

НОВОЕ
В ЖИЗНИ, НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

ЗНАНИЕ



2/1972

СЕРИЯ
ФИЗИКА

Г. И. Покровский
ГИДРО-
ДИНАМИЧЕСКИЕ
МЕХАНИЗМЫ

Г. И. Покровский,
лауреат Государственной премии,
доктор технических наук, профессор

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»
Москва 1972

Покровский Георгий Иосифович

П48 Гидродинамические механизмы. М., «Знание», 1972,

48 стр. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Физика»).

В брошюре рассмотрены простейшие случаи движения жидкостей, при которых происходит перераспределение скоростей, масс и энергии. Обращается внимание на явления, часто встречаемые человеком в природе и технике, и разъясняется их физический смысл. Круг явлений, рассматриваемых в брошюре, позволяет читателю сделать вывод о том, что в современной науке новые научные принципы и технические перспективы могут содержаться в простых и, казалось бы, давно знакомых явлениях.

Прочтя эту брошюру, читатель сможет находить и анализировать многочисленные явления, возникающие при видоизменениях движения тел, находящихся в твердом, жидком и газообразном состоянии.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей, в том числе студентов, учащихся и всех тех, кто интересуется вопросами точного естествознания.

2-4-3

532

Т. п. 1972 г. — № 45

СОДЕРЖАНИЕ

Введение

Могут ли существовать механизмы из жидкостей?	3
Что такое механизмы?	3
Что такое жидкость?	4

1. Струи жидкости

Как образуется струя?	6
Удар струи о преграду	8
Движение струи в воздухе	11
Дробление струи на капли	15
Перестройка струи при взаимодействии с преградой	18
Кумуляция	19

2. Частицы жидкости

Частицы и античастицы (капли и пузырьки)	21
Возникновение пузырьков	23
Кавитация	26
Вредные и полезные действия кавитации	28
Взрыв и антивзрыв	28
Взрыв вблизи свободной поверхности воды	30
Электрический разряд в капиллярной трубке	31
Падающая пробирка	32
Трансформаторы импульса	34

3. Фигуры из жидкости

Форма жидкости в космических условиях	35
Оптические приборы из жидкости	37
Жидкие оптические линзы	40
Капиллярные силы в технологии пластмасс и стекла	41
Система зубчатых колес в жидкости	42

4. Твердые тела, подобные жидкостям

Вибрирующий песок	44
Чем хороши песочные часы?	46
Генераторы электрической энергии	47

Заключение

47

ВВЕДЕНИЕ

Могут ли существовать механизмы из жидкостей?

Что такое механизм?

Слово «механизм» настолько широко вошло в современный повседневный язык, что кажется каждому давно знакомым и вполне понятным. Но оно применяется настолько часто для разных целей, что нужно здесь ограничить его значение в пределах, которые определяются задачами этой брошюры. В ней будут рассмотрены устройства, позволяющие управлять скоростью движения и распределением энергии, в частности увеличивать концентрацию энергии и направлять ее для выполнения различных действий.

В течение тысячелетий человек применял простейшие механизмы, сделанные из твердого материала и имеющие неизменяемую форму, например рычаг, клин, колесо. Применялись издавна также механизмы, в которых использовались деформации твердых веществ. Примером этому может служить обычный лук. На его изгиб затрачивается сила человека. Затраченная механическая работа превращается в энергию упругой деформации изогнутого лука. Эта энергия накапливается постепенно при натягивании тетивы и потом весьма быстро отдается стреле, когда стрелок отпускает натянутую им тетеву.

По мере увеличения скоростей движения и сил, передаваемых механизмам и преобразующихся в них, требования к прочности отдельных звеньев таких механизмов соответственно возрастают и требуются все более и более прочные материалы для их изготовления. Однако иногда и наступают такие пределы, за которыми уже ни один материал не остается достаточно стойким. Твердое тело начинает интенсивно деформироваться и теряет способность восстанавливать нарушенную форму.

Более того, при очень сильных воздействиях, например при ударе быстро движущегося тела в массивную преграду, деформация может быть настолько интенсивной и возникающие силы столь значительными, что самые твердые материалы превращаются в жидкость, а иногда даже в сильно сжимающийся газ. Примером этому может служить удар метеорита о поверхность какого-либо небесного тела. Особенно интенсивными такие удары бывают, как известно, тогда, когда небесное тело не имеет атмосферы, тормозящей метеорит и смягчающей его удар. Весьма интенсивные удары метеоритов испытывает поверхность Луны и несомненно многие кратеры на ее поверхности являются результатом таких ударов.

Характерной особенностью современного этапа в развитии различных областей техники является резкое возрастание сил, напряжений, скоростей и концентрации энергии, которыми управляет человек. В соответствии с этим все чаще и чаще возникают случаи, когда в дополнение к механизмам, состоящим из твердого материала, добавляются звенья из жидкости или так сильно деформируемые звенья из твердых тел, как если бы они были жидкими.

В дальнейшем в этой брошюре под словом «механизм» мы будем понимать такую совокупность твердых и жидких тел, которая преобразует скорости движения своих частей и перераспределяет их энергию. При таком определении механизмами можно назвать как устройства, изготовленные человеком для решения определенных задач, так и соответствующие природные явления.

Что такое жидкость?

Вещества, называемые жидкими, подобно воде, всем отлично известны на основе повседневного опыта. Однако это не значит, что не составляет трудности дать исчерпывающее определение жидкости.

Всякое состояние вещества — твердое, жидкое, газообразное — имеет множество особенностей. Некоторые из этих особенностей имеют существенное, решающее значение, другие являются более или менее второстепенными. Для тех целей, которые поставлены в этой брошюре, имеют значение только некоторые главнейшие свойства жидкостей. В первую очередь можно в качестве основного свойства жидкости принять ее способность неограниченно изменять свою форму, не сохраняя совершенно, так сказать, никакого воспоминания о тех формах, которые жидкость имела когда бы то ни было ранее.

Если изменение формы не требует никакой энергии, то

жидкость обычно называют идеальной. Конечно, в реальных условиях изменение формы жидкости всегда связано с затратами энергии. Однако если эти затраты малы в сравнении с энергией, получаемой и передаваемой жидкостью, то ими можно пренебречь.

Кроме этого, у большинства реальных жидкостей в большинстве реальных случаев перемещения, обусловленные общим движением жидкости, очень велики по сравнению с перемещениями, зависящими от изменения объема этой жидкости. Это позволяет пренебрегать изменениями объема и считать жидкость несжимаемой в отношении ее объема. Итак, если жидкость можно считать достаточно легко деформируемой и достаточно мало сжимаемой, то это является во многих случаях очень удобной для практики идеализацией жидкости, приводящей к достаточно малому отступлению от истины при решении практических задач. Поэтому представление о несжимаемой и весьма легко деформируемой идеальной жидкости нашло широкое применение в науке и технике; именно на его основе можно очень просто и удобно разъяснять многие явления, наблюдаемые при движении жидкостей и при их взаимодействии с твердыми телами.

Впрочем, здесь следует сделать важную оговорку. Далее мы рассмотрим интересное свойство жидкостей — их поверхностное натяжение. Это свойство — результат молекулярного притяжения — выражается в том, что жидкость испытывает как бы сильное сжимающее действие своего поверхностного слоя. Этот слой является как бы крепкой пленкой, натянутой с некоторой постоянной и определенной силой. Наличие такой силы может привести к тому, что жидкость определенным образом сопротивляется изменению своей формы, хотя внутри нее нет заметных сил, стремящихся сохранить неизменной форму жидкости.

Таким образом, жидкость можно считать веществом, не «запоминающим» конкретную форму в отдельные моменты своего существования, но способным «помнить» некоторые идеальные формы, к которым жидкость «стремится», выделяя некоторую энергию для их достижения. Например, масса воды, разлетающаяся в разные стороны при ударе о преграду, разбивается на множество капель, причем каждая из них стремится принять сферическую форму — превратиться в шарик правильной формы.

1. СТРУИ ЖИДКОСТИ

Как образуется струя?

Струи, состоящие из быстродвижущейся жидкости, встречаются как в природе, так и в технике. К природным струям можно отнести струи гейзеров, периодически появляющиеся в районах с развитой вулканической деятельностью, струи воды, выбрасываемой китами, и многое другое. В технике струи также распространены очень широко. Мощные струи воды или воды с различными добавками применяются для тушения пожаров. Широко известны декоративные фонтаны, способные в некоторой мере охладить и увлажнить окружающий воздух и своеобразно преломлять и отражать искусственный и естественный свет.

Струя жидкости, движущаяся с достаточно большой скоростью, способна нанести на преграду, оказавшуюся на ее пути, удар очень большой силы и произвести такие разрушения, которые не могут быть осуществлены самыми твердыми и прочными буровыми средствами, изготовленными из весьма прочных материалов.

Таким образом, струю жидкости можно рассматривать как один из вполне реальных элементов гидродинамических механизмов.

Как правило, струя жидкости возникает, если жидкость может истекать под действием избыточного давления из какого-либо сосуда в свободное пространство. При этом обычно сечение сосуда, по которому жидкость подается к отверстию, существенно больше, чем сечение отверстия. В этих условиях движение жидкости при подходе к отверстию существенно ускоряется и струя формируется непосредственно после выхода жидкости из отверстия. Скорость жидкости, получаемая при действии давления P , может быть определена исходя из известного принципа сохранения энергии.

Здесь работа силы давления жидкости за время t выразится в выдавливании столбика жидкости длиной vt . Здесь v — скорость жидкости. Сила, производящая эту работу, равна PS , где S — площадь отверстия. Работа, как известно, равна произведению силы PS на длину vt , т. е. $PSvt$.

В результате этой работы жидкость получит кинетическую энергию, равную произведению массы на половину квадрата скорости, т. е.

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

где ρ — плотность жидкости. Приравнявая работу силы кинетической энергии, получаем

$$PSvt = vtS\rho\frac{v^2}{2}.$$

Сокращая произведения Sv , входящие в правую и левую части, можно написать

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

Из этого уравнения находим

$$v = \sqrt{\frac{2P}{\rho}}.$$

Объем жидкости, вытекающей за единицу времени, обычно называют расходом. Расход при рассматриваемых условиях равен

$$Q = Sv = S \sqrt{\frac{2P}{\rho}}.$$

Проведенные нами расчеты очень просты и кажутся вполне убедительными. Однако они, как правило, не соответствуют действительности. Все зависит от формы сосуда, из которого выбрасывается струя. Если струя образуется из плавно сужающегося патрубка, в котором скорость нарастает постепенно, а сечение очень равномерно уменьшается, то в принципе оказывается возможным получить скорость, соответствующую сделанному расчету.

Если же имеется широкий сосуд, к стенке которого прикреплена трубка с острыми краями, то жидкость может подходить к такому отверстию по различным направлениям, в частности и с боков. Эти боковые потоки движутся друг навстречу другу и сильно изгибаются при проходе к самому отверстию. При таком искривлении линий движения возникают значительные центробежные силы, которые противодействуют ускорению потока избыточным давлением. Боковые потоки как бы заклинивают центральный поток жидкости. Вследствие этого расход жидкости существенно уменьшается. Это уменьшение может быть вдвое и даже несколько более.

Рассмотренное нами явление самоторможения встречается очень часто в окружающей нас жизни. Например, при входе на эскалаторы метро большой массы людей, пассажиры, стремящиеся проникнуть на ленту эскалатора с боков, могут сильно задержать общий поток людей. Чтобы этого не происходило, при входе на эскалаторы нередко ставят поручни, направляющие потоки людей к эскалатору по плавно сходящимся линиям. На основе данных гидродинамики можно предполагать, что такие простые направляющие устройства могут вдвое повысить пропускную способность эскалаторов.

Нечто подобное происходит и при посадке в вагоны метро. Однако если посадка происходит с обычных перронов, то здесь невозможно применить направляющие людей поручни. Такая возможность возникает только в том случае, если

обычные перроны заменены дверями центрального зала, открываемыми синхронно с дверьми вагонов остановившегося поезда. Так задача решена на новых станциях Ленинградского метро, являющихся с рассматриваемой точки зрения принципиальным шагом вперед.

Удар струи о преграду

Если струя встречается преградой, то она производит на эту преграду некоторое давление. При этом могут быть выделены два характерных случая.

Можно рассматривать действие струи в течение длительного времени. В этом случае струя растекается в стороны в виде диска, толщина которого быстро уменьшается от середины к краям и дальше поток разбивается на мелкие капли. Наибольшее давление производит струя вдоль своей оси. Это давление равно тому давлению, которое вызвало образование струи и сообщило ей соответствующую скорость. На основе этой закономерности можно давление выразить так:

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

Это давление сравнительно незначительно. Например, при скорости водяной струи, равной 10 м/сек, оно составляет 5000 кг (5 т) на 1 м², или 0,5 кг на 1 см².

Несмотря на это водяная струя оказывается очень эффективным инструментом, позволяющим разрабатывать мягкие грунты — песок, суглинок, глину. Эти грунты легко размываются и образуют так называемую пульпу — воду, смешанную с частицами грунта. Эта смесь может подаваться по трубам на расстояния во много километров. Таким образом, вода оказывается не только средством разрушения грунта, но и средством его транспорта. Этот способ называется, как известно, гидромеханизацией земляных работ и широко применяется при строительстве различных сооружений.

Однако вода способна разрушать не только мягкие грунты. Нередко можно видеть, как в твердых камнях выбиты углубления в тех местах, куда попадают отдельные, падающие сверху капли воды. В чем же состоит физическая сущность разрушающего действия отдельных капель?

Рассматривая это явление подробнее, следует обратить внимание на то, что при ударе капель о преграду в отличие от постоянно действующей струи происходит внезапно возникающий контакт воды с преградой. При таком внезапном контакте осуществляется явление, называемое гидравлическим ударом. При гидравлическом ударе происходит тормо-

жение движущейся жидкости. При этом навстречу движущейся массе в жидкости распространяется волна торможения. Нечто подобное можно наблюдать на примере интенсивного потока автомашин, внезапно задерживаемого красным огнем светофора. Возникает пробка, хвост которой быстро удлиняется, как бы двигаясь навстречу потоку машин. В жидкостях, в частности в воде, такие волны распространяются очень быстро. Скорость их распространения равна скорости звука. У воды скорость звука равна около 1500 м/сек. При таких условиях силы инерции создают очень высокие давления гидравлического удара.

Исходя из известного в механике принципа равенства импульса силы изменению количества движения, можно установить, что произведение давления жидкости P на время его действия t должно равняться количеству движения у массы жидкости, заторможенной при ударе о преграду в течение того же времени t . Масса этой жидкости (отнесенная к единице площади преграды) равна ρct .

Здесь ρ — плотность жидкости и c — скорость звука. Количество движения равно $\rho ct \cdot v$.

Здесь v — скорость жидкости до ее удара о преграду. Итак, импульс силы $Pt = \rho ctv$.

Сокращая правую и левую части этого равенства на время, получаем формулу, определяющую величину давления при гидравлическом ударе: $P = \rho vc$.

Если скорость движения жидкости равна 10 м/сек, как это было принято в рассмотренном выше расчете давления струи воды, и скорость звука в воде 1500 м/сек, то давление гидравлического удара воды оказывается равным $P = 1\,500\,000$ кг/м², или 150 кг/см². Это в 300 раз больше давления постоянно действующей струи воды, движущейся с той же скоростью.

На основе приведенного расчета становится ясным, почему многочисленные удары капель могут оказаться сильнее непрерывного напора мощной водяной струи.

На основании рассмотренных физических явлений может быть устроен своеобразный трансформатор давлений и скоростей в потоке жидкостей.

Представим себе, что жидкость движется по трубе из сосуда и опускается при этом с высоты, равной H . При этом жидкость приобретает такую же скорость, как и любое тело, падающее с этой высоты H . Эта скорость равна, как известно,

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

Здесь g — ускорение силы тяжести, равное 0,81 м/сек².

Если устроить в трубе клапан, способный перекрыть внезапно поток жидкости и остановить ее движение, то произой-

дет гидравлический удар и возникнет давление P , которое можно определить по выведенной выше формуле, если в ней заменить скорость v величиной $\sqrt{2gH}$. В результате можно получить

$$P = \rho c \sqrt{2gH}.$$

В трубе, где возникло такое давление, можно сделать боковой клапан и отвести от него идущую вверх трубу. Под действием гидравлического удара можно по этой трубе поднять воду на высоту H_1 , при которой давление поднятой воды уравнивает давление гидравлического удара: $P = \rho g H_1$. На этом основании можно поднять воду на высоту

$$H_1 = \frac{\rho g}{P}.$$

Заменяя P его значением, найденным выше, получаем

$$H_1 = c \sqrt{\frac{2H}{g}}.$$

Таким образом, вода, опускаясь с высоты H , может поднять часть своей массы на высоту, заметно большую, чем H . Увеличение высоты равно

$$\frac{H_1}{H} = c \sqrt{\frac{2}{gH}}.$$

Однако как указано выше, $\sqrt{2gH} = v$. Поэтому

$$\frac{H_1}{H} = 2 \frac{c}{v},$$

Это значит, что чем больше скорость звука скорости текущей воды, тем относительно выше можно поднять часть этой воды при помощи гидравлического удара. Если, например, $v = 10$ м/сек и $c = 1500$ м/сек, то

$$\frac{H_1}{H} = 300.$$

Если скорость движения жидкости очень велика и приближается к удвоенной скорости звука, то использование гидравлического удара для повышения уровня подъема жидкости становится невозможным. Явления, связанные с гидравлическим ударом, весьма разнообразны. Например, можно во время шторма на море наблюдать, как волны бьют в вертикальную стенку набережной или мола, ограждающего морской порт. При определенных условиях возникают в этих случаях всплески воды, имеющие высоту до 100 м и превосходящие в десятки раз высоту тех волн, под действием которых они возникают.

Исходя из этого, становится ясным, почему морской при-

бой может проявлять иногда громадную разрушающую силу. Борьба с разрушающим действием морских волн требует поэтому отличного понимания физических основ гидравлического удара.

Движение струи в воздухе

Если струя жидкости выброшена в воздух, то она движется в нем по тем же законам, как и летящее свободно тело. Однако торможение струи воздухом будет осуществляться за счет трения о воздух боковой части струи, между тем как летящее свободно тело встречает основное сопротивление воздуха своей передней частью, вытесняя его в стороны при своем движении. Это справедливо для постоянно движущейся струи.

Совершенно иначе ведут себя струи, возникшие внезапно и имеющие поэтому резко ограниченную головную часть.

Встречая сопротивляющийся проникновению в него жидкости воздух, голова струи приобретает форму шляпки гриба и постепенно растекается в стороны, дробясь на более крупные или мелкие капли. В результате этого струя постепенно укорачивается. Если кусок струи имеет определенный хвостовой конец и общая ее длина L , то на определенном пути длиной S вся струя будет разрушена и немного дальше полетят только некоторые рассредоточенные капли.

Если скорость разрушения головной части струи равна скорости струи v , плотность жидкости $\rho_{ж}$ и плотность воздуха $\rho_{в}$, то давление струи на воздух будет равно

$$\frac{\rho_{ж} v^2}{2},$$

как было рассмотрено выше, применительно к действию струи на неподвижную преграду.

Направленное на обратную сторону давление воздуха на головную часть струи равно

$$\frac{\rho_{в}}{2} (v - v_1)^2.$$

Согласно известному принципу механики «действие равно противодействию» величины обоих давлений равны. Поэтому

$$\rho_{в} (v - v_1)^2 = \rho_{ж} v_1^2.$$

Из этого уравнения можно найти

$$v_1 = v \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho_{ж}}{\rho_{в}} + 1}}.$$

Струя разрушится полностью за время, равное L/v_1 . За это время струя пройдет в воздухе путь

$$S = \frac{L}{v_1} (v - v_1) = L \left(\frac{v}{v_1} - 1 \right).$$

Подставляя в правую часть этого равенства значение v_1 , найденное ранее, получаем

$$S = L \sqrt{\frac{\rho_{ж}}{\rho_{в}}}.$$

Учитывая, что вода в 800 раз плотнее атмосферного воздуха вблизи от поверхности земли (на уровне моря), можно считать, что отрезок водяной струи длиной L может пролететь в атмосфере Земли путь, в $\sqrt{800} \approx 28$ раз превосходящий его длину.

Замечательной особенностью полученного результата является то, что дальность проникания струи жидкости в воздух, а также в любой другой газ или жидкость не зависит от скорости этой струи.

Рассмотренный способ расчета может быть применен также и при проникании достаточно быстро движущейся струи в любые среды, в частности даже в твердые тела. При этом, однако, необходимо, чтобы твердое тело испытывало настолько большое давление, при котором стало бы течь подобно жидкости. Это давление должно по порядку величины быть не меньше модуля упругости соответствующего вещества.

Напомним, что модулем упругости твердого вещества называется давление, при котором упругая деформация, если бы она могла осуществиться, равнялась бы соответствующему размеру ненагруженного тела (т. е. тело было бы полностью раздавлено при его сжатии или растянуто вдвое при его растяжении).

Это значит, что скорость струи должна удовлетворять приближенному неравенству

$$\frac{\rho_{ж} v^2}{2} \gtrsim E,$$

где E — модуль упругости.

Отсюда

$$v \gtrsim \sqrt{2} \sqrt{\frac{E}{\rho_{ж}}}.$$

Полученное выражение можно несколько усложнить, введя в него плотность среды ρ_c , куда проникает струя. Тогда получится

$$v \gtrsim \sqrt{2} \sqrt{\frac{E}{\rho_c}} \sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_{ж}}}.$$

Величина $\sqrt{\frac{E}{\rho_c}}$ примерно равна (по порядку величины) скорости звука в твердом теле. Следовательно, чтобы проникать в твердое тело, струя должна иметь скорость не меньшую, чем $\sqrt{2 \frac{\rho_{ж}}{\rho_c}} c$,

где c — соответствующая скорость звука.

При рассмотренных условиях и твердое тело, проникающее в другое твердое тело, может рассматриваться как жидкая струя. Это значит, что проникание на очень больших скоростях любых твердых тел друг в друга должно подчиняться рассмотренным закономерностям. При более подробном рассмотрении такой задачи выявляются некоторые любопытные детали.

На рис. 1 показаны два соударяющихся тела равной плотности, движущиеся с равными скоростями навстречу друг другу. В этих условиях граница раздела между двумя этими телами будет неподвижной. Тела имеют равные размеры. Они показаны в разрезе, где изображены также линии тока, т. е. направления, по которым движутся частицы.

На рис. 2 показана такая же картина для случая соударения двух тел различного поперечного сечения. В этом случае тело меньшего сечения проникает в тело большего сечения, вызывая появление в нем некоторого углубления.

Если более крупное тело от удара было неподвижным, то линии тока можно получать для него, считая, что к скоростям всех точек на рис. 2 дополнительно приложена некоторая скорость, равная по величине скорости более крупного тела, но направленная в противоположную сторону. Полученный таким способом результат показан на рис. 3.

Если соударяющиеся тела имеют некоторую прочность, то они

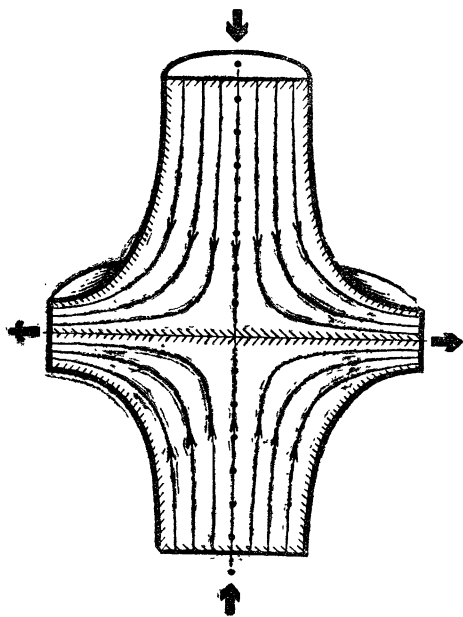


Рис. 1. Линии движения жидкости при соударении двух струй равного диаметра, движущихся навстречу друг другу.

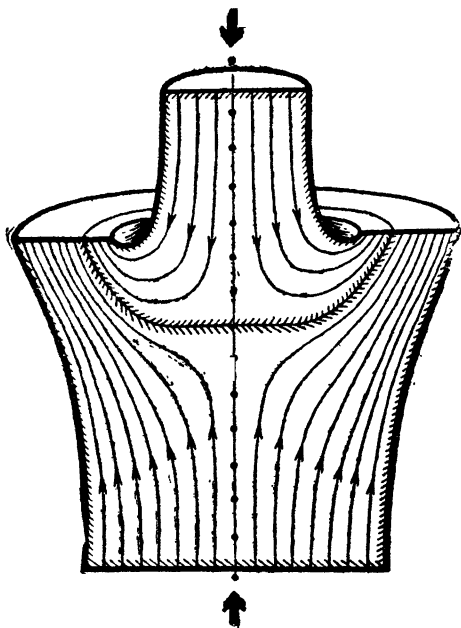


Рис. 2. Линии движения жидкости при соударении двух струй разного диаметра, движущихся навстречу друг другу.

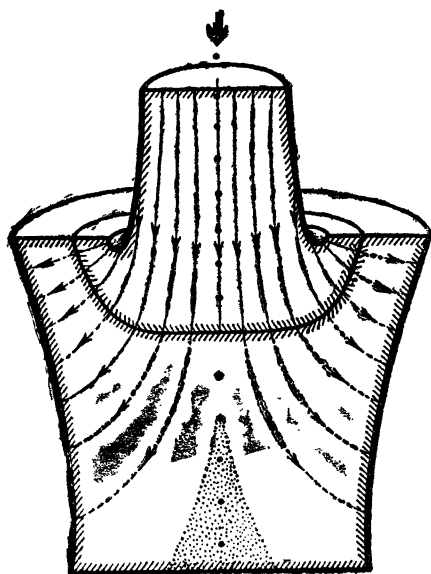


Рис. 3. Линии движения жидкости при проникновении струи в неподвижную массу.

будут деформироваться так, как показано на рис. 1, 2 и 3 только там, где скорости достаточно велики; на рисунках этому соответствуют места, где линии движения частиц идут достаточно плотным потоком. Там же, где линии движения расходятся на значительные расстояния друг от друга, скорости становятся очень малыми, энергия движения может оказаться недостаточной, чтобы преодолеть силы прочности вещества. Следовательно, в таких областях тела при ударе могут не разрушиться. На рис. 3 область такого рода выделена мелкими точками. Такой неразрушающийся конус может возникнуть около оси, по которой происходит удар.

Чтобы подтвердить правильность сделанного вывода, можно обратиться к общеизвестным кратерам на поверхности Луны. Многие из них возникли в результате ударов метеоритов, движущихся со скоростями в десятки километров в секунду. При таких скоростях соударение метеоритов с поверхностью Луны должно приводить к гидродинамической картине движения масс в поверхностном

слое Луны. Образующиеся при этом кратеры должны иметь в своем центре коническую горку, сохранившуюся при ударе в соответствие с приведенными выше картинками движения частиц соударяющихся тел. Разрез такого кратера показан на рис. 4. В действительности такие центральные конические горки наблюдаются во многих лунных кратерах. Это подтверждает, что такие кратеры действительно возникли в результате гидродинамических процессов при ударе метеоритов по поверхности Луны.

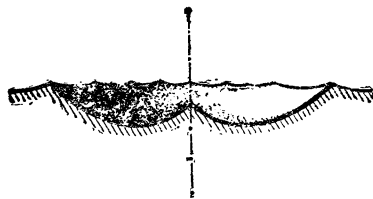


Рис. 4. Схематический разрез лунного кратера.

Дробление струи на капли

Если струя жидкости движется в воздухе, то она рано или поздно дробится на капли. Это можно видеть, наблюдая фонтан. Дробление на капли связано с тем, что обычная цилиндрическая струя жидкости оказывается неустойчивой в механическом смысле. Чтобы раскрыть физическую сущность этого явления, необходимо учесть, что все жидкости представляют собой газы, чрезвычайно сильно сжатые притяжением их молекул друг к другу. Вследствие этого поверхностный слой жидкости имеет свойства тонкой пленки, натянутой с определенной силой. Эта сила, отнесенная к единице длины контура пленки, называется поверхностным натяжением σ .

Если поверхность жидкости искривлена, например имеет цилиндрическую форму как у струи жидкости, то натянутая поверхностная пленка создает внутри жидкости так называемое капиллярное давление. Это давление внутри цилиндрической струи равно

$$P = \frac{\sigma}{R},$$

где R — радиус струи.

Вследствие различных причин струя может иметь в разных своих частях несколько отличающиеся друг от друга радиусы R_1 и R_2 ; тогда в частях струи с разными радиусами возникнут разные давления. Разность этих давлений будет

$$\Delta P = \sigma \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right).$$

Под влиянием этой разности давлений жидкость станет перемещаться из узких частей струи в ее более широкие ча-

сти. Поэтому разница в радиусах струи возрастет, разность давлений также увеличится и перетекание жидкости ускорится. В результате этого струя разобьется в конце концов на отдельные куски, которые превратятся в шарообразные капли.

Эти капли при их дальнейшем движении по инерции в воздухе, как правило, подвергаются дальнейшему дроблению. Механика этого дробления заслуживает более подробного анализа. При движении капли в атмосфере воздух, обтекающий ее, увлекает за собою поверхностный слой жидкости. Вследствие этого внутри капли образуется кольцевой вихрь, который показан на рис. 5. Вращательное движение жидкости сопровождается появлением центробежных сил. Эти силы растягивают каплю в направлениях, перпендикулярных направлению ее движения. В результате этого капля настолько сильно растягивается, что разрывается на несколько более мелких капель, как показано на рис. 6. В этих более мелких каплях при их дальнейшем движении вновь могут возникнуть кольцевые вихри, и процесс дробления может продолжиться, пока скорость капель будет достаточной для этого процесса.

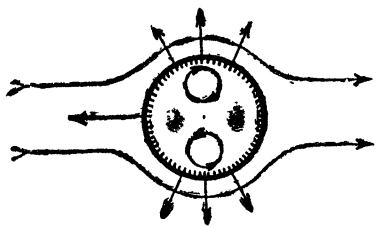


Рис. 5. Вихри, возникающие в капле, движущейся в воздухе (или вном газе).

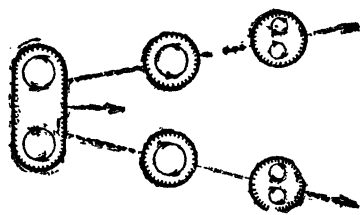


Рис. 6. Схема движения жидкости при дроблении более крупной капли на две более мелкие.

Расчет условий такого дробления основывается на том, что центробежная сила зависит от скорости движения жидкости в кольцевом вихре. Эта скорость приближается к скорости движения капли в воздухе. Центробежные силы вихря могут разрушить каплю тогда, когда они превосходят капиллярное давление. Для воды эта критическая скорость дробления капель оказывается равной

$$v = \frac{1}{2\sqrt{R}}.$$

Здесь скорость v выражена в метрах в секунду и радиус R — капли в метрах.

Для капель наиболее часто встречающихся размеров мож-

но привести следующие значения критических скоростей дробления:

Радиус, мм	10	1	0,1
Радиус м	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}
Скорость дробления, м/сек	5	15	50

На основании сказанного можно определить максимальные радиусы дождевых капель, падающих в воздухе под действием силы тяжести. Скорость падения капли воды в воздухе зависит от ее радиуса. Чем крупнее капля, тем быстрее она падает. На основании наблюдений советским ученым Л. Крыстановым установлена такая зависимость скорости падения капель воды от их радиуса

$$v = 150 \sqrt{R}.$$

Здесь v и R выражены в таких же единицах, как и выше. Приведенная зависимость пригодна для капель радиусом от 0,0002 до 0,0025 м, т. е. диаметром от 0,2 до 5 мм.

Формула Крыстанова дает такие скорости падения капель:

Радиус, мм	10	1	0,1
Радиус, м	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}
Скорость падения, м/сек	15	5	1,5

Приравнивая естественную скорость падения капель воды к критической скорости их дробления, получаем равенство

$$\frac{1}{2\sqrt{R}} = 150 \sqrt{R},$$

или

$$R = \frac{1}{300} \text{ м.}$$

Отсюда можно получить максимальный радиус дождевой капли, свободно падающей в воздухе. Он равен $R \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 3 \text{ мм}$. Следовательно, максимальный диаметр устойчивой капли примерно равен 6 мм.

Перестройка струи при взаимодействии с преградой

Если струя жидкости встречается недеформируемую плоскую преграду, то она растекается в плоский диск так же, как и при встрече со струей противоположного направления, имеющей то же абсолютное значение скорости и ту же плотность. Это видно на рис. 1. Это справедливо в том случае, если направление струи перпендикулярно поверхности преграды.

Если струя попадает на плоскую преграду наклонно, то она тоже растекается в диск, причем радиальная скорость воды в диске по всем направлениям одинаковая. Однако диск имеет в различных своих частях разную толщину. В том направлении, которое соответствует наименьшему искривлению потока жидкости, толщина диска существенно больше, чем в других. Наименьшая толщина диска соответствует максимальному повороту линии перемещения жидкости.

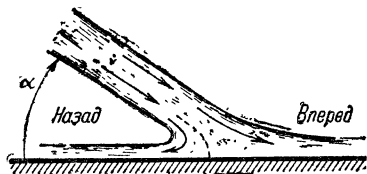


Рис. 7. Растекание струи жидкости на косом ударе о поверхность массивной преграды.

Если первое из названных направлений для краткости назвать «вперед» и второе «назад» (рис. 7), то можно установить следующее. Если растекание струи происходит практически без заметных потерь энергии и скорость ее сохраняется, то должен быть также сохранен и импульс струи. Это значит, что количество движения у массы воды до подхода к преграде и после взаимодействия с преградой должно оставаться неизменным. На этом основании можно написать такое равенство:

$$mv_0 \cos \varphi = mv_0(1-a) - amv_0.$$

Здесь m — масса воды, проходящая к преграде за любое заданное время, и v_0 — ее скорость; $mv_0 \cos \varphi$ является так называемой горизонтальной составляющей количества движения струи. Входящее в правую часть произведение $mv_0(1-a)$ является горизонтальной составляющей количества движения жидкости, уходящего на рис. 7 вправо. Второй член дает количество движения жидкости, идущей налево. Величина a указывает долю жидкости, уходящей налево. Из приведенного уравнения можно определить

$$a = \frac{1 - \cos \varphi}{2}.$$

В рассмотренной картине расчет проведен для случая, когда струя ограничена спереди и сзади гладкими стенками

и не может растекаться во всевозможные стороны, а движется (после взаимодействия с преградой) только «направо» и «налево». Соударение струи с преградой может протекать и совсем иначе, если струя тонкая, скорость жидкости небольшая и жидкость смачивает преграду настолько сильно, что не может от нее оторваться, если поверхность преграды имеет плавное очертание.

При таких условиях струя, встречая на своем пути, например, цилиндр, будет обтекать его так, как показано на рис. 8.

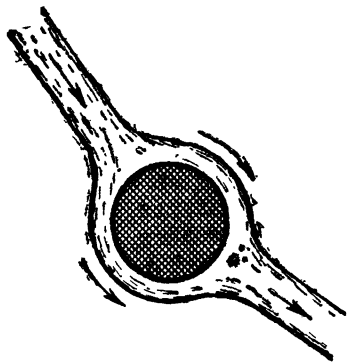


Рис. 8. Схема обтекания струей жидкости массивного цилиндра.

Кумуляция

Рассмотрев взаимодействие струи с жесткой, недеформируемой преградой, можно перейти к весьма любопытному явлению, при котором могут возникнуть весьма высокие скорости. Это явление носит название кумуляция, что означает возникновение очень высоких концентраций энергии.

Представим себе, что масса воды (например, морская волна) ударяет в какую-либо преграду (например, в прибрежную скалу) таким образом, что поверхность воды и поверхность преграды образуют острый угол α . Точка, где пересекаются поверхности преграды и воды, быстро перемещается вдоль преграды. Ее скорость равна

$$v_1 = v_0 \frac{1}{\sin \alpha}.$$

Здесь v_0 — скорость, с которой масса воды приближается к преграде. При ударе возникает струя воды, бьющая вдоль поверхности преграды, обгоняя точку пересечения поверхностей воды и преграды со скоростью

$$v_2 = v_0 \frac{1}{\tan \alpha}.$$

Если просуммировать скорости v_1 и v_2 , получится скорость воды в струе, направленной вдоль поверхности преграды. Эта скорость оказывается равной

$$v_k = v_0 \left(\frac{1}{\sin \alpha} + \frac{1}{\tan \alpha} \right).$$

Если угол α достаточно мал, то сумма

$$\frac{1}{\sin \alpha} + \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha}$$

может быть очень большой. Это означает, что скорость будет во много раз превосходить первоначальную скорость удара воды v_0 о преграду. Схема рассмотренного нами движения показана на рис. 9.

Такие явления встречаются очень часто. Например, автомобильное колесо, набегая на лужу, вызывает всплеск воды, выбрасываемой с очень большой скоростью. Если камень падает в воду, то возникающий при этом всплеск тоже имеет кумулятивную природу. Таких примеров можно найти в окружающих нас явлениях очень много.

Здесь уместно также вспомнить, что кумуляция имеет важное значение во взрывной технике.

Если в заряде взрывчатого вещества сделана выемка и в эту выемку вложена металлическая облицовка, то при взрыве эта облицовка сжимается. Металлическая стенка облицовки под воздействием весьма высокого давления взрывных газов приобретает скорость около 1 км/сек. В момент, когда металл сжимается в один массивный кусок, происходит соударение стенок, движущихся друг другу навстречу со скоростью около 1 км/сек. Если провести расчет давления, возникающего в таких условиях, то окажется, что это давление равно примерно 4 млн. кг/см² в том случае, если облицовка выемки сделана из железа. Такое давление настолько велико, что железо под его действием превращается в жидкость и при сжатии облицовки возникает кумуляция. В результате из сжавшейся облицовки вылетает по направлению ее оси чрезвычайно быстрая кумулятивная струя. Скорость такой струи может равняться 10 км/сек и более и легко превосходит не только первую, но и вторую космические скорости.

Если бы не было воздуха, то кумулятивный взрыв мог бы легко вывести на орбиту кумулятивную струю в виде не только спутника Земли, но и спутника Солнца. Эта струя способна пробивать самые прочные преграды, проникая в них так, как если бы они состояли из жидкости. При этом толщина пробиваемого слоя может быть определена, так как был рассчитан выше путь, проходимый отрезком струи в воздухе. Если железная кумулятивная струя пробивает стальную броню, то она может пройти

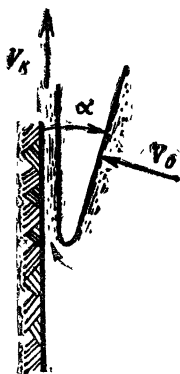


Рис. 9. Косой удар массы жидкости о поверхность неподвижной массивной преграды.

насквозь через слой стали, толщина которого равна длине кумулятивной струи.

Весьма интересный способ сварки металлов при помощи взрыва был предложен академиком М. А. Лаврентьевым. Если два листа металла бросить плашмя друг на друга так, чтобы они образовывали небольшой угол, то при соударении листов возникнет кумуляция и поверхностный слой одного и другого листа, сжатые вместе, образуют плоскую, подобную ножу, кумулятивную струю, которая уносит с собой окислы и загрязнения, находящиеся на поверхностях соударяющихся листов металла. Это показано схематически на рис. 10. Поэтому прижимаются друг к другу совершенно чистые массы металлов, не соприкасавшиеся с воздухом. В таких условиях сварка металла с металлом оказывается исключительно высококачественной. Более того, можно обеспечить сварку таких веществ, которые при других, обычных условиях не свариваются друг с другом вовсе.

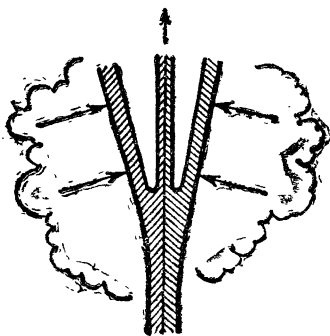


Рис. 10. Схема соударения двух пластинок, брошенных силой взрыва под некоторым углом друг другу навстречу.

2. ЧАСТИЦЫ ЖИДКОСТИ

Частицы и античастицы (капли и пузырьки)

Очень простым и наглядным примером, поясняющим весьма общую идею теоретической физики относительно частиц и античастиц, является сопоставление капель жидкости и пузырьков в этой же жидкости. При этом самым любопытным можно считать то, что капли обладают обычной массой, определяющей их поведение под действием инерционных и гравитационных сил. Капли имеют определенный вес и притягиваются друг к другу в соответствии с известным законом всемирного тяготения.

Наоборот, пузырьки можно характеризовать отрицательной массой, равной по абсолютной величине массе, вытесненной ими жидкостью. Вследствие этого под действием силы тяжести капли падают вниз, а пузырьки, наоборот, всплывают вверх. Капли притягиваются друг к другу, а пузырьки отталкиваются друг от друга с силой, определяемой законом всемирного тяготения Ньютона.

Интересно отметить поведение капель и пузырьков в ус

ловиях невесомости. В этих условиях капли могут, подобно небесным телам, вращаться друг около друга. Если рассмотреть более детально это вращение, то время полного оборота окажется одинаковым у спутника Земли и соответствующей малой капли, движущейся вокруг более крупной капли. Это справедливо, если плотность капель равна плотности Земли.

Если же плотность жидкости иная, чем средняя плотность земного шара, то время полного оборота будет прямо пропорционально корню квадратному из отношения плотности жидкости к плотности земного шара.

Совершенно так же, как небесные тела, пузырьки могут во вращающейся жидкости вращаться около своего общего центра тяжести; независимо от размеров пузырьков он будет совершать один полный оборот за время одного витка спутника Земли, т. е. примерно 1,5 ч, если малый пузырек вращается вблизи большого пузырька.

При соприкосновении капель друг с другом они сливаются вместе, образуя новую каплю с увеличенным диаметром. Совершенно также сливаются и пузырьки. Как было рассмотрено выше, капля, движущаяся в воздухе или ином газе, может раздробиться на более мелкие капли. Чтобы это произошло, необходима достаточно высокая скорость движения. Если капля воды падает в обычном атмосферном воздухе, то она дробится, если ее радиус более 3,5 мм.

Совершенно так же пузырьки в воде разрушаются, превращаясь в более мелкие. Пузырьки всплывают со скоростью тем более значительной, чем больше их радиус. Они начинают разрушаться и превращаются при всплытии в более мелкие пузырьки, если их радиус превосходит 3,5 мм. Скорость всплытия более мелких, устойчивых пузырьков равна примерно $v \approx 0,2 \sqrt{R}$.

Здесь скорость выражена в метрах в секунду и R в миллиметрах. Пузырьки могут превращаться в капли. Чтобы убедиться в этом, достаточно посмотреть на поверхность газированной воды, в которой растворенная углекислота выделяется в виде множества маленьких пузырьков. Они всплывают и исчезают, достигнув поверхности. Каждый пузырек при своем исчезновении вызывает появление капли размером примерно вдвое меньше пузырька. Эта капля взлетает вверх примерно на 10 см и потом падает вниз под действием силы тяжести.

Когда пузырек достигает поверхности воды, происходит его слияние с этой поверхностью. Под влиянием поверхностного натяжения происходит настолько быстрое исчезновение пузырька, что примыкавшая к нему вода получает значительную скорость, направленную к центру исчезающего пузырька. Сходясь, потоки воды образуют тонкую струйку, которая

вырывается вверх и образует каплю, отрывающуюся от поверхности.

Любопытно отметить, что рассмотренное явление не может превратиться в свою противоположность. Капли, падающие сверху в воду или иную жидкость, не превращаются в пузырьки. Чтобы в воде возникли пузырьки, необходимо падение значительных масс, когда захватываются внутрь воды сравнительно большие массы воздуха, сразу же раздробляющиеся в пузырьки различного размера. Это обусловлено тем, что пузырьки стремятся всплыть вверх, и чтобы они могли существовать некоторое время, они должны образоваться на заметной глубине под поверхностью воды. Вследствие этого образование пены, т. е. воды, насыщенной пузырьками, происходит только при бурном движении больших масс воды — при сильном шторме в море, в крупных водопадах, на водосбросах гидростанций и т. д. Можно видеть, что образовавшаяся при сбросе воды на Братской, Красноярской, Асуанской гидростанциях вспененная вода идет на большое расстояние вниз по течению. Между тем выливая воду из чайника, устойчивой пены получить вообще невозможно.

Возникновение пузырьков

Во многих жидкостях, в частности в воде, соприкасающейся с атмосферным воздухом, растворяется этот воздух; чем выше давление воздуха, тем больше его растворяется в воде. Наоборот, при уменьшении давления растворенный воздух выделяется не только со свободной поверхности жидкости, но и внутри ее массы. При этом возникают мельчайшие пузырьки. Если давление продолжает снижаться, эти пузырьки увеличиваются до значительных размеров и могут всплывать вверх и исчезать на поверхности жидкости. Существенно то, что пузырьки в основном возникают не в сплошной массе воды, а там, где есть мельчайшие частицы какого-либо вещества, которое становится как бы зародышем пузырька, постепенно увеличивающегося в размерах после своего возникновения. Если температура воды дошла до температуры кипения, то в ней возникают пузырьки, заполненные парами воды.

Если вода подвергается длительному кипячению, то возникающие при кипении пузырьки, поднимаясь вверх, уносят из воды все, что может служить затравкой для возникновения новых пузырьков. При этом кипение при повторном нагревании воды затрудняется и вода может быть перегрета, т. е. ее можно нагреть выше нормальной температуры кипения, сообщая ей избыточную энергию.

В конце концов кипение в таких условиях все же возник-

кает. Сначала образуется очень немного отдельных пузырьков, которые стремительно растут и бурно поднимаются вверх. Вскипание происходит взрывообразно. Нечто подобное наблюдается и при очень быстром снижении давления в жидкости, насыщенной растворенным газом. Например, при открывании бутылки с шампанским или с газированной водой происходит, как известно, интенсивное вскипание жидкости. Такие явления могут достигать и очень крупных масштабов. Так, при извержении вулканов раскаленная жидкая лава поднимается из недр земли вверх к кратеру и давление в этой лаве снижается. Это может привести к тому, что в определенный момент растворенные в лаве газы начнут стремительно выделяться и объем лавы будет очень быстро расти до чрезвычайно мощных взрывов, разрушающих кратер вулкана и перемещающих огромные массы раздробленных скал.

Бывают взрывы при извержении вулканов, когда выделяющаяся энергия эквивалентна энергии взрыва миллионов тонн такого взрывчатого вещества, как тротил.

Примером этому может служить извержение вулкана Кракатау на небольшом острове между островами Ява и Суматра в Индонезии, происшедшее в августе 1883 г. При этом извержении произошел взрыв, звук которого был слышен на расстоянии более 3000 км. Приборы зарегистрировали воздушную ударную волну в атмосфере, которая три раза обошла вокруг земного шара. Взрывные газы имели объем до 20 км³, что соответствует взрыву 20 млн. т (20 Мт) тротила. Взрыв уничтожил (сбросил в океан) более половины острова и поднял огромную морскую волну, которая, достигнув берегов Явы и Суматры, погубила более 36 тыс. человек. И все это было результатом внезапного рождения бесчисленных газовых пузырьков в потоке лавы, поднимающейся из недр Земли в жерле вулкана.

* * *

Если в воде (или иной жидкости) мало растворенного газа и нет зародышей пузырьков, то такая вода хорошо выдерживает растягивающие усилия. Наоборот, если газа много и пузырьки возникают легко, то всякое снижение давления приводит к интенсивному вскипанию воды.

Любопытные последствия вызывает появление пузырьков в воде, находящейся в порах грунта. Обычно это происходит при фильтрации воды через грунт, когда вода переходит из мест с более высоким давлением в места, где это давление понижено. Возникающие в порах грунта пузырьки заполняют в основном наиболее широкие части этих пор. При этом пузырек сопротивляется всякому изменению его формы. Это обусловлено тем, что вследствие поверхностного на-

тяжения поверхность пузырька подобна сильно натянутой пленке. Она стремится иметь минимальную площадь при том или ином объеме пузырька. Как известно, минимальная площадь поверхности при заданном объеме имеется у шара. Именно поэтому пузырек, свободно плавающий в жидкости, имеет сферическую форму. Форму, возможно более близкую к шару, стремятся иметь и пузырьки в порах грунта. Если жидкость с такими пузырьками фильтрует в грунте, т. е. перемещается внутри грунтовых пор, то пузырьки проталкиваются между частицами грунта. При этом пузырьки должны менять свою форму. Они сопротивляются такой деформации тем сильнее, чем меньше их размеры. В результате грунт, содержащий воздушные пузырьки в воде, находящейся в порах грунта, значительно хуже пропускает воду, чем грунт, не содержащий пузырьков. Если при фильтрации воды через грунт выделяются воздушные пузырьки, то происходит «воздушное заиливание грунта», т. е. происходит закупоривание пор грунта воздушными пузырьками, так как если бы в них попали частицы мелко раздробленного ила.

* * *

При повышении давления в воде пузырьки воздуха сжимаются и на уменьшение их объема затрачивается некоторая энергия. В результате этого вспененная вода приобретает свойства амортизатора, смягчающего резкие колебания давления и снижающего быстро изменяющиеся скорости движения воды.

Можно образовать в воде завесу из воздушных пузырьков, если по дну водоема проложить трубу со множеством мелких отверстий и нагнетать на нее воздух с помощью компрессора или иным способом.

Такая воздушная завеса, сделанная при входе в порт, может гасить крупные морские волны, возникшие при шторме. Такая завеса может также значительно уменьшать давление в подводных ударных волнах, возникающих при взрыве. Опыты показывают, что такое снижение может быть очень значительным. Слой пузырьков может его снизить более чем в сто раз.

Известный шведский инженер Лаваль, изобретатель одного из типов паровой турбины, в свое время предлагал использовать подушку воды, насыщенной пузырьками, для того чтобы снижать сопротивление воды движению корабля. Это предложение по различным причинам осталось не осуществленным до сих пор. Однако оно не потеряло принципиального значения и в дальнейшем может еще найти эффективное применение на практике.

Кавитация

Если на жидкость, содержащую пузырьки, действует переменное давление, то при его уменьшении пузырьки увеличиваются в размерах, а при возрастании сжимаются. Каждый пузырек представляет собой что-то вроде маленького манометра.

Могут быть случаи, когда пузырьки заполнены паром той жидкости, в которой они возникли. В этом случае они могут легко исчезнуть при соответствующем повышении давления. Если давление повысилось быстрее, чем произошло исчезновение пузырьков, избыток давления жидкости над давлением пара этой жидкости будет производить ускорение жидкости при ее движении к центру пузырька. Скорость сжатия будет в этих условиях возрастать и может стать весьма большой. Если обозначить начальный радиус пузырька через R и радиус в какой-то определенный момент сжатия через r , то скорость сжатия пузырька будет в этот момент равна

$$v = \sqrt{\frac{2P}{3\rho} \left[\left(\frac{R}{r} \right)^3 - 1 \right]}.$$

Здесь P — избыточное давление, сжимающее пузырек, и ρ — плотность жидкости.

Обозначим через $v_{1/2}$ скорость, полученную при сжатии пузырька вдвое. Тогда расчет, основанный на этой формуле, даст следующие скорости при дальнейшем уменьшении размеров пузырька:

при сжатии в 3 раза	$v_{1/3} = 1,93 v_{1/2};$
» » в 10 раз	$v_{1/10} = 11,9 v_{1/2};$
» » в 100 раз	$v_{1/100} = 378 v_{1/2};$
» » в 1000 раз	$v_{1/1000} = 11\,900 v_{1/2}.$

Рост скорости движения поверхности жидкости свидетельствует о накоплении огромной энергии движения в слое жидкости, примыкающей к пузырьку. При сжатии пузырька все время уменьшаются объем и масса, имеющие высокую скорость, но зато энергия единицы массы непрерывно и очень быстро растет, потому что кинетическая энергия пропорциональна, как известно, квадрату скорости движения.

Таким образом, сжимающийся пузырек представляет собой своеобразный трансформатор энергии, повышающий ее концентрацию. Обычно в окружающем нас мире энергия передается из мест, где ее концентрация выше, в места с меньшей концентрацией. Теплота переходит с тел, нагретых до высокой температуры, к телам, менее нагретым; быстро движу-

щиеся тела тормозятся, передавая энергию движения другим телам, причем обычно основная часть энергии движения незаметно рассеивается, преобразуясь в теплоту. Именно это происходит при торможении автомашины или железнодорожного состава.

Явления, при которых происходит обратный процесс перехода энергии, рассеянной в большой массе, к малой массе, сопровождающийся резким ростом скорости и концентрации энергии, встречаются в природе очень редко и могут вызвать весьма необычные последствия. Это относится и к сжимающимся пузырькам. При сжатии и исчезновении пузырька в точке, где он сомкнулся, возникает столь высокая концентрация энергии, что происходит диссоциация молекул и ионизация атомов. При определенных условиях можно наблюдать мгновенную искру. Из места, где сомкнулся пузырек, расходится во все стороны по жидкости быстро гаснущая, но вначале очень интенсивная ударная волна. Все происходит так, как если бы в точке, где сомкнулся пузырек, произошел микроскопический взрыв заряда с очень высокой концентрацией энергии. Ударные волны этого рода могут быть зафиксированы в прозрачных жидкостях при помощи высокоскоростной фотосъемки или киносъемки. Это обусловлено тем, что жидкость в такой волне сжимается настолько высоким давлением, что происходит заметное изменение плотности и изменяется преломление света в ударной волне.

Если в жидкости при изменениях давления могут возникать небольшие пузырьки, то они обыкновенно образуются в точках, где имеются мельчайшие кусочки веществ, способных быть зародышами пузырьков. Обычно такие зародыши располагаются на поверхностях твердых тел, соприкасающихся с жидкостью. Возникающие при переменах давления пузырьки производят при своем последующем исчезновении очень сильное разрушающее действие на самые прочные материалы. Конечно, зона разрушения очень мала при каждом исчезновении пузырька. Но если давление колеблется в течение длительного времени и пузырьки многократно возникают и вновь исчезают, их разрушающее действие постепенно нарастает. Разрыхленная поверхность твердого тела, смачиваемая жидкостью, обычно покрывается все большим числом зародышей пузырьков и процесс разрушения вследствие этого нередко протекает ускоренно.

Такое явление получило название «кавитация» от латинского слова «кавитас» (cavitas), что означает пустота. Таким образом, кавитацией является перераспределение энергии в жидкости, обусловленное возникновением и исчезновением микроскопических пустот.

Вредные и полезные действия кавитации

В случае если гидротехнические механизмы, вроде гидротурбин, корабельных гребных винтов и т. п., спроектированы недостаточно хорошо, при движении воды около них возникает быстро протекающая пульсация давления. При этом всякое снижение давления приводит к быстрому возникновению многочисленных пузырьков в воде, примыкающей к металлическим деталям. При последующем повышении давления пузырьки сжимаются и создают точечные очаги высокой концентрации энергии. При этом соприкасающиеся с жидкостью поверхности твердых тел могут интенсивно разрыхляться и разрушаться. Самые прочные вещества не выдерживают многократных разрушающих импульсов пузырьков, пульсирующих вблизи их поверхности.

В этом состоит широко распространенное отрицательное действие кавитации. Чтобы спастись от него, необходимо особо тщательно проектировать и изготавливать все детали, соприкасающиеся с движущимися жидкостями, что вообще и достигается в большинстве случаев.

* * *

Кавитация, впрочем, может производить положительное действие. Если в специальной ванне создать с помощью какого-либо вибратора (например, управляемого электричеством и действующего с помощью электричества) быстро изменяющееся давление, то можно путем создаваемой таким способом в ванне кавитации обрабатывать самые твердые и прочные материалы. При этом вместо резцов из сверхтвердой стали или алмазов успешно действуют мельчайшие пузырьки, не имеющие какой-либо прочности и жесткости.

Взрыв и антивзрыв

Любопытные явления можно наблюдать при подводном взрыве, если вблизи заряда в воде имеется воздушная полость — пустой водонепроницаемый ящик, пустая закупоренная бутылка и т. п. При взрыве вследствие высокого давления взрывных газов они быстро расширяются и вытесняют воду во все стороны. При наличии полости вблизи места взрыва высокое давление в воде приводит к быстрому уменьшению объема полости. Вода интенсивно перемещается от центра взрыва к центру полости. Расчеты показывают, что линии движения воды в этом случае имеют ту же самую форму, как электрические или магнитные силовые линии, идущие от положительного электрического заряда к отрицатель-

ному заряду или соответственно от северного магнитного полюса к южному полюсу. Это движение возникает следующим образом. Сразу после взрыва в воде возникает сферическая подводная ударная волна.

Когда эта волна, распространяясь во все стороны от места взрыва, проходит мимо полости, вода устремляется к центру этой полости и вслед за фронтом ударной волны в воде начинает распространяться фронт волны разрежения, за которым направление движения воды резко меняется. Вместо того чтобы удалиться радиально от места взрыва, струи воды резко искривляются, направляясь от места взрыва к центру сжимающейся полости. Это показано на рис. 11. Наиболее интенсивный поток воды возникает по направлению, соединяющему центр взрыва с центром полости.

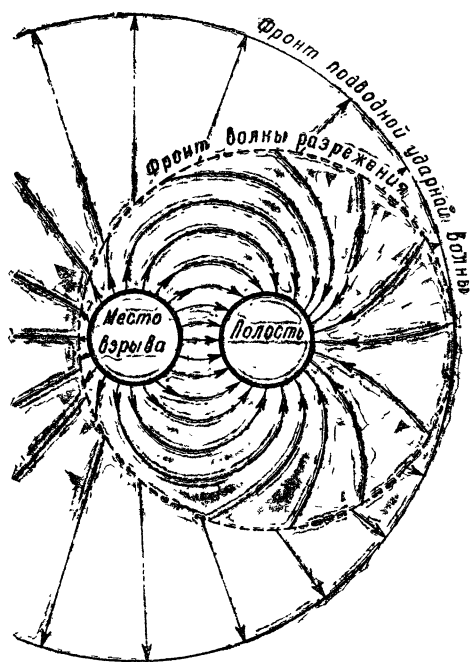


Рис. 11. Линии движения жидкости после взрыва вблизи полости, не заполненной жидкостью.

Таким образом, при рассматриваемых явлениях образуются две смежные области с движением, имеющим сходный характер, но отличающимся по своему направлению. От места взрыва идут расходящиеся потоки воды, а к центру полости эти потоки сходятся. На этом основании можно говорить, что в воде наряду с обычным взрывом возникает своеобразный «антивзрыв». Впрочем, такое сопоставление спра-

ведливо только для первой стадии процесса. При дальнейшем развитии движения воды полость сомкнется, образуя зону очень сильно сжатой жидкости. Вместе с тем расширение взрывных газов замедлится и несколько позднее остановится вовсе. Тогда начнется перемена направлений движения. Из зоны сильно сжатой воды пойдет во все стороны новая ударная волна. Вследствие различных потерь энергии эта волна будет слабее первой, возникшей при взрыве, но по своему общему характеру обе волны будут вполне похожи друг на друга. Вторая волна пройдет мимо полости, заполненной разреженными, переставшими расширяться взрывными газами, и эта полость начнет сжиматься. От нее по воде пойдет новая волна разрежения и за ее фронтом возникнет поток воды, идущей от места сжатия полости к первоначальному месту взрыва. Такие смены картины движения могут повториться несколько раз, постепенно ослабевая вследствие потерь энергии.

Рассмотренное явление взрыва и антивзрыва имеет весьма большое практическое значение при проведении подводных взрывных работ. Если, например, необходимо действием взрыва перерезать в воде сваю или металлический стержень, то это можно сделать просто, взорвав заряд, укрепленный на свае или стержне около места перерезывания. Однако такой способ требует сравнительно больших зарядов.

Если же, помимо заряда, против него к свае или стержню привязать пустую закрытую канистру или иную наполненную воздухом емкость, то успешного действия взрыва можно достигнуть, применяя заряд в 5—10 раз меньшего веса, потому что полость концентрирует энергию взрыва и обеспечивает направленное действие заряда в воде. Вместе с тем полость, способствуя концентрации энергии взрыва в промежутке между зарядом и полостью, значительно уменьшает действие взрыва на значительных расстояниях от заряда. Это обстоятельство имеет большое практическое значение при производстве взрывных работ вблизи мостов, гидростанций, шлюзов, кораблей и разных других объектов, создавая хорошую защиту от разрушительного действия взрыва на более или менее значительных расстояниях.

Взрыв вблизи свободной поверхности воды

Направляющее действие полости на поток энергии взрыва проявляется и во многих других случаях. При этом существенно не наличие какой-либо замкнутой полости, а влияние просто свободной поверхности воды, отделяющей плотную воду от воздуха, который в обычных условиях примерно в 800 раз менее плотен, чем вода

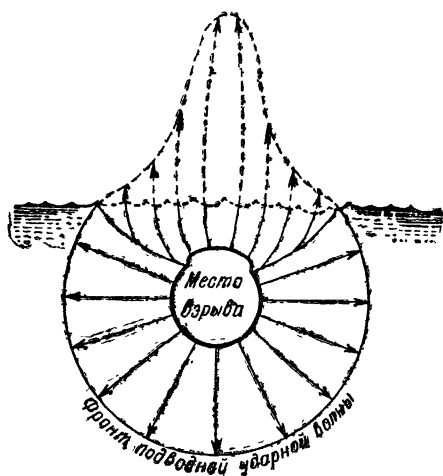


Рис. 12. Линии движения жидкости при взрыве вблизи от свободной поверхности и схема образования фонтана над местом взрыва.

Это показано на рис. 12. Форма фонтана свидетельствует о значительной концентрации энергии взрыва около вертикали, проходящей через центр заряда в рассматриваемой картине. Расчет показывает, что на расстоянии от оси фонтана равной глубине расположения заряда под поверхностью воды высота выброса воды в 8 раз меньше, чем в центре.

Если за ширину струи, выброшенной вверх, принять размер, в пределах которого высота подъема уменьшается вдвое, то окажется (на основе соответствующих расчетов), что эта величина равна

$$b = 2w \sqrt[3]{\sqrt[3]{2}-1} \approx w.$$

Здесь w — глубина расположения заряда взрывчатого вещества под поверхностью воды.

Электрический разряд в капиллярной трубке

Направленность выброса воды при взрыве можно существенно увеличить, если поверхность воды имеет некоторую вогнутость. Если взять стеклянную трубку диаметром примерно 0,5 см (или меньше), то поверхность воды в этой трубке вследствие смачивания ведою поверхности стекла (капиллярность) будет искривлена — края у стенок трубки приподняты, а середина поверхности опущена. В такой трубке

произвести маленький взрыв заряда взрывчатого вещества весьма неудобно и трудно. Однако такой взрыв можно достаточно просто заменить электрической искрой между двумя проволочками, запаянными в стенах трубки. Присоединяя эти проволочки к электрическому конденсатору, имеющему достаточный электрический заряд, можно получить внутри трубки в воде мощную электрическую искру. Под ее действием некоторая часть воды мгновенно испарится и расширяющиеся пары произведут сильное давление на окружающую воду. Таким образом, возникает действие, аналогичное действию взрыва очень маленького заряда. При этом вдоль оси трубки с криволинейной поверхности воды поднимается чрезвычайно тонкая и весьма быстро движущаяся струйка воды. Эта струйка имеет такую скорость, что способна пробивать тонкие преграды из не очень прочных материалов.

Несмотря на то что такое явление осуществляется весьма просто и безотказно и выражено очень ярко, оно пока еще не нашло себе целеустремленного практического применения. Здесь, по-видимому, имеется плодотворная возможность для деятельности изобретателей и рационализаторов.

Падающая пробирка

Выброс тонкой струи жидкости, выраженный притом очень ярко, можно получить при помощи еще более простых и доступных средств.

Возьмем для эксперимента этого рода самую простую стеклянную химическую пробирку и заполним ее любой жидкостью, смачивающей стекло. Держа в руке такую пробирку на высоте нескольких сантиметров над поверхностью стола, дадим ей возможность, сохраняя вертикальное положение, упасть и удариться низким выпуклым концом о поверхность стола. Как только произойдет такой удар, с поверхности жидкости в пробирке стремительно поднимется очень тонкая струя жидкости, которая, разбиваясь на капли, может достигнуть весьма значительной высоты.

Чем вызвано это явление? При ударе о поверхность стола пробирка и находящаяся в ней жидкость почти мгновенно останавливаются. При таком резком торможении в жидкости возникают очень высокие отрицательные ускорения. В первом приближении можно принять, что эти ускорения настолько превосходят ускорение силы тяжести, насколько высота падения пробирки больше микроскопического пути ее торможения при ударе о поверхность стола. При действии таких отрицательных ускорений жидкость становится как бы очень тяжелой и ее поверхность, искривленная капиллярными си-

лами, выравнивается. Края опускаются вниз, а средняя часть немного поднимается. Путем простого расчета можно установить следующее. Пусть край поверхности жидкости в пробирке расположен выше средней части этой поверхности на величину h . Пусть высота падения пробки y и путь ее торможения при ударе равен Δy . Тогда высота, на которую может подняться возникающая при ударе струйка жидкости, оказывается равной

$$H = h \frac{y}{\Delta y} .$$

Если, например,

$$h = 0,1 \text{ см},$$

$$y = 10 \text{ см},$$

$$\Delta y = 10^{-3} \text{ см}, \text{ то}$$

$$H = 1000 \text{ см} = 10 \text{ м}.$$

Фактически струйка на такую высоту подняться не может, потому что этому препятствует сопротивление воздуха. Однако и в воздухе подъем струйки может составить несколько десятков сантиметров и поэтому описываемое явление проявляется очень ярко.

К явлениям, имеющим сходство с теми, которые рассмотрены выше, относится самое обычное, встречающееся повсюду в окружающей нас жизни — это всплеск воды при падении в нее различных тел. При входе тела в воду возникает вокруг него свободная от воды полость довольно больших размеров. Под действием силы тяжести вода устремляется со всех сторон внутрь полости, причем сходящиеся со всех сторон водяные струи сливаются вместе и образуют мощный всплеск, поднимающийся на значительную высоту. Если в воду падает тело, имеющее правильную цилиндрическую симметрию и закругленную головную часть, получается особенно правильная и значительная по размерам полость. При смыкании этой полости образуется всплеск значительной высоты. Характерным следует считать то, что головная часть такого всплеска поднимается выше того уровня, с которого упало тело в воду. Это значит, что при рассматриваемом явлении происходит такое перераспределение энергии, когда некоторая часть всей движущейся массы воды получает скорость и энергию, отнесенную к единице массы, превосходящие то, что было у падающего тела в момент его встречи с поверхностью воды. В этом случае мы имеем пример гидродинамического трансформатора энергии, повышающего ее концентрацию подобно тем, которые были рассмотрены выше,

Трансформаторы импульса

Как известно, одним из основных принципов механики является закон сохранения импульса силы (сохранения количества движения). Этот закон указывает на то, что в замкнутой механической системе сумма произведений движущихся масс на соответствующие скорости их движения является в принципе величиной неизменной. Импульс или количество движения можно измерять различными способами. Например, можно установить сосуд на пружине и измерять количество движения, сообщаемого этому сосуду, по величине максимального сжатия этой пружины. Сосуд можно заполнить какой-либо жидкостью или другой легко деформируемой массой для плавной амортизации удара тела, падающего в сосуд. Таким же способом можно определять скорость движения пуль огнестрельного оружия, если производить выстрелы вертикально сверху вниз. Если такие эксперименты производить без учета обратного выброса жидкости, можно получить совершенно неправильные, весьма завышенные данные об импульсе и о скорости ударяющегося тела. Скорость может быть завышена до десяти раз. Такие результаты получаются потому, что основная часть регистрируемого импульса возникает не от удара тела, а от реактивного действия струи жидкости, возникающего после удара.

На основании простых расчетов можно установить, что импульс движущегося тела, имеющего массу m и энергию движения E , равен $I = \sqrt{2Em}$.

При ударе тела о жидкость энергия, передаваемая жидкости согласно закону сохранения энергии, равна энергии ударяющегося тела. Если потери на внутреннее трение в жидкости невелики, то принесенная телом энергия передается столбу жидкости, выбрасываемой после проникновения в жидкость ударяющегося тела. Как показывают расчеты и непосредственные эксперименты, масса жидкости, выбрасываемой наружу после удара, может в десятки раз превосходить массу ударяющегося тела. При особо благоприятных условиях это превосходство может доходить до 100 раз. Это значит, что импульс, осуществляемый за счет выброса жидкости, после удара может в 10 раз превосходить первоначальное количество движения у ударяющегося тела.

Если удар производится в наклонном направлении относительно поверхности, то направление импульса ударяющегося тела при отсутствии выброса жидкости будет совпадать с направлением удара, т. е. направлением движения тела, наносящего удар. Выбрасываемая при косом ударе масса жидкости, как правило, движется перпендикулярно к поверхности жидкости. Это значит, что общий импульс, возникающий при косом ударе движущегося тела по поверхности жидкости,

должен иметь направление, близкое к перпендикуляру к поверхности жидкости, воспринимающей удар. С этим связано также и то, что форма кратера, образующегося при косом ударе весьма быстро движущегося тела, является достаточно симметричной и не позволяет определить направления, по которому был нанесен удар. Эта характерная особенность резко выражена у всех кратеров на лунной поверхности, хотя несомненно, что метеорные тела могут наносить удары по лунному грунту по весьма разнообразным направлениям.

Немногочисленные остатки метеорных кратеров на поверхности Земли также позволяют сделать вывод о полном отсутствии каких-либо указаний относительно направлений удара при возникновении этих кратеров.

3. ФИГУРЫ ИЗ ЖИДКОСТИ

Форма жидкости в космических условиях

Все явления, которые были рассмотрены выше, происходили в обычных условиях на Земле или других крупных небесных телах, где действует значительная сила тяжести. Если перейти к условиям, которые имеются в космосе, то окажется необходимым учесть много новых обстоятельств.

Рассмотрим поведение жидкостей на каком-либо спутнике Земли или другого сравнительно крупного небесного тела. Допустим, что спутник движется по идеальной круговой орбите с постоянной скоростью и это движение не искажается никакими аномалиями гравитационного поля. В системе такого спутника будет наблюдаться полная, идеальная, невесомость по линии, совпадающей с орбитой центра массы спутника. Если некоторые массы жидкости на спутнике расположены так, что центры этих масс совпадают с указанной линией, то определяющее значение при установлении формы таких жидких масс будет иметь поверхностное натяжение жидкости. Поверхностный слой жидкости подобно тонкой натянутой пленке будет стремиться иметь минимальную площадь. Это должно привести к тому, что жидкость превратится в шарообразную каплю. Образовавшаяся капля может иметь очень большие размеры. Однако такая закономерность проявится только тогда, когда жидкость не соприкасается с твердыми телами, которые она смачивает, т. е. молекулы этой жидкости притягиваются к молекулам соответствующего твердого тела. В таком случае жидкость приобретает форму, при которой суммарная площадь твердого тела и растекающейся по его поверхности жидкости была бы минимальной. Если размеры и форма твердого тела таковы, что оно может полностью потонуть в сферической капле жидкости, объем

которой увеличен за счет объема твердого тела, то это тело будет поглощено каплей. Оно уйдет полностью внутрь капли, будет, так сказать, «съедено» массой жидкости. Если размеры твердого тела велики, то жидкость растечется по одной или нескольким граням так, чтобы на ребрах поверхность жидкости и поверхность твердого тела образовывали бы совместно исходящий двугранный угол.

Если же жидкость не будет соприкасаться ни с какими твердыми телами и будет двигаться в виде компактной массы по соответствующей орбите спутника, то такая жидкая масса будет иметь в первом приближении сферическую форму.

Помимо сил поверхностного натяжения, в крупной массе жидкости заметную роль будут играть гравитационные силы, обусловленные известным законом всемирного тяготения. Гравитационные силы будут действовать подобно силам поверхностного натяжения, стремясь сохранить сферическую форму масс жидкости. Если размеры капли жидкости окажутся не исчезающе малыми по сравнению с радиусом орбиты, то на массу жидкости будут действовать еще так называемые приливообразующие (приливные) силы. Такие силы действуют, как известно, на частицы массы, не находящиеся на линии идеальной невесомости (совпадающей, как указано выше, с линией орбиты центра массы). Частицы, находящиеся по сторонам от плоскости орбиты центра массы, притягиваются к этой плоскости. Частицы же, находящиеся выше и ниже уровня орбиты, отталкиваются от этого уровня. Вследствие этого сферическая капля в космосе должна несколько растянуться по направлению радиуса орбиты и сжаться по нормали к плоскости орбиты. Жидкость в первом приближении превратится в трехосный эллипсоид, наибольшая ось которого направлена по линии, соединяющей центры капли и небесного тела, вокруг которого она движется. Наименьшая ось эллипсоида будет направлена перпендикулярно орбите.

Если масса жидкости очень велика, то приливообразующие силы растянут ее в направлении радиуса орбиты настолько сильно, что капля разобьется на более мелкие части, дальнейшее движение которых будет достаточно сложным. Это движение мы здесь более подробно рассматривать не будем.

Совершенно иначе будет вести себя жидкость, если она находится внутри корпуса спутника и имеет контакт со стенками этого корпуса. Чтобы рассмотреть этот вопрос, допустим, что корпус спутника имеет форму параллелепипеда, большая ось которого совпадает с радиусом орбиты, а малая ось перпендикулярна плоскости орбиты. Такое положение корпуса спутника будет устойчивым относительно приливо-

образующих сил и при отсутствии других воздействий на спутник будет сохраняться неограниченно долго, если спутник движется по идеальной круговой орбите. Допустим, что жидкость заполняет часть внутреннего свободного объема параллелепипеда. В этом случае наиболее устойчивым состоянием будет такое, когда жидкость находится на одном из торцов длинной части параллелепипеда или разделена на две массы, находящиеся на противоположных торцах.

Поверхность жидкости, полностью смачивающей стенки корпуса спутника, будет сильно вогнута. У стенок корпуса жидкость будет ограничена такой криволинейной поверхностью, которая не образует заметного угла со стенками. Поверхность стенок будет плавным продолжением поверхности жидкости. В любой части поверхности жидкости можно определить ее кривизну, построив мысленно две дуги на этой поверхности, лежащие во взаимно перпендикулярных плоскостях. Обозначив радиусы кривизны этих дуг R_1 и R_2 , можно для поверхности, образованной капиллярными силами (существенно превосходящими рассмотренные выше приливообразующие силы), написать следующее соотношение:

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \text{const.}$$

Если сечение корпуса спутника прямоугольное, то форма поверхности жидкости будет весьма сложной. Иначе дело обстоит, если корпус спутника представляет собою круглый удлиненный цилиндр, ось которого совпадает с радиусом орбиты. Если жидкость находится в торцах цилиндра и объем жидкости достаточно велик, то она будет ограничена правильными полусферическими поверхностями. Чем значительнее капиллярные силы жидкости превосходят приливообразующие силы, тем точнее будет форма поверхности жидкости приближаться к идеальной полусфере.

Оптические приборы из жидкости

Если в условиях космической почти полной невесомости жидкость помещена в чашку с острыми краями, то сферическая поверхность жидкости будет всегда иметь своей границей смачиваемые края чашки. В этих условиях можно, увеличивая объем жидкости в чашке, уменьшать кривизну поверхности и весьма точно устанавливать заданную кривизну. Это достигается точным регулированием объема жидкости в чашке.

Жидкость может быть, в частности, любым расплавленным металлом. Охлаждаясь и затвердевая, этот металл может сохранить форму поверхности, созданную капиллярными

силами. Следовательно, описанный способ может рассматриваться как перспектива для создания весьма правильных сферических зеркал. Впрочем, при реализации такого способа могут встретиться трудности, если затвердевание материала, образующего сферическое зеркало, будет сопровождаться кристаллизацией с соответствующим изменением объема. Кристаллизация может заметно испортить правильность сферической поверхности, особенно если остывание и затвердевание происходят в разных частях материала не одновременно.

Кроме этого, точные сферические зеркала недостаточно совершенны и с оптической точки зрения. Дело в том, что электромагнитные волны (световые, инфракрасные, ультрафиолетовые), отражаясь от периферической части сферического зеркала, сходятся в точке (фокусе), который расположен ближе к зеркалу, чем точка схождения лучей, отраженных от центральной части зеркала, это общеизвестное явление называется сферической аберрацией.

Чтобы создавать идеальное схождение всех отраженных лучей в одной точке и таким путем обеспечить получение высококачественного изображения источника этих лучей, а также получить возможность точно измерять энергию излучения, следует отказаться от зеркала со сферической вогнутостью. Известно, что должную точность схождения (фокусировки) отраженных лучей в одной точке обеспечивает вогнутое зеркало, представляющее собой параболоид вращения. Такие зеркала отличаются от сферических зеркал тем, что у них кривизна поверхности зеркала меньше на периферии зеркала и больше в его центре.

Такое зеркало может быть автоматически создано в космических условиях достаточно легко и просто. Задача решается так. Необходимо прежде всего чашку с жидкостью (расплавленный металл) снабдить реактивным двигателем, расположенным под дном чашки на ее оси. Двигатель должен обеспечить ускоренное движение чашки по направлению ее оси с некоторым (достаточно значительным) ускорением j .

Кроме того, необходимо сообщить чашке вращение около ее оси при помощи пары реактивных двигателей, расположенных на краях чашки. Можно также обеспечить вращение при помощи какого-либо двигателя (например, электромотора), ось которого совпадает с осью чашки. Этот двигатель можно поместить между дном чашки и тыльной частью реактивного двигателя. Двигатель должен раскручивать маховик. Тогда согласно закону «действие равно противодействию» двигатель и вся остальная система, с которой он соединен, станут вращаться в противоположную сторону.

При вращении чашки в ней и в заполняющей ее жидкости возникнут центробежные силы, стремящиеся сместить жид-

кость к краям чашки. Одновременно осевое ускорение j будет прижимать жидкость к дну чашки.

Расчет показывает, что в описанных условиях поверхность вращающейся жидкости приобретает форму параболоида вращения. Таким образом, можно обеспечить с значительной точностью формирование параболического зеркала. Как известно, оптические свойства вогнутого параболического зеркала определяются его фокусным расстоянием F , т. е. расстоянием от зеркала до точки, где расположен главный фокус зеркала. Главным фокусом называется центр, в котором сходятся после отражения от зеркала лучи, падающие на него потоком, параллельным оси зеркала.

Расчет показывает, что параболическое зеркало заданной формы можно получить при любом значении осевого ускорения. Для этого нужно сообщить массе, образующей зеркало, вращение со временем одного оборота, равным

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{2F}{j}}.$$

Любопытно то, что время одного оборота в этих условиях оказывается равным времени одного полного колебания математического маятника (точечный груз на невесомой нити), длина которого равна удвоенному фокусному расстоянию F . Этот маятник качается в системе, движущейся ускоренно с ускорением, равным j .

Величину ускорения j и соответствующие центробежные ускорения можно в рассматриваемых, легко осуществимых условиях космического полета сделать достаточно большими, чтобы обеспечить точное образование параболического зеркала, несмотря на искажающее действие кристаллизации при остывании расплавленного металла и других нежелательных воздействий.

Необходимо, конечно, иметь в виду то, что осуществление описанной космической технологии приготовления зеркал потребует преодоления очень многих мелких трудностей и препятствий. Однако из сказанного следует, что космос может дать такие технологические возможности, о которых нельзя даже мечтать в условиях проведения работ на земной поверхности. Конечно, можно и на Земле устроить вращающийся сосуд и формировать в нем из расплавленного металла параболическое зеркало. При этом расчет скорости вращения можно провести, как указано выше. Однако вместо ускорения j необходимо при расчете взять ускорение силы земного притяжения g . Ось вращения при этом следует расположить вертикально. Таким путем, по-видимому, окажется возможным и на Земле изготовить сравнительно неплохое параболическое зеркало. Однако вращение в земных условиях в

принципе отличается от вращения объекта, свободно движущегося в космосе. В земных условиях окажется необходимым опереть ось вращающейся массы на те или иные подшипники. Это приведет к возникновению хотя и очень небольших, но в принципе неустраняемых вибраций, которые будут в некоторой мере искажать идеальную параболическую поверхность изготавливаемого зеркала.

Параболические зеркала высокой точности могут приобрести при дальнейшем развитии как земной, так и космической техники исключительно широкое применение. Они необходимы для управления лучами квантовых генераторов, направляемых на большие расстояния. Параболические зеркала необходимы при различных наблюдениях естественных небесных тел и движущихся на больших расстояниях космических кораблей, для регистрации свойств излучений, идущих с малых участков поверхности Солнца и планет. Чем короче электромагнитные волны, фокусируемые зеркалом, тем точнее должна быть отделана его поверхность. Известно, каких огромных усилий требует точная доводка крупных вогнутых зеркал для мощных астрономических инструментов. Возможно, что свойства жидкостей когда-либо в будущем помогут обеспечивать должную точность изготовления зеркал существенно более эффективно.

Жидкие оптические линзы

Очень многие задачи в области оптики — фотосъемка, киносъемка и кинопроекция, наблюдение далеких и очень малых объектов (телескоп и микроскоп) — как известно, осуществляются с помощью оптических приборов, главной

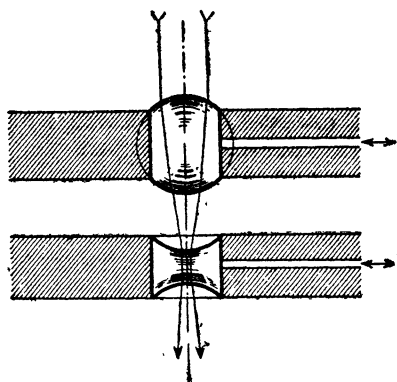


Рис. 13. Жидкие оптические линзы; двояковыпуклая и двояковогнутая.

частью которых являются линзы из стекла или другого прозрачного материала. В условиях невесомости можно такие линзы изготавливать из различных жидкостей, помещенных в виде крупных капель внутри крупных отверстий или колец, выполненных из материала, хорошо смачиваемого жидкостью, примененной в качестве материала для линз. Действие капиллярных сил приведет к тому, что жидкая линза будет ограничена сферически-

ми выпуклыми или вогнутыми поверхностями. Оптические свойства линз зависят, как известно, от кривизны их поверхностей. У жидких линз эту кривизну можно изменять с огромной точностью, добавляя или удаляя из линзы через тонкую трубочку соответствующее количество жидкости (рис. 13).

Жидкие оптические линзы малого размера могут быть и в земных условиях. Однако сила тяжести искажает их форму и достаточно удовлетворительно они могут работать только тогда, когда их оптическая ось расположена вертикально. Пользуясь малыми жидкими линзами, любители могут изготовить объектив для самодельного микроскопа и другие оптические инструменты.

Капиллярные силы в технологии пластмасс и стекла

Не следует думать, что свойства жидкостей, рассмотренные выше, применительно к необычным условиям космоса и перспективам технологии далекого будущего не имеют значения в обычных условиях, давно освоенных на Земле в различных областях производства. Прежде всего следует напомнить, что громадное количество изделий из обычного стекла получает определенную форму и безупречно гладкую поверхность именно вследствие действия капиллярных сил.

Работа мастеров-стеклодувов, изготавливающих как массовую продукцию, так и высокохудожественные уникальные вещи, основана главным образом на управлении такой вязкой жидкостью, какой является расплавленная стеклянная масса, при помощи дутья, т. е. воздуха повышенного давления, поверхностного натяжения и силы тяжести. Целеустремленное сочетание этих факторов позволяет изготавливать тонкостенные баллоны ламп и электронных приборов, имеющих правильную и целесообразную форму и строго выдерживаемые размеры.

Не меньшее значение имеют поверхностные (капиллярные) силы при обработке пластмасс, которые в определенной стадии их изготовления являются вязкими жидкостями. Эти жидкости могут быть вытянуты в тончайшие нити, в частности, такие, которые имеют идеально правильную цилиндрическую форму. Эти жидкости можно превратить в тонкие и тончайшие пленки равномерной толщины, выдерживаемой с достаточной точностью, имеющими совершенно гладкую однородную поверхность. Из пластмасс можно формировать шарики малых размеров, имеющие определенный диаметр, и очень многие другие изделия, которые было бы невозможно сделать, не используя основных свойств жидкостей, из которых они возникли.

Системы зубчатых колес в жидкости

Представим себе, что на дне реки выкопана глубокая яма с вертикальными стенками. Вода реки, протекая над такой ямой, каким-то образом взаимодействует с водой в яме и увлекает ее за собой. Однако движение жидкости в яме ограничено вертикальными стенками. Этого условия достаточно, чтобы сплошная масса воды разделилась на отдельные звенья, движущиеся во взаимодействии друг с другом, однако сохраняющие сколь угодно длительное время свою индивидуальность, свой объем и характер движения.

Итак, поток воды в реке увлекает за собой верхний слой воды, заполняющий яму. Этот слой движется вместе с водой реки и подходит к вертикальной стенке ямы. Здесь он уже не может двигаться дальше вместе с водой реки. Поток речной воды не позволяет этому слою подняться вверх, поэтому остается только одна возможность — повернуть вниз. Это и происходит. Однако движение вниз оказывается ограниченным. Дело в том, что верхний слой воды, увлекаемый течением реки, уходит от соответствующего откоса ямы и в освободившееся место перемещается вода из расположенного ниже слоя. В результате весь этот слой смещается навстречу течению. Таким образом, в верхней части воды, заполняющей яму, возникает вращение ее около горизонтальной оси. Эта

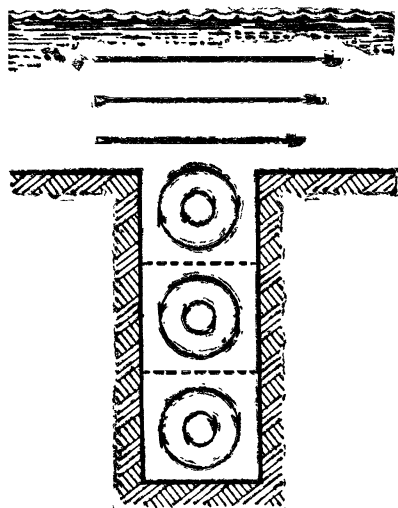


Рис. 14. Схема возникновения системы взаимно связанных вихрей в воде, заполняющей яму на дне реки.

часть воды преобразуется в своеобразное жидкое колесо, устойчиво сохраняющее свое место, свою массу и направление своего движения. Это видно из рис. 14. Верхнее жидкое колесо или, точнее, водяной вихрь охватывает массу, высота и ширина которой практически одинаковы. Поэтому такой вихрь не может вытянуться в вертикальном направлении и захватить воду в пределах глубины всей ямы. Однако движение не может не проникнуть глубже. Это проявляется в появлении ниже верхнего вихря еще двух. При этом верхний из них, так сказать, цепляясь за воду самого

верхнего, получает вращение в противоположную сторону. Самый нижний вихрь, увлекаемый вихрем, находящимся над ним, вовлекается в движение наподобие зубчатого колеса, входящего в систему трех колес, вращающихся так, как показано на рис.

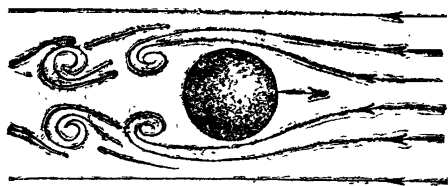


Рис. 15. Образование вихрей при обтекании жидкостью (или газом) цилиндра (или шара).

14. Здесь изображена устойчивая система, способная существовать в неизменном состоянии достаточно длительное время.

Впрочем, возможны случаи, когда полной устойчивости нет и в процессе движения возникают все новые и новые замкнутые вихри. Это обусловлено тем, что вихрь в жидкости может как бы наматывать на себя окружающую жидкость и увеличивать при своем вращении свою массу и размеры. В конце концов вихрь приобретает такие размеры, при которых он перестает быть устойчивым. От него отделяется небольшой вновь возникший вихрь, который увлекается потоком, после чего возникает новый вихрь и вихревая дорожка растягивается по дну реки. Такие вихревые дорожки возникают также за движущимися телами, за неподвижными преградами, обтекаемыми как жидкостями, так и газами. Вихревая дорожка этого рода показана на рис. 15. Возникновение новых вихрей возможно тогда, когда скорость движения достаточно велика, когда размеры возникающих вихрей также велики.

Если плотность жидкости ρ умножить на скорость жидкости v и на линейные размеры l зоны, где возникают вихри, и разделить полученное произведение на коэффициент вязкости η , то получится величина

$$\frac{\rho v l}{\eta},$$

которая называется критерием Рейнольдса по имени автора, впервые установившего эту величину.

Критерий Рейнольдса является величиной, не зависящей от единиц, в которых выражены входящие в него величины, потому что произведение $\rho v l$ выражается в тех же единицах, что и коэффициент вязкости. Другими словами, ρ является безразмерной или отвлеченной величиной.

Критерий Рейнольдса зависит от формы того движения, для которого определяют условия появления вихрей. Если, например, имеется течение жидкости в трубе круглого сече-

ния и величину l приравнять диаметру трубы, то при любой жидкости начинают возникать вихри вдоль стенок трубок, когда Re становится больше 2200 ± 200 .

Следует учесть, что согласно кинетической теории вязкости (основанной на изучении взаимодействия движущихся молекул) коэффициент вязкости равен $\eta = \rho c \lambda$.

Здесь c — средняя скорость движения молекул и λ — средняя длина свободного пробега молекул (т. е. пробега от одного соударения до другого с соседними молекулами). На основании сказанного, можно написать

$$Re = \frac{v}{c} \cdot \frac{l}{\lambda}.$$

Эта формула позволяет сделать вывод о том, что вихри возникают тем легче, чем больше скорость жидкости по отношению к скорости молекул и чем больше размеры вихря по сравнению с размером среднего пути, проходимого молекулами. Существенно то, что критерий Рейнольдса не зависит от химического состава и температуры и одинаково применим к движению жидкостей и газов. К твердым телам этот критерий не применяют потому, что он не включает величины, определяющие прочность твердых тел. Однако при очень высоких скоростях и давлениях, когда самые прочные металлы текут наподобие жидкостей, не исключена возможность применения критерия Рейнольдса.

4. ТВЕРДЫЕ ТЕЛА, ПОДОБНЫЕ ЖИДКОСТЯМ

Вибрирующий песок

Твердые тела могут приобретать свойства жидкости, как указано было выше, при очень высоких давлениях, когда силы деформации существенно больше сил, определяющих прочность вещества. Однако это не единственный способ придать твердому телу свойства жидкости.

Есть особый вид твердых тел, называемый сыпучими телами. К ним принадлежат разнообразные порошки. Характерным представителем сыпучих тел является обыкновенный сухой песок.

Если такой песок подвергнуть достаточно сильным вибрациям, то он приобретает свойства жидкости. Простейшим способом проведения соответствующего эксперимента является следующий. На пружинах устанавливается массивная горизонтальная металлическая плита. На этой плите крепятся две подставки с подшипниками, через которые проходит массивная ось. Рядом с ней устанавливается точно такая же

другая ось. Обе оси соединяются с помощью шестерен равного диаметра. Вследствие этого при вращении одной оси другая вращается тоже с такой же скоростью, но в противоположном направлении. На осях укрепляются небольшие одинаковые грузы так, чтобы их центры не совпадали с осями вращения и чтобы при вращении оба груза одновременно поднимались вверх и одновременно опускались вниз. Система приводится в движение при помощи гибкого вала от электромотора, установленного на неподвижном фундаменте.

Над этим механизмом на подставке, жестко прикрепленном к плите, укрепляется металлический цилиндр, заполняемый песком или любым другим сыпучим телом. Когда механизм описанного вибратора приводится в движение, сосуд с песком начинает вибрировать, т. е. происходит его колебательное движение с амплитудой, лежащей обычно в пределах миллиметра, и с частотой порядка нескольких десятков колебаний в секунду. Эти величины могут вообще изменяться в широких пределах без какого-либо изменения характера явлений, которые будут описаны дальше.

Вибрирующий в сосуде песок несколько увеличивает свой объем по сравнению с состоянием, когда вибрации нет. Песок становится также чрезвычайно подвижным. Если поверхности песка при отсутствии вибраций придан некоторый уклон, то при вибрировании, даже очень слабом, угол откоса приближается к нулю и поверхность песка становится горизонтальной, как у жидкости, налитой в сосуд.

Если на поверхность вибрирующего песка положен предмет, материал которого имеет плотность, превосходящую плотность песка, то этот предмет тонет так, как если бы он находился в соответствующей жидкости. Наоборот, если на дне сосуда внутри вибрирующего песка помещен предмет, материал которого менее плотен, чем песок, то этот предмет всплывает немедленно вверх и плавает на поверхности в соответствии с общеизвестным законом Архимеда.

Если сосуд с вибрирующим песком достаточно велик, то в него можно погрузить игрушечный катер с электромоторчиком, вращающим гребной винт, и катер будет плавать в песке, как в воде.

Если вибрации окажутся достаточно интенсивными, то в песке возникнет быстрый подъем песка вверх около оси сосуда и опускание вниз у его стенок. В массе песка возникнет вихрь в форме замкнутого кольца (тор), заполняющего сосуд. Такое явление весьма напоминает движение жидкости в сосуде, интенсивно подогреваемом снизу. Ввиду того что сильно нагретая вода имеет меньшую плотность, чем вода, нагретая в меньшей степени, она всплывает вверх вдоль оси сосуда. Ее замещает менее нагретая вода, опускающаяся вниз вдоль боковых стенок сосуда. Такая циркуляция (движе-

ние) нагреваемой воды называется конвекцией. Конвекция в вибрирующем песке вызвана тем, что в центре сосуда степень разрыхления песка выше, чем около стенок. Трение частиц песка о стенки сосуда уменьшает интенсивность вибраций и степень разрыхления песка. Поэтому песок у стенок опускается вниз и вытесняет вверх более сильно вибрирующий и, следовательно, более разрыхленный и легкий песок центральной зоны.

При экспериментах можно легко получить очень сильную вибрационную конвекцию песка. Чтобы продемонстрировать силу этой конвекции, можно опустить сверху в центральную зону вибрирующего песка повернутый дном вверх тонкостенный лабораторный стакан. Песок станет быстро заполнять стакан, вытесняя воздух через поры между частицами песка. Когда уровень песка поднимется до доньшка стакана, оно будет немедленно выбито и вибрирующий песок перельется из образовавшегося отверстия наружу и будет падать обратно в сосуд.

Чем хороши песочные часы?

На простых примерах, описанных в предыдущем разделе, можно убедиться в том, что песок при вибрациях во многих отношениях становится очень похожим на жидкость. Однако у песка и обычных жидкостей имеются и некоторые характерные отличия. Рассмотрим, например, очень простое явление истечения жидкости и песка из отверстия в нижней части сосуда, в котором они находятся. В античном рабовладельческом обществе широко использовались сосуды с отверстиями, из которых могла вытекать вода, если она налита в сосуд. Такое истечение использовалось для измерения времени, и во многих языках сходство между движением времени и истечением воды отразилось в том, как выражается словами понятие о движении времени. Принято говорить недисциплинированным ораторам: «Ваше время истекло». Не менее часто встречается фраза «в течение этого времени» и т. д.

Такое применение жидкости, вытекающей из сосуда, как меры времени, имеет, однако, один существенный недостаток. Скорость истечения воды зависит от ее количества в сосуде. Чем выше уровень воды, тем быстрее она вытекает. Поэтому время нельзя считать пропорциональным объему вытекшей воды. Существенно удобнее с этой точки зрения песок. Он течет из отверстия с постоянной скоростью, которая зависит от размеров и формы отверстия, но практически совершенно не зависит от того, на каком уровне находится поверхность песка в сосуде.

Это свойство было замечено в VIII в. н. э. в монастырях Западной Европы и явилось основанием для устройства песочных часов, которые сохранили некоторое значение и в наше время для определения времени различных медицинских процедур.

Генераторы электрической энергии

Несмотря на указанное выше различие в законах истечения песка и жидкости из отверстий в сосудах, это истечение сопровождается и многими сходными явлениями. В частности, такое истечение сопровождается переносом электрических зарядов. Если применяется при опытах по истечению жидкость, не пропускающая электрического тока, и песок, высушенный в значительной мере, то при их истечении струя жидкости или песка заряжается электричеством одного знака, а сосуд, из которого происходит истечение, получает заряд противоположного знака. Таким способом можно получить очень высокие потенциалы и собирать на электрических конденсаторах значительные заряды. В этом случае гидравлические механизмы становятся электрическими генераторами, способными работать в самых разнообразных условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой брошюре рассмотрены различные примеры того, как в движущейся жидкости может перераспределяться скорость ее перемещения и соответствующая кинетическая энергия. Эти примеры охватывают огромный круг явлений в природе и технике, еще не изученных полностью и таящих в себе неисчерпаемые возможности практического применения в естествознании и технике.

Рассмотренные здесь явления далеко не исчерпывают всего того, что можно было бы описать и проанализировать в рассматриваемой области знания. Можно было бы, например, перечислить интереснейшие случаи распространения морских волн. В частности, как эти волны могут отражаться от преград и собираться в фокусе подобно световым лучам. Пример этому можно было бы найти хотя бы в порту города Сочи, где волны, идущие с юго-востока, отражаются от изогнутого в плане волнолома и образуют усиленное движение воды около стоянки глиссеров — морских такси. Можно было бы также ознакомиться с тем, как идущие навстречу друг другу морские волны ударяют друг в друга и взаимно

гасят энергию своего движения, образуя высокие фонтаны воды. Можно было бы, наконец, коснуться интереснейших явлений, сопровождающих возникновение, развитие и разрушение морских смерчей, когда столб воды подымается от поверхности моря до облаков.

Однако описание всех этих явлений выходит далеко за пределы небольшой брошюры. Можно надеяться, что читатель, ознакомившись с явлениями, описанными в этой брошюре, и заинтересовавшись ими, будет самостоятельно находить в окружающей его жизни много интересного в этом же роде.

ГЕОРГИЙ ИОСИФОВИЧ ПОКРОВСКИЙ

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ

Редактор *И. Б. Файнбойм*. Обложка *Л. П. Ромасенко*, Худож. редактор *В. Н. Конюхов*, Техн. редактор *Т. В. Пичугина*. Корректор *В. В. Каночкина*.

А 14051. Сдано в набор 22/XI 1971 г. Подписано к печати 27/XII 1971 г. Формат бумаги 60×90/16. Бумага типографская № 3. Бум. л. 1,5. Печ. л. 3,0. Уч.-изд. л. 2,75. Тираж 51000 экз. Издательство «Знание», Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4. Заказ 2573. Типография Всесоюзного общества «Знание», Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4. Цена 9 коп.

