

Майер В.В.

Кумулятивный эффект: учебные исследования



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ ®

УДК 535
ББК 22.34
М 14

Майер В. В. **Кумулятивный эффект: учебные исследования.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. — 208 с. — ISBN 978-5-9221-0826-3.

Книга посвящена учебным исследованиям кумулятивных струй жидкости. Рассмотрены простейшие явления, приводящие к образованию кумулятивных струй, и дана их элементарная теория. Предложены методы наблюдения и фотографирования кумулятивных струй. Описана электрическая модель кумулятивного заряда. Приведены краткие исторические сведения и указаны возможности практического применения кумулятивного эффекта. Подробно описаны самодельные физические приборы и экспериментальные установки. Даны рекомендации по постановке опытов, представлены различные варианты экспериментов. Все опыты доступны и могут быть самостоятельно поставлены учащимися в школьном физическом кабинете или в домашних условиях.

Для учащихся школ, гимназий, лицеев с углубленным изучением физико-математических дисциплин, а также студентов и преподавателей педагогических вузов, учителей физики.

Учебное издание

МАЙЕР Валерий Вильгельмович

КУМУЛЯТИВНЫЙ ЭФФЕКТ
УЧЕБНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
(БИБЛИОТЕКА УЧИТЕЛЯ И ШКОЛЬНИКА)

Редактор *Д.А. Миртова*
Оригинал-макет: *В.В. Затекин*
Оформление переплета: *Н.В. Гришина*

Подписано в печать 26.03.07. Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 13. Уч.-изд. л. 14,3. Тираж 1500 экз. Заказ №

Издательская фирма «Физико-математическая литература»
МАИК «Наука/Интерпериодика»
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 90
E-mail: fizmat@maik.ru, fmlsale@maik.ru;
<http://www.fml.ru>

Отпечатано с готовых диапозитивов
в ППП «Типография «Наука»
121099, г. Москва, Шубинский пер., 6

ISBN 978-5-9221-0826-3



9 785922 108263

ISBN 978-5-9221-0826-3

© ФИЗМАТЛИТ, 2007
© В. В. Майер, 2007

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Глава 1. Знакомимся с кумулятивной струей	7
1.1. Набегание плоской струи на плоское препятствие	8
1.2. Плоская кумулятивная струя	12
1.3. Исследование плоской кумулятивной струи	14
1.4. Цилиндрическая кумулятивная струя	17
1.5. Всплеск при падении жидкой капли в жидкость	18
Глава 2. Гидродинамический удар	30
2.1. Гидродинамический удар	30
2.2. Гидростатическое и гидродинамическое давление	34
2.3. Почему «капля камень точит»?	36
2.4. Гидродинамический удар в стеклянной бутылке	39
Глава 3. Гидродинамическая теория кумулятивного эффекта	51
3.1. Кумулятивный заряд	53
3.2. Задача о соударении жидких струй	56
3.3. Пробивание струей препятствий	59
3.4. Формирование кумулятивной струи	61
Глава 4. Метод наблюдения и фотографирования быстропротекающих процессов	73
4.1. Функциональная схема фотографирования быстропротекающих процессов	75
4.2. Электронное реле	76
4.3. Реле времени	79
4.4. «Мгновенное» освещение лампочкой накаливания	81
4.5. Лампа-вспышка	84
4.6. Управление запуском лампы-вспышки	87
4.7. Лампа-вспышка с устройством временной задержки	89
4.8. Конструкция экспериментальных установок	91

Глава 5. Кумулятивный всплеск, порожденный упавшей каплей	103
5.1. Почему упавшая в жидкость капля создает всплеск?	104
5.2. Схлопывание конического и полусферического углублений	110
5.3. Фотографирование кумулятивной струи от падающей в воду капли	111
5.4. Влияние деформации кумулятивного углубления на струю	117
5.5. Падение твердого шарика в жидкость	123
5.6. Что происходит при падении твердого шарика в жидкость?	124
5.7. Куда девается упавшая в жидкость капля?	128
Глава 6. Кумулятивная струя из упавшей пробирки и другие опыты	133
6.1. Опыт Покровского	133
6.2. Исследование кумулятивной струи, даваемой падающей пробиркой с водой	136
6.3. Форма поверхности жидкости в падающей пробирке	141
6.4. Снова об опыте с падающей пробиркой	144
6.5. Кумулятивное углубление, созданное воздушной струей	147
6.6. Кумулятивная струя в стеклянной трубке	150
6.7. Исследование кумулятивной струи, возникающей в стеклянной трубке	152
Глава 7. Электрическая модель кумулятивного заряда	159
7.1. Электрическая модель взрыва	159
7.2. Экспериментальная установка для моделирования взрыва	162
7.3. Ударная волна при электрическом разряде	164
7.4. Взрыв под водой	166
7.5. Кумуляция энергии подводного взрыва	168
7.6. Пробивание препятствия кумулятивной струей	171
Глава 8. Вместо заключения	187
8.1. Кавитация	187
8.2. Прибор для наблюдения кавитации	189
8.3. Опыты с кавитационными пузырьками	190
8.4. Ударная волна при схлопывании кавитационного пузырька	192
8.5. Кавитация и кумуляция	193
8.6. Кумулятивные струи при деформации и схлопывании газовых пузырей	195
8.7. Ультразвуковая кавитация в учебных опытах	196
8.8. Магнитострикционный излучатель ультразвука	197
8.9. Ультразвуковой генератор	199
8.10. Наблюдение ультразвуковой кавитации	201
8.11. Кавитационная эрозия	203

Предисловие

Кумулятивный эффект ничуть не интереснее других физических явлений. Тогда почему ему посвящена книга?

Хотя бы потому, что другие явления отнюдь не интереснее кумулятивного эффекта. Главное же в том, что кумулятивный эффект вы в состоянии изучить экспериментально. Вы можете буквально «прощупать», что и как происходит на самом деле.

А это очень важно. Нет слов, без теории, фантазии, воображения не удастся создать ничего нового. Но даже самая смелая человеческая мысль бесконечно далека от того, что есть в действительности. Лучше сказать: человек не в силах придумать ничего такого, с аналогом чего он не встречался бы в реальности.

Поэтому неудачной окажется попытка научить физике без эксперимента. Никто не оспаривает этого утверждения, но многие вновь и вновь на практике пытаются опровергнуть его. За примерами не надо далеко ходить — вспомните хотя бы школьные уроки физики.

Есть простой и эффективный способ решительно поправить это положение: достаточно, чтобы вы настойчиво просили учителя о постановке на каждом без исключения уроке по крайней мере одного опыта. Попробуйте!

Второй путь не столь прост, хотя, возможно, более результативен: надо самостоятельно учиться экспериментальной физике, обращаясь к учителю лишь в тех ситуациях, когда его помощь действительно необходима. Для этого нужны не совсем обычные популярные книги, в которых не столько говорится о красивых и полезных явлениях, сколько рассказывается о том, как самому увидеть и на доступном уровне изучить такие явления. Подобную книгу мы и хотели сделать.

Основное ее содержание заключается в описаниях физических опытов и экспериментальных установок. Большая группа опытов не требует для своего осуществления ничего кроме пробирок, трубок, воронок, сосуда с водой и других мелочей, которые всегда имеются под руками. Эти опыты вы сможете поставить даже у себя дома. Домашний эксперимент хорош тем, что никто не мешает сосредоточиться на его выполнении и анализе. Часть предлагаемых экспериментальных установок можно изготовить только на базе школьных мастерских и физического кабинета. Это позволит вам приобрести начальные навыки коллективного производительного труда, к слову сказать, гораздо более значимого, чем изготовление вешалок, табуреток и гаек. Приборы или опыты, которые недоступны школьнику, в книге не описываются.

Чтобы ваша работа не свелась к примитивным действиям по подробной инструкции, каждый параграф книги, кроме последней главы, большими черными точками разбит на две части. Предполагается, что, прочитав первую из них, вы приостановитесь, обдумаете полученную

информацию и попытаетесь самостоятельно выполнить предложенное задание. Во второй части параграфа содержится материал, с которым вы можете сравнить собственные результаты или просто ознакомиться, если задание оказалось чрезмерно сложным. С той же целью стимулирования инициативы каждая глава заканчивается разделом «Для самостоятельной проработки», в котором дается небольшой список литературы и формулируются новые задания, в определенной степени развивающие содержание главы. Хотя такую структуру нельзя считать общепринятой, ничто не мешает читать эту книгу, как обычно: вообще, лучшим является тот способ «взаимодействия» с книгой, который вы предпочитаете.

Не совсем привычным может оказаться также изложение, равное внимание уделяющее эксперименту, его теории и технике. Но тут уж ничего не поделаешь: вы должны иметь определенные навыки во всех этих видах работы, и недооценивать какой-то из них было бы неправильно.

Кроме того, нужно уметь работать с литературой. Некоторые приемы в книге показаны, но сейчас хотелось сказать не только об этом. Стало хорошим тоном не замечать в изданных книгах ошибок. Подоплека тут проста: никогда не ошибается только тот, кто не видит ошибок у других. Но вам надо учиться, а умолчание учит не совсем тому, что требуется. Поэтому мы не слишком стремились сглаживать острые углы.

Теперь несколько замечаний. В книге использована система единиц СИ, но расстояния, например, чаще измеряются в миллиметрах, давления — сравниваются с атмосферным. Немало поставленных вопросов оставлены без ответов. Изложение не отличается занимательностью. При вычислениях иногда применяются дифференциалы и интегралы, а где-то написан даже натуральный логарифм. Некоторые сведения предполагаются известными читателю, хотя школьник вовсе не обязан их знать. Одним словом, нарушены почти все каноны популярной литературы, но сделано это с благой целью: на определенную высоту (отнюдь не рекордную!) поставлена планка, и вы, если хотите, должны ее преодолеть.

Автор выражает глубокую благодарность О. Г. Батаноговой, Е. И. Варакиной, А. Ф. Волкову, В. Ф. Колупаеву, Л. С. Кропачевой, Е. С. Мамаевой, А. В. Проказову, В. А. Саранину, И. А. Старцеву и А. Е. Чиркову за совместные эксперименты, обсуждения, помощь в оформлении результатов. Он искренне благодарен также рецензентам Е. И. Кацу и Л. Г. Болховитину, чьи замечания и доброжелательные рекомендации способствовали устранению ошибок и недочетов рукописи. Наконец, автор будет весьма признателен тем читателям, которые укажут ему на допущенные промахи.

Глава 1

ЗНАКОМИМСЯ С КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУЕЙ

Термин кумуляция происходит от латинского *cumulatio* — «скопление» или *cumulo* — «накапливаю» и дословно означает увеличение или усиление какого-либо эффекта за счет сложения или накопления нескольких однородных с ним эффектов.

Когда физики говорят о кумуляции, они обычно подразумевают кратковременные процессы, например взрывы, и под кумуляцией понимают усиление в определенном месте или направлении действия этих процессов.

Представьте, что заряд взрывчатого вещества (ВВ) находится в сплошной, однородной и изотропной среде, скажем в жидкости. Пусть в некоторый момент времени происходит его взрыв, то есть крайне быстрое выделение запасенной ВВ энергии в объеме этого вещества. Продукты взрыва имеют высокую температуру, значительную плотность, огромную скорость и находятся под большим давлением. Они резко сжимают граничащую с ними среду, образуя скачок уплотнения. Этот скачок, конечно, не остается на месте, а распространяется по среде, причем со сверхзвуковой скоростью. Часто порожденное взрывом движение среды называют взрывной волной, а фронт взрывной волны, на котором происходит скачкообразное изменение состояния среды, принято называть ударной волной. Частицы среды, до которых дошла ударная волна, получают от нее энергию. Полная, то есть внутренняя и механическая энергия, приходящаяся на единицу объема среды, называется плотностью энергии. При взрыве плотность энергии в точках среды, до которых дошла ударная волна, скачком возрастает.

Для простоты ограничимся рассмотрением только кинетической энергии частиц среды, а саму среду будем считать несжимаемой. Если плотность среды равна ρ и скорость в некоторой ее точке составляет v , то плотность кинетической энергии в окрестности указанной точки

$$w = \frac{\rho v^2}{2}. \quad (1.1)$$

Если заряд взорвался в небольшой области (точечный взрыв), то от нее распространяется имеющая сферическую форму ударная волна, и те частицы среды, которых она достигает, при-

обретают скорости, направленные от области взрыва. Очевидно, модули скоростей всех частиц, расположенных на равных расстояниях от центра взрыва, одинаковы (рис. 1.1 а). Поэтому такой взрыв во всех направлениях от его центра дает одинаковую плотность кинетической энергии.

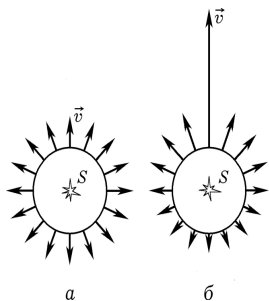


Рис. 1.1. Схематическое изображение взрыва в жидкости: а — сферически-симметричный взрыв; б — энергия взрыва перераспределена в пространстве

Теперь представьте себе, что тем или иным способом энергию взрыва удалось перераспределить в пространстве так, что в некотором направлении плотность кинетической энергии среды существенно больше, чем в остальных. В этом направлении частицы среды будут иметь более высокую скорость (рис. 1.1 б), и в среде возникнет струя. Эффект концентрации энергии

в определенном направлении или в определенном месте и является *кумуляцией*, а часто возникающая при этом струя — *кумулятивной*. Можно сказать так: если при обычном взрыве энергия «разбрасывается» во все стороны, то при кумулятивном она «собирается» в некотором направлении.

Понятно, что кумулятивные струи жидкости могут появляться не только при взрывах. Для их образования достаточно создать такие условия, при которых плотность кинетической энергии движущейся жидкости быстро возрастает в сравнительно небольшом объеме. Если этот объем не сферически-симметричен, то обязательно возникнет кумулятивная струя.

Простейшим опытом с кумулятивными струями жидкости и посвящена настоящая глава. Основная ее задача — показать вам, что кумулятивные струи встречаются на каждом шагу и вполне доступны для экспериментального изучения, пояснить некоторые приемы работы с литературой, казалось бы, весьма далекой от опытов, сообщить определенные сведения из гидродинамики, необходимые в дальнейшем.

1.1. Набегание плоской струи на плоское препятствие

- Мы начнем с теоретической задачи, предложенной в одном из интереснейших сборников задач по физике И. Ш. Слободецкого и Л. Г. Асламазова [1, с. 11, 55–59]. Вот ее условие:

«Плоская бесконечная струя толщины d_0 падает под углом β на плоскость (рис. 1.2). Скорость струи равна v , ее плотность ρ . На какие струи распадается струя?»

В том же сборнике приведено и решение этой задачи. Познакомьтесь с ним, если вы не сумели решить задачу самостоятельно.

«Обозначим через d_1 и d_2 толщины образовавшихся струй, а через v_1 и v_2 — их скорости. Так как через поперечное сечение первоначальной падающей струи за одну секунду проходит такая же масса жидкости, что и через поперечные сечения обеих образовавшихся струй, и жидкость несжимаема, то

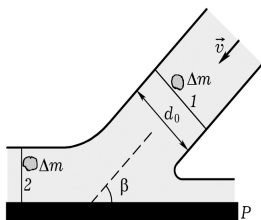


Рис. 1.2. Плоская струя жидкости, набегаящая на плоское препятствие

$$\rho d_0 v = \rho d_1 v_1 + \rho d_2 v_2. \quad (1.2)$$

Найдем, как меняется скорость частиц жидкости. Проследим за небольшой массой Δm жидкости, которая перемещается из основной струи в левый рукав (см. рис. 1.2). Такое перемещение равносильно просто переносу этой жидкости из области 1 в область 2. Но в области 1 мы «извлекаем» объем жидкости V_1 и силы давления совершают работу $A_1 = p_1 V_1$. В области 2 работа сил давления отрицательна и равна $A_2 = -p_2 V_2$. Следовательно, полная работа A внешних сил равна $p_1 V_1 - p_2 V_2$. Но жидкость несжимаема и, следовательно, $V_1 = V_2$. Кроме того, давление во всех струях тоже одинаково и равно атмосферному, так как границы у струй плоские. Поэтому $A = 0$. По теореме о кинетической энергии изменение кинетической энергии массы Δm жидкости равно A . Следовательно, кинетическая энергия частиц жидкости и их скорость остаются постоянными:

$$v_1 = v_2 = v. \quad (1.3)$$

Поэтому из равенства (1.2) получаем

$$d_0 = d_1 + d_2. \quad (1.4)$$

Так как на жидкость не действуют никакие внешние горизонтальные силы, горизонтальная проекция импульса текущей жидкости должна оставаться постоянной: $mv \cos \beta = m_1 v_1 - m_2 v_2$, где m , m_1 и m_2 — массы жидкости, прошедшие через сечения струй за одно и то же время. Так как $m \sim d_0$, $m_1 \sim d_1$ и $m_2 \sim d_2$,

то

$$d_0 \cos \beta = d_1 + d_2. \quad (1.5)$$

Из равенств (1.4) и (1.5) получаем

$$d_1 = d_0 \cos^2 \frac{\beta}{2} \quad (1.6)$$

и

$$d_2 = d_0 \sin^2 \frac{\beta}{2}. \gg \quad (1.7)$$

Итак, решение поставленной задачи приводит к следующим результатам: падающая под некоторым углом на плоскость плоская струя распадается на две струи, скорости жидкости в которых одинаковы и равны скорости исходной струи (1.3), а толщины струй различны и определяются формулами (1.6) и (1.7).

На этом месте теоретик ставит точку и удовлетворенно вздыхает. Экспериментатор тоже вздыхает, но совсем по другой причине: ему нужно засучить рукава и начать, наконец, настоящую работу. В данном случае она заключается в том, что требуется придумать и поставить эксперимент, хотя бы качественно подтверждающий результаты теоретического решения задачи.

● Главное, в чем вы должны убедиться на опыте, — это в равенстве скоростей образующихся струй. Для этого нужно уметь оценивать скорости жидкости в струях. Метод такой оценки должен быть очень прост, так как чем сложнее метод, тем менее доступен эксперимент и меньше вероятность того, что вы его выполните.

На рис. 1.3 приведена схема одного из возможных вариантов опыта. Вытекающая из сопла 1 плоская струя воды 2 встречается плоскую поверхность 3 твердой пластинки P , расположенной горизонтально. Падающая струя разделяется на две струи 4 и 5, которые стекают с пластинки и падают на горизонтальную поверхность, находящуюся на расстоянии h под пластинкой. Очевидно, если скорости воды в этих струях одинаковы, то одинаковы должны быть и расстояния l_1 и l_2 от проекции точки A падения исходной струи на горизонтальную поверхность до точек B и C падения на эту поверхность образовавшихся струй.

Для постановки опыта нужно в первую очередь изготовить сопло. Сечение выходного отверстия сопла может составлять, например, 4×25 мм. Такое сопло нетрудно сделать из подходящей по диаметру тонкостенной медной или латунной трубки, обжав в тисках один из ее концов.

На сопло наденьте резиновый шланг и соедините его с водопроводным краном. Открыв кран, получите плоскую струю и направьте ее на расположенную горизонтально пластинку из оргстекла или иной пластмассы шириной 30–50 мм. Понятно, что

пластинку лучше всего закрепить над раковиной так, чтобы вода с нее могла стекать непосредственно в канализацию. Изменяйте

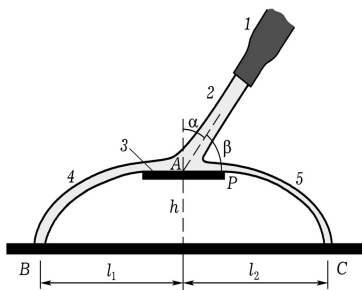


Рис. 1.3. Схема опыта по измерению скоростей струй, на которые разделяется падающая на плоское препятствие струя жидкости

угол падения $\alpha = \pi/2 - \beta$ струи воды на эту пластинку. При малых углах падения α вы будете наблюдать, что образующиеся струи действительно имеют различные толщины, но в горизонтальном направлении проходят примерно равные расстояния l_1 и l_2 , то есть имеют близкие скорости. Однако по мере увеличения угла падения α расстояние l_2 постепенно уменьшается по сравнению с расстоянием l_1 , которое остается практически неизменным или несколько увеличивается.

Противоречит ли это изложенной выше теории? Чтобы ответить на поставленный вопрос, давайте немного посчитаем. Пусть толщина падающей струи $d_0 = 4$ мм и угол падения $\alpha = \beta = 45^\circ$. Тогда, согласно формулам (1.6) и (1.7), толщины образующихся струй равны $d_1 \approx 3,4$ мм и $d_2 \approx 0,6$ мм. Вода в определенной степени смачивает пластмассовую пластинку. Поэтому более тонкая струя сильнее «прилипает» к плоской поверхности пластинки, чем более толстая. Поверхностное натяжение воды в большей мере сказывается на тонкой струе. Трение воды о пластинку существенно влияет опять-таки на тонкую струю. Следовательно, результат эксперимента вряд ли противоречит теории, рассматривающей идеальную ситуацию, в которой перечисленным и другим факторам просто нет места. Но в опыте совсем исключить эти факторы вы, разумеется, не в состоянии. Кроме того, не следует забывать, что теория построена для плоской бесконечной струи, а в вашем опыте падающая струя далека от идеально плоской и уж, конечно, не бесконечна по ширине.

Таким образом, эксперимент способен или подтвердить, или опровергнуть теорию, если его условия соответствуют идеализации, для которой она построена. Как только условия эксперимента выходят за рамки, очерченные данной теорией, для объяснения его результатов требуется новая теория. В нашем случае условия опыта и рассмотренной теоретической задачи будут примерно соответствовать друг другу только для достаточно широких и толстых струй. А это будет иметь место лишь для сравнительно небольших углов падения вытекающей из сопла струи на пластинку, что вполне удовлетворительно подтверждает эксперимент.

1.2. Плоская кумулятивная струя

• Хотелось бы продолжить цитирование задачника И. Ш. Слободецкого и Л. Г. Асламазова [1, с. 56, 57]. Дело в том, что хороших теоретических книг по физике много, и читатель, склонный к экспериментальной работе, должен уметь перерабатывать содержащуюся в них информацию в нужном ключе. Поэтому посмотрим, как из чисто теоретической задачи можно получить экспериментальную. Итак, немного теории.

«Рассмотрим другое интересное явление — кумулятивную струю. Она возникает, например, когда поток жидкости налетает

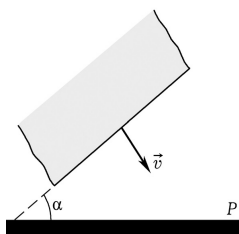


Рис. 1.4. Поток жидкости с плоским фронтом падает под некоторым углом на плоское препятствие

под углом на плоскость так, как показано на рис. 1.4. В этом случае вдоль плоскости «бьет» струя, скорость которой во много раз превышает скорость набегающего потока. Такая струя обладает огромной кинетической энергией.

Найдем скорость $\vec{u}$ кумулятивной струи при падении на плоскость потока жидкости, имеющего скорость $\vec{v}$. Обозначим через α угол между фронтом потока и плоскостью (рис. 1.5).

Точка пересечения фронта потока и плоскости перемещается вдоль плоскости. Обозначим через $\vec{v}'$ ее скорость. Если мы перейдем в систему отсчета, движущуюся со скоростью $\vec{v}'$, то в ней задача сведется к предыдущей (см. § 1.1) — струя движется так, что ее скорость направлена под углом α к плоскости со скоростью $\vec{v}' = \vec{v} - \vec{v}'$, и разбивается на две струи, движущиеся со скоростями, равными по модулю v' , «вперед» и «назад» вдоль плоскости.

Найдем скорости $\vec{v}'$ и $\vec{v}''$. Так как вектор $\vec{v}'$ перпендикулярен к вектору $\vec{v}$, то $v'' = v / \sin \alpha$ и $v' = v \operatorname{ctg} \alpha$. В неподвижной системе отсчета, в которой плоскость покоится, скорость u кумулятивной струи равна $v' + v''$, то есть

$$u = \frac{v}{\sin \alpha} + v \operatorname{ctg} \alpha = v \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}. \quad (1.8)$$

При малых α эта скорость может достигать огромной величины, во много раз превосходящей v . Например, при $\alpha = 10^\circ$ $u \approx 11v$, при $\alpha = 2^\circ$ $u \approx 57v$ и т. д. Во много раз в кумулятивной струе может быть больше и энергия единицы объема жидкости (плотность энергии) $\rho u^2/2$. При $\alpha = 10^\circ$ $\rho u^2/\rho v^2 \approx 120$, при $\alpha = 2^\circ$ $\rho u^2/\rho v^2 \approx 3200!$

Усвоив теоретическое решение задачи о плоской кумулятивной струе, обратитесь к эксперименту: разработайте и изготовьте простейшую установку, пользуясь которой можно убедиться, что, действительно, поток жидкости, набегающий на плоскость, как показано на рис. 1.4, порождает кумулятивную струю.

• Перейдем в систему отсчета, в которой поток жидкости неподвижен, и перевернем рис. 1.4 так, чтобы поверхность жидкости стала горизонтальной, а твердая пластинка P оказалась над ней. Идея экспериментальной установки теперь становится вполне очевидной: на жидкость нужно «бросить» плоскую пластинку так, чтобы между поверхностями жидкости и пластинки был некоторый угол α .

Схематически простейшая установка для эксперимента изображена на рис. 1.6. Металлический стержень 1 может свободно перемещаться во втулке 2, снабженной держателем 3, который предназначен для закрепления втулки в штативе. На конце стержня под нужным углом к нему укреплена твердая пластинка P с плоской нижней поверхностью (в пер-

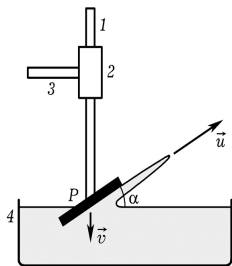


Рис. 1.6. Схема установки для исследования плоской кумулятивной струи

в штативе. На конце стержня под нужным углом к нему укреплена твердая пластинка P с плоской нижней поверхностью (в пер-

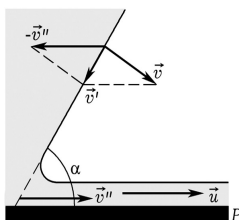


Рис. 1.5. Налетающий на плоское препятствие поток жидкости порождает бьющую вдоль этого препятствия кумулятивную струю

вых опытах ее можно закрепить на стержне просто пластилином). Под пластинкой расположена кювета 4 с водой. Подняв стержень так, чтобы пластинка оказалась на высоте 5–20 см от поверхности воды, отпустите его. В момент входа пластинки в воду возникает кумулятивная струя, летящая в горизонтальном направлении на расстояние в несколько метров!

Подобные струи вы, без сомнения, наблюдали и раньше. Вспомните, как при купании, войдя в воду, вы «брызгались» со своими товарищами, шлепая по поверхности воды ладонями. При этом возможны два вида движения: либо ладонь, ориентированная под некоторым углом к поверхности воды, движется вдоль этой поверхности, либо ладонь опускается вниз. Сейчас вы уже в состоянии проанализировать оба этих случая. Если осуществляется первый вариант движения, то образующаяся струя, очевидно, не может иметь скорость, превышающую скорость движения ладони вдоль поверхности воды (см. § 1.1). При втором варианте движения ладони возникает кумулятивная струя, скорость которой тем больше, чем меньше угол между ладонью и поверхностью воды, и может существенно превышать скорость удара ладони о воду. Для получения наибольшего эффекта нужно правильно скомбинировать оба вида движений и подобрать оптимальный угол между ладонью и поверхностью воды. Таким образом, если вы все еще продолжаете игры на воде, то, подойдя к ним с научных позиций, вы наверняка сможете научиться «поражать противника» на более далеком расстоянии от себя, чем способен это сделать он.

1.3. Исследование плоской кумулятивной струи

- Рассмотренный в предыдущем параграфе прибор обладает рядом недостатков: при ударе о поверхность воды наклонная пластинка, насаженная на нижний конец стержня, не только движется вниз, но и поворачивается; прибор не позволяет регулировать угол между пластинкой и поверхностью жидкости в сосуде и т. д. Выявите все недостатки прибора и разработайте конструкцию, свободную от них. Экспериментально исследуйте различные насадки на стержень и выберите такую, которая дает наиболее мощную кумулятивную струю. Проведите оценочные измерения скорости кумулятивной струи. Сопоставьте полученные вами результаты с теми, которые должны иметь место согласно теории (см. § 1.2).

- Внешний вид одного из возможных вариантов экспериментальной установки показан на рис. 1.7. В приборе использован стальной стержень 1 диаметром 10 мм и длиной 500 мм (такой

стержень обладает достаточно большой для успешной постановки опытов массой). На стержне винтом закреплен ограничитель 2, обеспечивающий падение наклонной пластинки в воду на нужную глубину. Вдоль всего стержня снята фаска шириной 6 мм. Вкрученный во втулку 3 винт 4 почти касается поверхности этой фаски и, следовательно, предотвращает поворот падающего стержня. На нижнем конце стержня имеется отверстие с резьбой М6 под крепежный болт 5. Каждая из насадок 6 снабжена припаянным к ней уголком с отверстием и прорезью, что позволяет легко менять насадки и устанавливать их под нужным углом к поверхности воды. Все насадки изготовлены из жести толщиной 0,8–1,0 мм (некоторые из применявшихся нами показаны на рис. 1.8).

Этой информации вполне достаточно, чтобы вы смогли изготовить прибор из имеющихся в вашем распоряжении материалов и провести исследование, итогом которого будет определение наиболее эффективной насадки, дающей при прочих равных условиях самую мощную

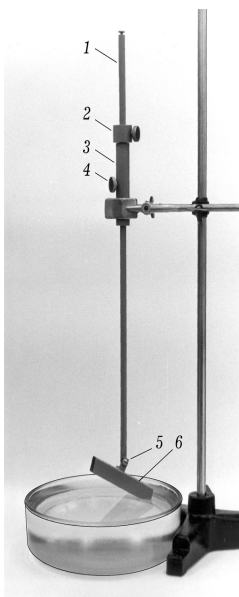


Рис. 1.7. Установка для исследования плоской кумулятивной струи

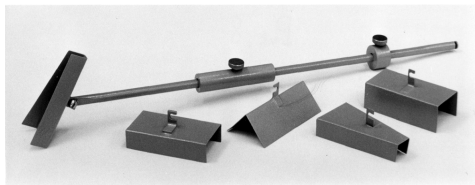


Рис. 1.8. Различные насадки, позволяющие получать разные кумулятивные струи с помощью установки, изображенной на рис. 1.7

кумулятивную струю. Такую работу лучше всего выполнить в рамках школьного физического кружка. Тогда кабинет физики получит интересный прибор, который можно будет использовать на факультативных и внеурочных занятиях.

Скорость u образующейся в опытах кумулятивной струи нетрудно определить, например, по дальности ее полета (рис. 1.9). Действительно, кумулятивная струя вылетает под

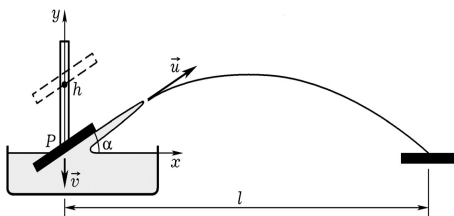


Рис. 1.9. Схема эксперимента по измерению скорости плоской кумулятивной струи

углом α к горизонтальному направлению. Горизонтальная и вертикальная составляющие скорости струи соответственно равны $u_x = u \cos \alpha$ и $u_y = u \sin \alpha$. Время t полета струи, очевидно, составляет $t = 2u_y/g$, где g — ускорение свободного падения. Следовательно, дальность полета

$$l = u_x t = \frac{2u_x u_y}{g} = 2 \frac{u^2}{g} \sin \alpha \cdot \cos \alpha = \frac{u^2}{g} \sin 2\alpha.$$

Отсюда искомая скорость

$$u = \sqrt{\frac{gl}{\sin 2\alpha}}. \quad (1.9)$$

Если наклонная пластинка P падает с высоты h , то ее конечная скорость (мы пренебрегаем влиянием сопротивления воды на входящую в воду пластинку, хотя ясно, что при строгом расчете этого делать нельзя) $v = \sqrt{2gh}$. Значит, отношение скорости кумулятивной струи к скорости порождающей эту струю пластинки составляет

$$\frac{u}{v} = \sqrt{\frac{l}{2h \sin 2\alpha}}. \quad (1.10)$$

Измерив в опытах величины h , l и α , вы можете вычислить отношение u/v . С другой стороны, это же отношение скоростей можно определить по формуле (1.8): $u/v = \operatorname{ctg}(\alpha/2)$. Таким образом, вы имеете возможность произвести сравнение результатов теории и эксперимента.

Понятно, что такое сравнение будет носить оценочный характер. Одну из причин этого мы указали выше. Другие попытайтесь отыскать самостоятельно.

1.4. Цилиндрическая кумулятивная струя

- Выполняя два предыдущих эксперимента, вы поработали с плоской кумулятивной струей. Придумайте опыт, аналогичный проделанному, но отличающийся тем, что в результате получается не плоская, а цилиндрическая кумулятивная струя. Поставьте разработанный эксперимент и убедитесь в правильности своих рассуждений.

- Цилиндрическая струя симметрична относительно своей оси, следовательно, для ее получения нужно использовать симметричную относительно некоторой оси твердую поверхность. Учитывая, что, кроме того, эта поверхность должна составлять определенный угол с поверхностью жидкости, приходим к выводу, что форма твердой поверхности должна быть конической. Значит, требуемый эксперимент можно поставить, применяя, например, стеклянную воронку.

В широкий сосуд глубиной не менее 10 см налейте воду. Стеклянную воронку возьмите в руку, перекройте отверстие ее трубки указательным пальцем и опустите воронку конической частью в воду так, чтобы ее трубка была расположена вертикально (рис. 1.10а); фотографию нам было удобнее сделать, используя в опыте воронку, которая имеет не коническую поверхность, но вы, скорее всего, будете работать с коническими воронками, причем существенно большего размера, чем показанная на фотографии). Вода не сможет зайти в воронку, так как этому будет препятствовать находящийся внутри нее воздух. Теперь резко уберите палец, открыв отверстие трубки (рис. 1.10б). Вода быстро войдет в воронку и выплеснется из ее трубки в виде кумулятивной струи!

Очевидно, результат описанного опыта объясняется набегающим потоком воды на внутреннюю коническую поверхность воронки. Сравните его с явлением, которое рассматривалось в § 1.2, и вы убедитесь в справедливости сказанного. Разумеется, хороший результат получается отнюдь не со всякой воронкой. Одной из стоящих перед вами экспериментальных задач как раз и является выбор такой воронки, которая дает наилучший эффект. Помимо размеров и формы воронки результат опыта существенно зависит и от того, насколько глубоко погружена воронка в воду и какая часть объема конической емкости воронки предварительно (перед открыванием отверстия трубки) заполнена водой.

Вы, должно быть, догадались о возможности иного варианта постановки опыта. Он заключается в следующем. Двумя пальцами берут воронку за трубку, погружают воронку в воду так,

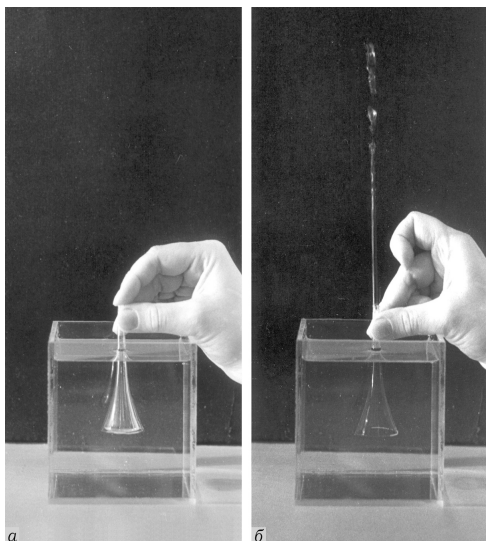


Рис. 1.10. Опыт по образованию цилиндрической кумулятивной струи: *а* — так нужно закрыть отверстие воронки, чтобы заключенный в ней воздух не позволил воде войти внутрь воронки; *б* — струя, бьющая из открытого отверстия воронки

чтобы область перехода от конуса к трубке оказалась на 2–4 см выше поверхности воды, и затем резким, но коротким движением кисти руки вниз быстро затапливают всю коническую часть воронки. При этом образуется кумулятивная струя, которая бьет вверх на высоту 2–4 метра!

1.5. Всплеск при падении жидкой капли в жидкость

- Повернем рис. 1.4 на 90° и представим, что на расположенную вертикально твердую пластинку P натекает поток жидкости, плоская поверхность которого составляет угол α с пластинкой (рис. 1.11 *а*). Тогда, как мы знаем, вдоль пластинки, то

есть вертикально вверх, будет бить плоская кумулятивная струя. Подобные струи часто образуются при падении волн прибоя на бетонную стенку причала.

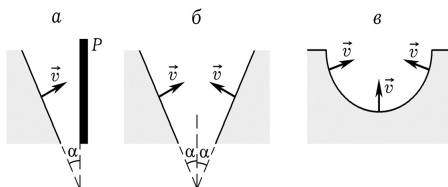


Рис. 1.11. Некоторые движения жидкости, приводящие к образованию кумулятивных струй: *а* — набегание потока с плоским фронтом на плоское препятствие; *б* — встречное движение двух потоков с плоскими фронтами; *в* — схлопывание полусферического углубления

Нетрудно сообразить, что для получения кумулятивной струи вовсе не обязательно использовать твердую пластинку или иное препятствие. Вполне достаточно направить навстречу друг другу с одинаковыми скоростями два потока жидкости, плоские поверхности которых образуют равные углы α с вертикальным направлением (рис. 1.11 б). В этом случае также возникнет кумулятивная струя, направленная вертикально вверх. Подобная ситуация встречается в природе, если сталкиваются две близкие по параметрам волны. Заметим, что в двух последних примерах речь идет о крупных, скажем морских, волнах большой амплитуды, которые при своем движении переносят не только энергию, но и вещество, то есть воду. В школе вы изучаете волны малой амплитуды, которые при распространении переносят лишь энергию, а не вещество. Одна из таких волн проходит сквозь другую так, как если бы второй волны не было, при этом кумулятивная струя возникнуть не может.

Теперь становится совершенно очевидным, что для получения цилиндрической кумулятивной струи нет необходимости использовать воронку (см. § 1.4) или иное твердое тело с внутренней поверхностью вращения. Задача может быть решена, если тем или иным способом в поверхности жидкости сделать углубление, например, коническое или сферическое (рис. 1.11 в), и затем быстро захлопнуть его так, чтобы скорости частиц жидкости были направлены перпендикулярно поверхности углубления.

Предложите простейший способ получения цилиндрической кумулятивной струи из углубления у поверхности жидкости. Поставьте опыты, позволяющие выяснить, от чего зависят энергия и размеры возникающей струи.

● Наверное, нет такого человека, которому никогда не приходилось видеть, как при падении редких капель дождя в лужу образуются всплески воды. Это маленькие кумулятивные струи.

Чтобы убедиться в сказанном, можно проделать следующую серию простых опытов.

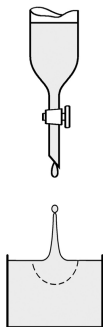


Рис. 1.12. Схема опыта по образованию кумулятивной струи при падении жидкой капли в жидкость

На стол поставьте стеклянный стакан с водой и над ним укрепите капельницу (рис. 1.12), дающую капли воды диаметром около 4 мм. Отрегулируйте кран капельницы так, чтобы капли срывались с ее трубки, например, каждую секунду. Вы будете наблюдать, что всякий раз, когда капля долетает до поверхности воды в стакане и исчезает, вслед за этим над водой появляется кумулятивная струя. Если посмотреть на стакан сбоку, то хорошо видно, что в момент удара капли в верхнем слое воды образуется полусферическое углубление. Схлопывание именно этого углубления и приводит к возникновению кумулятивной струи.

Наблюдения покажут вам, что следующие одна за другой капли дают различные по высоте кумулятивные струи. Это удивительно, так как капельница, очевидно, «вырабатывает» капли равной массы, имеющие одинаковые начальные скорости, причем эти капли проходят до встречи с поверхностью воды равные расстояния. Вскоре вы убедитесь, что за обнаруженный эффект ответственны волны на поверхности воды в стакане. Первая капля, упавшая в воду, возбуждает расходящуюся от места падения волну, которая доходит до стенки стакана и отражается назад. Интерференция падающей и отраженной волн приводит к тому, что на поверхности воды на некоторое время устанавливается стоячая волна.

Результат опыта по образованию кумулятивной струи, безусловно, зависит от того, упадет ли вторая капля во впадину или в горб стоячей волны. Чтобы исключить этот нежелательный эффект, нужно либо увеличить промежуток времени между двумя следующими друг за другом каплями, либо заменить стакан с водой на сосуд большего диаметра. В первом случае стоячая волна, созданная упавшей каплей, успеет затухнуть, и следующая капля упадет на спокойную поверхность воды. Во втором — стоячая волна не сможет развиваться и достичь большой амплитуды, так как пока цуг волн от места падения капли идет до стенки сосуда и обратно, энергия его непрерывно уменьшается. Добившись, чтобы каждая капля падала на спокойную поверхность воды, вы сможете удостовериться, что разные капли