, чем у тонкой струи. Эти два обстоятельства позволяют увеличить дальность водомета.

Нужно отдавать себе отчет, что такое импульсное увеличение мощности струи достигается благодаря тому, что в промежутках времени между импульсами вода будет иметь меньшую скорость

и лететь ближе. Для процесса орошения это даже хорошо, а для пожарных устройств это должно рассматриваться как неизбежные издержки.

ГЕНЕРАТОР ВОЗДУШНЫХ ВИХРЕЙ

Свойство воздушных вихревых колец сохранять свою геометрию и двигаться на большое расстояние было обнаружено давно. В Институте гидродинамики СО АН СССР были проведены теоретические и экспериментальные исследования крупномасштабных кольцевых вихрей, создаваемых с помощью взрыва. С результатами этих исследований можно познакомиться в книге М. А. Лаврентьева, Б. В. Шабата. Поскольку дальность полета таких вихрей может достигать 1—2 км, авторы предполагали использовать вихри для выброса газообразных промышленных отходов на такую высоту, где они могли бы уноситься горизонтальными потоками воздуха. К этому можно добавить еще большое количество других возможных областей применения кольцевых вихрей. Например, для опыления посевов, виноградарств и садов, для рассеивания туманов над аэродромами, для обработки облаков химическими ре-

агентами, чтобы вызвать дождь или предотвратить образование града. Цепочка из вихревых колец может использоваться для увеличения дальности полета водяной струи. Это увеличит дальность действия противопожарных водометов, увеличит орошаемую одной установкой площадь земли.

Однако все эти проекты могут быть реализованы только в том случае, если кольцевые вихри будут создаваться не взрывом, а некоторым генератором, который бы создавал вихри дешево, без шума, с большой частотой.

В упомянутой выше книге приведен следующий закон движения вихря:

$$L(t) = \frac{R_0}{\alpha} \left[\left(1 + \frac{4\alpha V_0}{R_0} t \right)^{1/4} - 1 \right].$$

Здесь R_0 — начальный радиус, V_0 — начальная скорость вихря, t — время полета, $\alpha = 6 \cdot 10^{-3}$ — экспериментальный коэффициент, $L(t)$ — текущее расстояние от вихря до генератора. Эта формула дает исключительно хорошее совпадение с экспериментальными данными. Однако само движение и этот закон выполняются только на некотором пути, после чего вихрь останавливается и разрушается.

При начальном радиусе $R_0 = 2$ м и начальной скорости $V_0 = 100$ м/с вихрь проходил расстояние 500 м.

Вот этим параметром $L_{\max}/R_0 = 250$, который мало зависит от размеров, мы и будем пользоваться. Так, для высоты подъема вихря 1000 м потребуются кольцевой вихрь радиусом 4 м.

Из приведенной выше формулы следует, что начальная скорость вихря пропорциональна начальному радиусу.

Описанные выше исследования относились к одиночным вихревым

кольцам больших размеров, создаваемым с помощью взрывов.

Представляет интерес сконструировать генератор вихрей, который, используя энергию воздушной струи компрессора, формировал бы вихревые кольца нужного диаметра. Прежде всего такой способ должен оказаться более дешевым по сравнению с использованием взрывчатых веществ, более технологичным, менее шумным.

Кроме того, генератор вихрей может формировать вихри с достаточно большой частотой. Легко понять, что поведение цепочки вихрей будет отличаться от поведения одиночного вихря. В частности, дальность полета их должна увеличиваться. Длительно действующая цепочка вихрей вызовет течение прилегающего воздуха в сторону их полета. Это обстоятельство сделает более эффективным механизм удаления газообразных промышленных отходов.

Цепочку мелких кольцевых вихрей можно с большим эффектом применять для увеличения дальности полета струи воды в дождевальных установках и в пожарных гидромониторах. Для этого достаточно соосно совместить генератор вихрей и сопло водомета.

Попутно летящие вихревые кольца согласуют скорость струи и скорость воздуха и тем самым замедляют процесс разрушения водяной струи.

Обсудим теперь возможную конструкцию вихревого генератора.

Основу такого генератора будет составлять компрессор. Главное требование к такому компрессору — слабая зависимость расхода от противодавления. Такой характеристикой обладают винтовые компрессоры, производительность которых в широком диапазоне

давлений от давления не зависит. В более узком диапазоне полагая характеристика присуща некоторым центробежным компрессорам, которые обладают высокой производительностью и обеспечивают необходимое давление. Собственно генератором вихрей выступает затвор, который обеспечивает импульсную подачу воздуха по определенному закону.

В известных экспериментах по образованию вихревого кольца реализовали следующий процесс.

Из круглого отверстия импульсом выбрасывали цилиндрический объем воздуха или воды. Цилиндрическая поверхность, по которой происходил разрыв скорости, теряла устойчивость и, разрушаясь, образовывала кольцевой вихрь. Важным результатом экспериментов является установление факта, что безразмерные параметры вихря не зависят от способа его формирования. Однако мы вправе считать, что энергетическая эффективность генератора будет тем выше, чем лучше мы согласуем начальное распределение скоростей с тем распределением, которое соответствует установившемуся режиму.

Итак, компрессор и быстродействующий затвор должны заменить взрывчатое вещество.

Для этого затвор должен быстро открываться, выпускать порцию воздуха в виде воздушного цилиндра длиной, равной диаметру. Если скорость струи U равна скорости вихря и ее диаметр D , то время выброса равно

$$\Delta t = \frac{D}{U}.$$

Время открытия затвора должно иметь порядок

$$\Delta t_1 = 0,1 \frac{D}{U};$$

так как из опыта известно, что $D_0/U_0 = 0,04$ с, то

$$\Delta t_1 = 0,004 \text{ с и } \Delta t = 0,04 \text{ с.}$$

Таким образом, мы определили требуемое быстродействие затвора и длину выдержки.

Мы можем значительно увеличить длительность выдержки и размер вихря, если вслед за выброшенной порцией воздуха будем подавать струю меньшего диаметра и большей скорости, так чтобы она догоняла весь объем на некотором расстоянии от затвора.

Пусть компрессор обеспечивает постоянный объемный расход Q м³/с. Переменный диаметр затвора обозначим $D(t)$. Тогда скорость струи будет равняться

$$V(t) = \frac{4Q}{\pi D^2(t)} = U_0 \left[\frac{D(0)}{D(t)} \right]^2.$$

Само собой разумеется, что этой формулой можно пользоваться для скоростей, значительно меньших скорости звука. Для приближенного расчета будем считать, что частицы воздуха, покинувшие затвор, не взаимодействуют с частицами воздуха, которые выходят из затвора в последующие моменты. Определим расстояние, на котором весь объем воздуха, выпущенный в течение некоторого интервала времени $t_2 - t_1$, соберется в одной точке.

Струя в начальный момент t_1 имеет скорость U_0 и улетит на расстояние

$$S = U_0(t_3 - t_1),$$

где t_3 — момент фокусировки.

В конечный момент t_2 скорость будет равняться

$$V(t_2) = U_0 \left[\frac{D(0)}{D(t_2)} \right]^2.$$

И струя должна за время $t_3 - t_2$

пройти тот же путь S

$$S = U_0 \left[\frac{D(0)}{D(t_2)} \right]^2 (t_3 - t_2).$$

Отсюда находим связь

$$\left[\frac{D(0)}{D(t_2)} \right]^2 = \frac{t_3 - t_1}{t_3 - t_2}.$$

Начальный момент времени t_1 можно принять за начало отсчета. Перепишем последнюю формулу следующим образом:

$$\frac{D(t_2)}{D(0)} = \sqrt{\frac{t_3 - t_2}{t_3}} = \sqrt{1 - \frac{t_2}{t_3}}.$$

Как мы увидим ниже, особый интерес представляет случай, когда $t_2/t_3 \ll 1$. Это условие нам позволяет написать приближенную формулу

$$\frac{D(t_2)}{D(0)} = 1 - \frac{t_2}{2t_3}.$$

Зададимся линейным законом изменения диаметра

$$D(t) = D(0) \left[1 - \frac{vt}{D(0)} \right],$$

где $v = \text{const}$ — скорость изменения диаметра.

Тогда

$$1 - \frac{vt_2}{D(0)} = 1 - \frac{t_2}{2t_3}.$$

Отсюда

$$t_3 = \frac{D(0)}{2v}, \quad S = \frac{U_0}{2v} D(0).$$

Интервал $t_2 - t_1 = t_2$ определяется допустимым пределом изменения диаметра

$$\frac{D(t_2)}{D(0)} = 1 - \frac{vt_2}{D(0)} = \frac{1}{m},$$

откуда

$$\frac{vt_2}{D(0)} = 1 - \frac{1}{m}, \quad t_2 = \frac{D(0)}{v} \left(1 - \frac{1}{m} \right).$$

По-видимому, реально задать $S = 10D(0)$. Такого условия можно достичь, если закрывать затвор со скоростью

$$2v = 0,1U_0.$$

Тогда время t_2 будет равняться

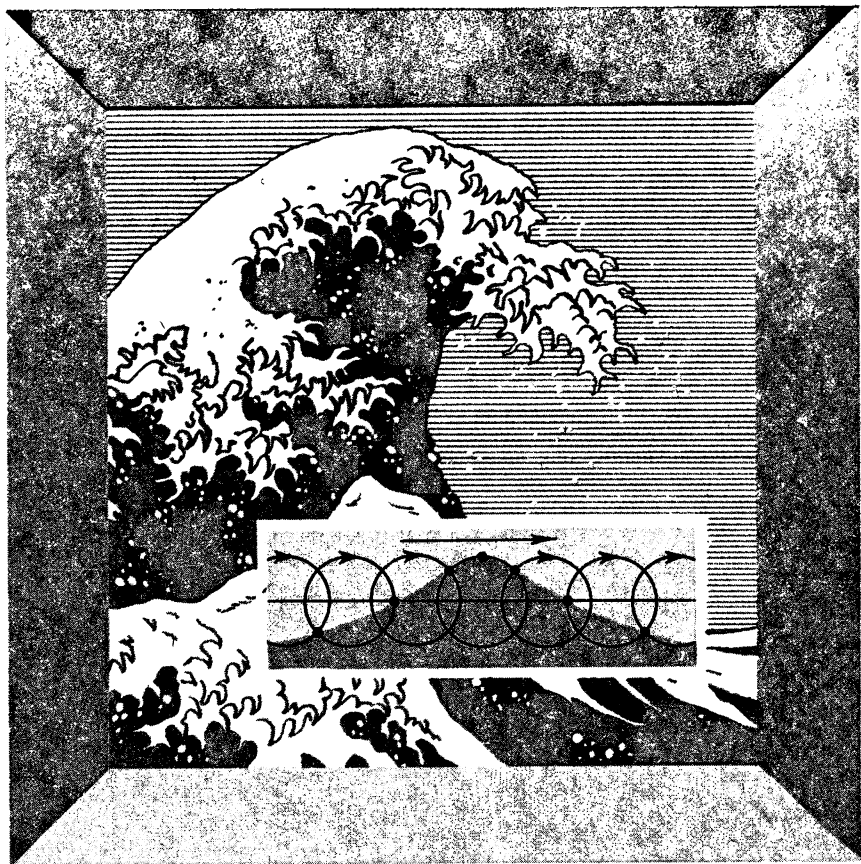
$$t_2 = 20 \frac{D_0}{U_0} \left(1 - \frac{1}{m} \right) = 0,8 \left(1 - \frac{1}{m} \right) \text{ с.}$$

За это время будет выброшен объем воздуха

$$V = 0,8Q \left(1 - \frac{1}{m} \right) \text{ м}^3 \text{ с,}$$

который и образует одиночный вихрь.

Увеличение длительности формирования вихря в 10 раз увеличивает диаметр вихря в 2,15 раза по сравнению с диаметром затвора. Во столько же раз при этом увеличивается скорость движения вихря. Кроме того, уменьшается требуемое быстроедействие затвора тоже в 10 раз.



ВОЛНА СМЫВАЕТ ГОРОД

ЗАРОЖДЕНИЕ ВОЛНЫ

Вы заметили, с какой неумолимой закономерностью морские волны набегают на берег? Сдержанные вдали, они становятся на дыбы, приближаясь к берегу, а встречаясь с препятствиями, очень сердятся и поднимают тучу брызг.

Давно уже прошел шторм, успокоившееся море ласкает берег редкими спокойными движениями. Но вдруг, как будто в нем просну-

лась прежняя ярость, оно бросается на берег одиночной высокой волной.

Сколько красоты можно увидеть в море, если на него посмотреть глазами поэта, художника, музыканта! Но еще больше красоты вы обнаружите, если, кроме того, взглянете в море глазами ученого. Глядя на поверхность моря, вы увидите, как двигаются все частицы воды, от поверхности до самого дна. В опрокидывающейся волне

вы увидите нарушение гармонии. Одинокaя сердитaя волна расскажет вам и о прошедшей буре, и о законах сложения волн. Девятый вал будет для вас не легендой, а выражением строгого математического закона.

Вдоль гладкой поверхности моря дует ветер. Что произойдет, если на этой глади появится складка? Над гребнем складки скорость воздуха будет больше, а у ее основания — меньше. Согласно закону Бернулли давление на гребне уменьшится, а у основания станет больше. Таким образом, возникновение любой неровности на поверхности моря при наличии ветра приводит к появлению сил, которые будут увеличивать эту неровность и гнать ее в направлении ветра. Накапливая в себе энергию, отнятую у ветра, эти неровности постепенно превращаются в огромные волны, неспособные остановиться даже спустя много времени после того, как прекратился ветер.

Подобно тому как любую каcофонию можно получить, комбинируя гармонические звуки, так и беспорядочную пляску волн можно представить в виде суммы гармонических колебаний. Гармоническое колебание можно описать математически:

$$y = a \sin (kx - \sigma t).$$

Если зафиксировать какой-либо момент времени t , то график, вычерченный по этой формуле, даст нам форму свободной поверхности в виде волнистой кривой с амплитудой подъема и спуска, равной a , и расстоянием между гребнями

$$\lambda = 2\pi/k.$$

В другой момент времени картина повторится, однако сместится вправо. Скорость смещения, ко-

торую называют скоростью распространения волны, будет равняться

$$v = \sigma/k.$$

Величина σ (частота, с которой волна опускается и поднимается) зависит от силы тяжести и длины волны. Для глубокого места $\sigma = \sqrt{2\pi g/\lambda}$, где g — ускорение свободного падения, равное 9,8 м/с. Таким образом, скорость распространения волны можно выразить через длину волны и ускорение силы тяжести:

$$v = \sqrt{g\lambda/(2\pi)}.$$

Приведем таблицу, показывающую, как изменяется скорость распространения волн и их период колебания T в зависимости от длины волны λ .

λ , м	50	60	70	80	90
v , м/с	8,83	9,68	10,45	11,19	11,86
T , с	5,60	6,20	6,70	7,15	7,59

λ , м	100	110	120	130	140
v , м/с	12,50	13,11	13,70	14,26	14,80
T , с	8,00	8,39	8,76	9,12	9,46

Отсюда видно, что длинные волны медленно опускаются и поднимаются, но зато быстро перемещаются по поверхности моря. Приведенные формулы и таблица позволяют с помощью секундомера определить скорость распространения волн и их длину. Для этого достаточно только измерить частоту их набегающих.

ВОЛНА БЕЖИТ, ВОДА ОСТАЕТСЯ

До сих пор мы с вами говорили только о форме волны. Как же движутся частицы воды? Впечатление, что вода движется вместе с

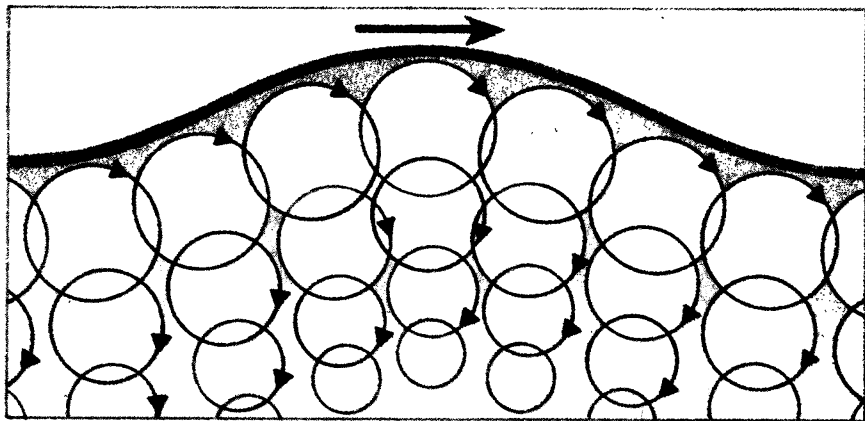


Рис. 46

волной, хотя и сильно, но обманчиво. Если бы это было так, то волны перенесли бы всю воду от одного берега к другому. Однако этого не происходит. Полное решение задачи о волновом движении показывает, что каждая частица жидкости описывает замкнутую кривую, близкую к окружности (рис. 46). Когда точка находится на гребне волны, она движется вместе с волной, затем опускается вниз, а оказавшись во впадине, смещается назад, а после этого — вверх. Такую кривую будет описывать поплавок, если нет ветра. Частицы жидкости, находящиеся на некоторой глубине, также описывают окружности, но меньшего радиуса. На глубине, равной длине волны, радиус такой окружности будет в 535 раз меньше, чем на поверхности воды. Таким образом, на большой глубине море спокойно в любую погоду.

СЛОЖЕНИЕ ВОЛН

Ветер возбуждает одновременно волны различной длины и частоты. Что произойдет, если в море сложатся две волны, частоты и

длины которых мало отличаются друг от друга? Там, где фазы обеих волн совпадают, амплитуда результирующей волны удвоится. А там, где их фазы противоположны, амплитуда будет равна нулю. Скорость распространения такого пучка волн, которую называют групповой скоростью, в два раза меньше скорости распространения волн, из которых этот пучок состоит.

Теперь можно сказать, что девятый вал — это максимум результирующей волны, образовавшейся в результате сложения нескольких близких по частоте волн меньшей амплитуды. Однако номер этой волны по счету не обязательно должен быть девятым.

Сложение волн можно проиллюстрировать весьма простым способом.

Возьмите две расчески с различной частотой зубьев. Наложите их одна на другую и, глядя через них на свет, перемещайте их относительно друг друга. Вы увидите, как вдоль зубьев побежит волна светлых и темных полосок.

ВОЛНЫ ЧУВСТВУЮТ ДНО МОРЯ

До сих пор мы не учитывали влияния дна на волновое движение жидкости, т. е. считали, что жидкость имеет бесконечную глубину. При какой глубине можно пренебречь наличием дна? Как известно, на глубине, равной длине волн, колебание жидкости настолько мало, что ее можно считать неподвижной и заменить твердым дном. Таким образом, для океанских волн глубина 100 м будет считаться малой, а короткие черноморские волны испытывают влияние дна только вблизи самого берега.

Законы волнового движения жидкости в том случае, если ее глубина значительно меньше длины волны, иные, чем для глубокой жидкости. Скорость распространения волны теперь уже не зависит от длины волны, а зависит от глубины h :

$$v = \sqrt{gh}.$$

Групповая скорость равняется той же величине. Указанная зависимость скорости v от глубины объясняет одно интересное обстоятельство. Волны в открытом море могут двигаться в самых различных направлениях в зависимости от направления ветра, их вызывающего. В то же время гребни прибрежных волн всегда параллельны берегу. Где и почему эти волны поворачиваются лицом к берегу? Анализируя предыдущую формулу, можно понять, как это происходит. Пусть волна идет так, что один ее конец находится ближе к берегу, чем другой. Ближний конец, находящийся на более мелком месте, имеет меньшую скорость, чем тот конец, который находится вдаль от берега. Такая волна ведет себя

как шеренга солдат по команде «правое плечо вперед». Волна разворачивается своим фронтом к берегу.

Вдали от берега в движении участвует толща воды, равная длине волны. Эта масса воды обладает определенной, довольно значительной энергией. Что же происходит, когда волна выходит на мелкое место? Толщина водяного слоя уменьшается. Энергия воды не может исчезнуть, и меньшее количество воды поднимается на большую высоту. Это и приводит к тому, что волна становится очень крутой, а потом с шумом опрокидывается. Такую волну нельзя представить в виде суммы гармонических колебаний, и она в буквальном смысле нарушает гармонию.

ЦУНАМИ

Итак, мы с вами попытались разглядеть за шумом и брызгами морского прибоя закономерности движения воды. Теперь можно понять такое грозное явление природы, как волны цунами.

Эти волны образуются при различных геологических катастрофах в глубинах океана. Это может быть оживший подводный вулкан, землетрясение, образование складок дна или появление нового острова. Во всех этих случаях большая масса воды испытывает сильный толчок, отчего образуется гигантская волна — цунами. Поперечные размеры этих волн исчисляются километрами, а длина фронта — десятками и сотнями километров. И хотя высота их, как правило, не велика, всего несколько десятков сантиметров, так что на фоне обычных океанских волн их не видно, они таят в себе огромную энергию.

Такая волна благодаря своей длине обладает и большой скоростью распространения, достигающей иногда 700—800 км/ч. От места катастрофы волна спешит со скоростью современного самолета к островам и материкам, покрывая тысячи километров. Совершенно незаметная в океане на глубоких местах, волна цунами становится неузнаваемой, когда приближается к берегу, где глубина становится меньше. Скрытая в ней энергия поднимает большие массы воды на высоту до 40 м. Гигантская волна обрушивается на берег и оставляет за собой руины и обломки на месте городов и лесов.

Именно такая катастрофа не очень давно произошла на Курильских островах. Потрясающее по драматизму и достоверности описание цунами дано в рассказе Н. Мартыанова «Не спи! Цунами нападает из-за угла» (Знание — сила, 1965, № 9).

«Я взглянул в сторону воды. Так вот ты какой! Встретились мы с тобой... Под низким светлым солнцем, перерезая спокойную синеву, шла на берег высокая, темная и тоже какая-то очень спокойная полоса. Вот на ней местами забилась белый, прозрачный от солнца венчик, перекатывающийся шум стал нарастать, и я понял, что просто не успею добежать ни до склона, ни даже до мостков через нашу речушку.

Оглянулся — назад тоже было поздно. Оставались шлюпки — до них было метров тридцать.

Похоже, что эту первую волну ослабила прибрежная грядя камней. Я пригнулся, стоя рядом со шлюпкой, и дьявольски холодный ледяной вал не то захлестнул, не то подтопил нас. Я толком ничего не успел сообразить, как отхлынув-

шая волна медленно и как-то очень длинно вытащила меня в бухту...

Отнесло меня довольно далеко — метров за триста-четырееста. Вокруг шумело и шум даже усилился. Чертыхаясь и отплевываясь, я стал стаскивать сапоги, и развернувшись, случайно взглянул в сторону океана.

Это было так страшно, что я закрыл глаза. Потом посмотрел опять. И еще успел подумать, что дело мое дрянь. Совсем дрянь. Потому что надо всей этой мелкой толчеей — надо мной, над шлюпкой, над бухтой — нависал темный переливающийся, застывший и несущийся серо-зеленый водяной кряж. Он валился на меня с нахлобченной белой, как льдина, грядой наверху, и последнее, что я видел — его косой лоб, и по нему стекали вниз какие-то легкомысленные струйки и разорванные кружева пены. Это была вторая, главная волна.

Меня оторвало от шлюпки, подняло, завертело — и вдруг выбросило в какой-то чужой мир, чужую планету, где не было ни ветра, ни воды, ни земли, ни воздуха, ни пены — только страшная белая непродыхаемая смесь, пустая и вязкая, а в ней меня поворачивало и медленно швыряло, оглушенного, задыхавшегося.

Внезапно это кончилось. Гребень цунами ушел вперед, а я соскользнул по тыльной стороне волны еще дальше в океан. Я кашлял и отплевывался, но я дышал, я был жив! И я не отрываясь смотрел на берег и видел, как взлетали в воздух бревна и доски причалов, как в пене швырнуло вперед разваливающиеся сараи рыбозавода, как далеко по речушке побежал высокий поворотливый вал. А волна со спадающим бурым гребнем шла даль-

ше и дальше, вот уже были сбиты крайние домики, и мне показалось, что грязная пена догнала последние черные пятнышки убежавших людей...

...Волна остановилась и лениво поволокла с собой в бухту крыши, щиты, бочки, шляпки, доски».

Сопоставляя этот рассказ и законы поведения волн, можно понять обстоятельства, сохранившие жизнь автору.

Он встретил основную волну вдали от берега, где глубина была большей, а следовательно, волна более низкой и пологой.

Но если это событие оценивать не по законам механики, а по человеческим законам, то нужно сказать, что его спасло собственное мужество.

Знание законов волнового движения жидкости позволяет определить время, за которое волна цунами достигнет берегов, предугадать наиболее опасные участки берега. Все это необходимо для предупреждения возможной катастрофы.

ВОЛНЫ В ТОПЛИВНОМ ОТСЕКЕ РАКЕТЫ

Волны бывают не только на море. Главную часть веса современной ракеты, предназначенной для освоения космоса, составляет жидкое топливо. Волновое движение топлива в баках ракеты в большой степени влияет на ее движение. А о точном управлении ракетой без учета тех возмущений, какие вносит волна, не может быть и речи. К этим возмущениям еще добавляются упругие колебания корпуса ракеты.

Исследование движения жидкости в упругих баках представляет собой трудную и интересную математическую задачу.

А как ведет себя топливо, когда ракета находится в состоянии невесомости? В этом состоянии нет ни верха, ни низа. И если топливо занимает только часть бака, то где оно будет находиться? Чтобы понять важность этого вопроса, представим себе, что произойдет после включения тормозного двигателя, если топливо располагалось несимметрично относительно оси ракеты. Ракета начнет кувыряться, как фейерверочная игрушка.

КОРАБЛЬ НА ПОДВОДНЫХ КРЫЛЬЯХ

Имеется и еще одна область техники, где нужно глубокое знание законов волнового движения жидкости. Дешев и надежен водный транспорт. Но XX век спешит, пытается обогнать время. И вот на реках появились стремительные суда на подводных крыльях, для которых родной стихией скорей является воздух, чем вода.

Появились такие суда и на морских линиях. Однако плавают они только в спокойную погоду. И теперь, перед тем как отправиться в плавание, вы должны ждать у моря погоды. Виноваты в этом волны, которые то лишают судно опоры, то принимают его в свои тяжелые объятия.

В настоящее время ученые и инженеры многих стран работают над созданием судов с управляемыми подводными крыльями. Система автоматического управления так изменяет угол встречи крыла с волной, что корпус судна не испытывает никаких колебаний, и он, двигаясь по прямой, не выскакивает из воды и не погружается в волны. Можно себе представить, каким точным должно быть такое управление, как точно придется

определять движение волны! Когда задача будет решена, морские суда будут, как птицы, летать над бушующими просторами, а путешествие в штормовую погоду превратится в увлекательную прогулку.

КАК ИСПОЛЬЗОВАТЬ ВОЛНУ

Океанские волны обладают довольно большой энергией. Чтобы понять это, достаточно увидеть, как легко качает волна огромный океанский лайнер. Еще большее впечатление производит зрелище разрушенных железобетонных дамб, которые не смогли устоять под ударами штормовых волн.

Использовать энергию волн трудно, поскольку она рассредоточена по большому пространству. Поэтому пока будем говорить о спорте. Здесь пример нам подадут дельфины. Многие видели, как небольшие группы дельфинов, расположившись вблизи форштевня движущегося судна, плывут долго и быстро без всяких видимых усилий. При этом они плывут непосредственно под поверхностью воды или погружаются до глубины 1,5—2,0 м. Зона их «катания» располагается вправо и влево

от плоскости симметрии на 1,5 м. Когда дельфин плывет в плоскости симметрии судна, его хвостовой плавник находится впереди форштевня на расстоянии от 0,1 до 1,5 м. Если дельфин плывет сбоку, то хвостовой плавник располагается позади форштевня на 0,3—0,5 м. Дельфины могут плыть друг за другом или друг над другом. Они приближаются к судну своим ходом и на расстоянии 6—9 м резко сворачивают к форштевню. Прежде чем занять постоянное положение, перемещаются перед форштевнем вправо и влево. Они могут часами плыть перед кораблем, совершенно не двигая плавниками.

Чтобы понять, как удастся дельфинам так плавать, обратимся к рис. 47. На каждую точку поверхности тела дельфина действует гидростатическое давление, равное весу водяного столба в рассматриваемой точке. Дельфин располагается так, что его задняя часть находится под гребнем волны, в зоне высокого гидростатического давления, а голова — под впадиной, в зоне малого давления. Разность этих давлений и вызывает его поступательное движение. Нет сомнения, что большие ветровые волны также используются стаями дельфинов для быстрого и экономного передвижения.

Возможность движения за счет соскальзывания с переднего склона волны используется в спортивном катании на доске («серфинге»). Этот вид спорта очень развит в Австралии и в некоторых других странах, где большие океанские волны подходят к самым берегам. Искусство такого катания состоит в умении управлять процессом скольжения. Если вы направите движение круто вниз по склону волны, то сможете обогнать волну, спуститься в ее впадину. Там вы потеряете скорость,

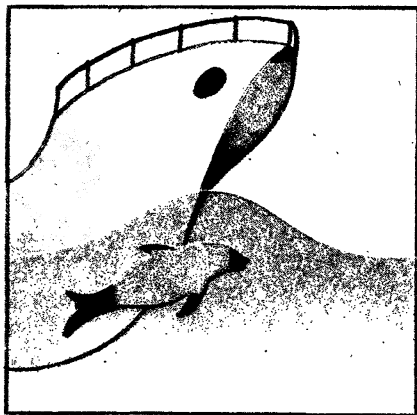


Рис. 47

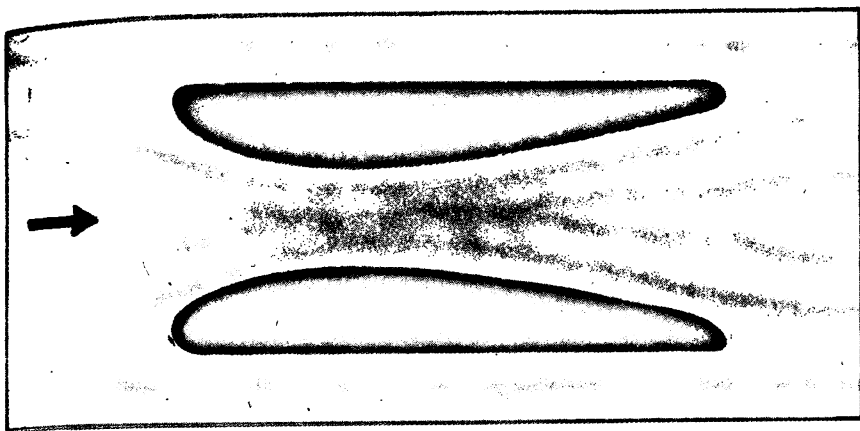


Рис. 48

доска погрузится в воду, а волна, настигнув, накроет вас своим гребнем. Медленное соскальзывание приведет к тому, что волна вас обгонит и вы окажетесь на заднем склоне ее.

Значительно меньше искусства нужно, чтобы оседлать волну на легкой лодке, однако в этом случае, как правило, нам не хватает скорости, чтобы не отстать от волны. При достаточной мощности двигателя можно постоянно удерживаться на переднем склоне волны. При этом расход топлива в двигателе существенно уменьшится.

Рассмотрим два рядом плывущих корабля (рис. 48). При достаточно близком расположении каждый из них оседлает волну другого и будет испытывать дополнительную толкающую силу. Если мы захотим постоянно использовать преимущество парного плавания, объединим эти два корабля общей надстройкой. А чтобы выпуклость внешних бортов не создавала лишней волны, обрежем их вдоль оси — получится катамаран с малым волновым сопротивлением. Само собой разумеется, что такая конструкция эффективна только для быстро плавающих су-

дов, когда волновое сопротивление превосходит сопротивление трения смоченной поверхности судов, которая в этом случае удваивается.

Если говорить о практическом применении такой конструкции, то нужно иметь в виду, что расстояния между корпусами могут оказаться большими и к тому же должны меняться при изменении скорости движения.

Однако для спортивных судов, например, парусных судов класса «Торнадо» это обстоятельство не будет служить непреодолимым препятствием.

Описанный катамаран только частично утилизирует волновое движение. Поставим перед собой вопрос, можно ли создать судно, движение которого не вызывает волны.

Кораблестроители твердо знают, что движение всякого водоизмещающего тела вблизи свободной поверхности будет сопровождаться волновым движением. Показать, что это утверждение не всегда справедливо, — это значит поколебать одну из важнейших концепций теории корабля. Для практики этот вывод указал бы путь, на котором можно уменьшить корабельную волну.

Образование волны, во-первых, требует мощности и, во-вторых, приводит к разрушению берегов. Последнее обстоятельство в настоящее время привлекает к себе все большее внимание.

Возьмем тонкий стальной лист, погрузим его в водяной поток. При параллельном направлению потока положению листа никакой волны практически не образуется. Ничего не изменится, если этот же лист согнуть в прямоугольную коробку с образующимися плоскостями, параллельными скорости воды.

Мы превратим эту коробку в модель судна, если во внутренней части сделаем необходимые утолщения. Однако теперь не вся вода, приходящая к входному отверстию, войдет во внутренний канал. Часть ее начнет обтекать трубу с внешней стороны, а это приведет к возмущениям внешнего потока и к образованию волны на свободной поверхности. Этого можно избежать, если на входе в межкорпусное пространство поставить колеблющиеся крылья, которые должным образом воздействовали бы на поток и подталкивали воду внутрь. Для любой геометрии внутреннего канала можно указать необходимое управляющее воздействие, которое бы гарантировало требуемый режим течения.

Если пренебречь вязкостью воды, а при изучении волнового движения это вполне допустимо, то можно воспользоваться принципом обратимости. Применительно к рассматриваемому случаю он выражается в том, что если одни лопатки протолкнули воду в канал и обеспечили отсутствие возмущения в набегающем потоке, то такие же лопатки на выходе из канала, но работающие в обратном режиме, обеспечат согласование вытекающей воды со спутным невозмущенным потоком.

И если передние лопатки работали в насосном режиме и требовали подвода мощности, то задние лопатки будут работать в турбинном режиме и требовать отвода такой же мощности.

Управляющие воздействия, приложенные к воде на входе и выходе из канала, делают возможным невозмущающее движение тела в жидкости. В традиционной теории корабля такие условия не рассматриваются и такие течения не достигаются.

Математическое моделирование описанного течения не вызвало никаких трудностей. Однако при физическом моделировании и тем более при выдаче рекомендаций для практики мы должны учесть еще и требование простоты инженерной реализации.

В испытанной нами модели судна с малым волновым сопротивлением вместо двух управляющих механизмов использовался один судовой движитель (в данном случае гребное колесо), расположенный между корпусами в самой узкой части канала. Верхняя стенка канала отсутствовала и заменялась свободной поверхностью. Как видим, исходная модель претерпела значительные изменения.

Однако подбором режима работы движителя мы могли добиваться условия, при котором весь объем жидкости, приходящийся против входного сечения, проходил в канал. Кроме этого, движитель компенсировал гидравлические потери канала и, само собой разумеется, выполнял свои прямые функции: создавал дополнительный импульс, необходимый для движения.

Испытание такой модели позволило, если говорить в целом, убедиться в правильности теоретических рекомендаций. Не менее инте-

ресными являются и частные наблюдения.

На свободной поверхности возникают носовые волны от каждого корпуса, которые входят в межкорпусный канал. При определенном режиме движения и работы движителя эти волны интерферируют между собой, а также с волной, возбуждаемой движителем, и внешний поток остается практически невозмущенным.

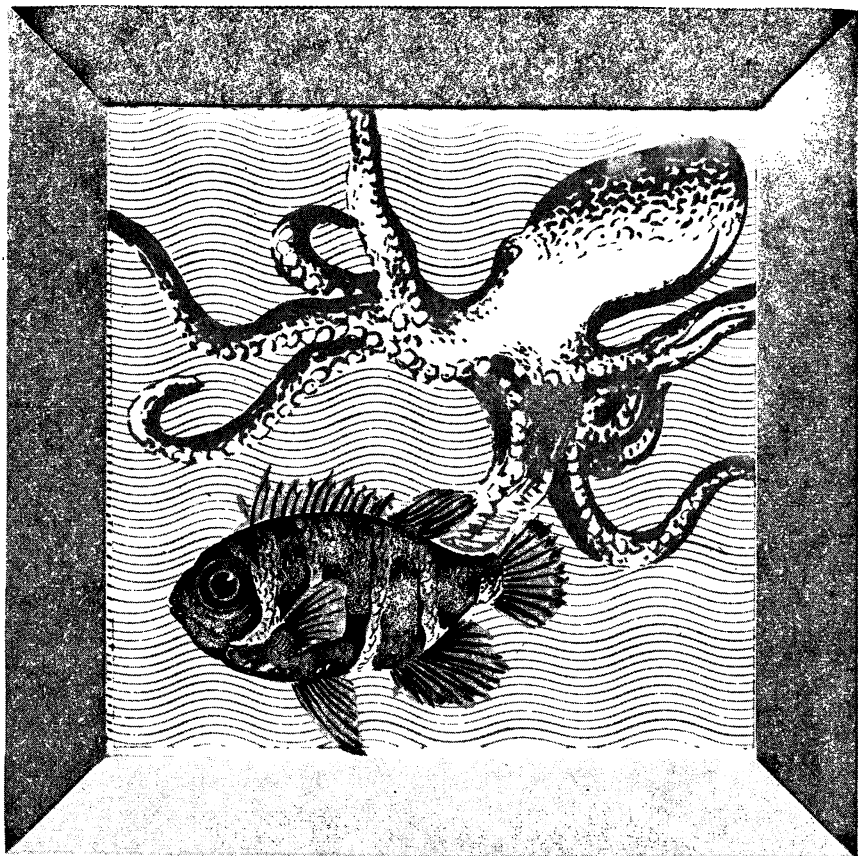
Нетрадиционными оказываются и условия работы движителя. Понижение уровня воды перед движителем и увеличение уровня воды после движителя привело к появлению тяги на корпус, которая превосходила тягу на движителе и сопротивление корпуса, вместе взятые.

Такой режим, который наблюдался только при малых скоростях, эффективно использовать для бук-

сиров-толкачей, так как он позволяет значительно увеличить тягу, а, следовательно, и КПД буксира.

В главе «Гидродинамические машины» мы рассказали, каким образом создается тяга гребным винтом. Те же законы применимы и в рассматриваемой конструкции, если только корпус судна считать насадком винта.

Ометаемую площадь винта при этом следует определять по площади выходного сечения межкорпусного канала, а требуемую тягу определять только по сопротивлению внешней поверхности корпуса. Так как ометаемая площадь в этом случае будет большая, а сопротивление малым, то и приращение скорости после винта должно быть малым. Отсюда следует высокий КПД движительного комплекса.



ГИДРОДИНАМИКА ЖИВОТНЫХ

ЧЕМПИОНЫ ПОДВОДНОГО ПЛАВАНИЯ

О скоростях, достигаемых морскими животными, ходят целые легенды. Конечно, многое в этих легендах — преувеличение. Но все-таки они основаны на фактах, заставивших ученых провести строгие измерения.

Крупный тунец, проглотив живца, начинает разматывать леску спиннинга. Лучшей возможности

для измерения скорости этой рыбы трудно придумать. Измерения показывают, что в течение нескольких секунд он движется со скоростью 90 км/ч. А меч-рыбы питаются тунцами. В литературе за меч-рыбой утвердилась скорость 130 км/ч. Такая скорость не достижима ни для одного подводного судна.

Вызывают восхищение ловкие и быстрые дельфины, которые, хотя и не развивают таких больших скоростей, однако дают хороший пример

экономичного использования энергетических ресурсов, заключенных в их мышцах.

Говоря о дельфинах, уместно вспомнить парадокс, который лет тридцать назад сформулировал английский физиолог Грей. Определив энергетические возможности дельфина и сопоставив их с необходимой для его движения мощностью, он пришел к выводу, что требующаяся мощность раз в семь превосходит возможную. Из этого противоречия Грей сделал закономерное предположение, что дельфин обладает эффективным механизмом, который уменьшает гидродинамическое сопротивление по сравнению с контрольной твердой моделью в семь раз.

Правда, в последнее время начали подвергать сомнению точность вычислений Грея и вместо семи называют цифру четыре, и к этому добавляют, что при кратковременной работе дельфин может развить мощность, в четыре раза превосходящую нормальный уровень. Эти сомнения и вызвали вопрос: существует ли парадокс Грея?

Приведем один простой пример, который позволит нам занять по этому вопросу совершенно определенную позицию. Для этого вычислим сопротивление дирижаблеподобного тела диаметром 0,5 м и длиной 2,25 м, движущегося со скоростью 25 м/с. Согласно многочисленным экспериментальным данным сопротивление такого тела равняется 3000 Н. Чтобы двигать его со скоростью 25 м/с при стопроцентном коэффициенте полезного действия, требуется 100 л. с. Рассмотренное дирижаблеподобное тело можно сравнить с тунцом, который имеет такие же размеры и может двигаться, как мы знаем, с такой же скоростью. Это сравнение наводит на мысль, что ту-

нец должен либо превосходить по своей мощности табун в 100 лошадей, либо иметь весьма эффективный способ снижения гидродинамического сопротивления. Не нужно быть специалистом, чтобы понять, что холоднокровная рыба, использующая для окислительных процессов кислород, растворенный в воде в весьма малой концентрации, не может соперничать в мощности с табунном теплокровных животных. Кроме того, на хвостовой плавник тунца, обеспечивающий его движение, работает только одна треть всех мышц. Остальные мышцы не связаны с хвостовым плавником и в создании тяги не могут участвовать.

Если бы водные обитатели испытывали такое сопротивление, как построенные человеком суда, то они не могли бы осуществить дальние миграции по морям и океанам.

Следовательно, природа допускает такое движение в воде, которое сопровождается малым сопротивлением.

В чем же секрет быстрого и экономичного плавания водных животных? Чтобы разобраться в этом процессе, познакомимся с некоторыми сторонами гидродинамики водных животных.

ПРИРОДНЫЕ ДВИЖИТЕЛИ

Для того чтобы какое-либо тело могло двигаться в воде, необходимо наличие силы, уравнивающей гидродинамическое сопротивление. Как известно, в созданных человеком конструкциях такую силу создают гребные винты-двигатели, которые отбрасывают сильную струю воды. А как создают силу тяги рыбы, дельфины и другие обитатели водной среды!

При простейшей классификации движителей, используемых водными

животными, мы должны указать три их типа: гидрореактивный, гибкую пластинку, машущее крыло.

Гидрореактивный движитель животных работает так же, как и водометный движитель, созданный человеком. Мощный мускульный мешок кальмара выталкивает воду через узкое отверстие воронки и тем создает тягу. Поворотом воронки осуществляется изменение направления движения. Способность кальмара изменять объем обуславливает некоторую специфику его движения. При уменьшении массы кальмара происходит дополнительное увеличение скорости движения. Правда, при следующем цикле, когда мускульный мешок будет набирать воду, произойдет такое же торможение. Однако в том случае, если кальмар удирает от хищника, такое неравномерное движение в сочетании с высокой маневренностью может дать ему определенные преимущества.

Более распространенным является второй тип движителя, который мы называли гибкой пластинкой. Чисто периодическое колебание пластинки приводит к появлению как силы тяги, так и силы торможения. Чтобы гибкая пластинка создавала тягу, она должна изгибаться по закону бегущей волны. При этом амплитуда волны должна возрастать от носа к хвосту. Нестационарность движения точек пластинки приведет к появлению реакции инерционных сил со стороны жидкости. Эти силы на заднем склоне каждой волны создают силу тяги, а на переднем — силу торможения. Благодаря нарастанию амплитуды эти силы оказываются разными, отчего суммарная сила будет отличаться от нуля.

Положительный вклад сил оказывается еще больше, если пластин-

ка будет двигаться с ускорением; тогда в каждый последующий момент времени она будет находиться в потоке с большей скоростью, чем в предыдущий. Так как в создании тяги участвует вся поверхность, то такой движитель способен вызвать большое ускорение, хотя КПД его будет не очень высок. Описанный механизм создания тяги целесообразен в тех случаях, когда нужно сделать рывок, например, для преодоления водопада, при погоне за добычей. Угорь, форель дают прекрасный пример такого движителя. Более подробно рассмотрим третий тип движителя.

МАШУЩЕЕ КРЫЛО

Наиболее высоким КПД обладает движитель типа «машущее крыло». Такое название объясняется сходством действия плавника с работой крыльев птиц. Да и по своей форме хвостовой плавник тунца очень напоминает форму крыльев таких птиц, как ласточка или стриж.

К указанному типу движителей относятся хвостовые плавники морских млекопитающих и чемпионов подводного плавания — тунца и меч-рыбы. В отличие от рыб, у млекопитающих хвостовой плавник расположен в горизонтальной плоскости и колеблется в вертикальном направлении, почти как крылья у птиц.

Такие движения млекопитающих, дышащих воздухом, обеспечивают им хорошую маневренность в вертикальной плоскости. Однако вдали от свободной поверхности, где горизонтальные и вертикальные направления не отличаются друг от друга, работа движителя рыб и млекопитающих не имеет различия.

Каков механизм создания тяги у такого движителя? При поперечном

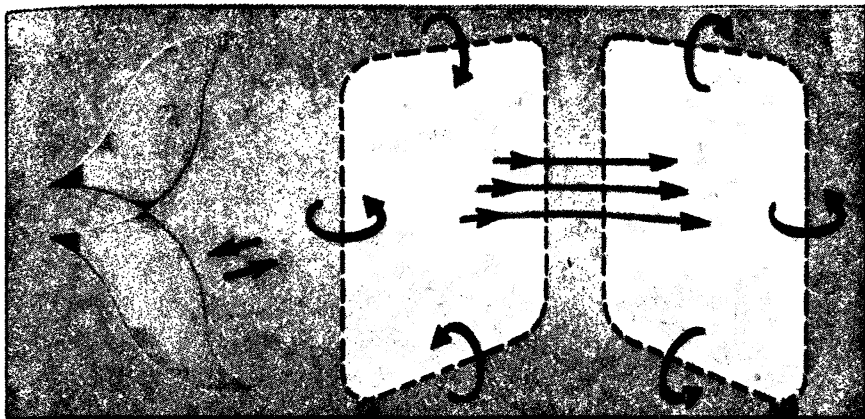


Рис. 49

колебании хвостовой плавник как бы закручивает воду, создавая вокруг себя вихревой жгут. Концы этого вихревого жгута сносятся потоком вниз. Смыкаясь, жгут образует кольцо, одним из участков которого является сам плавник. В крайних верхнем и нижнем положениях хвостовой плавник для смены направления делает резкое движение, благодаря которому вихревой жгут срывается с плавника. От плавника отрывается замкнутое вихревое кольцо и начинает формироваться новое. На рис. 49 показана схема создаваемых хвостовым плавником вихрей. Внутри вихревого кольца скорость воды больше, чем снаружи. Это создает струю воды, направленную вниз по потоку. Очевидно, что, так же как и у гребных винтов, создание такой струи приводит к появлению силы тяги, приложенной к хвостовому плавнику.

Какими достоинствами обладает такой механизм создания силы тяги? Исследования движителя типа «машущее крыло» проводили на специальном испытательном стенде, в гидродинамической лотке. Именно там была обнаружена вихревая картина, которую мы описали. На стен-

де, кроме того, имелась возможность измерять мгновенное значение силы тяги и потребляемую мощность. Эти измерения показали большую эффективность такого типа движителя. В частности, сила тяги в швартовом режиме, т. е. при испытании в неподвижной жидкости, оказалась почти в четыре раза больше, чем у обычного движителя с той же ометаемой площадью и с той же частотой вращения. Расход мощности на единицу силы тяги при этом также оказался несколько меньше. Именно этим объясняется способность дельфина стоять, почти полностью высунувшись из воды.

Создаваемая таким движителем тяга зависит от ометаемой плавником площади. А так как поперечные размеры плавника превосходят поперечные размеры туловища, то и ометаемая площадь оказывается больше поперечного сечения туловища дельфина или тунца. У судов, созданных человеком, площадь, ометаемая гребными винтами, всегда намного меньше поперечного размера судна. Чтобы создать с помощью узкой струи заметную тягу, приходится отбрасывать воду с большой скоростью. Кинетическая

энергия такой струи — это и есть потерянная энергия. У рыб и дельфинов струя, образованная вихрем, очень широкая, и необходимая тяга образуется уже при малой скорости в этой струе. Мала и потерянная мощность. Эти достоинства позволяют морским животным развивать большие скорости. Тело у них веретенообразное и малоподвижное. Мощная мускулатура заставляет колебаться довольно жесткий хвостовой плавник с большой частотой.

Заметим, что возможно и комбинированное использование двух типов движителей.

В минуту опасности работает весь плоский корпус, обеспечивая большую тяговую силу.

В спокойном состоянии работает только хвостовой плавник как наиболее экономичный движитель.

У читателей, увлекающихся подводным спортом, может возникнуть вопрос, как усовершенствовать ножные ласты для человека. Выпускаемые в настоящее время ласты являются комбинацией гибкой пластинки и машущего крыла. Причем достоинства обоих движителей используются слабо. Появившиеся в последнее время длинные моноласты несколько улучшили тягу за счет использования гибкой пластинки.

Проведенные исследования показали, что ласты типа «машущее крыло» будут намного более эффективными. Однако устройство их более сложно. В то время как гибкую пластинку можно изготовить из пассивных упругих элементов подходящей жесткости, машущее крыло требует механизма принудительной перекладки в крайних верхнем и нижнем положениях.

СЕКРЕТЫ БОЛЬШОЙ СКОРОСТИ

Итак, мы убедились, что водные животные обладают различными, подчас совершенными, механизмами создания тяги. Однако это несколько не отвечает на вопрос, который возникает в связи с парадоксом Грея. Ведь движитель служит лишь средством превращения мускульных усилий в тягу, необходимую для движения. Каким бы совершенным ни был этот движитель, он не может иметь КПД выше 100%. Чтобы быстро двигаться, нужно иметь либо большую мощность, либо малое сопротивление. Большую мощность рыба не может иметь по физиологическим причинам; значит, она должна обладать значительно меньшим сопротивлением, чем ее твердая модель, сопротивление которой нам известно.

Первое, в чем обычно ищут объяснение большим скоростям водных животных, — это их форма. Действительно, форма быстрходных рыб и млекопитающих весьма совершенна. Характерно, что хотя рыбы и млекопитающие сильно различаются по своему происхождению и физиологическим признакам, одинаковые условия плавания привели к большому сходству их внешних форм.

Опережая вопросы читателя, скажем, что судостроители в полной мере использовали опыт живой природы. Если подводные лодки времен второй мировой войны имели большую длину, отношение которой к диаметру достигало 11—13, то современные лодки имеют форму, близкую к форме тунца, с отношением длины к диаметру 5—6.

Однако хотя оптимальная форма и позволяет уменьшить расход

мощности и увеличить скорости подводных лодок, экономичность и скорость плавания водных животных остались недостигнутыми. Ведь парадокс Грея, о котором шла речь выше, относится именно к этим оптимальным формам.

В чем же может быть секрет быстрого плавания? Напомним, что течение вязкой жидкости может быть двух типов: слоистым (ламинарным) и турбулентным, с бурным перемешиванием слоев. Легко понять, что во втором случае гидродинамическое сопротивление движению будет значительно больше. Каким путем можно предотвратить переход ламинарного течения в турбулентное? Один из эффективных путей — это введение полимерных добавок, изменяющих физические свойства жидкости. Действие полимерных добавок может быть двояким. С одной стороны, добавки могут уменьшить вязкость жидкости в пристеночном слое, а с другой — длинные молекулы полимеров способны воспрепятствовать мелкомасштабным возмущениям, которые характерны для турбулентного течения. Важным свойством полимерных добавок является то, что указанный эффект они вызывают при весьма низких концентрациях (10^{-3} — $10^{-4}\%$). Добавка такого полимера в охлаждающую жидкость радиатора уменьшает сопротивление на 70%. Вращающийся в жидкости диск при наличии полимерных добавок испытывает на 60% меньшее сопротивление.

Все эти экспериментальные данные позволяют считать слизистые покрытия многих костистых рыб эффективным средством снижения гидродинамического сопротивления. Если к тому же принять во внимание, что молекулярный вес слизистых выделений

значительно больше, чем у испытанных человеком синтетических полимеров, и способ подачи слизи в пристеночный слой более совершенен, чем в опытах, то можно предположить, что рыбы достигают большего эффекта с меньшим расходом вещества, чем это осуществлено в опытах.

Теоретический анализ влияния полимерных добавок показывает, что они способны увеличить допустимые размеры и скорости, при которых сохраняется ламинарное течение, только в ограниченных пределах. Следовательно, крупные и быстроплавающие рыбы и млекопитающие должны иметь другой механизм снижения сопротивления, не связанный со слизистыми выделениями на поверхности кожи.

Здесь уместно вспомнить об упруго-демпфирующем покрытии, изобретенном американским инженером Крамером, которое моделирует такое покрытие у дельфина. Не будем останавливаться на конструкции такого покрытия, а скажем только, что своими свойствами оно должно обеспечивать поглощение всех возмущений, развитие которых и приводит к разрушению ламинарного течения. Проведенные Крамером эксперименты показали, что его покрытие способно уменьшить сопротивление на 40%. Особенностью такого покрытия является то, что оно вызывает уменьшение сопротивления только в узком диапазоне скоростей. Вне этого диапазона это покрытие способно даже увеличить сопротивление. Не исключена возможность, что некоторые млекопитающие и рыбы пользуются именно таким способом снижения сопротивления. Кроме того, для расширения диапазона допустимых скоростей они могут регулировать упругие свойства

ва своего покрытия. Однако и этот способ снижения сопротивления становится неэффективным с ростом размеров и скоростей. Поэтому даже у дельфина, скорость которого при длине тела два метра достигает 10—15 м/с, а тем более у тунца и меч-рыбы следует искать другой механизм снижения сопротивления.

Таким механизмом может быть бегущая по поверхности тела волна. Остановимся более подробно на том, какое именно течение формируется вдоль бегущей волны и благодаря чему она способна уменьшать сопротивление. На рис. 50 показано, как течет жидкость между гребнями волны. Передний фронт волны как бы выбрасывает жидкость в поток, а задний фронт откачивает эту жидкость. Таким образом, бегущая волна заставляет двигаться вдоль тела некоторый слой жидкости. Именно это обстоятельство и приводит к уменьшению сопротивления. Однако чтобы такое течение реализовалось, нужно выполнить несколько специальных условий. Прежде всего длина волны должна быть достаточно малой. Это необходимо по двум

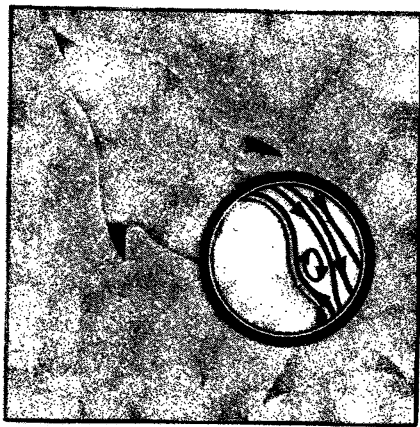


Рис. 50

причинам. Во-первых, на всей длине тела должно укладываться по меньшей мере несколько десятков таких волн, так как в первых из них указанное течение только будет формироваться, и лишь последующие будут служить целям уменьшения сопротивления. Во-вторых, малый размер волны нужен еще и для устойчивости ламинарного течения между гребнями волн. При больших размерах волны это течение может разрушиться, превратившись в бурное турбулентное течение. Вот почему бегущая волна, предназначенная для снижения сопротивления, должна в корне отличаться от крупномасштабной волны, которая обеспечивает водному животному тягу. Мы подчеркнули этот факт потому, что в популярной литературе часто смешивают эти два типа волн.

Другое условие, которому должна удовлетворять бегущая волна, это согласование скорости движения тела и фазовой скорости волны, так как бегущая волна способна не только уменьшать, но и увеличивать сопротивление. Для проверки эффективности бегущей волны была изготовлена специальная модель, которая получила шуточное наименование «стиральная доска». Эксперименты показали, что если скорость движения волны меньше половины скорости движения модели, то сопротивление последней больше сопротивления гладкой поверхности. С дальнейшим ростом скорости волны сопротивление уменьшается, и при равенстве скоростей модели и волны оно становится в 3—4 раза меньше сопротивления гладкой поверхности.

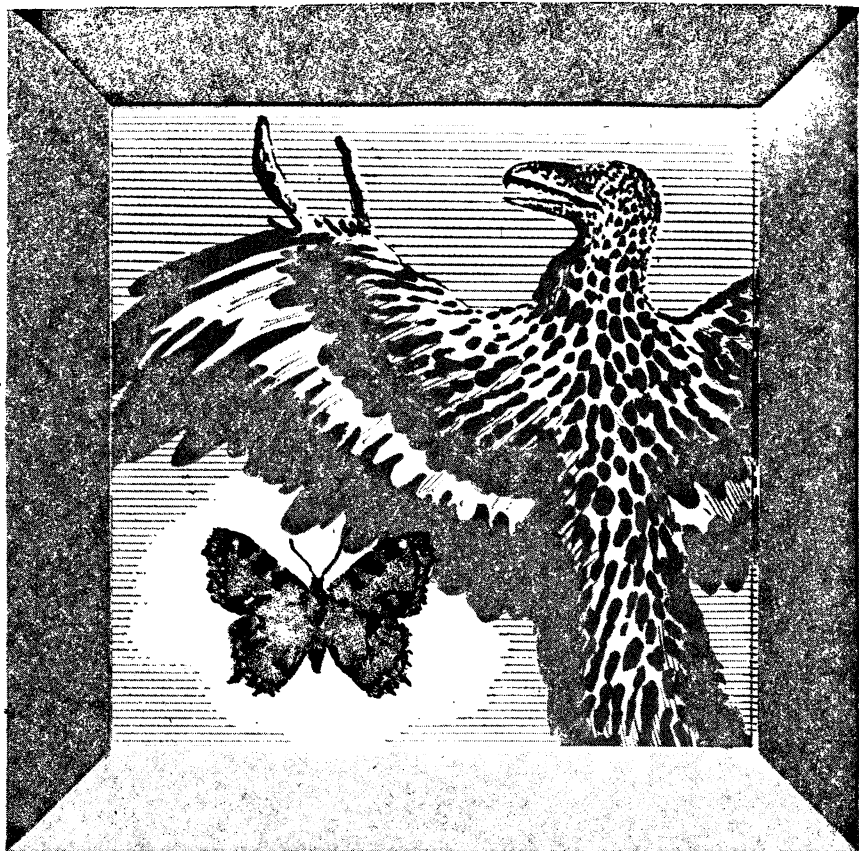
Какое же устройство генерирует и поддерживает бегущую волну? Таким механизмом может быть

гидро-упругий флаттер поверхности животного, т. е. автоколебания упругого тела в быстром потоке воды. Подобно тому как ветер вызывает на поверхности моря бегущие волны, движущаяся вода может вызвать волны на коже дельфина или тунца. Напрягая или ослабляя подкожные мышцы, животное может регулировать упругие свойства своего покрытия и настраивать их в зависимости от скорости плавания. Заканчивая рассказ о влиянии бегущей волны, скажем, что с таким объяснением хорошо согласуется парадоксальный, на первый взгляд, факт наличия шероховатости на поверхности тела у таких быстроходных животных, как акулы, парусники, меч-рыбы. Шероховатость как бы увеличивает сцепление между телом и той частью воды, которая увлекается бегущей волной.

Читатель может спросить: если известен механизм снижения сопротивления, то почему же его не применяют до сих пор на судах? На это имеются свои причины.

Во-первых, бегущая волна способна не только уменьшать сопротивление, но и увеличивать его. И следует провести довольно сложные эксперименты, чтобы найти параметры волны, которая будет уменьшать сопротивление.

Вторая причина, в отличие от первой, имеет чисто конструктивный характер. Сделать корабль с такими стенками, упругие свойства которых могут меняться, довольно сложная задача. Однако для человека важно познать эффективность природных приспособлений, а затем он может либо повторить их, либо найти удобное для себя решение.



ПОЛЕТ В ЖИВОЙ ПРИРОДЕ

ПЛАНИРУЮЩИЙ ПОЛЕТ

Совсем недавно человек с завистью смотрел на птиц, которые с легкостью покрывали большие расстояния, а он, царь природы, вынужден был медленно переступать по земле. Но человек научился летать и летает теперь быстрее и дальше любой птицы. Однако законное чувство превосходства над птицами омрачается сознанием того, что человек осуществ-

ляет свой полет слишком неэкономично.

Такие птицы, как почтовый голубь, орел, ласточка, стриж, летают со скоростью 100—110 км/ч. Дальние беспосадочные перелеты служат доказательством большой экономичности полета птиц. Колибри — самая маленькая из птиц пролетает за ночь над Мексиканским заливом более 800 км. Золотая ржанка летит зимовать из Новой Шотландии в

Южную Америку и в хорошую погоду, по наблюдению орнитологов, преодолевает расстояние в 4000 км за 48 ч.

Образы Икара и Дедала отражают извечное стремление человека летать. Как ни прекрасны современные воздушные лайнеры, в которых мы за считанные часы переносимся в города Сибири и Средней Азии, они являются только транспортными средствами, а мы являемся пассивными пассажирами.

Иначе себя чувствуют летчики-спортсмены на специальных спортивных самолетах. Послушная машина делает человека покорителем воздушной стихии. Однако спортивная авиация требует довольно сложных и дорогих технических средств, предъявляет высокие требования к летчику-спортсмену. Эти причины препятствуют массовому распространению авиационного спорта. И миллионы людей, прикованных к земле силой тяжести, вынуждены томиться от неудовлетворенной жажды полета. А рядом, в одном с нами небе, беспечно резвятся стрижи, пролетают в дальние страны журавли. Летательный аппарат их предельно прост и доступен, кажется, любому живому существу. Этим объясняется исключительный интерес к проблеме машущего полета со стороны молодежи. Попробуем и мы разобратся в некоторых «секретах» полета птиц.

Планирующим полетом, кроме птиц, пользуется большое количество животных. Например, летучие рыбы энергичными движениями хвостового плавника развивают скорость 18 м/с, которая оказывается достаточной для частичного выхода из воды. После этого грудные плавники, которые были сло-

жены вдоль туловища, разворачиваются над водой, образуя несущие плоскости. Благодаря большой скорости и большой площади плавников рыба отрывается от воды полностью и совершает планирующий полет. Пролетев 20—40 м, рыба снижается настолько, что хвостовой плавник вновь касается воды. Энергичные движения хвостом вызывают новое увеличение скорости, в результате чего рыба снова отрывается от воды и продолжает планирующий полет.

Некоторые виды лягушек имеют на лапах удлинённые пальцы, между которыми натянуты перепонки значительной площади. Взобравшись на дерево, такая лягушка способна перелететь, планируя сверху вниз, расстояние до 20 м.

Среди рептилий к планирующему полету приспособились летающий дракон и несколько видов змей. Несущая поверхность у летающего дракона образована складками кожи, расположенными по бокам туловища и поддерживаемыми удлинёнными ребрами. Эта маленькая ящерица, обитающая в лесах на юге Азии, способна летать между деревьями, стоящими на расстоянии 70 м друг от друга. Летающие, а точнее, планирующие змеи так сплющивают свое тело, что оно напоминает ленту. В таком состоянии они и совершают свои прыжки с вершины деревьев, на которые они забираются по стволу.

Вымершие в конце мезозоя летающие ящеры — птерозавры — имели длинные крылья в виде летательной перепонки, опорой которой служил удлинённый палец передней конечности. Некоторые представители этой группы достигали гигантских размеров (размах крыльев до 7 м). Из-за низких

аэродинамических качеств птерозавры едва ли были хорошими летунами. Однако планирующий и парящий полет они могли использовать в полной мере.

ПАРЯЩИЙ ПОЛЕТ

К планирующему полету непосредственно примыкает парящий. Действительно, планирование в интенсивном восходящем потоке будет сопровождаться не только горизонтальным перемещением, но и подъемом вверх, как, например, при полетах планеров.

Многие птицы используют этот вид полета как наиболее экономичный. Такие птицы, как альбатрос, серебристая чайка, черный аист, могут часами держаться в воздухе, ни разу не взмахнув крыльями. Однако способы парения птиц более разнообразны, чем планеров.

Кроме парения в восходящих потоках, птицы способны использовать пространственную и временную неравномерность встречных потоков. Рассмотрим возможность парения в воздушном потоке, скорость которого возрастает с высотой. Пусть птица планирует по ветру с какой-то начальной высоты. При этом скорость птицы будет складываться из скорости ветра и скорости планирования. Достигнув некоторой скорости, птица постепенно поворачивает навстречу ветру. Встречная скорость будет почти в два раза больше скорости ветра. При этом подъемная сила крыльев окажется больше веса птицы, и она начнет подниматься. Скорость ее движения, естественно, будет уменьшаться. Однако благодаря тому, что она при подъеме попадает в слой воздуха со все возрастающей скоростью, встречный поток

будет некоторое время сохраняться. В тот момент, когда движение птицы относительно воздушной массы полностью прекратится, птица должна повернуть по ветру. Последующее планирование по ветру приведет ее в ту же точку на местности, но на большей высоте. Повторяя описанные движения, она будет подниматься все выше и выше.

Другой вид динамического парения можно осуществлять, используя порывы ветра. Расчеты показывают, что если птица летит против ветра в тот промежуток времени, когда ветер усиливается, и по ветру, когда он ослабевает, то по завершении цикла она оказывается выше точки, с которой начинался цикл. Полет птиц по восходящей винтовой линии, который можно часто наблюдать в природе, служит только для увеличения высоты. Но и при движении в одном направлении птицы могут осуществлять динамическое парение. Для этого им достаточно менять подходящим образом угол атаки крыла и лететь с переменной высотой.

МАШУЩИЙ ПОЛЕТ

Планирование и парение, хотя и представляют экономичные формы полета, могут осуществляться только с некоторой начальной высоты, а далекий перелет возможен только при определенных метеорологических условиях.

Универсальной формой полета является активный машущий полет, применяемый птицами, насекомыми, летучими мышами и даже некоторыми рыбами. Насекомые являются наиболее древней формой животных, применяющих такой способ полета. Длительный период

эволюции насекомых привел к огромному разнообразию форм машущего полета. Частота взмахов варьируется от 5 Гц у крупных бабочек до 1000 Гц у мелких двукрылых.

Многие насекомые могут зависать в воздухе, как вертолет. При этом крылья у них совершают колебание в горизонтальной плоскости. Попробуем понять, в чем может заключаться преимущество зависания насекомого по сравнению с зависанием вертолета. Прежде всего отметим, что законы механики являются общими как для живых существ, так и для механизмов. В частности, предмет весом P будет висеть только в том случае, если он отбрасывает вниз определенное количество воздуха, в соответствии с законом импульса:

$$P = Mv,$$

где P — вес предмета, v и M — скорость и масса отбрасываемого в единицу времени воздуха.

Если через S обозначить площадь, ометаемую крыльями, то

$$M = \rho S v.$$

Следовательно,

$$P = \rho S v^2.$$

Для того чтобы отбросить массу воздуха M со скоростью v , нужно при стопроцентном КПД совершить в единицу времени работу

$$N = \frac{1}{2} M v^2 = \frac{1}{2} \rho S v^3.$$

Из двух последних формул найдем необходимую мощность в зависимости от веса:

$$N = \frac{P^{3/2}}{2\sqrt{\rho S}}.$$

Очевидно, что с ростом ометаемой площади уменьшается расход мощности, однако увеличиваются

потери на трение и вращение воздуха. Это обстоятельство и требования к прочности крыльев не позволяют беспредельно увеличивать площадь S и тем самым уменьшать мощность N . С учетом реальных потерь для мощности в ваттах была получена следующая формула:

$$N \approx 0,8 \frac{P^{3/2}}{L},$$

где L — размах крыльев (м).

Определим, как меняется удельная мощность n при изменении абсолютных размеров. Из последней формулы найдем

$$n = \frac{N}{P} = 0,8 \frac{\sqrt{P}}{L}.$$

Поскольку

$$P = \alpha L^3,$$

где α — некоторая константа, получим:

$$n = 0,8 \sqrt{\alpha L}.$$

Следовательно, удельная мощность воробья с размахом крыльев $L = 0,25$ м будет в 10 раз меньше удельной мощности летательного аппарата с размахом крыльев 25 м. В свою очередь насекомое с размахом крыльев 2,5 мм может обойтись удельной мощностью в 10 раз меньшей, чем воробей.

Различие в абсолютных значениях мощностей для рассмотренных случаев еще больше бросается в глаза. Вычислим мощность, необходимую для зависания воробья, по таким данным: $P = 0,33$ Н, $L = 0,25$ м.

Расчет дает

$$N = 0,6 \text{ Вт.}$$

Из приведенных выше формул можно получить, что мощности для аппаратов различных размеров

относятся друг к другу как

$$\frac{N_1}{N} = \frac{L^{7/2}}{L^{7/2}}$$

Отсюда следует, что насекомому достаточно мощности

$$N_1 = 0,6/100^{7/2} = 0,6 \cdot 10^{-7} \text{ Вт},$$

а мощность аппарата, в 100 раз большего, чем воробей, должна равняться

$$N_2 = 0,6 \cdot 100^{7/2} = 6000 \text{ кВт}.$$

Эти расчеты позволяют объяснить неутомимость насекомых и малую грузоподъемность вертолетов. Представим себе летательный аппарат, который изготовлен по образцу и подобию воробья, но предназначен для транспортировки человека. Вес аппарата примем равным 1000 Н. Так как вес должен быть пропорционален кубу линейного размера, для размаха крыльев мы получим такую формулу:

$$L = 0,25 \sqrt[3]{\frac{1000}{0,33}} \approx 3,6 \text{ м}.$$

Необходимая для зависания мощность будет равна

$$N = 0,8 \frac{10^4 \sqrt{10}}{3,6} = 7 \text{ кВт}.$$

Удельная мощность при этом

$$n = 7 \text{ Вт/Н}.$$

Таким образом, для зависания человека с помощью крыльев необходима мощность, которую способны развить десять лошадей. В связи с этим возникает вопрос о мощностях, необходимых для зависания с помощью несущего винта, и о различии в работе машущих крыльев и воздушного винта.

В главе «Гидродинамика животных» был описан движитель типа «машущее крыло». Именно

потому, что работа хвостового плавника дельфина близка к работе крыльев птиц, мы можем воспользоваться экспериментами на модели плавника дельфина.

Возвратно-поступательное движение крыла, согласно этим данным, создает в четыре раза больший упор, чем винт той же площади, вращающийся с той же частотой, что и крыло. Следовательно, крыло будет создавать такой же упор при частоте колебаний, в два раза меньшей, а это приведет к четырехкратному уменьшению потерь на трение о воздух.

Если для насекомых зависание на одном месте является наиболее типичной формой полета, то крупные птицы никогда этого не делают, да, по-видимому, и не способны к этому. Горизонтальное перемещение для них является обязательным.

При описании машущего полета обычно приводят несколько довольно сложных схем колебаний крыла, которые объясняют, за счет чего крыло может создавать положительную тягу как при движении крыла вниз, так и при движении вверх. Наиболее экономичным является почти планирующий или парящий полет, когда вес уравновешивается подъемной силой движущихся поступательно крыльев во встречном потоке, а слабые взмахи лишь поддерживают необходимую скорость. В этом случае планирование и создание тяги могут рассматриваться как два независимых процесса.

Обычное планирование сопровождается потерей высоты, потому что только при скольжении по наклонной линии сила тяжести может дать тянущую компоненту. Машущие движения крыльев могут обеспечить необходимую тягу, и в

этом случае планирование будет происходить по горизонтальной или даже по восходящей линии. Какую силу и какую работу должны выполнять крылья при этом? Для примера рассмотрим горизонтальный полет. При этом подъемная сила крыла, равная весу, не будет совершать никакой работы и, следовательно, не будет требовать дополнительной мощности. Взмахи крыльев должны создать горизонтальную тягу, равную силе любого сопротивления.

Для определения минимальной мощности, необходимой для горизонтального полета птиц, была выведена следующая формула:

$$N_{\min} = 0,236 P \sqrt{\frac{P}{L^2}} = 0,236 P \sqrt{\alpha L}.$$

Здесь, как и раньше, P — вес птицы (Н), L — размах крыльев (м), N — мощность (Вт).

Так же как и для случая зависания, из этой формулы можно сделать вывод о большом росте необходимой мощности с ростом размера птицы.

Что касается удельной мощности, то она также растет пропорционально величине $\sqrt{L}$:

$$\frac{N_{\min}}{P} = 0,236 \sqrt{\frac{P}{L^2}} = 0,236 \sqrt{\alpha L}.$$

Подсчитаем входящие сюда величины применительно к альбатросу, у которого $P = 120$ Н, $L = 4,2$ м. Тогда

$$\alpha = \frac{P}{L^3} = 1,62 \text{ Н/м}^3.$$

Мощность, необходимая для горизонтального полета, будет равна 740 Вт.

А теперь вычислим мощность летательного аппарата, подобного альбатросу, но весом 1200 Н (приблизительный вес аппарата вместе с человеком). Такой аппарат должен иметь размах крыльев

$$L = \sqrt{\frac{P}{\alpha}} = 9,1 \text{ м}.$$

Следовательно, $N_{\min} = 1080$ Вт. Это, конечно, больше, чем может развить человек. В этом случае без мотора обойтись нельзя.

Конструкторы мускулолетов, т. е. аппаратов, использующих силу мышц, идут по пути увеличения размаха крыльев. Если увеличить величину L до 30 метров, не меняя веса аппарата, то можно уложить в мощность, которую способен развить человек. Однако при этом обязательно возрастет и вес аппарата, что потребует дополнительного увеличения длины крыльев. Предел, на котором остановится этот процесс увеличения веса и размеров, зависит от материалов и конструкции крыльев. Однако даже если такой аппарат построить, то пользоваться им можно будет только в абсолютно тихую погоду. Мощности человека при столь больших крыльях не хватит, чтобы преодолеть самый слабый встречный ветер.

Теперь, когда мы пришли к столь неутешительному выводу о мускулолете, можно опять обратиться к планеру, который уже и сейчас летает без всяких усилий со стороны человека, хотя и требует специальных метеорологических условий. Значительно лучших результатов можно достичь, если использовать возможность динамического парения.

Если обратиться к примеру птиц, то можно предположить, что они своими органами чувств

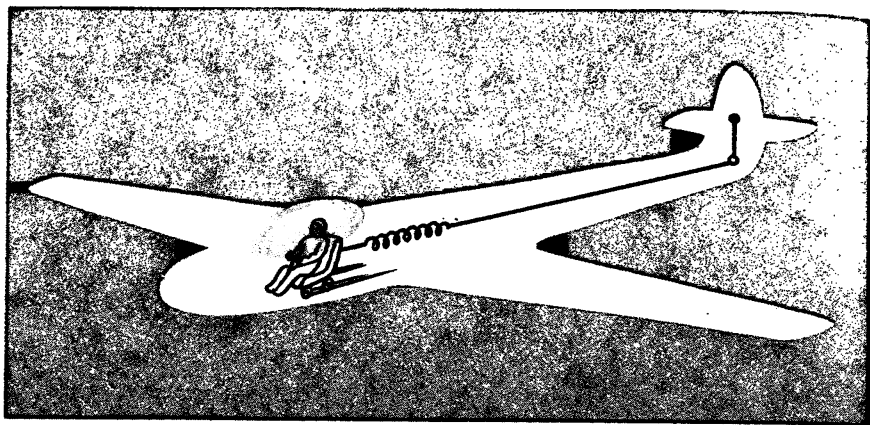


Рис. 51

воспринимают порывы ветра, центральной нервной системой анализируют эту информацию, т. е. определяют амплитуду порыва, нарастание его или убывание, и с помощью мышц меняют подходящим образом — крыло атаки крыла.

Но еще более естественно предположить, что порыв ветра сам отгибает крыло и меняет угол атаки. Чем сильнее нарастает скорость ветра, тем больше изгибается крыло. Ветер пошел на убыль — крыло разогнулось, угол атаки уменьшился. Легко понять, что такой простой закон управления можно обеспечить подходящей конструкцией и жесткостью крыла. Центральной нервной системе и системе управления остается только следить, когда нужно менять направление полета.

Применительно к планеру эту идею можно осуществить различными способами, один из которых мы сейчас рассмотрим. Нарастающий встречный порыв ветра вызывает замедление полета крыльев. При этом всякая масса, расположенная внутри планера, будет стремиться к перемещению вперед. Возникающую при этом

силу можно использовать для поворота закрылков планера. Наибольшей массой, помещенной в планере, обладает, конечно, планерист. В том случае, если его кресло будет укреплено на подвижных шарнирах (рис. 51), замедление полета, вызванное порывом ветра, будет сопровождаться отклонением кресла вперед. Это перемещение может быть использовано для поворота закрылка так, чтобы увеличить подъемную силу крыла. При ослаблении ветра пружины возвращают кресло и, следовательно, закрылки в прежнее положение. Планер с такими крыльями будет отнимать энергию у неравномерного встречного потока и тем самым сохранять или даже увеличивать высоту полета. В том случае, если воздушный поток мало меняется во времени, но сильно меняется по высоте, можно использовать пространственную неравномерность потока. Применяя руль высоты, можно заставить планер летать по синусоидальной траектории, то опускаясь вниз и попадая в слабый поток, то поднимаясь вверх и попадая в сильный встречный ветер. При этом планер будет подвер-

гаться действию переменного во времени встречного ветра, энергию которого он может использовать. Такого же эффекта можно достичь при движении по винтовой линии.

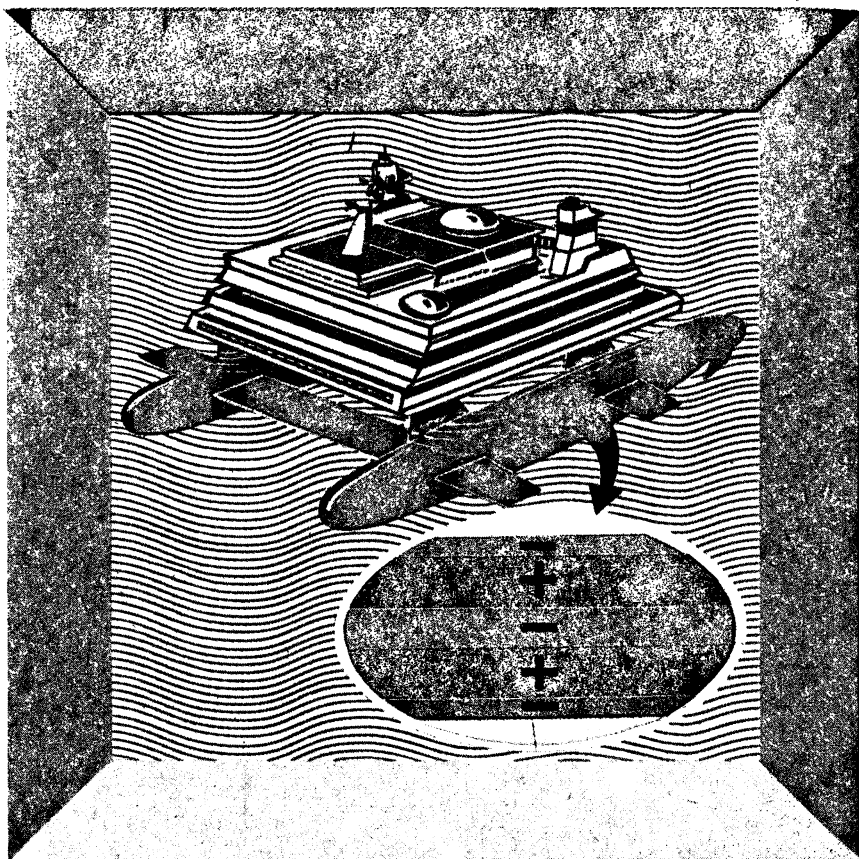
Теперь, когда мы ознакомились с некоторыми особенностями полета птиц, можно оценить перспективы полета человека на индивидуальном летательном аппарате. Прежде всего подчеркнем, что машущий режим не содержит в себе никакого секрета или чуда. Расчетные 7 кВт мощности, необходимые для зависания человека в воздухе, получены с учетом всех преимуществ машущего полета. Увеличенная удельная нагрузка (в четыре раза) позволяет уменьшить размеры крыльев, но мало уменьшает мощность, необходимую для зависания.

Для горизонтального полета человека требуется в десять раз меньшая мощность, но и это превосходит наши возможности. Выводы, сделанные выше, применимы к полету в неподвижной атмосфере. Но такая атмосфера — очень редкое явление. Если нет ветра, то, как правило, есть восходящие потоки воздуха. Если есть ветер, то обязательно будет и неоднородность воздуха: либо порыв ветра,

либо переменная скорость по высоте. А эти условия позволяют летать без всякого источника энергии.

Но ведь прежде чем использовать энергию ветра, нужно подниматься в воздух, нужно поддерживать полет в промежутках между порывами ветра. Во всех этих случаях понадобится хотя бы кратковременно мощность около 1 кВт. Кратковременность необходимой работы наводит на мысль использовать аккумулятор энергии. Таким аккумулятором может быть маховик. Современные маховики из кварцевых волокон допускают большое число оборотов и запасают 0,1 кВт/ч энергии на каждый килограмм массы. Пятикилограммовый маховик способен поддерживать горизонтальный полет человека в течение 30 мин. А этого, по-видимому, более чем достаточно и для ветра, и для поиска восходящих потоков воздуха или порывов ветра.

При парении в воздухе можно заряжать инерционный аккумулятор либо с помощью мускульной силы, либо используя избыточную энергию порыва ветра. В этом режиме полета мощности человеческих мышц окажется вполне достаточно для сохранения высоты.



МАГНИТНАЯ ГИДРОДИНАМИКА

МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ НАСОС

Все, что мы до сих пор узнали о гидродинамике, не имело связи с магнитными полями. И поэтому сочетание слов «магнитная гидродинамика» на первый взгляд может показаться удивительным. Однако вспомним основные законы электродинамики. Разве когда Фарадей или Максвелл формулировали свои законы, они исключали

ли возможность того, что проводник окажется жидким? Итак, если жидкость обладает электропроводностью, то гидродинамика может соприкасаться с электродинамикой. А поскольку на проводящую жидкость сильное действие оказывает магнитное поле, динамику такой жидкости и назвали магнитной.

Наблюдения за поведением жидкости в магнитном и электрическом полях проводятся так же давно, как и опыты с электрическим

током. Однако практический смысл они приобрели совсем недавно.

Рассмотрим принцип действия и конструкцию простейшего магнитного насоса, предназначенного для перекачки жидких металлов. Представим себе скрещенные магнито-, электро- и гидропровод (рис. 52). По вертикали от одного полюса к другому проходит поток магнитных линий. По горизонтали от одного электрода к другому течет электрический ток. Через эти скрещенные электрическое и магнитное поля течет проводящая жидкость, как указано стрелкой. Вырежем в потоке жидкости небольшой элемент, направленный вдоль электрического поля. Его можно рассматривать как обычный проводник. По правилу Ленца такой проводник, расположенный в поперечном магнитном поле, будет испытывать действие силы, направленной по стрелке. Так как всю жидкость можно разбить на такие элементарные проводники, то становится понятным, что жидкость будет проталкиваться через скрещенные поля. На этом принципе построены кондукционные электромагнитные насосы.

Подобно тому как динамомашина может выполнять роль источника постоянного тока и электродвигателя, кондукционный насос

можно превратить в источник постоянного электрического тока. Для этого достаточно только принудительно прогонять проводящую жидкость через магнитное поле.

В электротехнике известны коллекторные электродвигатели (кондукционные) и электродвигатели переменного тока, в которых отсутствует непосредственный электрический контакт с подвижными обмотками якоря. Естественно ожидать, что можно создать и индукционный насос.

Действительно, если возле потока жидкости поместить электромагнит, питаемый переменным током, то в жидкости будет наводиться электрический ток. Если электромагнит начнет двигаться, то за ним будет увлекаться и жидкость. Однако передвигать электромагнит нет нужды. Достаточно вдоль потока разместить несколько электромагнитов, а переменный электрический ток в них посылать с некоторым сдвигом фаз (рис. 53). В результате возникает магнитное поле, изменяющееся как во времени, так и вдоль потока. При этом гребни магнитного поля будут перемещаться (бегущая волна). Такое магнитное поле увлекает за собой и жидкость. На описанном принципе и построены индукционные электромагнитные насосы.

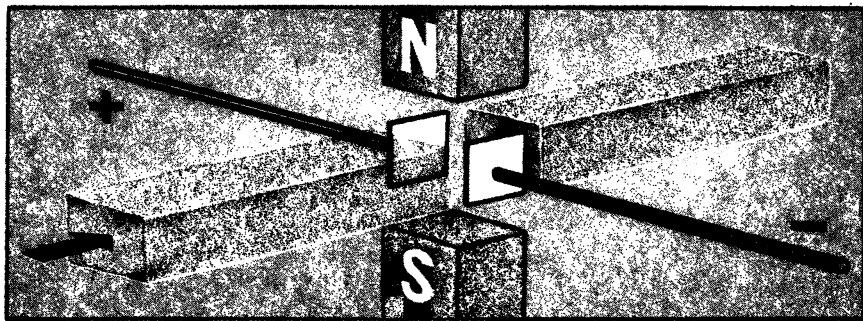


Рис. 52

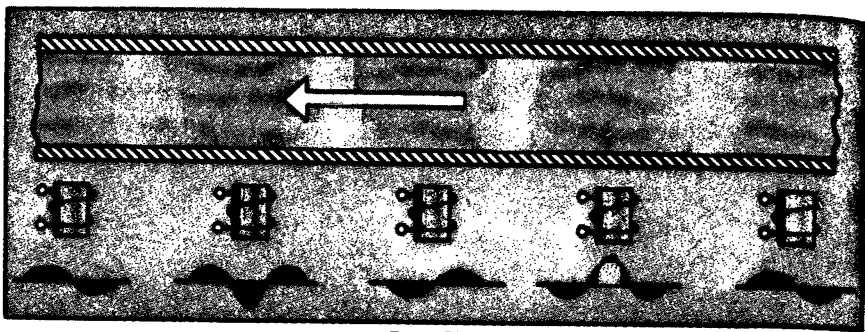


Рис. 53

До сих пор мы пользовались упрощенным объяснением, т. е. считали, что жидкий проводник ничем не отличается от твердого подвижного проводника. В таком изложении удалось обойтись электротехническими понятиями и избежать гидродинамических. На самом же деле при необходимости произвести точный расчет и конструирование насоса приходится решать уравнения магнитной гидродинамики, которые представляют собой совокупность уравнений обычной гидродинамики и электродинамики. Кроме того, на проводящую жидкость будут действовать как сила тяжести, так и силы электромагнитного происхождения, отсутствующие в обычной жидкости.

Область применения магнитной гидродинамики вообще и электромагнитных насосов в частности уже сейчас очень широка и постоянно растет. Для примера укажем на атомные реакторы. В некоторых конструкциях, особенно энергонапряженных реакторов охлаждение осуществляется не газом и водой, а жидкими металлами. Особенно удобными для этих целей являются щелочные металлы — калий и натрий, обладающие большой теплопроводностью.

Построить обычный механический насос для перекачки раска-

ленного жидкого металла, побывавшего в радиоактивной зоне, почти невозможно. У стального подшипника, находящегося в среде жидкого натрия, свариваются подвижные части с неподвижными. Этот и другие недостатки исключают возможность применения обычных насосов для перекачки жидких металлов. Магнитогидродинамический насос (МГД-насос) здесь оказывается особенно необходимым.

Или другой пример. Трудно себе представить какой-либо технологический процесс, в котором воду перевозили бы в ковшах из одного цеха в другой. А вот расплавленный чугун или сталь возят в ковшах. Создание мощных электромагнитных насосов позволит отказаться от разливки и перевозки расплавленных металлов. Это освободит завод от громоздких железнодорожных составов с чугуновозами, устранил горение жидкого металла в воздухе при его разливе, к большому огорчению операторов кинохроники, так любивших этот процесс за его зрелищность.

Одной из важных проблем магнитной гидродинамики является изучение морских течений в магнитном поле Земли. Действительно, морская вода способна

проводить электрический ток, Земля обеспечивает постоянное магнитное поле. Конечно, и плотность тока, и напряженность поля невелики. И силы, возникающие при этом, намного меньше сил, вызванных ветром. Но если учесть, что ветер действует на воду только на поверхности, с разной силой и в разных направлениях, а электромагнитные силы постоянны и действуют по всей глубине, то преимущество окажется на стороне последних.

МГД-ДВИЖИТЕЛЬ

Способность морской воды проводить электрический ток наводит на мысль создать МГД-насос для ее перекачки и применить этот насос в качестве судового движителя. Магнитное поле, создаваемое электромагнитами, пересекает зазор, заполненный морской водой (см. рис. 50). С помощью электродов подводится ток. В результате вода потечет слева направо, вызывая силу тяги. Проста идея, да трудно осуществима! Трудности возникают из-за малой проводимости морской воды. На электроды невозможно подать высокое напряжение, так как при этом на них начнет выделяться газообразный хлор и водород. А это приведет к еще большему сопротивлению жидкости. Вот и приходится довольствоваться малой плотностью тока в насосе.

Единственный способ увеличения силы тяги МГД-двигателя — это повышение напряженности магнитного поля. Но на этом пути есть свои трудности. Обычные медные обмотки и железные сердечники, даже если смириться с их громоздкостью, позволяют создать поле с индукцией не более

1—1,5 Тл. Для морской воды этого недостаточно.

Из этого положения может выручить только использование свойства сверхпроводимости металлов при низкой температуре. Сверхпроводящий проводник допускает огромную плотность тока и почти не требует энергии для его поддержания.

В литературе появилось сообщение об успешном испытании МГД-двигателя на пятиметровой модели судна. Громоздкость движителя, дополнительное гидродинамическое сопротивление, малая удельная мощность — все это, конечно, следует отнести к серьезным недостаткам. Однако исследователи считают, что бесшумность такого движителя — столь большое достоинство, что работы по созданию МГД-двигателя следует продолжать.

До сих пор мы считали обязательным, чтобы магнитное и электрическое поля подводились снаружи, а проводящая жидкость была заключена внутри насоса-двигателя. Вывернем все наизнанку. Пусть поля подводятся изнутри, а снаружи находится проводя-

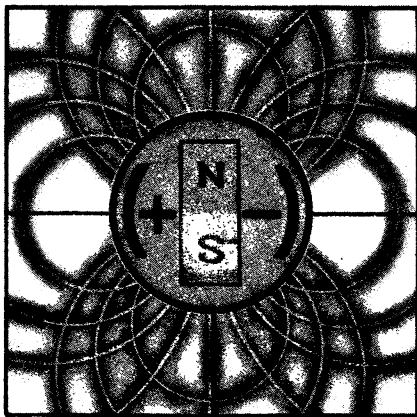


Рис. 54

щая жидкость, в данном случае морская вода (рис. 54). Это позволит, например, разместить источники полей в корпусе судна, а в качестве полюсов магнита и электродов использовать всю поверхность судна.

В отличие от вышеописанного такой движитель не вносит дополнительных поверхностей и, следовательно, не увеличивает сопротивления. Что касается геометрии полей, то она может быть различной. В простейшем случае это могут быть скрещенные поля электрического и магнитного диполей, которые помещены в центре.

Собственно, диполей в центре может и не быть: магнитное и электрическое поля создаются на поверхности судна. При такой геометрии поля проникают на большое расстояние от судна и вызывают движение жидкости перпендикулярно осям обоих диполей.

Возможен более сложный случай, когда полюса магнитов и электроды чередуются, как полоски на арбузе. В этом случае магнитное и электрическое поле закорачиваются вблизи поверхности судна, а электродинамическая сила, ими создаваемая, будет направлена по касательной к поверхности судна, с равнодействующей, направленной от носа к корме.

Теоретические расчеты показывают, что для сферического корпуса диаметром 2 м при индукции магнитного поля 1 Тл движитель обеспечит скорость 1 м/с с коэффициентом полезного действия, равным 6%. Увеличение напряженности магнитного поля приведет к повышению коэффициента полезного действия движителя.

БЕСТИГЕЛЬНАЯ ПЛАВКА

Можно привести еще один пример, иллюстрирующий возможности применения магнитной гидродинамики. Известно, что свойства полупроводниковых материалов полностью определяются их чистотой (количеством примесей). Причем допустимая концентрация примесей исчисляется дробью с многими нулями после запятой. Один из радикальных способов получения материалов такой чистоты — это бестигельная плавка в каком-либо инертном газе или вакууме. Понятно, что без тигля можно обойтись только в том случае, если мы будем удерживать жидкий металл с помощью магнитного поля.

Способ удержать твердый шарик в подвешенном состоянии очень прост. На рис. 55 указана схема магнитного поля, обеспечивающая такую подвеску. Мощный соленоид, ось которого направлена вертикально, создает вокруг себя сильное магнитное поле. В верхней части силовые линии поля расходятся, образуя воронку. Вот в эту воронку и опускается шарик

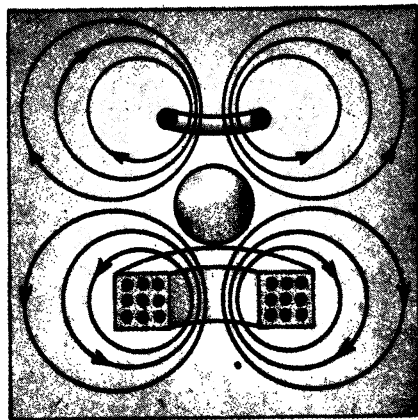


Рис. 55

из хорошо проводящего металла. Чтобы магнитное поле не просочилось внутрь шарика, соленоид питают переменным током. Для алюминиевого шарика достаточно, чтобы частота этого тока была равна 200 Гц. Сверху, для устойчивости равновесия, иногда помещают соленоид меньшей мощности противоположной полярности.

Так обстоит дело с твердым шариком. Но даже из приведенного рисунка видно, что у магнитного поля имеется на оси соленоида «дырка», т. е. пятно, где силовые линии ориентированы перпендикулярно поверхности шарика. Если шарик будет из жидкого металла, то он вытечет через эту дырку.

Даже магнитные поля более удачной конфигурации обладают тем недостатком, что они не могут удержать жидкость. Все успешные попытки бестигельной плавки ограничивались малыми дозами (12—15 г), при которых силы поверхностного натяжения не позволяли капле потерять шаровидную форму.

Дело в том, что магнитное поле не удерживает возмущений жидкой поверхности, ориентированных вдоль силовых линий поля. Равновесие границы раздела обладает так называемой желобковой неустойчивостью.

Выход из этого положения можно найти в создании магнитного поля переменного направления.

А еще лучше — поля круговой поляризации. Так как жидкий металл обладает большой инерцией, возникающие желобки, не успевая развиться, окажутся в поперечном к полю положении и будут подавлены.

БЕСТИГЕЛЬНАЯ ЗОННАЯ ПЛАВКА

Для некоторых технологических процессов в металлургии достаточно изолировать от тигля только часть жидкого металла, а другой частью жидкий металл может касаться своей твердой фазы. В этом случае может оказаться полезным кондукционный способ.

Сущность его легко понять из рис. 56. Стержень из металла, подлежащий зонному переплаву, укладывается в горизонтальном положении между двумя охлаждаемыми электродами. Также в горизонтальном направлении, но перпендикулярно стержню накладывается постоянное магнитное поле. Если теперь через стержень пропустить постоянный ток подходящей силы, то в нем возникнет вертикальная объемная сила, которая уравновесит силу тяжести. В этом уравновешенном состоянии можно проводить высокочастотный переплав стержня. Если стержень передвигается слева направо, то жидкая фаза будет поступать в охлаждаемый правый электрод и кристаллизироваться там, а на место ее в

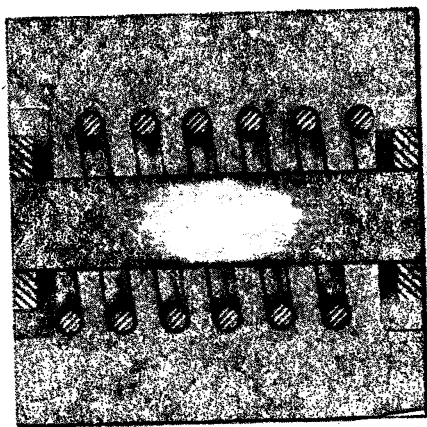


Рис. 56

зону нагрева будут поступать новые части стержня.

И в этом случае главное — обеспечить условия устойчивости равновесия границы раздела. Исследования показали, что высокочастотное продольное магнитное поле соленоида удовлетворяет этим требованиям.

Приведем здесь некоторые формулы, которые позволяют рассчитать параметры системы. Начнем с магнитной системы, обеспечивающей равновесие.

Как известно, электрический ток плотностью $j/\text{А/м}^2$, протекая поперек магнитного поля с индукцией B Тл, испытывает действие силы jB Н/м³, направленной перпендикулярно току и полю. Выберем эту силу так, чтобы она уравновешивала силу тяжести, равную произведению плотности материала ρ на ускорение силы тяжести g .

Итак, должно выполняться равенство

$$q = jB.$$

Рассмотрим, какую плотность тока нужно обеспечить в металле, чтобы уравновесить силу тяжести в магнитном поле индукции $B = 0,1$ Тл = 1000 Гс. Плотность металла возьмем равной $\rho = 7800$ кг/м³. В результате вычислений получим $j = 0,765 \cdot 10^6$ А/м² = 0,765 А/мм².

Таким образом, мы убедились в том, что при умеренной легко достижимой индукции магнитного поля потребуются сравнительно небольшая плотность тока, чтобы уравновесить силу тяжести в каждой точке объема.

В случае однородной электрической проводимости металла или его сплава кондукционная магнитная подвеска обеспечивает условия невесомости, которые сейчас получают только в космосе.

Распределение температуры по длине стержня определится следующим уравнением:

$$T = T_0 + \frac{2q}{\lambda d} \left[\left(\frac{L}{2} \right)^2 - x^2 \right].$$

Здесь T_0 — температура плавления металла, достигаемая в точках фазового перехода (для тонких стержней эти точки будут совпадать с краями охлаждаемых электродов); L и d — длина и диаметр жидкой зоны стержня; q — тепловой поток, подводимый к единице поверхности стержня; λ — теплопроводность материала.

Величина теплового потока подбирается из условия, чтобы максимальная температура, достигаемая в средней части стержней ($x = 0$), равнялась температуре перегрева T_w , при которой будет проходить вакуумная очистка металла.

Таким образом,

$$T_w = T_0 + \frac{2q}{\lambda d}.$$

Теперь мы можем написать

$$T = T_0 - (T_w - T_0) \left[1 - \left(\frac{2x}{L} \right)^2 \right].$$

Тепловой поток на оба электрода определится формулой

$$Q = 2\lambda \frac{\pi d^2}{4} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{2}{L} \pi d^2 \lambda (T_w - T_0).$$

Теперь представим, что мы вдвигаем стержень через левый электрод и вытягиваем его через правый. Скорость такого движения обозначим через U . Если мы хотим сохранить максимальную температуру T_w , то мы обязаны увеличить подвод тепла на величину, необходимую для плавления и подогрева поступающего металла. Обозначим

теплоемкость жидкой фазы металла c , скрытую теплоту плавления — μ . Потребность в дополнительном тепле на единицу времени определится суммой

$$Q_1 = U \frac{\pi d^2}{4} q [\mu + (T_n - T_0)c],$$

причем количество Q_1 является обязательным количеством тепла, необходимым по технологии.

Коэффициент использования энергии можно определить как отношение

$$\eta = \frac{Q_1}{Q_1 + Q} = \left[1 + \frac{8\lambda(T_n - T_0)}{ULq[\mu + (T_n - T_0)c]} \right]^{-1}.$$

Допустимая скорость переплава равняется

$$U = \frac{4Lq - 8d\lambda(T_n - T_0)}{qd[\mu + (T_n - T_0)c]}.$$

Отсюда видно, чем больше L , тем больше коэффициент использования энергии и тем больше производительность процесса при той же плотности энергии q .

Рассмотрим конкретный пример, который даст представление о входящих сюда величинах. Переменное магнитное поле частотой 17 кГц и напряженностью $H = 4,6 \cdot 10^4$ А/м обеспечит в стальном стержне выделение тепла

$$q = 4 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2.$$

Остальные входящие в формулы величины имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} \lambda &= 30 \text{ Вт/(м} \cdot \text{град)}, \\ c &= 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{град)}, \\ \mu &= 25 \cdot 10^4 \text{ Дж/кг}. \end{aligned}$$

Длину жидкой зоны выберем такой: $L = 16d$. Тогда для скорости переп-

лава получим

$$U = 10 \text{ мм/с} = 36 \text{ м/ч}.$$

В том случае, если мы примем $L = d$, то та же формула нам даст:

$$U = 0,6 \text{ мм/с} = 2,25 \text{ м/ч}.$$

Как мы уже отмечали, в проблеме бестигельной плавки главным является условие устойчивости. Если устойчивость обеспечивается только силами поверхностного натяжения, то длина жидкой зоны ограничивается величиной

$$L \leq \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\alpha}{\rho g}} \left[1 - \frac{1}{(\pi d/L^2)} \right]^{1/4},$$

где α — коэффициент поверхностного натяжения.

В частности, для оловянного стержня диаметром $d = 8$ мм по этой формуле $L \leq 13$ мм.

Высокочастотное продольное магнитное поле, которое может служить и источником нагрева, обеспечивает устойчивость более длинной жидкой зоны. Для этого случая получается такое условие:

$$L \leq 2\pi H \sqrt{\frac{R\mu_0}{2\rho g}}.$$

Здесь H — напряженность поля.

При радиусе стержня $R = 5$ мм длина L может достигать 35 см, в то время как поверхностное натяжение удерживает стержень длиной 13 мм независимо от радиуса.

Большая длина, как мы уже отмечали, обеспечивает большую скорость переплавок, высокий коэффициент использования энергии.

МГД-ГЕНЕРАТОР

Сейчас мы познакомимся еще с одной важной и интересной областью применения магнитной гидродинамики. Речь пойдет о так

называемом магнитогидродинамическом генераторе электрического тока (МГД-генераторе).

Как в настоящее время получают электрический ток, вы, наверное, знаете. Шахтеры под землей добывают уголь — солнечную энергию, законсервированную в окаменелых растениях. Уголь везут по железной дороге до ближайшей тепловой электрической станции. Там его дробят и подают в топку парового котла. Котел современной электростанции — это огромное сооружение размером с пятиэтажный дом. Много металла, сил, средств нужно, чтобы его построить. Да и эксплуатация его обходится недешево. И вот из этого котла пар поступает в турбину, которая вращает ротор электрического генератора. Таков современный способ получения электрической энергии, без которой мы не можем себе представить ни современный быт, ни современное производство. Атомное топливо устраняет необходимость в угле, но огромный паровой котел как был, так и остается.

Описанный способ получения электрической энергии оказывается и громоздким, и дорогим. Ученые

поставили перед собой задачу создать такой генератор, в котором тепловая энергия непосредственно превращается в электрическую (безмашинный способ получения электрической энергии).

Из всех возможных вариантов мы остановимся на магнитогидродинамическом. Рассказывая об электромагнитном насосе, мы уже отметили его обратимость. Если проводящую жидкость заставить протекать через магнитное поле, то в жидкости в поперечном направлении появится разность напряжений. Если в эту жидкость опустить электроды, то можно снимать электрический ток.

Устройство МГД-генератора на обычном химическом топливе схематически показано на рис. 57. Работает генератор следующим образом. Химическое топливо, сгорая, создает большое количество горячего газа. В расширяющемся сопле тепловая энергия превращается в кинетическую энергию газа, движущегося со скоростью несколько тысяч километров в час.

Чтобы можно было превратить эту энергию в электрическую, газ должен обладать достаточной электропроводностью. Электропроводность газа зависит от его температуры. Для продуктов сгорания химического топлива требуется температура около 2750°C . Требуемую температуру можно понизить до 2200°C с помощью добавки в газ малых примесей щелочных металлов. Итак, 2200°C — самая низкая температура, при которой еще может работать МГД-генератор. Теперь становится понятным, что основной трудностью при создании такого генератора является создание термостойкой камеры сгорания и каналов МГД-генератора. Однако успехи ракетной техники, в ко-

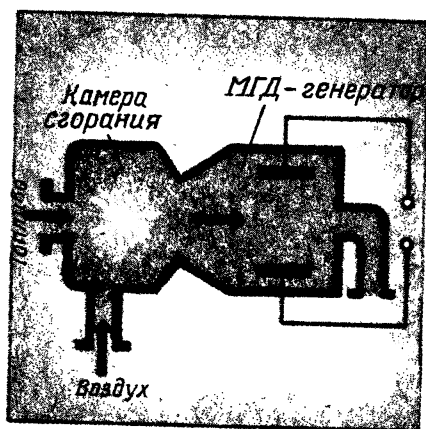


Рис. 57

торой пришлось столкнуться примерно с такими же проблемами, позволяют надеяться на решение этой задачи. Преимущества такого способа получения электроэнергии очевидны. Отсутствует огромный паровой котел, нет ни турбин, ни машинного электрогенератора. Высокая начальная температура газа обеспечивает высокий тепловой КПД, достигающий до 60 %.

АТОМНЫЕ МГД-ГЕНЕРАТОРЫ

Особенно перспективно применение МГД-генераторов в сочетании с атомными реакторами. Представим себе принцип работы такой установки (рис. 58). Аэрозоль гелия и делящегося изотопа урана под большим давлением подается в камеру реактора. Размер камеры и концентрация урана выбраны так, что в камере образуется критическая масса. Процесс деления приводит к повышению температуры газовой смеси до 5500°C . Горячий газ выходит через отверстие в расширяющемся сопле (благодаря расширению масса перестает быть критической, и процесса деления здесь не будет).

Горячий газ, хорошо проводящий при такой температуре, проходит через сильное магнитное поле, направленное перпендикулярно

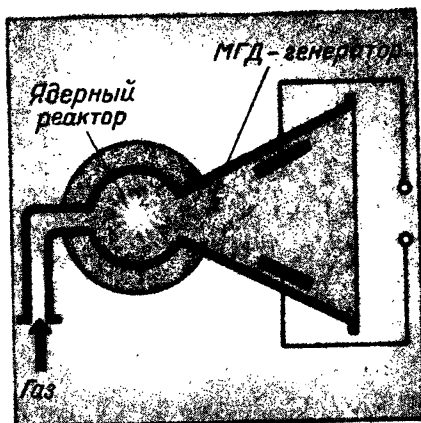


Рис. 58

плоскости чертежа (на схеме не показано), и отдает свою энергию в электрическую цепь. Затем газ вместе с делящимся веществом сжимается компрессором и вновь подается в камеру реактора.

Чтобы представить себе преимущества МГД-генератора по сравнению с машинным, отметим, что от установки, не превышающей по размерам обычного турбогенератора на 100 тыс. кВт (без парового котла), можно получить мощность 10 млн. кВт. В этом случае можно будет считать, что атомная энергия нашла свое достойное применение!

Существует и другая схема прямого превращения атомной энергии в электрическую (рис. 59).

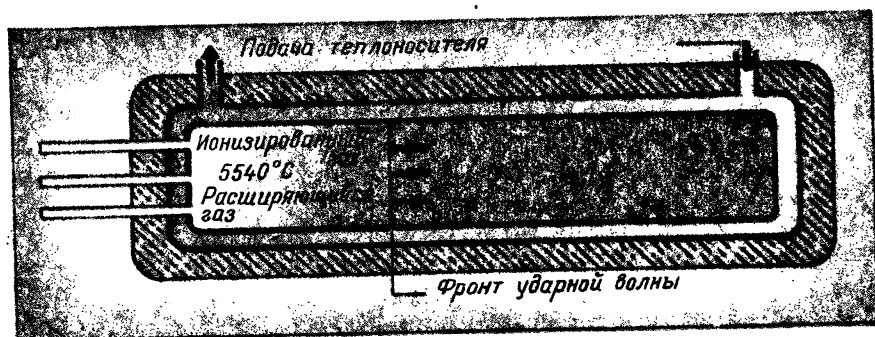


Рис. 59

Длинный цилиндр из тугоплавкого материала наполнен смесью гелия и делящегося вещества. Для повышения проводимости в газе могут быть добавки солей щелочных металлов. Когда газ равномерно распределен по всей цилиндрической камере, делящееся вещество не образует критической массы и процесс протекает медленно. Теперь представим себе, что в начальный момент мы соберем большую часть газа в каком-либо конце трубы, например слева. В этой части масса достигнет критического значения, начнется интенсивная реакция распада, что приведет к сильному повышению температуры газа. При этом газ будет расширяться, образуя перед собой фронт ударной волны. Когда фронт достигнет противоположной стенки цилиндра, делящееся вещество окажется расщепленным по всему объему и атомная реакция прекратится. Но газ по инерции будет двигаться в прежнем направлении, что приведет к созданию критической массы теперь уже на другом конце трубы. Затем процесс будет повторяться.

Итак, в трубе будет двигаться (возвратно-поступательно) проводящий газ. Очевидно, что если этот газ поместить в сильное магнитное поле, то его можно будет использовать для генерации электричества. Периодический характер движения позволяет отказаться от электродов, помещенных в горячий газ, а воспользоваться индуктивной связью. И если в предыдущем варианте полностью отказаться от машины не удастся, так как для сжатия газа используется обычный компрессор, то здесь компрессор отсутствует. Нет и электродов, которые подвергаются действию высокой температуры. А кроме того, сразу получается переменный ток,

удобный для трансформации и передачи на большие расстояния.

Основной трудностью при создании высокотемпературных МГД-генераторов является создание жаропрочных материалов. Поэтому может представлять интерес низкотемпературная машинная схема превращения энергии распада в электроэнергию. Аэрозоль гелия и урана сжимается до такой плотности и выдерживается столько времени, чтобы она успела нагреться только до 1500 °С. Затем газ поступает на лопатки обычной газовой турбины, которая вращает обычный электрический генератор.

После турбины газ поступает в компрессор, соосный с турбиной, сжимается до критического состояния, нагревается и вновь подается в турбину. При такой схеме полностью снимается вопрос об уникальных жаропрочных материалах.

ДЖИНН В МАГНИТНОЙ БУТЫЛКЕ

Читатели хорошо знают одного из героев арабских сказок — джинна, который три тысячи лет просидел в бутылке. Не в магнитной, а в обыкновенной стеклянной. У всех, конечно, вызывает удивление, что могущественный волшебник, будучи каким-то чудесным образом заключен в стеклянную бутылку, оказывается смиренным слугой, готовым выполнить любое приказание своего господина. Мы не будем разрушать иллюзий, навеянных волшебными сказками. Наш рассказ послужит их утверждению.

ТЕРМОЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ

Речь пойдет о ядерной энергии и ее укрощении. Как известно, ядерная энергия выделяется в ре-

зультате атомного распада, при котором элементы с высоким атомным весом превращаются в элементы с меньшим атомным весом. Энергия, выделяемая при этом, в несколько тысяч раз больше той, которая выделяется при сгорании такого же количества лучшего топлива.

Ученым известна другая реакция, которая сопровождается выделением еще большего количества энергии. Это реакция синтеза, или термоядерная реакция, когда из каждых двух молекул водорода образуется одна молекула гелия. По злой иронии судьбы большая часть человечества связывает этот процесс с взрывом водородной бомбы, хотя его можно связать и с основным источником света и тепла — Солнцем.

В недрах Солнца при большом давлении и температуре в несколько миллионов градусов непрерывно протекает реакция синтеза. Выделяемая при этом энергия и не позволяет Солнцу остыть. Ученые поставили перед собой задачу — создать управляемую термоядерную реакцию, которая могла бы стать для человечества неисчерпаемым источником энергии. Как показывают расчеты, если нагреть водород, а точнее, его изотоп — дейтерий, до температуры 200—300 млн. °C, то возникнут условия, при которых начнется термоядерная реакция.

Двести миллионов градусов! Чтобы представить себе, что это значит, вспомним, что на поверхности Солнца всего 6000 °C, а в его недрах — несколько миллионов. Однако ученых не пугают такие высокие температуры. Но чтобы достичь их, нужно решить еще некоторые проблемы. И первая из них — это удерживать газ, нагретый до звездной температуры.

Очевидно, что сосуд из какого-либо материала для этой цели не может пригодиться. Проблему можно решить благодаря тому, что при высоких температурах молекулы газа теряют электроны, т. е. ионизируются, и газ в этих условиях становится хорошим проводником. А на проводящий газ можно воздействовать магнитным полем, которое не боится никаких температур. Магнитное поле должно так воздействовать на газ, чтобы оторвать его от стенок сосуда, образовав слой вакуума между стенками сосуда и горячей плазмой.

ПИНЧ-ЭФФЕКТ

Чтобы лучше представить, как это можно осуществить, рассмотрим следующий эксперимент. В замкнутом цилиндрическом сосуде находится водород. К концам сосуда через электроды подводится напряжение. Если это напряжение достаточно велико, то в зазоре между электродами появляется разряд. Чтобы уменьшить необходимое для разряда напряжение и увеличить первоначальную проводимость, газ можно предварительно ионизировать, например, рентгеновскими лучами. После того как через зазор проскочит искра, начинается лавинообразный процесс ионизации газа. Благодаря этому газ почти мгновенно превратится в хороший проводник, через который потечет ток большой силы.

Осевой ток наведет магнитное поле с кольцевыми силовыми линиями. Из физики известно, что быстро меняющийся ток в хорошем проводнике течет по его поверхности. И при газовом разряде почти весь ток будет сосредоточен в поверхностном слое, образующем полый цилиндр. Если рассмотреть си-

лы взаимодействия электрического тока и магнитного поля, вызванного этим током, то мы обнаружим силу, направленную к оси цилиндра. Эта сила приложена к движущимся электронам, которые и устремляются к центру. Но между электронами и ионами существует сильное электростатическое взаимодействие, заставляющее ионы следовать за электронами.

Если магнитное поле имеет напряженность H , то сила магнитного

давления будет равняться $\frac{1}{8\pi} \mu H^2$,

где μ — магнитная проницаемость. Эту силу называют магнитным давлением. В газе, особенно нагретом, имеется газокинетическое давление $p = 2nkT$. Здесь n — количество молекул в единице объема, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура газа в кельвинах.

Очевидно, что газ будет отрываться от стенки в том случае, если магнитное давление будет превосходить газокинетическое. При некотором радиусе плазменного шнура может наступить равновесие между этими силами. В пространстве между стенками сосуда и плазменным шнуром образуется вакуум, который и предохранит стенки от действия высоких температур, а плазму — от загрязнения молекулами, оторвавшимися от стенок.

Если электрический ток настолько велик, что магнитное давление значительно превосходит газокинетическое, то магнитное поле можно использовать не только для отрыва и удержания плазмы, но и для ее нагрева. В существующих экспериментальных установках через зазор между электродами пропускают токи, исчисляемые десятками и сотнями тысяч ампер. При этом частицы плазмы начина-

ют двигаться к центру со скоростью 100 тыс. км/с. Очевидно, что столкновение движущихся навстречу друг другу частиц плазмы приводит к сильному повышению ее температуры.

Описанный процесс получил название пинч-эффекта. С этим эффектом было связано много надежд получить достаточно плотную высокотемпературную плазму, в которой сможет протекать реакция термоядерного синтеза.

УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА

Магнитное давление стягивает плазму со всего сосуда в узкий шнур, в котором газокинетическое давление благодаря повышению плотности и температуры становится равным магнитному. Наступает равновесие. Но это равновесие оказывается чрезвычайно неустойчивым. То самое магнитное поле, которое создает плазменный жгут, вызывает его разрушение.

Чтобы понять, что происходит с тонким плазменным шнуром, сжатым кольцевым магнитным полем, наблюдайте за поведением тонкой струи воды, вытекающей из крана. Аналогия здесь в том, что действие сил поверхностного натяжения, которое сжимает струю, можно сравнить с действием сил магнитного давления. Струйка воды в своей нижней части, когда она становится достаточно тонкой, начинает терять свою цилиндрическую форму, на ней образуются волны, а затем она дробится на отдельные капли. Точно такой же процесс происходит на поверхности плазменного шнура. Отличие состоит только в том, что процесс разрушения протекает в миллионы раз быстрее, так как сила магнит-

ного давления во много раз больше сил поверхностного натяжения, а инерция газа, замедляющая процесс, значительно меньше инерции воды.

Еще более опасными являются возмущения, получившие название перетяжек (рис. 60). Магнитная напряженность, вызванная электрическим током, текущим по цилиндрическому проводнику, определяется формулой

$$H=2I/r,$$

где I — сила тока, R — расстояние от оси шнура. Очевидно, что сила тока будет постоянна в любом сечении шнура. Но в том его сечении, в котором появилось возмущение типа перетяжки, благодаря уменьшению r увеличивается магнитное давление, которое приводит к дальнейшему углублению перетяжки. Такой процесс заканчивается полным разрывом плазменного шнура, после чего прекращается ток и исчезает магнитное поле, удерживающее плазму в сжатом состоянии. Плазма под действием большого газового давления мгновенно расширяется и касается стенок сосуда.

В механике известен такой принцип: всякую неустойчивую механическую систему можно сделать устойчивой путем добавления сис-

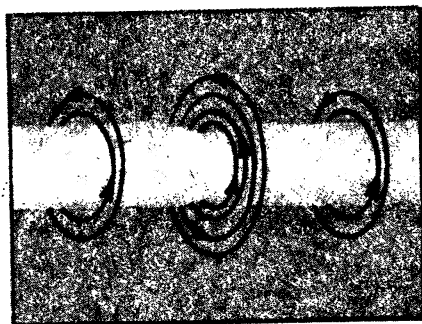


Рис. 60

темы автоматического управления. Применительно к плазме система автоматического управления должна повышать магнитное давление в том месте и в тот момент, где и когда плазма пытается прорваться через магнитный барьер. Так как от системы управления в этом случае требуется чрезвычайно высокое быстродействие и большая пространственная разрешающая способность, здесь оказывается непригодной обычная схема управления, состоящая из отдельных органов измерения, исполнительных органов и системы усиления.

В упрощенном виде систему автоматической стабилизации плазмы можно описать так. Плазму окружают витками медного провода различной намотки. Все витки питаются током высокой частоты. Витки, расположенные параллельно оси плазменного шнура, чувствуют приближение шнура при его параллельном смещении, так как это меняет его индуктивное сопротивление. Другие витки в этом же смысле чувствуют смещение и деформации шнура по другим направлениям, в частности по винтовым. Это свойство превращает витки в органы измерения системы управления. В цепь витков включены специальные усилители, реализующие отрицательное реактивное сопротивление. Благодаря этому каждая система витков является и исполнительным органом. Если к какому-то витку приближается плазменный шнур, в этом витке усиливается ток. Это приводит к увеличению магнитного давления и к восстановлению первоначального положения шнура.

Первые же опыты с применением средств автоматического управления позволили увеличить время существования плазмы в 10 раз.

ПЕРСПЕКТИВЫ ГИДРОМЕХАНИКИ

«Гидромеханика, как наука, давно миновала пору своего расцвета» — это довольно распространенное мнение как среди специалистов, так и вне этой среды.

Такая точка зрения неспециалистов объясняется той простой причиной, что они не знают гидромеханики. Специалисты в области гидромеханики придерживаются такой же точки зрения потому, что они очень хорошо знают свою науку. Все физические законы и эффекты открыты нашими предшественниками. На долю современников остались только рутинные расчеты. Для этого достаточно обратиться к справочникам, а в более сложных случаях к вычислительным машинам или экспериментальным установкам. И никому из современников не испытать радости открытия нового закона или неизвестного физического эффекта. И никто теперь не выскочит из ванны с криком «Эврика!».

Читатель, по-видимому, понял, что предложенная ему книга всеми своими страницами протестует против такого приговора. Гидромеханика, как и сама природа, из

которой черпаются задачи, неиссякаема.

Попробуем вместе с читателем заглянуть в недалекое будущее гидромеханики, используя для своих прогнозов описанные в книге примеры. И начнем с аппаратов на воздушной подушке. Сам термин «воздушная подушка» не совсем правильно отражает работу существующих транспортных средств. Обычная надувная подушка способна держать на себе тонны груза на каждом квадратном метре своей площади и не требует для этого какой-либо мощности. Нужно только решить вопрос о двигателе и о движении. Очевидно, что используемый в настоящее время воздушный винт для этой цели не годится. Но природа нам дает прекрасный пример решения этой проблемы. Посмотрите, как гусеница передвигается по ветке дерева. Легко себе представить, что с помощью секционированных воздушных камер, подключенных к компрессору, вполне можно реализовать механизм движения, присущий живой гусенице. Как и у гусеницы, поверхность можно покрыть щеткой из капроновых

нитей, которые надежно предохранят камеры от истирания. Такой аппарат, назовем его пневмокамерным, будет обладать большой экономичностью, хорошо преодолевать подъемы и двигаться вдоль склонов. Для него, очевидно, одинаково проходимы твердое бездорожье, болото и водные пространства.

Скорость у этого транспортного средства, конечно, не может быть большой. Но ведь основная масса грузов не требует большой скорости доставки, и для нее главным является дешевизна перевозки. А пассажиров, почту и свежие фрукты можно перевезти и самолетом, и вертолетом.

Каждый человек, глядя на бушующее море, мечтал об укрощении и использовании неисчерпаемой энергии моря. Правда, ветровые волны не обладают регулярностью. Зимние штормы могут смениться длительным штилем. А вот приливные волны обладают завидной регулярностью. Под действием лунного притяжения водная поверхность Мирового океана дважды в сутки меняет свой уровень. В разных точках береговой линии в зависимости от ее формы колебания уровня различны, но могут достигать 10 и 15 м. Вот в таких местах в последнее время и начали строить приливные гидроэлектростанции. Так как перепад высот мал, мощность достигается только за счет большого числа гидротурбин малой мощности, расположенных в теле длинной плотины.

Стоимость гидроагрегатов-турбин и электрических генераторов составляет большую часть стоимости приливной электростанции.

В главе «Магнитная гидродинамика» мы говорили о магнитогид-

родинамическом насосе, который может качать морскую воду и обеспечивать тягу морским судам. Легко понять, что движение через скрещенные электрические и магнитные поля морской воды позволяет снимать электрическую мощность без турбины и генератора тока. Так как электропроводимость морской воды мала (5 См), то для работы МГД-генератора требуется сильное магнитное поле (2—3 Тл). Однако открытие в настоящее время высокотемпературной сверхпроводимости делает вполне реальным создание таких полей.

Особенностью приливной электростанции является ее периодическое действие, при котором ее мощность дважды в сутки падает до нуля. По-видимому, не много найдется потребителей, которые согласятся с таким режимом потребления энергии. Действующие в настоящее время приливные электростанции работают в сочетании с речными гидроэлектростанциями, которые и выравнивают кривую подачи энергии. Однако есть потребители энергии, для которых этот режим вполне допустим. Это производство водорода из воды, путем ее электролиза. Дешевая энергия приливной электростанции позволит получить столь же дешевый водород, который с успехом может быть использован и в химическом производстве, и в авиационном, и наземном транспорте. Такой источник энергии, во-первых, является восполнимым и, во-вторых, экологически чистым, так как продуктом горения водорода является чистая вода.

Применение скрещенных электромагнитных полей для создания тяги у морских судов (МГД-двигатели) это их самое грубое ис-

пользование. Математическая физика позволяет решить задачу о таком распределении этих полей вдоль борта судна, чтобы уменьшить на порядок волнообразование и трение, а следовательно, во столько же раз уменьшить и потребную для движения тягу. Неискушенный читатель может поверить автору, а вот если эти строки будет читать специалист-корабел, то он наверняка поставит под сомнение даже принципиальную возможность такой постановки задачи.

Не прибегая к строгим математическим методам, дадим качественное описание работы электромагнитных объемных сил, которые обеспечивают безволновое движение и движение с малым трением.

Волны на поверхности возникают из-за того, что движущееся тело вытесняет воду вбок и соответственно вверх, выше невозмущенного уровня воды. Если объемные силы будут ускорять течение вдоль борта, то можно полностью скомпенсировать эффект вытеснения и тем самым предотвратить образование волн.

Несколько иной механизм требуется для уменьшения сопротивления трения.

Представьте себе, что в носовой части судна находится электромагнитная система, которая увлекает за собой жидкость.

В этом случае корпус судна окажется в спутном следе, в котором гидродинамическое сопротивление окажется малым. Понятно, что эта система сама будет испытывать сопротивление. Энергию торможения жидкости в магнитном поле можно использовать для получения электрической мощности, которую в свою очередь можно утилизировать уже в кормовой час-

ти судна для ускорения жидкости. С точностью до электрического КПД сила тяги МГД-двигателя уравнивает силу сопротивления МГД-генератора.

Изучение смерча-торнадо привело нас к открытию нового физического эффекта — упругости дискретно завихренной жидкости. Это открытие позволяет конструкторам использовать вихри как специфический конструкционный материал, изделия из которого могут появляться или исчезать по воле человека. Такие вихри могут использоваться в качестве стабилизаторов, рулей или удлинителей крыльев. Последний пример, по-видимому, в большой степени используется насекомыми. Подробное исследование такого летуна, каким является майский жук, показывает, что площадь, ометаемая его крыльями и частота их колебания достаточна для создания тяги, равной четверти его веса. Откуда берутся оставшиеся три четверти? Если же учесть, что с его крыльев сходит вихрь, который удлиняет крыло в два раза с одного сантиметра до двух, а следовательно, ометаемая площадь возрастает в четыре раза, то становится понятным секрет полета майского жука.

Рассмотрим еще один пример, в котором применение вихрей как элементов конструкции может дать большой эффект.

Речь пойдет об экранолете. Крыло малого удлинения, применяемое в экранолетах, создает большую подъемную силу. Одновременно оно создает большое индуктивное сопротивление. В том случае, если крыло имеет вид дуги, концы которой касаются экрана, индуктивное сопротивление обращается в нуль. Легко понять, что

жесткое крыло не может касаться экрана, а вот концы, образованные вихрями, могут замыкаться и на воду, и на землю.

Взаимодействие магнитного поля с электропроводящей жидкостью может найти применение не только под водой, но и в воздухе.

Читателю хорошо известно, как работает реактивный двигатель. Через воздухозаборник воздух поступает в компрессор, где он сжимается и поступает в камеру сгорания. Продукты сгорания идут в выхлопное сопло для образования реактивной струи, которая и создает тягу.

Перед выхлопом часть энергии струи с помощью газовой турбины используется для вращения компрессора. Эта энергия потом вновь возвращается, так как увеличивает энергию выхлопной струи.

Более того, чем больше энергия циркулирует между газовой турбиной и компрессором, тем выше тепловой и, следовательно, общий КПД двигателя, поскольку при этом увеличивается температура струи.

Однако такая тенденция ограничивается термостойкостью лопаток турбины. Замена газовой турбины реактивного двигателя МГД-генератором позволит снять это ограничение.

Неподвижные стенки камеры сгорания и сопла, охлаждаемые снаружи потоком воздуха, выдерживают и две, и три тысячи градусов, а для работы МГД-генератора чем выше температура, тем лучше, так как увеличивается электропроводность продуктов сгорания.

Кроме того, для авиационного двигателя допустимо применение

добавок к топливу щелочных металлов — калия, цезия, натрия, которые имеют низкую температуру ионизации и способны существенно повысить электропроводность газа.

Более того, МГД-генератор позволяет повысить КПД прямого реактивного двигателя и сделать его вполне конкурентоспособным. Достоинство прямого двигателя — в его простоте. Благодаря движению воздуха сам собой поступает в воздухозаборник, в камеру сгорания туда же впрыскивается топливо, которое, сгорая, образует реактивную струю. Ни тебе компрессора, ни турбины — вообще ни одного подвижного элемента! Однако КПД такого двигателя оказывается слишком мал. МГД-генератор может снять часть энергии выхлопной струи в виде электрической энергии.

Если теперь эту энергию с помощью электрической дуги ввести в камеру сгорания, то температура продуктов сгорания повысится, повысится и КПД двигателя.

Что касается плотности поступающего в камеру сгорания воздуха, то она, конечно, при этом не возрастает. Однако для сверхзвуковых и тем более гиперзвуковых скоростей движения этот фактор перестает играть роль, так как воздух, прежде чем поступить в двигатель, уплотняется ударной волной.

Основную массу МГД-генератора составляет магнитная система.

Сверхпроводящий проводник позволяет создать сильное магнитное поле без тяжелого железного сердечника. Специалисты по энергетике предсказывают, что в бли-

жайшее время наступит эра водородной энергетики, когда вся энергия, заключенная в ветре, Солнце, буром угле, и атомная энергия будут использоваться для получения жидкого водорода. Такое топливо прежде всего найдет применение в авиации. На самолете с жидким водородом на борту нет нужды в дополнительной криогенной системе для сверхпроводящего электромагнитного МГД-ге-

нератора. Если к этому добавить, что авиационный МГД-генератор в отличие от энергетического должен снимать только часть энергии и время его непрерывной работы измеряется часами, то легко понять, что такой генератор будет и легким, и надежным.

Невозможно исчерпать области применения гидромеханики, невозможно разглядеть вершины гидромеханики.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адасинский С. А. Транспортные машины на воздушной подушке.— М.: Наука, 1964.
2. Арцимович Л. А. Управляемые термоядерные реакции.— М.: Наука, 1963.
3. Белавин Н. И. Экранопланы.— Л.: Судостроение, 1968.
4. Гарднер Дж. Электричество без динамомашин.— М.: Мир, 1965.
5. Елимелих И. М., Сидоркин Ю. И. Струйная автоматика (пневмоника).— Л.: Лениздат, 1972.
6. Кирко И. М. Жидкий металл в электромагнитном поле.— М.: Энергия, 1964.
7. Константиnescу В. Н. Газовая смазка/Пер. с рум. Г. П. Махо; Под ред. М. В. Коровчинского.— М.: Машиностроение, 1968.
8. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Проблемы гидромеханики и их математические модели.— М.: Наука, 1973.
9. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа.— М.: Наука, 1987.
10. Макливи Рой. Суда на подводных крыльях и воздушной подушке.— Л.: Судостроение, 1981.
11. Наливкин Д. В. Ураганы, бури, смерчи.— Л.: Наука, 1969.
12. Прандтль Л. Гидроаэродинамика.— М.: ИЛ, 1951.
13. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике.— М.: Наука, 1987.
14. Сырмай А. Г. Корабль. Его прошлое, настоящее и будущее.— М.: Наука, 1967.
15. Тихонравов М. К. Полет птиц и машины с машущими крыльями.— М.: Оборонгиз, 1949.
16. Фабрикант Г. Я. Аэродинамика.— М.: Наука, 1964.
17. Франк-Каменецкий Д. А. Плазма — четвертое состояние вещества.— М.: Атомиздат, 1975.
18. Бишоп Р. Е. Колебания.— М.: Наука, 1986.
19. Меркулов В. И. Управление движением жидкости.— Новосибирск: Наука, 1980.

Научно-популярное издание

МЕРКУЛОВ Владимир Иванович

**ГИДРОДИНАМИКА ЗНАКОМАЯ
И НЕЗНАКОМАЯ**

Заведующий редакцией *Л. А. Русаков*

Редактор *А. Г. Мордвинцев*

Художественный редактор *Т. Н. Кольченко*

Технический редактор *С. Я. Шкляр*

Корректор *М. Л. Медведская*

ИБ № 32650

Сдано в набор 03.06.88. Подписано к печати 23.06.89.
Формат 60×90/16. Бумага тип. № 2. Гарнитура таймс.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 8,5. Усл. кр.-отт. 34,5.
Уч.-изд. л. 9,19. Тираж 24 000 экз. Заказ № 9-144
Цена 60 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени
издательство «Наука»

Главная редакция

физико-математической литературы

117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового
Красного Знамени МПО «Первая Образцовая типогра-
фия» Государственного комитета СССР по делам изда-
тельств, полиграфии и книжной торговли. 113054,
Москва, Валуевская, 28

Отпечатано на полиграфическом комбинате ЦК ЛКСМ
Украины «Молодь» ордена Трудового Красного Зна-
мени издательско-полиграфического объединения
ЦК ВЛКСМ «Молодая гвардия» 252119 Киев-119,
ул. Пархоменко 38—44

