

Б. В. ДЕРЯГИН • ЧТО ТАКОЕ ТРЕНИЕ?

АКАДЕМИЯ НАУК

СССР

НАУЧНО
ПОПУЛЯРНАЯ
СЕРИЯ

Б. В. ДЕРЯГИН

ЧТО ТАКОЕ? ТРЕНИЕ?

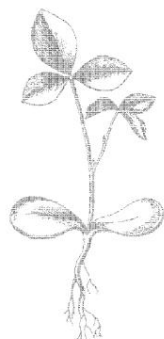
А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р
НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

Б. В. ДЕРЯГИН

ЧТО ТАКОЕ ТРЕНИЕ?

*Издание второе,
переработанное и дополненное*

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
Москва 1963



Scan AAW

Книга посвящена явлению, которое знакомо каждому человеку и лежит в основе самого древнего способа добычи огня. Но читатель узнает, что, как ни странно, механизм трения до недавнего времени был неизвестен. Это мешало понять самые простые, распространенные явления. Наряду с выяснением общей природы сил трения автор четко разъясняет различие законов внутреннего и внешнего трения.

Множество примеров явлений трения взяты из окружающей природы, быта, практики, транспорта и промышленности и объяснены в книге на основе законов трения, в частности двучленного закона трения, разработанного советскими учеными, и в первую очередь, автором книги. Особое внимание уделено роли отечественных ученых в развитии науки о трении.

Книга рассчитана на инженеров, техников, студентов технических вузов и техникумов, школьников старших классов.

ОТ АВТОРА

Трудно назвать другое столь распространенное в повседневной жизни явление, как трение. Оно сопровождает любые движения физических тел и накладывает отпечаток на характер этих движений. Без трения буквально нельзя ступить ни шагу. Поэтому естественно, что каждому человеку интересно знать, каковы основные проявления и закономерности трения и как они объясняются.

Лучше изучены и значительно проще закономерности и природа внутреннего трения в жидкостях и газообразных телах, чем внешнее трение, возникающее при контакте твердых тел. Поэтому научные и инженерно-технические работники больше осведомлены в области внутреннего, чем внешнего трения. Правильных представлений о природе внешнего трения часто нет даже у тех специалистов, которые по роду своей деятельности постоянно сталкиваются с этой проблемой, не говоря уже о широких кругах читателей.

В настоящей книге нами затронуты оба вида трения. При всем различии механизмов обоих видов трения между ними имеются общие, принципиально важные черты, и одновременное рассмотрение этих механизмов в одной книге весьма полезно для понимания каждого из них. И когда трение по видимым признакам относится к разряду внешнего, а по своей природе оно является внутренним, и наоборот.

Отсутствие не только популярной, но и специальной литературы по основным закономерностям и природе внеш-

него трения приводит к тому, что в этой чрезвычайно важной для практики области не только нет согласия во мнениях, но широко распространены совершенно неправильные взгляды, укоренившиеся в продолжении не одного столетия. Несомненно, что одна из важнейших причин такого положения кроется в объективных трудностях изучения явлений трения, коренящихся в его природе. Хотя внешнее трение по своему основному проявлению и действию — явление чисто механическое, которое крайне просто обнаруживать и измерять, в основе его лежат особые молекулярные взаимодействия, сосредоточенные в тончайшем поверхностном слое твердых тел и сложным образом зависящие от состава и строения этого слоя.

Из всех поверхностных явлений внешнее трение наиболее поверхностное, с наименьшим радиусом действия. Немудрено поэтому, что оно необычайно чувствительно к состоянию поверхности, если коэффициент трения изменяется в несколько раз от ничтожных загрязнений, сравнительно мало влияющих на другие поверхностные явления. Получение надежных значений коэффициента трения, которым принято характеризовать внешнее трение различных поверхностей, требует исключительной тщательности и точного контроля условий опыта.

Как правило, почти во всех исследованиях по внешнему трению эти условия не только не соблюдались, но зачастую даже не осознавались, главным образом в силу сложившихся взглядов о чисто механической природе внешнего трения. Приводимые в справочнике, иногда с «точностью» до нескольких значащих цифр, значения коэффициентов трения для различных материалов часто лишены поэтому научного или практического значения и лишь вводят специалистов в заблуждение. Это относится не только к коэффициенту трения таких неопределенных материалов, как кожа, дерево, резина, но даже и к метал-

лам, у которых коэффициент трения также изменяется в широких пределах и находится в зависимости от различной обработки поверхности и условий проведения опыта.

До недавнего времени вопросами трения занимались главным образом механики, не имевшие большей частью никакого представления о тонком физико-химическом механизме внешнего трения и его природе. Физики, которые могли бы правильно подойти к теории трения на основе достижений современной науки, недостаточно способствовали развитию научных представлений в этой области.

Правильнее оценили тонкий молекулярный механизм внешнего трения физико-химики, опиравшиеся на современные достижения науки о поверхностных явлениях. Однако, несмотря на это, до недавнего времени теория не была продвинута сколько-нибудь существенно вперед, так как физико-химические явления внешнего трения изучались преимущественно с качественной стороны без применения методов теоретической физики и механики.

Ныне благодаря коллективным усилиям советских ученых многие теоретические проблемы внешнего трения получили правильное освещение, позволяющее проанализировать ряд важных технических явлений. Назрела необходимость обобщить эти достижения для облегчения их плодотворного использования.

Настоящая книга, написанная по предложению покойного президента Академии наук СССР С. И. Вавилова, как раз и преследует эту цель. Название книги также предложено С. И. Вавиловым. Автор ставит своей главной задачей познакомить инженеров, физиков, физико-химиков, геологов и других лиц, близко интересующихся вопросами трения, а также и широкие круги советской интеллигенции с основными проявлениями и закономерностями внешнего трения и дать им возможность составить представление о молекулярном механизме и природе этого явления.

Теория трения находится пока еще на начальной ступени своего развития. Поэтому не следует пытаться уже сейчас применять ее к объяснению более сложных или второстепенных явлений. Для начала надо сформулировать основные закономерности трения, в первом приближении отражающие действительность. Например, необходимо объяснить, почему соблюдается закон Амонтона о пропорциональности трения нагрузке, почему внешнее трение мало зависит от температуры и скорости. Объяснение же отклонений от этих приближенных законов должно быть отнесено ко второй ступени изучения законов трения и к построению его более точной теории.

Поэтому автор упоминает далеко не все исследования природы трения, так как часть их относится не к выяснению основной природы трения, а к учету влияющих на него побочных факторов. Например, из того, что силы трения движения весьма близки к силам статического трения, следует, что явления износа, пластических деформаций и другие процессы, сопровождающие трение движения и могущие влиять на его величину, должны быть отнесены к разряду второстепенных факторов.

Это не значит, однако, что явления износа и изменения поверхности, сопровождающие трение движения, не заслуживают внимания. Наоборот, эти явления в практике часто играют более важную роль, чем трение само по себе. Так, уменьшение износа при работе двигателя внутреннего сгорания, пожалуй, более важная задача, чем уменьшение самой силы трения в этом случае. Однако для выяснения природы самого трения и причины выполнимости закона Амонтона и других его основных закономерностей рассмотрение явления износа дает немного. И прямые измерения показывают, что на работу разрушения твердых тел, даже хрупких, тратится чрезвычайно малая часть работы сил трения. В основном работа сил трения идет на развитие тепла, так как переходит в энергию молекулярного движения.

Книга написана на основании достижений отечественной науки, вклад которой в этой области знаний чрезвычайно велик. Рассмотрение природы трения стало возможным только на основе выдвинутой еще М. В. Ломоносовым молекулярной теории тел, стремившейся объяснить все их особенности и качества движением и свойствами составляющих атомов и молекул. Превращение механической энергии в энергию теплового молекулярного движения не может быть понятно вне рамок закона сохранения энергии, сформулированного Ломоносовым. Интересно, что самый термин «трение» был введен в науку Ломоносовым.

Пионером в области развития гидродинамической теории смазки подшипников был инженер Н. П. Петров. Строгое математическое решение поставленной Петровым задачи было дано в трудах классиков русской механики Н. Е. Жуковского и С. А. Чаплыгина. Основоположные работы этих классиков продолжили советские ученые Н. И. Мерцалов, Е. М. Гутьяр и др. Природа основных закономерностей вязкости жидкостей была вскрыта и исследована А. И. Бачинским, А. С. Предводителевым, Я. И. Френкелем, А. Э. Голиком и др. Важные исследования по вязкости жидкостей, их смесей и практическим применениям измерений вязкости принадлежат Н. С. Курнакову, П. П. Лазареву, М. П. Воларовичу, М. М. Кусакову, М. И. Усановичу, Е. Г. Швейдковскому и др.

Велики заслуги отечественной науки и в области изучения различных видов внешнего трения. Здесь следует отметить работы И. В. Крагельского по сухому трению, А. С. Ахматова, И. Л. Елина и Е. В. Сухова в области граничной смазки, М. Н. Бучина в области смазки при низких температурах, В. Д. Кузнецова, М. М. Хрущева и их сотрудников в области износа и приработки поверхностей. Существенное значение для понимания процессов износа при трении имеют работы академика

П. А. Ребиндера по понижению твердости под действием поверхностно-активных молекул, ясно показавшие на обширном материале значение физико-химических явлений для процессов «механического» разрушения и деформаций твердых тел. Интересные исследования явления предварительных смещений при трении принадлежат В. Н. Верховскому и Э. С. Хайкину с сотрудниками.

Далеко не все эти исследования отражены в настоящей книге, посвященной главным образом выяснению природы трения. Некоторые практические приложения изложены с целью иллюстрации тех или иных положений. Эти примеры, конечно, не могут заменить такой книги о трении, которая была бы специально посвящена прикладным вопросам. В популярной литературе этот пробел в известной степени заполнен книгой А. Саломоновича и И. Лисовского «Силы трения», вышедшей в 1949 г. вторым изданием.

Автор заранее благодарит всех лиц, которые поделятся критическими замечаниями и пришлют их в адрес Института физической химии АН СССР, где в лаборатории поверхностных сил в течение ряда лет он совместно с коллективом сотрудников изучал явления граничного трения.

Автор приносит искреннюю благодарность за чтение рукописи и критические замечания М. П. Воляровичу, М. М. Кусакову, Д. С. Кодниру и С. Б. Ратнеру.

С особой признательностью вспоминает автор интерес, проявленный С. И. Вавиловым к книге, и беседы с ним, облегчившие автору выбор материала и характер его изложения.

ВВЕДЕНИЕ

Соппротивление движению

Согласно закону инерции Ньютона, всякое тело сохраняет состояние покоя или прямолинейного и равномерного движения до тех пор, пока какая-нибудь сила не выведет его из этого состояния, т. е. не изменит направления или скорости движения. Таким образом, если толчком привести какое-либо тело в движение, то движение должно продолжаться вечно с постоянной по величине и направлению скоростью, если на тело не будет действовать внешняя сила. Такой вывод кажется противоречащим повседневному опыту. Мы знаем, что если толкнуть шар, лежащий на горизонтальной поверхности, то он будет постепенно замедлять свое движение и, наконец, остановится.

Для передвижения с постоянной скоростью какого-нибудь тела необходимо прилагать к нему непрерывно действующую силу. Аристотель еще две тысячи лет назад учил, что если сила внезапно прекратит свое действие, то тело также внезапно остановится.

Однако более внимательное рассмотрение движения показывает, что, во-первых, остановка никогда не происходит мгновенно, а во-вторых, что сила, необходимая для поддержания равномерного движения, зависит не только от самого тела, его рода, формы и скорости, но и от тех тел или той среды, с которыми оно соприкасается при движении. Чтобы поддерживать движение по более гладкой поверхности, необходима меньшая сила тяги, и в ее отсутствие скорость тела, предоставленного самому себе, убывает медленнее; тело до остановки пройдет больший путь.

Если движение происходит в камере, в которой воздух разрежен, то обнаруживается влияние внешней среды на движение: с уменьшением плотности окружающего воздуха скорость движения падает медленнее.

Следовательно, причина замедления движения тела лежит в его взаимодействии с окружающими телами, а вовсе не есть свойство, присущее самому телу или природе движения. Отсюда только один шаг до предположения, что тело, изолированное от окружающих тел и помещенное в безвоздушном пространстве, будет двигаться с постоянной скоростью бесконечно долго. Это умозаключение, по существу, и лежит в основе открытия закона инерции.

Поскольку, согласно этому закону, всякая причина, изменяющая скорость движения, называется силой, то можно сказать, что на всякое движущееся тело действует со стороны окружающей его среды или тел, с которыми оно соприкасается, сила, стремящаяся затормозить его движение и в конце концов остановить. Она называется силой трения или силой сопротивления среды. Так, футбольный мяч, пройдя некоторое расстояние, останавливается под влиянием силы трения о землю и сопротивления воздуха. Трение о лед и сопротивление воздуха останавливают сани, после того как они наберут скорость, скатившись с горы.

Сила трения или сопротивления среды стремится всегда уменьшить скорость движения тела относительно окружающих тел или окружающей среды. Эти же силы способны поддерживать движение некоторого тела в том случае, когда сама среда, окружающая это тело, находится в движении. Так, например, ветер увлекает в своем движении различные предметы. Ураган способен забросить на высоту второго этажа даже автомобиль. Сила трения со стороны поднимающихся воздушных масс поддерживает капли воды в облаках, уравнивая силу тяжести, а более мелкие капли увлекает, заставляя двигаться вверх.

Внешнее и внутреннее трение

Во всех случаях движения трение сопутствует относительному перемещению «соприкасающихся» тел или их частей. Трение, сопутствующее и противодействующее относительному перемещению двух тел, находящихся

В соприкосновении, называют внешним, поскольку оно зависит от взаимодействия внешних поверхностей этих тел вблизи участков касания и не зависит от состояния внутренних частей тела. Так, внешним можно назвать трение полозьев саней о лед, стремящееся прекратить скольжение саней относительно поверхности льда. Сила торможения саней при этом зависит только от состояния поверхности льда, его гладкости и температуры, но не от состояния льда под поверхностью.

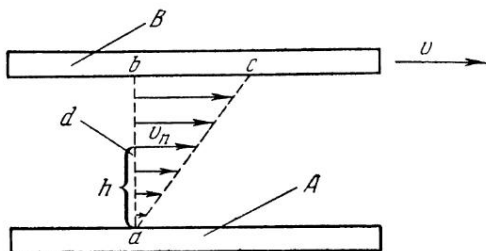


Рис. 1. Распределение скоростей в жидкости между двумя параллельно движущимися пластинами

Строго говоря, внешнее трение наблюдается только для твердых тел без смазочной прослойки, так как только в этом случае имеется «непосредственный» контакт двух тел и относительное перемещение обоих тел в области контакта (скольжение или качение).

Трение называют внутренним, если оно сопутствует и противодействует относительному перемещению частей одного и того же тела.

В первую очередь этот термин применяется к жидким и газообразным телам, отличающимся легкой подвижностью частей.

Наиболее простой случай внутреннего трения можно пояснить следующим примером. Допустим, что в жидкость погружены две параллельные пластины (рис. 1). Приведем верхнюю пластину *B* в равномерное движение со скоростью v , направленной параллельно нижней пластине *A*. Если проследить за движением частиц жидкости, расположенных между обеими пластинами, и

измерить их скорости¹, то окажется, что движение верхней пластины передалось лежащим ниже слоям жидкости, но не полностью, так что скорость каждой частицы жидкости, например в точке d , будет промежуточной между скоростями обеих пластин. Скорость частицы жидкости тем меньше, чем дальше отстоит эта частица от верхней пластины. Точнее: скорость частиц жидкости v_n пропорциональна расстоянию h по перпендикуляру от нижней пластины и вблизи каждой из пластин совпадает со скоростью соответствующей пластины.

Последнее обстоятельство крайне важно. Оно означает, что слои жидкости, непосредственно соприкасающиеся с твердой пластиной, приобретают общую с ней скорость и не способны скользить по ней так, как, например, скользит одно твердое тело по другому. Закон пропорционального изменения скорости с изменением расстояния от неподвижной пластины всего нагляднее иллюстрировать следующим мысленным опытом. Пусть в какой-либо момент времени некоторые, как бы отмеченные, частицы жидкости расположатся на общем к обеим пластинам перпендикуляре ab (рис. 1), как на стартовой линии. Тогда из закона пропорционального изменения скорости следует, что в следующий момент времени эти отмеченные частицы жидкости окажутся на другой прямой, ac , наклонной к пластинам.

Еще более наглядно можно представить характер движения жидкости между пластинами, мысленно подразделив ее на большое число весьма тонких слоев a, b, c, d, e, f (рис. 2), параллельных обеим пластинам. Благодаря различным скоростям при движении произойдет как бы проскальзывание каждого слоя относительно обоих соседних с ним слоев. В результате получится то, что называют сдвигом и что всего легче представить, сдвинув или скосив слой, как показано на рис. 2.

С течением времени «сдвиг» будет непрерывно возрастать. Угол сдвига θ можно определить по его тангенсу:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{s}{y}, \quad (1)$$

где s — путь, пройденный за рассматриваемое время слоем жидкости, находящимся на расстоянии y от нижней

¹ Для этого наблюдают за движением взвешенных в жидкости и увлекаемых ею мелких частиц, например угля и т. п.

пластины. Но путь равен скорости частицы жидкости v , умноженной на продолжительность движения t . Следовательно,

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{v}{y} t. \quad (2)$$

Если за меру величины сдвига принят тангенс угла сдвига θ , то сдвиг возрастает пропорционально протекающему времени t . Если под скоростью сдвига G разуметь

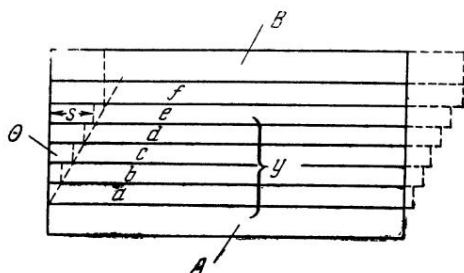


Рис. 2. Схема сдвига

его возрастание за единицу времени, т. е. при $t = 1$, то из формулы (2) мы получим выражение

$$G = \frac{\operatorname{tg}\theta}{t} = \frac{v}{y}. \quad (3)$$

Но, как мы уже говорили, v меняется по мере удаления от нижней пластины пропорционально этому удалению, измеряемому расстоянием y . Следовательно, v/y для рассматриваемого нами случая — величина постоянная во всем объеме слоя жидкости между обеими пластинами.

Градиент скорости

Величину G принято называть градиентом скорости течения жидкости. Уравнение (3) выражает следующее правило: скорость сдвига равна градиенту скорости. Если измерять скорость в сантиметрах в секунду, а расстояние в сантиметрах, то, как видно из уравнения (3), градиент скорости окажется выраженным в единицах, равных $\frac{\text{см}}{\text{сек} \cdot \text{см}} = \frac{1}{\text{сек}}$, или в сек^{-1} .

Чтобы поддержать в слое жидкости, заключенном между двумя пластинами, течение с постоянным градиентом скорости или с постоянной скоростью сдвига, необходимо прилагать к обеим пластинам постоянную силу, для каждой из пластин равную по величине, но противоположную по направлению. Для верхней пластины сила должна быть направлена вправо, параллельно направлению ее движения, для нижней пластины — влево. Обе эти силы, очевидно, нужны для уравнивания сил, стремящихся выравнять скорости обеих пластин и оказывающих сопротивление их взаимному перемещению, т. е. силы трения, приложенной к движущейся пластине и стремящейся затормозить ее движение, и силы трения, приложенной к нижней, неподвижной пластине и стремящейся увлечь ее и начать двигать в ту же сторону, в которую движется верхняя пластина.

Обе силы можно считать силами трения «между» обеими пластинами, поскольку эти силы препятствуют их взаимному перемещению.

Слово «между» поставлено в кавычках потому, что читатель может задать естественный вопрос: допустимо ли говорить о трении «между» двумя «непосредственно» не соприкасающимися телами? Ведь повседневный опыт приучает к мысли, что трение наблюдается только при контакте. В данном случае интуиция, внушенная опытом, действительно не расходится и с результатами более тонких экспериментов и научной теории.

В то время как силы притяжения и прилипания между телами могут действовать на измеримых, хотя и малых расстояниях, превышающих расстояния между соседними атомами или молекулами в твердых телах, силы трения не передаются на расстояние через «пустоту»¹.

В рассматриваемом случае промежуток между пластинами не пустой, а заполнен жидкостью. Через нее и «передается» сила трения между пластинами. Чтобы яснее представить, как может передаваться сила трения через слой жидкости, рассмотрим в качестве грубой аналогии

¹ Через «пустоту» может передаваться только так называемое радиационное трение, зависящее от обмена лучистой энергией (фотонами) между двумя лучеиспускающими телами, движущимися с неодинаковыми скоростями. Однако такого рода трение, имеющее значение в атмосферах звезд, мы в этой книге не будем рассматривать, так как его природа совершенно иная.

течения жидкой прослойки колоду карт, которая постепенно сдвигается, «скашивается». Если это скашивание происходит вследствие движения верхней карты колоды, то передачу движения лежащим ниже картам можно объяснить следующим образом. Трение между верхней картой и лежащей ниже второй картой приводит в движение эту последнюю. При этом появляется трение между второй картой и соседней с ней, расположенной еще ниже. Так, движение и сила трения последовательно передаются всем картам. При этом очевидно, что каждая карта находится под действием двух сил трения, действующих в противоположных направлениях, — со стороны соседних выше- и нижележащих карт.

Приходя в движение, каждая карта вначале движется неравномерно, с возрастающей скоростью. Однако это возрастание имеет определенный предел. Когда скорость каждой карты достигнет этого предела, дальнейшее движение будет происходить с постоянной скоростью. Такое движение можно назвать стационарным по аналогии с такими случаями течения жидкостей, при которых скорости частиц жидкости, проходящих через любую точку пространства, не меняются со временем. Приблизительно такой же характер имеет течение воды в спокойной реке. Для того, чтобы рассматриваемая карта, подобно всем другим, могла двигаться равномерно, с постоянной скоростью, необходимо, чтобы обе силы трения, действующие на нее, были равны по величине.

Если допустить, что сила трения между картами возрастает с увеличением относительной скорости, равной разности их абсолютных скоростей, то легко прийти к выводу, что при сдвиге колоды карт значения скоростей отдельных карт должны составлять арифметическую прогрессию, чему и соответствуют рис. 1 и 2. В этом случае скорость n -й карты, считая снизу, будет, очевидно, выражаться формулой

$$v_n = nv_1, \quad (4)$$

где v_1 — скорость самой нижней карты.

Картина стационарного течения жидкой прослойки между двумя плоскими поверхностями будет аналогична только что рассмотренной, если мы мысленно разобьем всю прослойку жидкости на большое число таких тонких слоев, параллельных направлению движения, что каж-

дый из них можно считать движущимся как одно целое, не учитывая различия скоростей внутри него. В пределе, когда слои делаются исчезающе тонкими, а их число бесконечно большим, совершаемая при этом неточность также исчезает. При этом скорость v любого такого бесконечно тонкого слоя будет пропорциональна его расстоянию L от неподвижной поверхности y , что и означает постоянство градиента скорости во всем слое жидкости. Этот закон соответствует изменению скоростей в колоде карт в арифметической прогрессии, а также может быть выведен из равномерности движения отдельных слоев жидкости и возрастания силы трения с разностью скоростей соседних слоев.

Однако при исследовании движения реальной жидкости возникает следующая трудность. По мере того как мы с целью более точного изображения картины распределения скоростей в жидкости подразделяем ее на все большее число все более тонких слоев, разность скоростей этих слоев делается все меньше и в пределе становится равной нулю. Как же при этом можно говорить о возможных различиях относительной скорости «соседних» слоев и что называть «соседними» слоями? Это затруднение разрешается, если прибегнуть к данным опыта, который показывает, что сила трения между двумя пластинами, разделенными слоем однородной жидкости, прямо пропорциональна скорости одной пластины относительно другой и обратно пропорциональна их расстоянию. Отсюда следует, что сила трения прямо пропорциональна градиенту скорости в слое жидкости. Когда мы мысленно подразделяем всю жидкость на отдельные слои, то сила трения «между» ними будет определяться не просто разностью их скоростей, а разностью их скоростей, деленной на расстояние между их центрами. Когда толщина слоя стремится к нулю, то одновременно уменьшается и разность скоростей и это расстояние (равное толщине каждого слоя); частное же их остается конечным и равным градиенту скорости.

Аналогия с колодой карт, полезная для уяснения общей картины распределения скоростей в жидкой прослойке, чересчур груба для выяснения механизма передачи трения и движения через слой жидкости. Помимо того, подобная аналогия, сводя сопротивление жидкости относительному перемещению своих частей относи-

тельно друг друга при сдвиге к «внешнему трению» двух соприкасающихся твердых тел, может направить мысль о причинах и природе сил трения в жидкостях по неправильному пути.

О передаче количества движения

Не следует упускать из вида то общее, что имеется в обоих видах трения. В основе обоих, да и вообще любых видов трения лежит одно и то же явление: стремление каждого тела или его частиц сообщить свое движение другим телам или частицам, которые с ним (или с ними) соприкасаются, что и ведет к выравниванию скоростей движения.

Таким образом, в основе трения лежит тенденция к выравниванию скоростей движения тел или частиц. Это представление можно уточнить, введя некую количественную меру движения. В качестве таковой в механике рассматривается произведение скорости v на массу m , называемое количеством движения

$$I = mv. \quad (5)$$

Силы трения всегда стремятся замедлить движение более быстрого тела и, наоборот, ускорить движение более медленного. В результате одно тело теряет количество движения, другое приобретает. Из основных законов механики Ньютона выводится следующий общий закон сохранения количества движения: силы взаимодействия между двумя (или большим числом) телами не могут изменить сумму количеств их движения. Следовательно, количества движения, потерянные одним телом и приобретенные другим, равны. Это положение регулирует обмен количеством движения и при трении.

Легко проиллюстрировать передачу количества движения на самых простых явлениях повседневной жизни и техники. На пруду плавает лодка (рис. 3). Как ее привести в движение, находясь на берегу? Это можно сделать, кидая в нее камнями. Попадая в лодку, камни теряют свою скорость, а следовательно, и некоторое количество движения, которое передается лодке. Она и приходит поэтому в движение. Однако скорость лодки, приобретенная таким способом, в дальнейшем постепенно падает, и лодка останавливается. Торможение и остановка лодки —

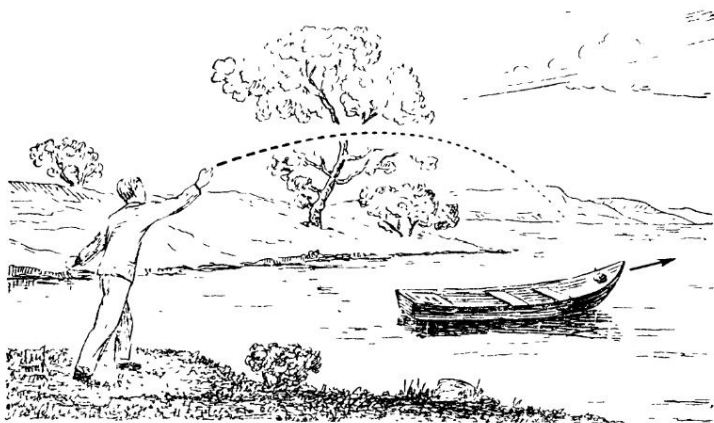


Рис. 3. Брошенный в лодку камень приводит ее в движение

следствие передачи количества движения лодки массе окружающей ее воды. Но движение воды в свою очередь также через некоторое время прекратится. Количество движения и в этом случае сохранится: оно будет передано Земле. Соответствующее изменение скорости Земного шара, однако, заметить нельзя. Из равенства количества движения, потерянного лодкой и приобретенного Землей, следует, что

$$mv = MV, \quad (6)$$

где m — масса лодки; v — скорость, которую она приобрела под действием камня; M — масса Земли; V — скорость, сообщенная ей лодкой (через посредство воды пруда).

Так как отношение m/M крайне мало, то из уравнения (6) видно, что полученная Землей скорость V чрезвычайно мала и не может быть обнаружена. Кроме того, эта скорость компенсируется скоростью, сообщаемой Земле ногами человека, упирающимися в нее в момент броска камня.

Оба рассмотренных случая передачи движения сопровождаются выравниванием скоростей, в первом случае — камня и лодки (удар), во втором — лодки и окружающей массы воды (трение). Сходство, различие и связь между трением и ударом ярко выражены Ф. Энгельсом: «Тре-

ние можно рассматривать как ряд маленьких ударов, происходящих друг за другом и друг подле друга; удар можно рассматривать как концентрированное в одном месте и на один момент трение»¹.

Различие между ударом и трением заключается также в том, что при ударе количество движения передается в направлении, совпадающем с относительной скоростью соприкасающихся тел, а при трении — в направлении, перпендикулярном к направлению относительной скорости. При трении оба тела скользят одно по другому, т. е. движутся, оставаясь в контакте друг с другом, хотя точки контакта и перемещаются относительно одного из тел (например, движение саней по снегу) или даже относительно обоих (например, трение двух цилиндров, вращающихся в противоположные стороны; рис. 4). Наоборот, удар предполагает, что два тела, не соприкасавшиеся друг с другом, в некоторый момент приходят в контакт, причем и после удара, при вполне неупругом его характере, контакт может сохраняться. Скольжение при ударе обычно отсутствует.



Рис. 4. Трение цилиндров, вращающихся в противоположных направлениях

Трение и превращения энергии.

Виды трения

Обмен количеством движения, ведущий к выравниванию скоростей, является только одной, по существу внешней, механической характеристикой трения. В действительности существо явлений трения заключается в превращении механического движения (или механической энергии) в молекулярное движение (или теплоту) в соответствии с общим законом сохранения энергии.

Энгельс пишет: «Теперь мы знаем, что трение и удар являются двумя формами превращения кинетической энергии в молекулярную энергию, в теплоту. Таким

¹ Ф. Э н г е л ь с. Диалектика природы. Госполитиздат, 1950, стр. 79.

образом, в каждом случае трения кинетическая энергия как таковая исчезает, чтобы появиться вновь не в виде потенциальной энергии, в смысле динамики, а как молекулярное движение в определенной форме теплоты»¹.

И далее: «Таким образом, трение и удар приводят от движения масс, предмета механики, к молекулярному движению, предмету физики»².

Само развитие тепла при трении является, пожалуй, одним из самых древних физических открытий, использованных еще доисторическим человеком для добывания огня. По этому поводу Энгельс пишет:

«Практическое открытие превращения механического движения в теплоту так старо, что от него можно было бы считать начало человеческой истории. Какие бы достижения ни предшествовали этому открытию огня — в виде изобретения орудий и приручения животных, — но только научившись добывать огонь с помощью трения, люди впервые заставили служить себе некоторую неорганическую силу природы. Какое глубокое впечатление произвело на человечество это гигантское, почти неизмеримое по своему значению открытие, показывают еще теперешние народные суеверия.

Изобретение каменного ножа, этого первого орудия, чествовалось еще долго спустя после введения в употребление бронзы и железа: все религиозные жертвоприношения совершались с помощью каменных ножей. По еврейскому преданию, Иисус Навин приказал совершить обрезание над родившимися в пустыне мужчинами при помощи каменных ножей; кельты и германцы пользовались в своих человеческих жертвоприношениях только каменными ножами. Но все это давно забыто. Иначе дело обстоит с огнем, получаемым при помощи трения. Долго спустя после того, как людям стали известны другие способы получения огня, всякий священный огонь должен был у большинства народов добываться путем трения. Еще и поныне в большинстве европейских стран существует народное поверье о том, что чудотворный огонь (например, у нас, немцев, огонь для заклинаний против поветрия на животных) может быть зажжен лишь

¹ Ф. Энгельс. Диалектика природы. Госполитиздат, 1950, стр. 77.

² Там же, стр. 79.

при помощи трения. Таким образом, еще и в наше время благодарная память о первой большой победе человека над природой продолжает полубессознательно жить в народном суеверии, в остатках язычески-мифологических воспоминаний образованнейших народов мира»¹.

Интересно, что, именно наблюдая нагревание пушечных стволов при сверлении, доводившее до кипения воду, применявшуюся для охлаждения, Румфорд отверг гипотезу, объяснявшую тепловые явления существованием невесомой тепловой жидкости — теплорода. Еще более бесспорно это следствие вытекало из известного опыта Деви, который добивался на морозе плавления трением друг о друга двух кусков льда. Подобного рода опыты и позволили обосновать так называемую механическую теорию тепла, вернее, общую природу кинетической энергии движения видимого, «молярного», по Энгельсу, и движения невидимого, молекулярного.

Так как под трением разумеют силы различного характера и различной природы, остановимся на классификации этих сил. Мы будем придерживаться такой классификации, основой которой являются резкие различия закономерностей трения в различных случаях.

Прежде всего мы делим трение (соответственно и материал этой книги) на внутреннее, когда превращения механических видов энергии в тепло происходят во всех точках некоторого объема (даже если он, при наличии смазки, имеет малую толщину), и внешнее, когда развитие тепла происходит только вдоль поверхности раздела двух тел, в которой протекает процесс скольжения.

Так как при пластических деформациях в кристаллических телах образуются плоскости скольжения, то сопротивление таким деформациям обнаруживает черты сходства с закономерностями внешнего трения. Наоборот, трение твердых тел, разделенных жидкой прослойкой, по своему механизму должно быть отнесено к внутреннему.

Внутреннее трение в однородных газах и жидкостях (не являющихся коллоидными растворами), как правило, подчиняется очень простому закону Ньютона: сила трения пропорциональна градиенту скорости. В твердых телах,

¹ Там же, стр. 80—81.

и даже в таких эластичных, как резина, или таких пластичных, как сырая резиновая масса, этот закон не применим; попытки складывать выражаемые этим законом силы трения с упругими силами, характерными для твердых тел, могут приводить к серьезным ошибкам. Поэтому автор считает целесообразным применять термин и понятие «внутреннее трение» только к жидкостям. Явления развития тепла при деформациях твердых тел могут излагаться и объясняться на базе представлений о релаксации (т. е. о рассасывании внутренних напряжений) и упругом последствии, что уже выходит за рамки настоящей книги.

При скольжении двух твердых тел, разделенных смазочной прослойкой, мы имеем дело с кажущимся внешним трением, механизм которого не отличается от механизма внутреннего трения в смазочной прослойке.

Когда толщина этой прослойки не меньше $0,1 \text{ мк}$, свойства этой прослойки такие же, как и смазочной жидкости в объеме. В этом случае говорят о жидкостном трении или о жидкостной смазке, а в случае более тонкой смазочной прослойки — о граничном трении или о граничной смазке.

Если смазка отсутствует (сухое трение) или состоит из двух слоев (толщиной в одну молекулу каждый), адсорбированных (как бы прилипших за счет сил молекулярного сцепления) к поверхностям трущихся тел (адсорбционная смазка), то закономерности трения являются общими и могут быть охарактеризованы как относящиеся к истинно внешнему трению, хотя в строгом смысле этот термин можно применять только к сухому трению.

Помимо этого, при внешнем трении различают трение движения и статическое трение (трение покоя); последнее имеет место до начала движения тела.

Наконец, в зависимости от геометрического характера, относительного перемещения трущихся тел различают следующие виды внешнего трения: трение скольжения, трение качения и трение верчения. При трении скольжения — наиболее общем и важном случае внешнего трения — в точках контакта скорости обоих тел не одинаковы по величине и относительная скорость контактирующих точек не равна нулю.

Противоположная картина наблюдается при качении и верчении. При качении движение одного тела относи-

тельно другого за любой бесконечно малый промежуток времени сводится к вращению вокруг оси, проходящей через точки контакта и лежащей на плоскости, касательной к обоим телам. Качение отличается от верчения тем, что точки контакта соприкасаются только на одно мгновение, в то время как при чистом верчении они соприкасаются неопределенно долгое время (например, вращение волчка).

При верчении ось вращения одного тела относительно другого перпендикулярна к касательной плоскости.

I. ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ

Основной закон внутреннего трения

Мы видели, что при движении одной пластинки относительно другой, ей параллельной, сила трения F пропорциональна градиенту скорости G жидкости в зазоре между пластинами. Кроме того, естественно считать, что сила трения равномерно распределена по всем участкам

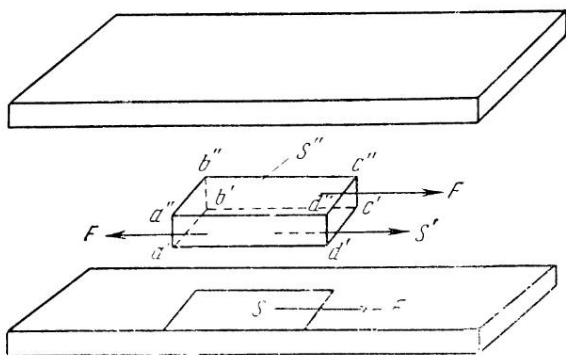


Рис. 5. К механизму внутреннего трения

поверхности каждой пластины и, следовательно, пропорциональна площади S участка, на который она действует (рис. 5). При этих предположениях сила трения должна выражаться формулой

$$F = \eta SG, \quad (7)$$

где η — коэффициент пропорциональности.

Как показывает опыт, η зависит от природы жидкой или газообразной среды между пластинами и от температуры; η называют коэффициентом внутреннего трения или вязкостью жидкости. Если все величины в формуле (7) выразить в абсолютной системе мер (CGS — см, г, сек), т. е. F — в динах, S — в см² и G — в сек⁻¹, то η будет выражено в единицах вязкости — пуазах ($пз$), названных так в честь французского исследователя Пуазейля (см. стр. 37).

Легко видеть, что та же формула (7) должна выражать силу трения любых находящихся в зазоре между пластинами слоев жидкости, соприкасающихся вдоль некоторой площадки S' (рис. 5). Действительно, силы трения, действующие на противоположные грани S' и S'' любого жидкого слоя $a'b'c'd'a''b''c''d''$, должны быть равны, иначе их равнодействующая была бы отлична от нуля и заставляла этот слой двигаться не равномерно, а с ускорением. Отсюда следует, что на силу трения не может влиять расстояние от нижней пластинки. Следовательно, силы трения между любыми слоями равны силе трения, действующей на пластинку со стороны нижнего слоя. Таким образом, F в формуле (7) выражает внутреннее трение в жидкости, могущее зависеть только от ее природы, но не от природы пластин и характера их поверхности. Отсюда также следует, что трение пластин, разделенных слоем жидкости, не зависит от рода пластин.

О скольжении между жидкостью и твердой стенкой

Такое утверждение способно, однако, породить вполне законные сомнения.

Прежде всего: разве трение не должно зависеть от степени гладкости пластин, будучи большим для более шероховатых? Ответ на этот вопрос дают наблюдения французского физика и инженера Кулона.

Опыты Кулона заключались в наблюдении за постепенным затуханием колебаний горизонтального диска, подвешенного в центре при помощи нити (рис. 6). Упругое сопротивление нити закручиванию способно поддерживать вращательные колебания диска вокруг вертикальной оси, при которых он поворачивается попеременно то в сторону движения часовой стрелки, то в обратную.

Отсчитывая углы поворота диска в момент изменения направления вращения, можно следить за постепенным затухающим колебанием, которое является результатом сил трения в жидкости между нижней поверхностью диска и дном сосуда, как между параллельными пластинами.

Кулон показал, что до тех пор, пока движение жидкости в зазоре между пластинами носит рассматриваемый

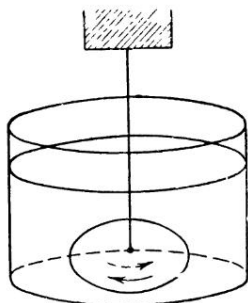


Рис. 6. Опыт Кулона с затуханием колебаний диска в жидкости

нами простейший характер и размеры углублений на пластинах малы по сравнению с расстоянием между пластинами, шероховатость заметного влияния на трение не оказывает. Это и понятно.

Подобная «неглубокая» микрошероховатость не может изменить градиент скорости между пластинами, а следовательно, согласно формуле (7), и силу F .

Неоднократно возникал также вопрос: не уменьшается ли трение в случае, когда пластины не могут смачиваться жидкостью, например если покрытые парафином пластины находятся в воде?

В самом деле, трение может уменьшиться в том случае, если между пластиной и не смачивающей ее жидкостью возникает скольжение. Это приведет к тому, что по схеме рис. 5. скорость частиц жидкости, прилегающих к верхней пластине, будет меньше ее скорости v , а частицы жидкости, прилегающие к нижней пластине, не будут в покое, а будут двигаться с некоторой скоростью. Вследствие этого градиент скорости G течения жидкости между пластинами не будет, согласно формуле (3), равен v/y , как раньше, а будет меньше этой величины. Поэтому и сила трения будет меньше, чем раньше. Это уменьшение будет тем значительнее, чем сильнее скольжение.

Меру этого скольжения можно получить, если продолжить прямолинейный профиль скоростей (рис. 7) вверх и вниз до достижения скоростей соответственно v (вверху) и 0 (внизу). Расстояния Δh , на которые надо продолжить профиль скоростей соответственно вверх и вниз, и будут характеризовать влияние скольжения. Действительно, уменьшение вследствие скольжения градиента скоростей

в зазоре между пластинами, а следовательно, и силы трения F будет равно $\frac{h}{h+2\Delta h}$, так что, если $h \gg \Delta h$, то влияние скольжения незаметно¹.

Опыты показывают, что в жидкостях, даже не смачивающих пластинку, например в случае ртути и стекла, Δh должно быть во всяком случае меньше 1 мк и что, следовательно, скольжение может влиять только при трении в очень узких зазорах.

Впервые «коэффициентскольжения» Δh ртути по стеклу был обнаружен и измерен в очень тонких и остроумных опытах Д. М. Толстого, который одновременно показал, что найденное значение $h \approx 1 \text{ мк}$ согласуется с теорией скольжения,

развитой им на основе теории вязкости жидкостей Я. К. Френкеля (стр. 84). Однако, как показал Д. М. Толстой, большее по величине скольжение может наблюдаться между твердой стенкой и консистентными смазками — мазеобразными по консистенции и потому по своим свойствам занимающими положение, промежуточное между жидкостями и твердыми телами.

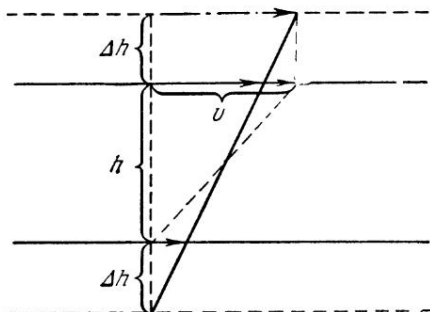


Рис. 7. Влияние скольжения на градиент скорости

Сопротивление движению твердого тела в жидкости

Таким образом, сопротивление, испытываемое твердым телом из-за вязкости жидкости, не зависит ни от природы тела, ни даже от природы и характера его поверхности. Не следует, однако, переносить этот вывод

¹ Влияние скольжения смазочной прослойки по твердым поверхностям на сопротивление их относительному перемещению рассматривал еще Н. П. Петров (подробнее см. стр. 91). Из опытов Н. П. Петрова вытекает пренебрежимо малое значение величины Δh для масел.

на любое движение твердого тела в жидкости. Опыт показывает, что, например, при высоких скоростях более гладкая форма облегчает движение тела в жидкостях. Еще более важно, что только при малых скоростях тела сила сопротивления его движению в жидкости пропорциональна скорости, а при больших скоростях квадрату скорости.

Следующее рассуждение, не претендуя на строгость, поможет уяснить физическое существо дела. Мы видели,

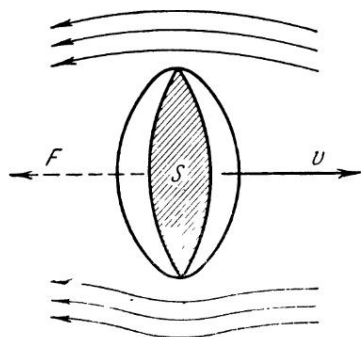


Рис. 8. Сопротивление при движении твердого тела в жидкости

что выравнивание скоростей и обмен количеством движения могут происходить как при трении, так и при ударе. При движении тела (рис. 8), например шара или снаряда, в воздухе (или жидкости) мы имеем, по существу, смешанный случай. С одной стороны, количество движения шара передается обтекающим его слоям воздуха вследствие внутреннего трения воздуха, т. е. передачи количества движения в направлении, поперечном направлению движения. С другой стороны, встречая в лобовой части все

новые и новые частицы воздуха, шар сообщает им количество движения, аналогично тому, как это происходит при ударе, т. е. происходит передача количества движения в направлении движения, однако шар при своем движении «ударяется» непрерывно о новые и новые частицы воздуха. Количество движения, которое передается при этом за единицу времени встречным частицам воздуха, будет пропорционально, во-первых, общей массе воздуха, встречаемой в единицу времени движущимся телом, и, во-вторых, сообщаемой им скорости. В итоге передаваемое в единицу времени количество движения, равное силе сопротивления, пропорционально плотности воздуха d и квадрату скорости тела v , причем оно зависит от формы тела.

Для тел геометрически подобной формы сопротивление пропорционально площади сечения S тела; речь идет

о сечении, перпендикулярном к направлению движения, так как площадь этого сечения пропорциональна массе встречаемого телом воздуха. Отсюда следует, как показал еще Ньютон, что сопротивление геометрически подобных тел пропорционально квадрату их линейных размеров, для шаров, например, — квадрату радиусов. Таким образом,

$$F = kR^2dv^2, \quad (8)$$

где k — безразмерный коэффициент.

На первый взгляд кажется, что сопротивление, зависящее от внутреннего трения, также должно быть пропорциональным квадрату линейных размеров тела, т. е. должно зависеть от площади поверхности тела S , соприкасающейся с обтекающей его средой. Однако с увеличением размеров тела при неизменной скорости градиенты скоростей уменьшаются пропорционально увеличению линейных размеров тела. В итоге сила трения «вязкого» происхождения оказывается пропорциональной первой степени линейных размеров тела (например, радиусу для шара).

Закон Стокса и его приложения

Формула, выведенная Стоксом из законов внутреннего трения жидкостей для сопротивления движению шара в жидкости за счет вязкости последней, имеет вид:

$$F = 6\pi R\eta v, \quad (9)$$

где η — вязкость жидкости.

Для практики очень важно знать, в каких условиях можно пользоваться законом Стокса и начиная с каких скоростей формула (9) начинает переходить в формулу (8).

Для формулировки этого условия необходимо пользоваться так называемым числом, или критерием, Рейнольдса Re . В рассматриваемом случае это число (безразмерное) равно отношению правых частей равенств (8) и (9), в которых опущены отвлеченные числа k и 6π :

$$Re = \frac{Rvd}{\eta}. \quad (10)$$

Как показали тщательные опыты над падающими в вязких жидкостях шариками, формула Стокса достаточно точно выполняется, если $Re < 1$.

Формула Стокса применяется весьма часто при решении задач четырех родов.

1. Тело движется под действием известной силы в среде с известной вязкостью. Требуется вычислить скорость движения v . Чаще всего речь идет о падении шарика под действием силы тяжести. В этом случае на шарик действует (вниз) его вес P , равный объему, умноженному на вес единицы объема dg (g — ускорение силы тяжести). Вверх действует выталкивающая сила, равная, по закону Архимеда, весу окружающей среды (с плотностью d_0) в объеме шара. Таким образом, равнодействующая сила

$$F' = \frac{4}{3} \pi R^3 g (d - d_0). \quad (11)$$

Под влиянием этой силы шарик начинает двигаться ускоренно, однако при этом возрастает сопротивление движению, действующее навстречу, ускорение падает, и через очень короткое время, когда обе силы — движущая и сила трения — делаются равными, тело начинает двигаться равномерно. Скорость равномерного падения найдется, если приравнять правые части уравнений (9) и (11) и найти v ; при этом

$$v = \frac{2}{9} g R^2 \frac{d - d_0}{\eta}. \quad (12)$$

По этой формуле можно рассчитать, например, скорость падения в воздухе капли воды. При радиусе $R = 0,03 \text{ мм} = 0,003 \text{ см}$ капля должна падать со скоростью $v = 20 \text{ см/сек}$. Число Рейнольдса при этом $Re = 0,6$, т. е. мы уже находимся близко от границы приложимости формулы Стокса.

Поучительно рассмотреть, к каким результатам можно прийти, если прилагать формулу Стокса и к более крупным каплям, не задумываясь над законностью этого. У самых крупных дождевых капель радиус равен нескольким миллиметрам. Вычислив скорость их падения для $R = 0,3 \text{ см}$ по формуле (12), получим $v = 2 \text{ км/сек}$, т. е. явно неправдоподобный результат. Капли, падающие с такой скоростью, представляли бы смертельную опас-

ность для человека, несмотря даже на их жидкое состояние. На самом деле такие капли падают со скоростью всего около 10 м/сек, что согласуется с формулами (8) и (11). Действительно, приравнявая F' и \bar{F} в формулах (8) и (11); придем к соотношению:

$$v^2 = \frac{4\pi}{3k} g \frac{d-d_0}{d} R,$$

откуда, подставляя числовые значения (на основании опытных данных) π , $g = 9,8 \cdot 10^2$ см/сек², $d_0 = 1$ г/см³, $d = 1,2 \cdot 10^{-3}$ г/см³, $k = 0,6$, найдем

$$v^2 \approx 6 \cdot 10^3 gR \approx 1,8 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{сек}^2;$$

$$v = 13 \text{ м/сек},$$

что примерно соответствует наблюдаемому результату.

Подобное же практическое приложение формулы Стокса было дано М. П. Воларовичем и А. А. Леонтьевой, вычислявшими на основании проведенных ими измерений скорость падения капель расплавленного металла через массу шлака. Этот расчет имеет существенное значение, так как для практических целей важно, чтобы падение происходило не слишком медленно.

2. Измеряя скорость падения шарика в жидкости под действием собственного веса, можно из формулы (12) вычислить вязкость жидкости, если остальные величины (радиус шарика и плотность окружающей его среды) известны. Этот способ позволяет, если применять очень маленькие шарики, измерять коэффициент внутреннего трения жидкостей средней вязкости (масло, глицерин), а если брать более крупные шарики, то и высоковязких жидкостей (смола, патока, расплавленное стекло).

Наблюдения над падением шарика в цилиндре, наполненном вязкой жидкостью (например, маслом), температура которой возрастает с высотой, позволяют сразу определить вязкость при различных температурах, наблюдаемых в цилиндре на разных уровнях. Такой способ определения температурной зависимости вязкости, во много раз сокращающий продолжительность экспериментов, был разработан М. М. Кусаковым.

3. Если известна вязкость среды и скорость движения в ней шарика, то по формуле (9) можно вычислить действующую на него силу F . Этот способ был применен,

например, американским физиком Р. Миллиkenом при измерении заряда электрона. Для этого (рис. 9) измерялось изменение Δv скорости падения под действием собственного веса P масляной капельки, находящейся в электрическом поле между двумя разноименно заряженными параллельными пластинами AA и BB при изменении заряда капли на один элементарный заряд, равный заряду одного электрона ¹.

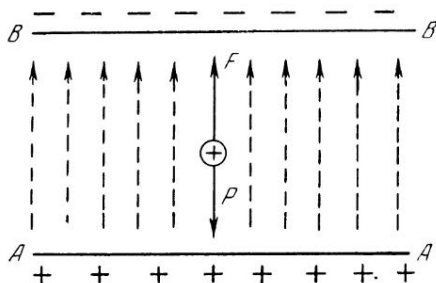


Рис. 9. Схема измерения заряда электрона

Зная изменение скорости и радиус масляной капельки, можно было по формуле (9) определить силу F , с которой электрическое поле действует на заряд электрона. Измерив предварительно силу, с которой то же электрическое поле действует на какой-нибудь заряд, величина которого известна, можно, используя правило пропорциональности, вычислить и величину заряда электрона. В опытах Р. Милликена электрическое поле действовало на заряд электрона e с силой порядка 10^{-8} — 10^{-9} мг, которая, по закону Стокса, могла быть измерена с точностью приблизительно 0,1%. Эти цифры показывают, какие тончайшие методы «взвешивания» мы получаем на основе законов трения.

4. Если неизвестен только радиус шарика R , то по скорости его падения под влиянием силы тяжести — его веса — можно определить этот радиус. Это, в частности,

¹ Подобные же опыты были еще ранее проведены акад. А. Ф. Иоффе с целью изучения механизма «выбрасывания» электронов под действием света и для проверки теории этого явления Эйнштейна. При этом об изменении заряда автор судил по изменению величины электрического поля, которое было необходимо для уравнивания веса самой капли.

потребовалось Милликену для определения радиуса его масляных капель. К этому же, по существу, сводится и измерение радиусов частиц, «взмученных» или взвешенных в какой-нибудь жидкости. По скорости оседания верхней границы облака таких частиц можно, очевидно, определить радиус наименьших из них.

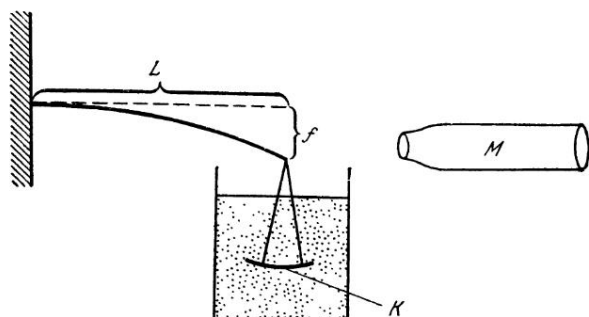


Рис. 10. Схема прибора Н. А. Фигуровского для определения фракционного состава взвешенных в жидкости частиц

Если все взвешенные частицы имеют одинаковый радиус и равномерно распределены в объеме жидкости, то осадок на дне со временем возрастает также равномерно. Отклонения от равномерности позволяют определить, какая доля частиц имеет радиусы, лежащие в том или ином интервале, что даст возможность определить число частиц различных размеров. Наблюдения над ростом осадка весьма удобно и вполне точно можно производить, подвешивая в жидкости чашечку и наблюдая возрастание ее веса со временем (седиментационный анализ). Для этой цели проще всего (рис. 10) подвешивать чашечку K к стеклянной нити длиной L и по увеличению ее прогиба f , наблюдаемого в микроскоп M , судить о весе осадка. Такой способ предложил и с успехом применил Н. А. Фигуровский.

Если в течение нескольких часов вести наблюдения над оседанием, то можно дожидаться выпадения весьма мелких фракций. Так, за 3 часа наблюдения из столба воды высотой 1 см осадут все кварцевые частицы (плотность $2,5 \text{ г/см}^3$) диаметром больше 1 μ . Этот результат можно

легко получить из формулы (12), учитывая, что вязкость воды при 20° приблизительно равна $0,01$ *пз*.

Наоборот, зная, что осаждение частиц из столба жидкости высотой h закончилось за время τ , можно заключить, что скорость падения частиц наименьшего радиуса, присутствующих в данном порошке, равна h/τ . Определив скорость, можно из формулы Стокса найти и радиус соответствующих частиц. Закон Стокса позволяет узнавать радиус даже самых малых частиц, размеры которых невозможно определить непосредственно под микроскопом. Недостатком методов статического седиментационного анализа является возможность возникновения ошибок из-за потоков жидкости, вызываемых случайными разностями температур (тепловая конвекция). Эти ошибки особенно велики и трудно устранимы при статическом седиментационном анализе аэрозолей, т. е. систем, образованных частицами, взвешенными в воздухе (или в других газах). Для этого случая, однако, автор предложил поточный метод седиментационного анализа, в котором не только устранено влияние конвекции, но и резко сокращено затрачиваемое на определение время.

При применении этого метода поток аэрозоля засасывается снизу через опрокинутую воронку, затянутую сеткой. Благодаря сетке в зоне на некотором расстоянии выше (а также ниже) ее, например в плоскости AA' , (рис. 11) скорости потока будут везде одинаковы и равны v , за исключением участков в непосредственной близости от боковых стенок воронки. Поэтому через плоскость AA' пройдут те и только те частицы, скорость падения которых под влиянием тяжести будет меньше скорости потока v . Если применить формулу Стокса, то можно, зная v , найти верхний предел радиусов частиц, которые проходят через воронку с сеткой. Считая концентрацию частиц, проходящих при разных скоростях засасывания v , можно с помощью разработанного Г. Я. Власенко и автором поточного ультрамикроскопа за короткое время определить численность фракций с различными верхними пределами радиусов, т. е. узнать фракционный состав. Этот способ применим и для определения фракционного состава частиц, взвешенных в жидкости.

При этом возникает важный вопрос; до каких наименьших радиусов можно считать применимым закон Стокса и, следовательно, не бояться ошибиться, определяя при

его помощи радиус соответствующих частиц? Нет оснований предполагать, что закон Стокса потеряет свою строгую приложимость раньше, чем радиус «частиц» приблизится к «радиусам» молекул жидкой среды, в которой движутся эти частицы. И действительно, из опыта следует, что отклонения от закона Стокса, даже при его применении к движению молекул одного тела (растворенного) в жидкости (растворителе), оказываются настолько

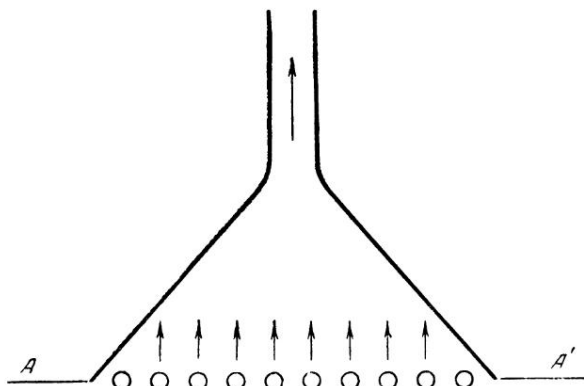


Рис. 11. Применение опрокинутой воронки с сеткой для фракционирования дисперсных частиц

умеренными, что позволяют использовать этот закон и для грубой оценки размеров молекул. Особенно важно применение этого метода к случаю «больших» молекул, например белков. Необходимо только учитывать осложнения, вносимые несферической формой молекул. Одним из методов доказательства приложимости закона Стокса к движению молекул с сохранением того же значения вязкости, что и для случая движения «больших» шариков, служит измерение скорости диффузии, т. е. процесса выравнивания концентрации растворенных молекул в результате их беспорядочного теплового движения. Наблюдаемая скорость диффузии близка к той, которая получается из вычислений, предполагающих, что сопротивление движению молекул в жидкости подчиняется закону Стокса.

Другое доказательство близости микро- и макро-вязкости было получено С. И. Вавиловым и В. Л. Левшиным при изучении влияния вязкости на яв-

ления свечения (люминесценции) жидкостей. Роль вязкости связана с ее влиянием на движение и соударения молекул, а движения и соударения молекул воздействуют на их свечение. Изучение этого явления также показало приложимость закона Стокса к микродвижениям отдельных молекул.

На явлении, охватываемом законом Стокса, основывается и практическое разделение порошков по фракциям. Беря то, что не успевает осесть за определенное время, мы освобождаемся от более крупных фракций. Так, обозначение «60-минутник» или «240-минутник», применяемое к полировальным порошкам, указывает на то, что порошки освобождены от фракций, осаждающихся из столба воды высотой 30—40 см соответственно за 1 час или за 4 часа. Формула (12) позволяет подсчитать и соответствующий максимальный размер частиц порошка. Этим способом не удастся, однако, одновременно освободиться и от более крупных, и от более мелких фракций, получая «узкую фракцию» с частицами, близкими по размерам. Эту задачу в принципе легко решить, направляя поток жидкости или воздуха горизонтально. Чем мельче частицы, тем дальше будет расположено место их оседания. При равномерном распределении частиц по различным фракциям и осадок также получится равномерным.

В некоторых случаях практического применения порошков задача равномерного покрытия осадком некоторой площади становится очень важной. Примером может служить обработка посевов различными порошками для уничтожения вредителей сельского хозяйства. Для этого образуют туман из мелких частиц порошка или капелек соответствующих растворов, который разносится ветром на большую площадь. Для более или менее равномерного покрытия площади осадком этих частиц нужен определенный фракционный состав, подыскиваемый на основе формулы (12). Подобная задача была поставлена и разрешена А. Г. Амелиным. В земной атмосфере обычными являются восходящие потоки воздуха. Поднимаясь, воздушные массы расширяются и, как следствие, охлаждаются. Содержащиеся в воздухе водяные пары, достигнув некоторой температуры, начинают конденсироваться и образовывать облако — собрание мелких водных капель. Некрупные капли падают со скоростью, меньшей

скорости восходящего потока. Поэтому облако, состоящее из таких капель, неспособно давать осадки до тех пор, пока не произойдет укрупнения капель. Таким образом, трение водяных капель о воздух регулирует одно из важнейших явлений природы — выпадение дождя. Однако расчеты здесь могут основываться на формуле (12) только для капель, скорость падения которых меньше 20 см/сек. Средние же дождевые капли имеют скорость падения до нескольких метров в секунду.

Трение водяных капель играет также, по-видимому, важную роль и в происхождении гроз и других электрических явлений в облаках. Мелкие и крупные капли в облаках заряжаются преимущественно разноименно. Более быстрое падение крупных капель разделяет эти противоположные заряды на разные горизонты. Разделение противоположных зарядов вызывает появление между ними мощных электрических сил (больших разностей потенциалов), дающих начало грозовым разрядам — молнии. Трение не играет роли в процессах заряжения отдельных водяных капель, а только обеспечивает их «сортировку» по размерам — своего рода воздушную сепарацию.

Течение жидкости по трубам

Проявления сил внутреннего трения наблюдаются и при течении жидкости или газов по трубам небольшого сечения. Первым ученым, обратившим внимание на это явление и положившим начало его изучению, был М. В. Ломоносов. Он обнаружил, что разные жидкости вытекают из капиллярных трубок с весьма различными скоростями, и предложил использовать подобные наблюдения для характеристики различных жидкостей. Сохранился и чертеж запроектированного Ломоносовым для этой цели прибора. Тем самым было положено начало развитию капиллярных приборов для измерения вязкости жидкостей.

Движение жидкости через капилляры лежит в основе кровообращения, и потому не случайно детально исследовал законы такого течения французский врач Пуазейль. В своих опытах он измерял количество воды, вытекавшей из капилляров различной длины и различного диаметра под давлением разной величины. Кроме того, Пуазейль изменял материал, из которого приготавлился капилляр.

Его опыты доказали, что объем протекающей через капилляр воды зависит не от природы стенок капилляра, а только от его формы и температуры (для данной жидкости — воды, с которой экспериментировал Пуазейль). Объем протекающей воды оказался пропорциональным давлению истечения¹, обратно пропорциональным длине капилляра и прямо пропорциональным четвертой степени радиуса капилляра.

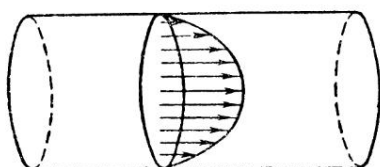


Рис. 12. Профиль скоростей при течении жидкости в капилляре

Опыты Пуазейля установили законы течения воды в капиллярных трубках и дали толчок к развитию важнейших методов измерения вязкости жидкостей — методов, основанных на измерении сопротивления течению жидкости в капилляре определенной формы.

Однако только работы Н. П. Петрова, тщательно исследовавшего течение через капилляры не только воды, но и некоторых масел при различных температурах, заложили настоящий научный фундамент измерения вязкости жидкостей.

Чтобы яснее представить себе роль в н у т р е н н е г о т р е н и я жидкости при ее течении в капилляре, следует прежде всего вспомнить, что, согласно предыдущему, частицы жидкости, прилегающие к стенкам капилляра, остаются в покое. Максимальную скорость движения v имеют частицы жидкости, находящиеся на оси капилляра. Скорость частиц жидкости постепенно падает по мере удаления от оси капилляра и приближения к его стенкам.

Если возьмем (рис. 12) какое-нибудь сечение капилляра, перпендикулярное к его оси, и из разных точек сечения будем откладывать стрелки, изображающие величину и направление скоростей v в соответствующих ме-

¹ Под давлением истечения разумеется разность давлений между концами капилляра.

стах сечения капилляра, то концы всех этих стрелок расположатся на некоторой кривой, изображающей профиль скоростей.

Основываясь на законах внутреннего трения жидкостей, можно показать, что профиль скоростей представляет собой отрезок параболы, ось которой совпадает с осью капилляра. Учитывая такую форму профиля скоростей и закон внутреннего трения (7), можно получить формулу, выражающую объем жидкости, протекающей через сечение капилляра в единицу времени, т. е. так называемый расход жидкости Q , связав его с радиусом капилляра r , длиной капилляра l , разностью давления на концах его p и вязкостью жидкости η :

$$Q = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{r^4}{l} \cdot \frac{p}{\eta} \quad (13)$$

Эта формула, в частности, объясняет результаты опытов Пуазейля, которые таким образом подтверждают правильность расчетов. Следует помнить, что эта формула применима только при определенных условиях, которые точно указаны Н. П. Петровым и важнейшим из которых является достаточная малость скорости течения жидкости и радиусов капилляра. Это условие формулируется при помощи числа Рейнольдса, которое мы выше рассматривали для случая движения шара в вязкой среде. Для случая, когда жидкость течет через капилляр, число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{rvd}{\eta},$$

где v — средняя скорость частиц жидкости в капилляре. Таким образом, в этом случае в число Рейнольдса входит, вместо радиуса шара, диаметр капилляра d .

Опыты показали, что формула (13) применима для капилляров, длина которых превышает по меньшей мере в десять раз их диаметр, до тех пор, пока число Рейнольдса остается меньшим тысячи. Если, увеличивая действующее давление и скорость течения жидкости, выйти за эту границу, так что условие

$$\text{Re} = \frac{rvd}{\eta} < 1000$$

больше уже не соблюдается, то расход жидкости начинает возрастать медленнее, чем перепад давления на концах капилляра, понуждающий течение жидкости.

В чем же причина отклонений от закона Пуазейля, основывающегося на законах внутреннего трения жидкости? Ответу на этот вопрос посвящен следующий раздел.

Ламинарный и турбулентный режимы течения

Причину указанного выше явления можно вскрыть, если постараться сделать видимым характер течения жидкости, пути движения отдельных ее частиц, подмешав

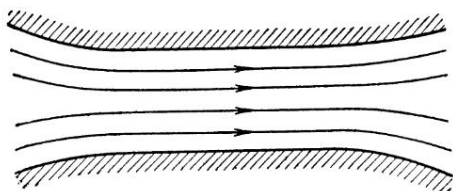


Рис. 13. Форма траекторий частиц при ламинарном течении через капилляр

к жидкости какой-нибудь тонкий порошок или подкрашивая в отдельных местах перед входом в капилляр струйки жидкости какой-нибудь краской, например метиленовой синей. Пока $Re < 1000$, частицы порошка движутся в капилляре по прямым линиям, строго параллельно оси капилляра. Только при входе в капилляр и выходе из него (рис. 13) пути движения отдельных частиц разбегаются в стороны соответственно изменению сечения потока жидкости. Вследствие этого и окрашенные струйки жидкости имеют прямолинейную форму, параллельную оси капилляра. Течение такого характера называется ламинарным, или послойным, от латинского слова *lamina* (слой).

Действительно, при таком режиме течения жидкость в капилляре можно мысленно разбить на ряд тонких цилиндрических слоев с общей осью, совпадающей с осью капилляра. Каждый такой цилиндрический слой движется как одно целое, но скорости различных слоев неодинаковы, убывая от оси капилляра к его стенкам.

Такая картина течения напоминает движение частей подзорной трубы или телескопа при его раздвижении — такой случай течения называют также телескопическим. При таком течении жидкости через капилляр может строго соблюдаться параболический профиль скоростей, с чем и связана приложимость закона Пуазейля.

Если, однако, при увеличении скорости течения $Re > 1000 \div 1500$, то наблюдается новое явление: окрашенные струйки жидкости теряют правильную прямолинейную форму и начинают изгибаться, приобретать с дальнейшим повышением скорости течения жидкости все более и более неправильную, узловатую форму (рис. 14). Само

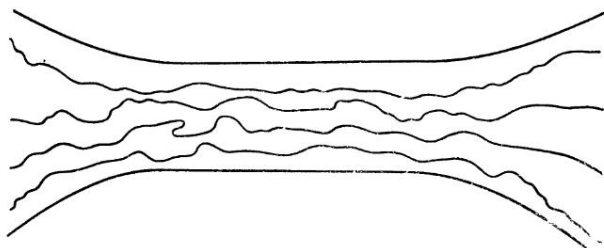


Рис. 14. Форма траекторий частиц при турбулентном течении через капилляр

собой разумеется, что ни о какой параллельности оси капилляра движению частиц жидкости при этом не может быть и речи. Частицы жидкости, движение которых при входе в капилляр совпадало с его осью, в дальнейшем могут совершенно отойти от оси капилляра, уступив место другим частицам, которые вначале находились дальше от оси капилляра или даже почти у самых его стенок. В результате этого пути движения отдельных частиц жидкости как бы перепутываются, вследствие чего подобный режим течения называется турбулентным (от латинского слова *turbulentus* — вихревой). Если же вести наблюдение за формой окрашенных струй, то обнаружится, что эти струи не только теряют прямолинейную форму, но и быстро размываются, вследствие чего окраска постепенно распределяется равномерно по всему объему текущей в капилляре жидкости. Это размывание окрашенных струй ускоряется с увеличением скорости течения.

Турбулентный характер режима течения хорошо виден также, если наблюдать за движением отдельных мелких частиц, взвешенных в жидкости, например частиц сажи.

При турбулентном режиме направление скорости меняется не только по мере продвижения какой-либо частицы жидкости, когда она переходит из одного сечения капилляра в другое, оно меняется также непрерывно, со временем, если наблюдать за скоростями частиц жидкости, пересекающих определенное сечение капилляра. Скорость частиц жидкости в данном месте определенного сечения капилляра не остается постоянной во времени, а непрерывно меняется и по величине, и по направлению. Таким образом, движение не носит установившегося характера, а поток жидкости непрерывно испытывает изменение своего характера во времени, он как бы пульсирует. Чем больше Re , т. е. чем выше скорость течения при прочих равных условиях, тем сильнее выражены те качества течения, которые заставили присвоить ему название турбулентного, т. е. вихревого.

Различие в степени турбулентности можно очень наглядно представить себе, если течение в тихой, мелкой реке с гладким песчаным дном сравнивать с течением бурного горного потока с каменистым ложем. Чем круче спускается поток и, следовательно, чем быстрее его скорость и чем неправильнее его ложе, образованное камнями, тем он бурливее, тем более движение потока отличается от движения спокойной реки, текущей с небольшим уклоном.

Следует, однако, заметить, что течение самой тихой реки никогда не бывает строго ламинарным, даже при очень гладкой и правильно цилиндрической форме дна и берегов. Это можно заметить, внимательно наблюдая движение отдельных мелких предметов, плывущих по поверхности реки, или фиксируя свое внимание на движении воды вблизи какого-нибудь определенного места реки: скорости движения частиц, проходящих через определенное место реки, которое можно отметить, например, при помощи неподвижного указателя, все время колеблются по направлению и величине, хотя и не столь резко и быстро, как у бурного горного потока. Несоблюдение ламинарного режима течения у такой тихой реки связано с тем, что и здесь Re больше 1000.

Если поток жидкости течет по капилляру нецилиндрической формы, то может случиться, что для одних сечений капилляра соблюдаются условия ламинарности, а для других, более широких сечений эти условия нарушаются.

Подобный случай будет возможен, если спаять два стеклянных капилляра разного диаметра и наблюдать за характером течения жидкости через такой составной капилляр. Подобрав давление, приводящее жидкость в движение, можно при помощи взвешенных в ней частиц, например сажи, наблюдать, как, переходя из узкой части

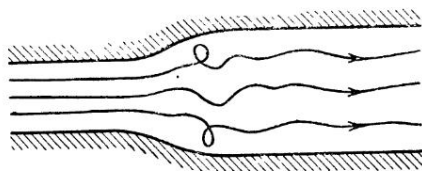


Рис. 15. Нарушение ламинарности при переходе потока в более широкую трубку

капилляра в более широкую, траектории этих частиц перестают быть параллельными одна другой и оси капилляра, что указывает на переход от ламинарного режима к турбулентному (рис. 15).

Впрочем, места расширения русла потока вообще характеризуются повышенной склонностью к нарушению ламинарного режима течения. Поэтому может случиться, что нарушение ламинарности, наблюдаемое при переходе из узкой части капилляра в более широкую, исчезнет и дальше от места стыка установится опять ламинарный режим течения. Этого не происходит, если число Рейнольдса для широкого участка капилляра достаточно велико.

При обратном направлении потока, из более широкой части капилляра в более узкую, в месте стыка ламинарность режима не нарушается. Вообще всякое расширение потока, наблюдаемое при обтекании каких-либо твердых стенок, может приводить к образованию вихревых движений в жидкости, сопровождающихся нарушением ламинарного режима, появлением области турбулентности. Особенно легко возникают подобные вихри тогда, когда поток жидкости обтекает стенки с острыми углами. Рез-



Рис. 16. Течение реки вблизи острого камня

кое изменение профиля стенки всегда сопровождается завихрениями течения жидкости, появлением турбулентности.

Появление подобных вихрей можно наблюдать, например, когда река обтекает какой-нибудь острый предмет (рис. 16). Подобные вихри также ясно видны при движении весла в воде. Образование вихрей наблюдается также и при обтекании вполне гладких предметов, например шара (рис. 17), но в случае гладких предметов ламинарный режим нарушается при определенной, более высокой скорости течения, зависящей от формы тела. При определенной гладкой форме тела ламинарность нарушается при больших скоростях потока и турбулентность получает меньшее развитие и захватывает меньший объем.

Образование вихрей при относительном движении шара и жидкости¹ с достаточной скоростью служит причиной отклонения от закона Стокса и перехода закона сопротивления к ньютоновскому закону. Аналогичный переход наблюдается и для тел другой формы, например чечевицеобразной или удлиненной, веретенообразной.

¹ Очевидно, что сила, действующая на тело, находящееся в жидкости, зависит только от относительной скорости тела и жидкости, но не от того, принять ли неподвижным тело или удаленные от него части жидкости.

Впервые объяснил образованием вихрей переход от вязкого, сопротивления к сопротивлению, зависящему от инерции частиц жидкости, наш великий ученый Н. Е. Жуковский. Особенно велико значение этих работ

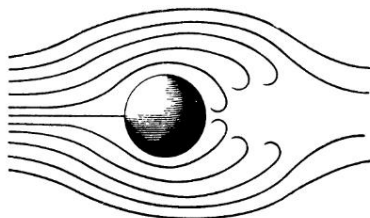


Рис. 17. Обтекание шара с образованием вихрей

Жуковского при расчете формы корпусов судов и самолетов. На первый взгляд кажется, что для уменьшения сопротивления движению корабля или подводной лодки важно обратить внимание на его носовую часть, как бы рассекающую жидкость, т. е. на форму корпуса вблизи носа корабля. На самом деле при больших Re дело обстоит как раз наоборот. Тело в виде круглого конуса

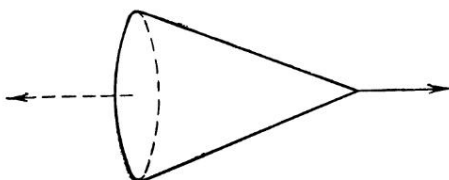


Рис. 18. К сопротивлению при движении в жидкости тела конической формы

(рис. 18) будет встречать большее сопротивление при движении направо, чем при движении налево. Это объясняется тем, что в основном сопротивление при больших Re зависит от образования вихрей и зоны турбулентности позади тела, обтекаемого потоком среды, в которой он движется. Эта зона образуется сзади именно потому, что там соседние струйки жидкости начинают удаляться одна от другой и в соответствующем месте поток жидкости, обтекающей тело, как бы расши-

ряется, а мы уже видели, что если наступает резкое расширение потока вследствие резкого изменения формы русла, то возникновение турбулентности облегчается. Наоборот, для устранения последней выгодно, чтобы задняя часть *A* тела имела форму, изображенную на рис. 19, где стрелками показана картина течения жидкости в этом случае и при движении в противоположном направлении.

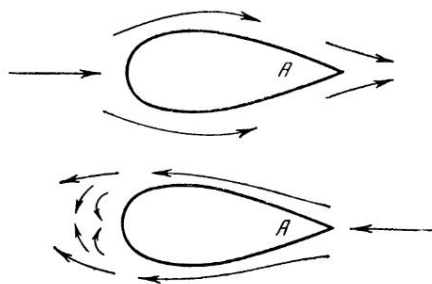


Рис. 19. К понятию обтекаемой формы тела при движении в жидкости

Даже при весьма хорошей, обтекаемой форме тела, когда турбулентное движение жидкости резко не выражено, все же закон сопротивления для тел достаточно больших размеров, как, например, подводные лодки и некоторые другие, в основном определяется инерцией частиц жидкости, а не ее вязкостью. В соответствии с этим сила сопротивления меняется пропорционально не первой степени скорости, а второй или даже более высокой.

При движении кораблей по поверхности воды весьма значительная часть сопротивления зависит от траты энергии на образование волн (рис. 20). Поэтому в кораблестроении большое значение имеют расчеты, позволяющие придать корпусу корабля такую форму, чтобы уменьшить это волновое сопротивление. Для подводных лодок учет волнового сопротивления, наоборот, не нужен.

Как уже мы говорили выше, при переходе ламинарного течения по капилляру в турбулентное формула Пуазейля перестает быть приложимой и давление истечения начинает возрастать быстрее, чем расход жидкости. Это объясняется тем, что более неправильный, запутанный

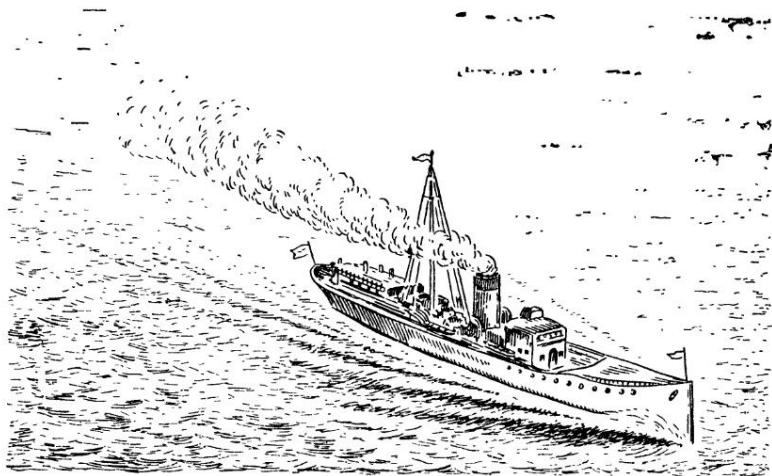


Рис. 20. Корабельная волна

характер течения жидкости требует для своего поддержания большей затраты энергии.

Иначе можно объяснить это явление, рассматривая обмен или перенос количества движения между слоями жидкости, расположенными на разных расстояниях от оси капилляра. При ламинарном режиме непосредственный обмен количеством движения происходит в результате внутреннего трения жидкости только между непосредственно соприкасающимися частями жидкости. В дальнейшем мы покажем, как объясняется внутреннее трение жидкости, сопровождающее такую передачу количества движения внутри жидкости от слоя к слою, когда будем рассматривать поведение, движение и взаимодействие отдельных молекул, из которых составлены все тела, в том числе и жидкости. Мы также рассмотрим и механизм внутреннего трения в газах. При турбулентном течении появляется еще другой механизм, усиливающий обмен количеством движения между частями жидкости, расположенными на разных расстояниях от оси капилляра.

При беспорядочном характере турбулентного потока все же можно говорить о некоторой средней скорости

частиц жидкости в данном месте потока, которую можно определить, ведя наблюдение за потоком в течение времени, значительно превышающего периоды колебаний скорости потока (его «пульсацию»). Найденная таким образом средняя скорость потока становится величиной определенной, не зависящей от времени.

В случае турбулентного потока в капилляре в точках, достаточно удаленных от его концов, средняя скорость частиц жидкости зависит только от расстояния от оси

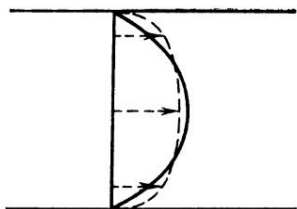


Рис. 21. Профиль средних скоростей при ламинарном (сплошная кривая) и турбулентном (пунктир) течении в капилляре

капилляра. Благодаря этому можно построить профиль скоростей в капилляре, форма которого будет одинаковой для различных сечений, не слишком близких к его концам. Однако, в отличие от ламинарного режима, профиль скоростей при турбулентном режиме имеет форму не параболы, а кривой, изображенной на рис. 21 пунктиром для некоторого частного случая течения. Для

сравнения на том же рисунке сплошной кривой изображен параболический профиль скоростей.

Таким образом, и в случае турбулентного движения средняя скорость течения частиц жидкости постепенно убывает по мере удаления от оси капилляра и приближения к его стенкам. Но мы видели, что в действительности движение каждой частицы жидкости происходит не параллельно оси капилляра, а является запутанным, так как каждая частица жидкости то удаляется от оси капилляра, то приближается к ней.

В те моменты своего движения, когда рассматриваемые частицы жидкости находятся около оси капилляра, они обладают в среднем более высокой слагающей скорости, параллельной этой оси. Переходя вследствие запутанности своего пути ближе к стенкам, те или иные частицы жидкости переносят туда и соответствующее избыточное количество движения. Попав же в окружение частиц жидкости, расположенных дальше от оси капилляра и, естественно, движущихся в среднем с меньшей скоростью, рассматриваемые частицы жидкости стремятся, благодаря

трению, выравнять скорость своего движения со скоростями движения окружающих частиц, обмениваются количеством движения с ними, т. е. отдают им свое избыточное количество движения.

Таким образом, турбулентный характер движения вызывает как бы перемешивание жидкости, текущей внутри капилляра, создавая тем самым дополнительный механизм обмена количеством движения, отсутствующий при ламинарном течении. Этим и объясняется более быстрое возрастание сопротивления с ростом скорости течения жидкости при не ламинарном режиме.

Естественно, что законы ламинарного движения жидкости в основном применимы к более узким капиллярам, и, наоборот, к более широким капиллярам и трубам чаще необходимо применять законы сопротивления, учитывающие турбулентный характер потока. Этим объясняется, что гидравлика — наука, занимающаяся, в частности, расчетом течения воды по трубам и каналам в различных промышленных сооружениях, а также движения паро-воздушных смесей в отопительных системах, паровых двигателях и других установках, — основывается главным образом на законах движения жидкостей по трубам при турбулентном режиме.

Однако при движении вязких нефтей и масел по соответствующим трубопроводам не меньшее значение имеет и закон Пуазейля. Ламинарным будет движение жидкости по капиллярам при течении крови по кровеносным сосудам, при движении питательных соков в стволах растений и деревьев. Близкие закономерности наблюдаются при движении воды или нефти в земле в тонкопористых грунтах.

Таким образом, этот случай течения жидкости имеет большое значение в жизни природы.

Применение закона Пуазейля при измерении вязкости

Особое значение имеет закон Пуазейля в лабораторной практике, так как дает наиболее простой и точный способ измерения коэффициента внутреннего трения жидкостей. Почти все определения вязкости в физических, химических и иных лабораториях производятся именно на основе формулы (13) с применением приборов, в которых

исследуемую жидкость заставляют протекать по капиллярам определенного сечения. Схема одного из таких приборов для определения вязкости — капиллярного вискозиметра — изображена на рис. 22.

Вискозиметр представляет собой двухколенную трубку с двумя расположенными в обоих коленах на разных уровнях расширениями в виде одинакового размера шариков *A* и *B*. Выше и ниже верхнего шарика *A* имеются сужения — в местах *a* и *b*. В левом колене под шариком *A* впаян капилляр. Исследуемая жидкость засасывается в вискозиметр так, что занимает заштрихованный объем.

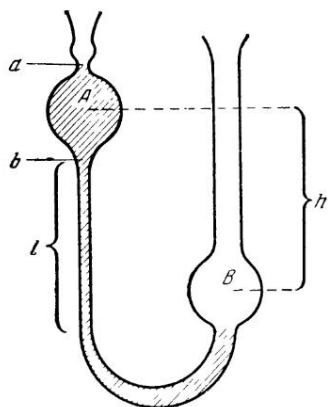


Рис. 22. Капиллярный вискозиметр

Отключая засасывающее приспособление, наблюдают течение жидкости под влиянием собственного веса, стремящегося сравнять уровни жидкости в обоих коленах сосуда. При этом замечают время τ , затрачиваемое мениском жидкости. в левом колене для того, чтобы спуститься от сужения *a* до сужения *b*. Зная емкость вискозиметра между сужениями *a* и *b* и деля ее на время истечения τ , находят объемную скорость истечения *Q*.

Перепад давления *p*, под действием которого происходит течение жидкости, вычисляется по разности уровня жидкости в обоих коленах вискозиметра. Если длина *l* и радиус *r* капилляра известны, то при помощи формулы (13) легко рассчитать вязкость жидкости. Однако трудно подобрать капилляр так, чтобы сечение его по всей длине было строго одинаково; кроме того, часть сопротивления движению жидкости зависит от трубок, присоединенных к капилляру. Все это затрудняет непосредственное определение вязкости по формуле (13).

Если, однако, в каком-нибудь приборе этого типа измерена при определенной температуре вязкость некоторой жидкости, например воды, то определение вязкости других жидкостей можно вести, пренебрегая этими трудностями, в любом капиллярном вискозиметре следующим

образом. Заменяя в уравнении (13) Q через V/τ , можно после простых преобразований получить уравнение

$$\eta = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{r^4}{lV} p\tau. \quad (14)$$

Из формулы (14) видно, что произведение перепада давления p , под которым происходит течение жидкости, на время истечения τ для прибора данных размеров строго пропорционально вязкости жидкости.

Таблица 1

Вязкость некоторых жидкостей и газов

Вещество	Температура, °C	Вязкость, пз	Вещество	Температура, °C	Вязкость, пз
Жидкости			Газы		
Вода	0	0,018	Водяной пар	0	0,000080
»	20	0,010	»	100	0,000127
»	100	0,003	Воздух . . .	0	0,000173
Анилин . . .	20	0,044	»	20	0,000181
Бензол	20	0,0065	»	100	0,000223
Ксилол	20	0,0064	Водород . . .	0	0,000083
Метиловый			Кислород . .	0	0,000192
спирт	20	0,0060	Азот	16	0,000168
Сероуглерод	20	0,0036	Углекислота	0	0,000138
Четыреххлористый углерод	20	0,0097	Гелий	0	0,000188
Ртуть	0	0,017			
»	20	0,016			
»	100	0,012			
Керосин * . .	20	0,02			
Патока * . . .	12	400			
»	20	270			
Касторовое масло *	20	10			
»	50	1,2			

* Данные приблизительные.

Таким образом, эту формулу можно переписать следующим образом:

$$\eta = C\rho\tau, \quad (15)$$

где C обозначает постоянную для данного прибора величину, не зависящую от природы жидкости. Значение этой постоянной определяется по формуле

$$C = \frac{\eta_B}{\rho\tau},$$

если произвести опыт с жидкостью, например водой, вязкость которой η_B была ранее измерена с большой точностью. После того как постоянная C определена и прибор проградуирован, им можно пользоваться для определения вязкости любой другой жидкости.

Если нужно измерить вязкость жидкости при разных температурах, то капиллярный вискозиметр погружают в сосуд с водой, в котором температура может меняться и поддерживаться на любом желательном уровне. Этим способом измерена вязкость многих химических соединений при различных температурах. При этом показано, что вязкость всех без исключения жидкостей с повышением температуры убывает, особенно быстро это протекает у весьма вязких жидкостей — смазочные масла, патока, мед, смолы и др. (табл. 1).

Еще о методах измерения вязкости

Однако для очень вязких жидкостей капиллярные вискозиметры неудобны, так как требуют либо чрезмерно большой затраты времени на производство измерений, либо применения очень высоких давлений. В ряде случаев для вязких жидкостей удобен метод, основанный на измерении скорости падения твердых шариков и использовании закона Стокса — формулы (9) и (12).

Для непрозрачных жидкостей этот метод неудобен. Точно так же осложняется применение этого метода при высоких температурах вследствие непрозрачности печей, служащих для получения и поддержания высокой температуры. Такого рода задача возникает, например, при измерении вязкости расплавленных стекол, которые становятся текучими при температуре выше $700-800^\circ$. Для преодоления всех этих трудностей автор прибегал к наблюдениям при помощи рентгеновских лучей падения платиновых шариков в цилиндре с расплавленным стеклом.

Все же для измерения вязкости расплавленных стекол при высоких температурах, как и вообще для измерения вязкости весьма вязких жидкостей, более удобен другой метод — метод концентрических, или, правильнее, соосных цилиндров, основанный на том, что при вращении цилиндра, расположенного внутри другого цилиндра, соосного с ним и заполненного вязкой жидкостью, последняя сопротивляется вращению пропорционально его скорости. Этот случай вязкого сопротивления был впервые детально изучен на основании опытов и расчетов Н. П. Петровым, Маргулисом и Куэттом.

Чтобы рассмотреть этот случай, отвлекаясь от несущественных осложнений, проследим характер движения жидкости в зазоре между двумя соосными цилиндрами (рис. 23), длина которых настолько велика по сравнению с радиусами, что движение во всех сечениях зазора независимо от расстояния до концов цилиндра происходит строго одинаково.

Как мы уже знаем, частицы жидкости, находящиеся в соприкосновении со стенками обоих цилиндров, участвуют в их движении. Поэтому при вращении одного цилиндра и неподвижности другого (наружного) скорость частиц жидкости в зазоре между обоими цилиндрами должна непрерывно меняться при переходе от поверхности одного цилиндра к поверхности другого, как изображено на рис. 23 стрелками.

Легко поэтому понять, что движение частиц жидкости в зазоре должно сопровождаться появлением градиента скорости в этом зазоре, а следовательно, и силы внутреннего трения. Если толщина зазора очень мала по сравнению с радиусами цилиндров, то движение жидкости будет чрезвычайно близко к движению с постоянным градиентом скорости, что мы уже рассматривали раньше на примере двух параллельных пластинок. Градиент скорости здесь равен разности линейных скоростей обоих цилиндров, деленной на толщину зазора между ними. Во всех случаях при вращении одного цилиндра возникает за счет внутреннего трения жидкости в зазоре между

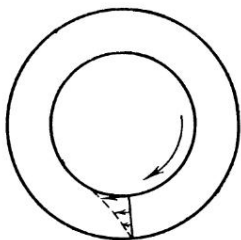


Рис. 23. Схема измерения вязкости по методу соосных цилиндров

цилиндрами пара сил, сопротивляющихся вращению, момент которой M пропорционален скорости вращения и вязкости. Согласно формуле, выведенной Н. П. Петровым,

$$M = k\omega\eta, \quad (16)$$

где ω — угол поворота цилиндра за единицу времени; k — константа прибора, зависящая от его размеров.

Для определения k достаточно произвести опыт с жидкостью известной вязкости, после чего прибор можно применять для измерения вязкости любой другой жидкости.

Приборы с соосными цилиндрами для измерения вязкости жидкости применяются с успехом в исследовательской работе и в заводской практике для измерения средней и высокой вязкости жидкостей. Наиболее удачные конструкции приборов этого типа (рис. 24), разработанные М. П. Воларовичем, широко распространены в исследовательских институтах и заводских лабораториях.

Некоторые методы измерения вязкости жидкостей, основанные на изменении профиля тонкого слоя жидкости под влиянием «сдувания» воздушным потоком, изложены на стр. 195—200.

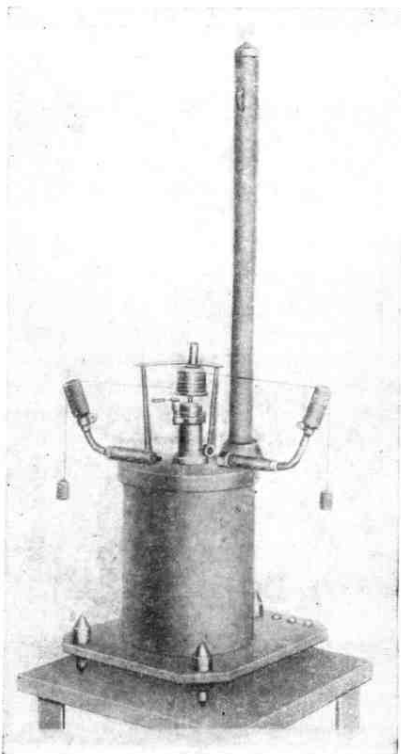


Рис. 24. Ротационный вискозиметр системы Воларовича

Роль вязкости в некоторых технологических процессах и научных исследованиях

Так как вязкость жидкостей играет большую роль в некоторых производственных и технологических процессах, ее измерения необходимы для правильного проведения этих процессов. Например, при изготовлении листового (оконного) стекла машинным способом вязкость расплавленного стекла требуется поддерживать в определенных пределах. Схема этого способа показана на рис. 25. Погруженный в расплавленную массу стекла W

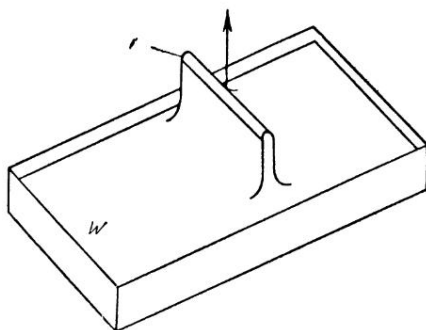


Рис. 25. Схема машинного способа изготовления оконного стекла

горизонтальный стержень I вытаскивается из нее вверх с постоянной скоростью. Он увлекает за собой слой стекла, образующие поднимающийся за ним лист. По мере подъема соответствующие части листа охлаждаются, вязкость их увеличивается, и, наконец, они застывают, превращаясь в знакомое нам стекло, в частности оконное.

Процесс изготовления листового стекла идет нормально при определенной вязкости содержащегося в ванне расплавленного стекла. При слишком малой вязкости стекло слабо увлекается вверх поднимающимся стержнем и лист получается либо очень тонким, либо вообще не образуется. Наоборот, при чрезмерно высокой вязкости образуется или слишком толстый лист, или лист неравномерной толщины. Чтобы получить пужную вязкость, необходимо знать ее зависимость от температуры. Определив эту

зависимость, можно поддерживать температуру, необходимую для проведения процесса.

Такое измерение вязкости стекла было впервые поставлено у нас по инициативе академика П. П. Лазарева и проведено М. П. Воляровичем под руководством Н. К. Щодро, а также автором совместно с Я. Ханановым. М. П. Волярович проводил измерения по методу соосных цилиндров, Б. В. Дерягин и Я. Хананов — по наблюдению скорости падения платино-иридиевых шариков в расплавленном стекле (стр. 52).

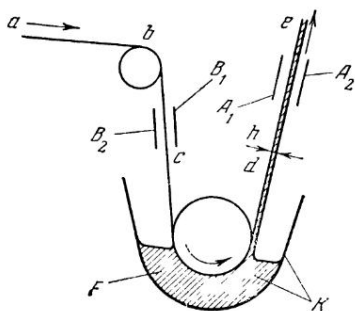


Рис. 26. Нанесение слоя фотографической эмульсии на подложку при производстве киноплёнки B_1 и B_2 — пластины конденсатора, контролирующего толщину подложки без слоя; A_1 и A_2 — пластины конденсатора, контролирующего подложку с нанесенным слоем фотографической эмульсии толщиной h

Не меньшее значение имеет выбор и точное поддержание определенной вязкости при нанесении светочувствительных слоев фотоэмульсии на подложку при производстве киноплёнки и фотобумаги. Подложка, представляющая собой (рис. 26) длинную (примерно 300 м) ленту $abcde$ шириной 0,5—0,6 м, протягивается через корытообразную кювету K , заполненную расплавленной фотоэмульсией F . Вследствие вязкости фотоэмульсии основа, или подложка, $abcde$, погружаясь в кювету и затем выходя из нее, увлекает слой фотоэмульсии, который как бы прилипает к поверхности основы. При постоянстве скорости движения подложки, температуры и состава эмульсии в течение процесса на подложку наносится слой фотоэмульсии также постоянной толщины, обычно 200—300 мк. Толщина отлагающегося слоя возрастает с увеличением скорости движения подложки и вязкости фотоэмульсии.

Наоборот, сила тяжести, пропорциональная плотности фотоэмульсии, и поверхностное натяжение ее оказывают противоположное действие, стремясь уменьшить толщину наносимого слоя.

Как показал автор, толщину h наносимого слоя можно выразить формулой

$$h = \frac{0,94}{\sqrt{1 + \cos \alpha}} \frac{(\eta v)^{2/3}}{d^{1/2} g^{1/2} \sigma^{1/6}}, \quad (17)$$

где η — вязкость эмульсии; v — скорость движения подложки; d — плотность эмульсии; g — ускорение силы тяжести; σ — поверхностное натяжение эмульсии; α — угол наклона к горизонту выходящей из кюветы подложки.

Эта формула была проверена не только в лабораторных условиях, но и непосредственно на производстве под руководством сотрудника Научно-исследовательского кинофотоинститута С. М. Леви и автора и оказалась точно приложимой.

Указанная выше теория полива киноплёнки и фотобумаги и выведенная из нее формула позволили не только внести ясность в этот процесс, но и устанавливать на основании точного расчета его режим, необходимый для получения желательной толщины светочувствительного слоя. Эта задача особенно важна при поливе цветной киноплёнки, состоящей из отдельных слоев, чувствительных к разным цветам (красному, синему, зеленому). Такая плёнка при нарушении толщины какого-либо слоя после проявления дает искаженную передачу цветов вследствие нарушения цветового баланса.

Например, если слой, чувствительный к красным лучам, при поливе окажется слишком тонким, то красная составляющая всех оттенков будет ослабленной и цвета получатся более холодными, чем в натуре. Чтобы путем расчета устанавливать, регулировать и поддерживать определенную толщину полива, необходимо либо подбирать вязкость эмульсии, либо изменять скорость движения подложки при поливе. Необходимую вязкость получают или разбавлением эмульсии водой, или изменением ее температуры в поливной кювете. Скорость движения подложки изменяется регулированием работы электромотора, приводящего в движение подложку.

Желательно непрерывно контролировать толщину слоя эмульсии, наносимого при поливе. Для этого Н. Р. Кудрявицкий, С. М. Леви и автор разработали метод, основанный на сравнении емкости конденсатора C_1 , между параллельными пластинами которого A_1 и A_2 (см. рис. 26) проходит подложка с политым слоем, с емкостью C_0 кон-

денсатора, между пластинами B_1 и B_2 которого проходит основа до полива. Чем толще нанесенный слой, тем тоньше воздушный зазор между пластинами конденсатора и тем больше разность емкостей обоих конденсаторов. Измерение этой разности¹ при помощи специальной электрической схемы позволяет непрерывно следить за толщиной

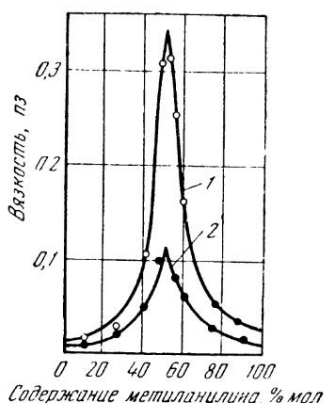


Рис. 27. Вязкость смесей аллилового горчичного масла и метиланилина (по Курнакову):

1 — \circ при 25°; 2 — \bullet — при 50°

наноса, а также автоматически ее регулировать. Большое распространение получил также метод нанесения на тонкие проволоки и стеклянные волокна покрытий путем протягивания через соответствующие жидкости. Так покрывают проволоки изоляцией, стеклянные нити замасливателем, облегчающим их применение, текстильные волокна гидрофобными покрытиями, придающими тканям водонепроницаемость.

В этих случаях, как показал автор, толщина наносимого слоя

$$h = 1,32R \left(\frac{\eta u}{\sigma} \right)^{2/3},$$

где R — радиус волокна или проволоки.

Правильность этой формулы была проверена на опыте В. А. Рябовым.

Измерения вязкости позволяют также делать важные заключения о составе различных жидкостей и наличии в них тех или иных соединений. Впервые применил измерение вязкости к подобного рода физико-химическому анализу академик Н. С. Курнаков. Совместно с С. Ф. Жемчужным им было показано, что если измерять вязкость смеси двух веществ при постоянной температуре, но при различном составе смеси и откладывая по оси абсцисс процентное содержание одного вещества в смеси, а по

¹ В действительности измерялась разность обратных значений емкости обоих конденсаторов, строго пропорциональная толщине h политого слоя фотоземли и легко доступная определению.

оси ординат вязкость, то кривые получаются весьма различной формы. Если оба смешиваемых вещества могут давать химическое соединение с высокой вязкостью, то образование этого соединения сразу же отражается на форме кривой.

На графике (рис. 27), где по оси абсцисс отложено содержание метиланилина в растворе в молярных процентах, а по оси ординат — вязкость раствора в пуазах, острый максимум на кривой соответствует определенному составу химического соединения. При другом составе раствора вязкость резко понижается, так как молекулы соединения оказываются разбавленными молекулами менее вязкого вещества.

Вязкость коллоидных растворов

Еще чаще приходится измерять вязкость при исследовании коллоидных растворов. Под коллоидными растворами, в отличие от обыкновенных, или «истинных», растворов, разумеют системы, образованные какой-либо жидкостью, в которой взвешены частички другого вещества, размеры которых заметно превышают размеры молекул жидкости, играющей роль растворителя. Это различие размеров может объясняться, во-первых, тем, что частички второго вещества состоят из многих молекул, образующих то, что в коллоидной химии называют мицеллой. Если эти частички твердые и имеют размеры, измеряемые при помощи микроскопа, такие системы называют суспензиями. Пример суспензий — большинство красок и лаков. В случае жидких частиц система называется эмульсией. Пример эмульсии — обыкновенное молоко, представляющее собой капельки жира, взвешенные в водном растворе. Во-вторых, коллоидные растворы с растворенными частичками, значительно превышающими по размерам молекулы растворителя, могут получаться при растворении высокомолекулярных соединений и полимеров (каучука, белковых веществ, желатина и др.).

Под высокомолекулярными соединениями разумеют вещества, молекулы которых весьма велики, так как состоят из большого числа атомов. К таким веществам принадлежат различные виды белка, входящего в состав растительных и животных клеток. Под полимерами разумеют вещества, молекулы которых объединяются посред-

ством химических связей в более крупные агрегаты или цепи, состоящие из многих одинаковых молекул. Такой процесс соединения отдельных молекул в более крупную группу называется полимеризацией.

Объединение отдельных молекул в более крупные группы всегда сопровождается увеличением вязкости вещества. Поэтому измерение вязкости позволяет следить за процессом полимеризации и контролировать его. Полимеры широко применяются в качестве материала в различных областях техники. Так, каучук входит в состав всевозможных резин, идущих на изготовление автомобильных камер и покрышек, галош и других предметов техники и обихода. Полимерами являются многие электроизоляционные материалы, например полистирол. К полимерам относятся и различные искусственные текстильные материалы (вискоза, нейлон и др.) и так называемый плексиглас, получивший большое распространение при изготовлении бытовых предметов, стекол кабин самолетов и пр. Огромное значение разветвления исследований полимерных материалов подчеркнуто в постановлении Пленума ЦК КПСС в мае 1958 г.

Весьма часто высокомолекулярные соединения и полимеры в процессе изготовления или применения получаются в виде растворов в различных растворителях.

Измеряя вязкость подобных растворов, так же как и вязкость суспензий и эмульсий, можно сделать определенные выводы о форме частиц растворенных веществ. Эти выводы основываются на том, что взвешенные в жидкости частицы, распределенные по всему объему жидкости, затрудняют ее течение.

Так, если вернуться к уже рассмотренному (см. рис. 1) примеру — к жидкости, находящейся между двумя параллельными стенками, из которых одна движется относительно другой, то становится очевидным, что присутствие посторонних включений искажает ту простую картину распределения скоростей в слоях жидкости, которую мы имели раньше. При градиенте скорости в зазоре между пластинами взвешенные частицы искривляют пути движения отдельных частиц жидкости и вызывают как бы некоторое перемешивание слоев, нарушающее простой характер движения, уподобленный движению карт в колоде. Нарушение движения параллельными слоями приводит, в частности, к тому, что по мере возраста-

ния скорости течения переход от ламинарного режима к турбулентному совершается раньше и при меньших скоростях, а следовательно, при меньших значениях числа Рейнольдса, чем для однородной жидкости без взвешенных частиц.

Однако и до перехода к собственно турбулентному режиму присутствие взвешенных частиц влияет на сопротивление течению жидкости, тормозящей скольжение пластин одна относительно другой. Твердые частицы сузжают пространство, занятое «струями» жидкости, и увеличивают средний градиент скорости поперек потока, действуя так, как если бы зазор между пластинами сузился. Следует также учесть, что при нарушении параллельности движения отдельных частиц жидкости, т. е. при искривлении их траекторий, обмен количеством движения между соседними слоями жидкости, расположенными на разных расстояниях от пластин, усиливается, подобно тому как этот обмен усиливается при настоящем турбулентном режиме. В результате вязкость коллоидного раствора, содержащего взвешенные частички, оказывается повышенной по сравнению с вязкостью чистого растворителя.

Формулу для расчета повышения вязкости нашел Эйнштейн, автор теории относительности. Она имеет вид:

$$\eta = \eta_0 (1 + 2,5\varphi), \quad (18)$$

где η_0 — вязкость растворителя; η — вязкость коллоидного раствора; φ — отношение объема взвешенных частиц к объему раствора.

Формула выведена в предположении, что частицы сферические и твердые. Точные расчеты показывают, что влияние частиц другой формы при том же значении объемного заполнения φ будет больше влияния сферических частиц. Формула (18) сохранит свой вид, но численный коэффициент 2,5 увеличится и будет зависеть от степени вытянутости частиц. Это и понятно, так как при более вытянутой форме частиц нарушения, вносимые ими в движение отдельных частиц жидкости, будут больше. Изменяя вязкость коллоидных растворов и зная долю объема, занимаемого взвешенными частицами, можно сделать определенные выводы о том, насколько эти частицы отклоняются по форме от шарообразной. Точно так же

можно судить о форме цепных молекул полимеров в том или ином растворителе по тому, насколько велико отношение вязкости раствора к вязкости растворителя. Чем больше вытянуты цепи полимера, тем больше это отношение. Поэтому огромное (в 10^3 раз и более) увеличение вязкости водных растворов желатины при добавлении цветных компонентов, применяемых для получения цветной киноплёнки, объясняется разворачиванием цепей желатины при поглощении ими цветных компонентов. Правильность этого объяснения доказали опыты С. М. Леви и автора.

Механизм внутреннего трения газов

Измерения вязкости позволяют выяснить не только строение коллоидных растворов, содержащих сравнительно грубые частицы, но и молекулярное строение любых тел. Само представление об атомно-молекулярном строении всех тел, изложенное Ломоносовым, Бернулли, Далтоном и другими учеными, проникает сейчас во все области физики и химии. Только считая все тела состоящими из отдельных молекул, мы можем понять внутренний механизм большинства явлений, происходящих в этих телах, и теоретически объяснить их свойства. Эта мысль впервые в исключительной форме была высказана Ломоносовым, благодаря чему его следует считать основателем молекулярно-кинетической теории строения материи и молекулярной физики.

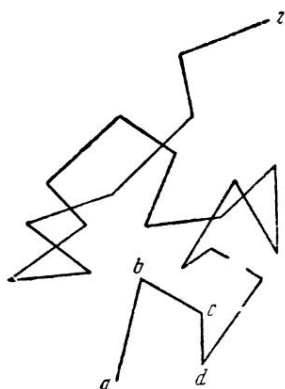


Рис. 28. Траектория газовой молекулы, испытывающей соударения с другими молекулами

Рассмотрим теперь, как объясняется с этой точки зрения внутреннее трение в газах и жидкостях. Газы и жидкости весьма существенно различаются по молекулярному строению. В газах молекулы расположены в среднем на таких больших расстояниях одна от другой, что движение отдельных молекул происходит большую часть времени по закону инерции, прямолинейно. Все же, двигаясь пря-

молинейно, молекулы, обладая определенными размерами, время от времени сталкиваются друг с другом, подобно упругим шарикам. В результате такого соударения меняется направление движения каждой молекулы, принимавшей участие в этом соударении, и, следовательно, движение молекулы будет представлять собою зигзагообразную, ломаную линию $abcd\dots z$ (рис. 28). Если общую длину этой ломаной линии разделить на число зигзагов, то получим среднюю длину пробега газовой молекулы λ .

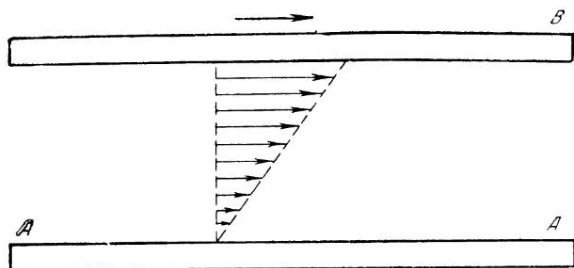


Рис. 29. Распределение скоростей частиц газа между параллельными пластинками

В обычном воздухе при нормальном атмосферном давлении $\lambda \approx 0,6$ мк, т. е. 0,00006 мм. Средняя длина пробега возрастает обратно пропорционально плотности газа, если его разрежать, что вполне понятно, так как по мере увеличения среднего расстояния между молекулами газа последние должны сталкиваться реже.

Представим себе теперь слой газа между двумя твердыми пластинками AA и BB , скользящими одна относительно другой (рис. 29). Как и в случае жидкости, скорость отдельных слоев газа, заключенного между пластинками, будет меняться в зависимости от расстояния до пластинок. Так же как и в случае жидкости, мы будем иметь движение с постоянным градиентом скорости. Следует при этом помнить, что под скоростью какого-либо слоя газа следует разуметь не среднюю скорость беспорядочного движения его молекул, а среднюю слагающую скорость его молекулы в направлении движения верхней пластинки (указано на рис. 29 стрелкой). Это среднее значение слагающей скорости движения имеет мало общего

со средней скоростью движения самих молекул. Так, средняя скорость движения молекулы кислорода в воздухе при 0° приблизительно равна 450 м/сек , между тем слагающая упорядоченного движения может быть гораздо меньше, например 1 см/сек , или даже отсутствовать вовсе, когда газ находится в покое.

Для уяснения того, что разумеется под средней слагающей движения молекул какого-либо объема газа, полезно отметить, что эта средняя слагающая в точности равна слагающей в том же направлении скорости движения центра тяжести λ рассматриваемого объема

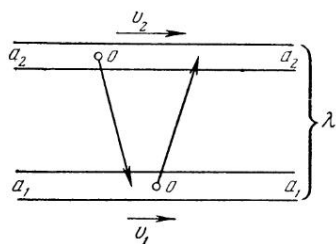


Рис. 30. Обмен количеством движения между соседними слоями газа

газа. Когда говорят, что некоторая часть газа находится в покое, то это значит, что общий центр тяжести совокупности всех молекул этой части газа неподвижен, средняя же скорость молекул газа может быть весьма велика и зависит только от температуры.

Рассмотрим механизм обмена количеством движения между двумя параллельными (рис. 30) слоями газа

a_1a_1 и a_2a_2 , расположенными на расстоянии, величина которого того же порядка, что и средняя длина пробега газовых молекул. Молекулы слоя a_2a_2 , расположенного выше идвигающегося вправо с большей скоростью v_2 , будут вследствие своего беспорядочного движения залетать в нижний слой a_1a_1 и при соударениях с расположенными там молекулами, имеющими меньшую скорость v_1 , выравнять свою избыточную слагающую упорядоченного движения. Вследствие соударения происходит обмен количеством движения между молекулами более медленного слоя и молекулами более быстрого слоя, проникшими туда при своем беспорядочном движении. В результате количество движения в нижнем слое должно возрастать. Поступательное движение слоя ускоряется. И молекулы нижнего, более медленнодвигающегося слоя будут вследствие своего беспорядочного движения проникать в расположенный выше слой, выравнять скорость при соударениях с находящимися там молекулами и тормозить

движение этого слоя. Таким образом, каждый лежащий ниже слой ускоряется слоем, расположенным выше и двигающимся быстрее, и, наоборот, тормозит его движение, так же как этот нижний слой сам тормозится в результате залета в него молекул слоя, расположенного еще ниже. При этом предполагается, что внешние силы поддерживают движение одной пластинки относительно другой с постоянной скоростью и движение каждого слоя газа также будет отличаться постоянством скорости во времени. Каждый слой будет двигаться равномерно, поскольку сила трения о ниже расположенный слой, тормозящий его движение, уравнивается силой трения о выше расположенный слой, двигающийся быстрее.

Механизм внутреннего трения становится ясным. Молекулы, залетающие из соседних слоев, приносят избыточное количество движения и, выравнивая его при соударениях с молекулами рассматриваемого слоя, осуществляют перенос количества движения, лежащий в основе внутреннего трения. Эта картина, объясняющая механизм внутреннего трения газов, была положена Максвеллом в основу количественных расчетов вязкости газов. Формула, полученная при этом, имеет вид:

$$\eta = k \frac{m\bar{c}}{\sigma^2}, \quad (19)$$

где k — безразмерный (численный) коэффициент; m — масса молекулы; \bar{c} — средняя скорость ее хаотического движения; σ — диаметр молекулы.

Так как средняя скорость хаотического движения молекул газа зависит только от его температуры, будучи пропорциональной корню квадратному из так называемой абсолютной температуры (отсчитываемой от абсолютного нуля, а не от точки плавления льда), то, значит вязкость газов (в отличие от вязкости жидкостей) с повышением температуры должна возрастать, что в действительности и наблюдается.

Еще более парадоксален второй вывод из формулы (19). Из нее следует, что вязкость газа не меняется при изменении его плотности (вследствие разрежения или сжатия), поскольку входящие в эту формулу величины не зависят от плотности. Подобный результат может, однако, возбудить сомнение в его правильности. На этом вопросе мы остановимся в следующем параграфе.

О скольжении газа на границе с твердой стенкой

Если мы будем все больше и больше разрезать газ, откачивая его из сосуда при помощи воздушного насоса, то в конце концов в сосуде останется так мало молекул газа, что их влияние на движение параллельных пластинок (см. рис. 29) будет ничтожно мало. Между тем, по предыдущему, вязкость газа, от которой зависит сила, стремящаяся выравнять скорости обеих пластин, при этом не меняется. Этот парадокс, однако, разъясняется, если вернуться к рассмотренному выше механизму внутреннего трения газа и обратить внимание на связь между сопрогиблением относительно движению параллельных пластинок и вязкостью газа, находящегося между ними. Как показано, сопротивление относительно движению пластинок проистекает от силы внутреннего трения газа. Между ними можно поставить знак равенства вследствие того, что количество движения, передающегося через слой газа, равно количеству движения, получаемого одной из пластинок от другой.

Таким образом для вычисления силы сопротивления можно воспользоваться формулой (7)

$$F = \eta SG.$$

Но для вычисления силы трения по этой формуле необходимо знать градиент скорости G в слое газа. Для жидкостей мы принимали, что молекулы, находящиеся непосредственно у поверхности твердой стенки, участвуют в ее движении и что скольжения между ними нет. Мы имеем право поэтому вычислять градиент скорости, деля разность скоростей обеих пластинок на их взаимное расстояние. В газах положение меняется. Оказывается, что между слоями газа, находящимися вблизи твердой стенки, и стенкой может существовать с к а ч о к с к о р о с т и. Чтобы определить его происхождение и величину, нужно рассмотреть подробнее механизм передачи количества движения между твердой стенкой и молекулами газа, текущего параллельно этой твердой стенке с некоторым градиентом скорости.

Если бы молекулы газа соударялись с твердой стенкой строго по закону упругого удара шаров, то обмен количеством движения между твердой стенкой и газом был бы невозможен. Поток газа вблизи твердой стенки не стре-

мился бы приводить ее в движение. Поэтому при взаимном движении двух пластинок, разделенных слоем газа, трение между ними должно было бы отсутствовать. В самом деле, по закону упругого удара направления скорости любой молекулы O до удара и после удара составляют одинаковые углы α с перпендикуляром к стенке в месте удара (рис. 31). Иными словами, направления движения молекул до и после удара связаны между собой так, как направления падающего и отраженного луча света.

Кроме того, при упругом ударе кинетическая энергия, а следовательно, и скорость движения молекулы v не меняются. Из этого следует, что и слагающая скорости молекулы u , параллельная тому направлению, в котором движутся слои газа и которое параллельно твердой стенке, не претерпевает изменения при ударе об эту стенку.

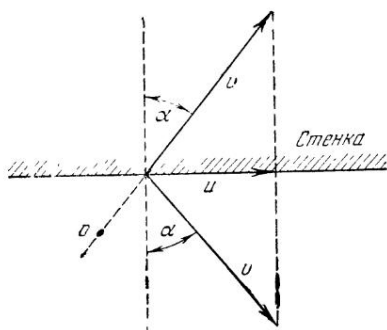


Рис. 31. Упругое соударение газовых молекул с твердой стенкой

Таким образом, при ударах молекул о твердую стенку количество движения молекулы в направлении потока не может изменяться. Так как действие всегда равно противодействию, то и сама стенка не может приобрести под влиянием удара о нее молекул газа никакого количества движения в направлении потока газа. Единственным результатом удара молекул газа о стенку оказывается давление газа на эту стенку, стремящееся ее двигать перпендикулярно к своей плоскости.

Однако законы упругого удара молекул о твердую стенку, как правило, не соблюдаются. Существуют две основные причины этого нарушения законов упругого удара. Первая причина заключается в том, что твердая стенка никогда не бывает идеально гладкой и, будучи шероховатой, всегда может быть представлена некоторой волнообразной поверхностью (рис. 32). Вследствие этой шероховатости только те сравнительно немногочисленные

молекулы газа, которые ударяются о вершины выступов a, a', a'' или о наиболее глубокие места b, b', b'' впадин поверхностного рельефа, отражаясь по закону отражения упругих шаров, сохраняют неизменной слагающую скорости в направлении потока, изображенном стрелкой u .

Молекулы же (а таких большинство), ударяющиеся по законам упругого удара о наклонные участки рельефа поверхности (например, в точке c), меняют, как это ясно из рисунка, слагающую скорости в направлении потока. На одних участках рельефа при ударе молекул газа слагающая их скорости меняется в сторону увеличения, на

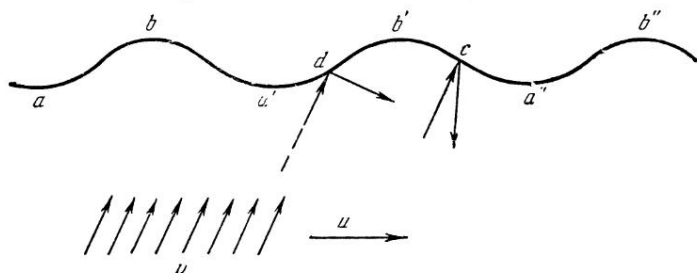


Рис. 32. Соударение газовых молекул с шероховатой стенкой

других (например, в точке d) — в сторону уменьшения. Так как и тех и других участков должно быть поровну и они занимают одинаковую долю поверхности стенки, то, на первый взгляд, кажется, что в среднем количество движения молекул газа после удара о все разнообразные части поверхности стенки остается тем же, что и до удара. Однако более внимательное рассмотрение показывает, что это не так.

Действительно, так как молекулы газа в среднем имеют слагающую скорости, направленную в сторону потока, то среднее направление молекул газа перед ударом о стенку будет наклонным, как показано на рис. 32 стрелками v . Мы имеем такую же картину, как при дожде с ветром или при ударе дождевых капель о крышу движущегося поезда. При таком «косом дожде» число ударов молекул газа о выступы, наклоненные в разные стороны, не будет одинаковым: число ударов о выступ $b'a''$ будет больше числа ударов о выступ $a'b'$. Но удары о те и другие выступы приводят к противоположным результатам. Удары

о выступ $b'a$ уменьшают слагающую скорости u молекул газа в направлении его потока, а удары о выступ $a'b'$ увеличивают эту слагающую скорость. Первых ударов больше, вследствие чего перевешивает влияние первых участков вида $b'a$ и средняя слагающая скорости газовых молекул после ударов в направлении потока оказывается уменьшенной по сравнению с ее значением до удара. Таким образом, в результате ударов молекул о стенку количество движения, которым они обладали в направлении потока, уменьшается, передаваясь твердой стенке.

Другой причиной, объясняющей обмен количеством движения между молекулами газа и твердой стенкой, служит неупругий характер удара, являющийся скорее правилом, а не исключением. Молекулы газа, вместо того чтобы отскакивать от твердой стенки, как бы прилипают к ней под действием сил молекулярного притяжения. Такое прилипание является причиной образования на твердых поверхностях так называемых адсорбционных слоев молекул газа, которым окружены твердые тела. Это явление, называемое адсорбцией газа (а его слой, находящийся на твердом теле, — адсорбционными слоями), имеет выдающееся практическое и научное значение. На нем основано разработанное впервые в России академиком Н. Д. Зелинским применение так называемого активированного, пористого угля для создания противогазов.

В большинстве случаев силы притяжения между молекулами газов и твердой стенкой оказываются достаточными для того, чтобы каждая ударяющаяся о твердую стенку молекула прилипла к ней на некоторое время. Однако, находясь в сфере молекулярного притяжения твердой стенки, молекула продолжает находиться в состоянии движения, причем обладает той же средней кинетической энергией, что и до удара. Все различие сводится к изменению характера движения; вместо поступательного, движение приобретает колебательный характер, при котором молекула находится вблизи некоторого среднего положения, то слегка удаляясь от него, то приближаясь к нему. Это движение поддерживается взаимодействием молекулы с окружающими атомами твердой стенки путем как бы непрерывного обмена толчками. Интенсивность и направление этих толчков, подчиненных закону случая, оставаясь в среднем постоянными, обнару-

живают колебания вокруг этого среднего значения. В некоторый момент направление этих толчков и их интенсивность могут быть таковы, что, взаимно усиливаясь, они сообщат молекуле такую большую скорость в направлении от стенки, что в результате она вылетит с поверхности, подобно песчинке, помещенной на вибрирующую поверхность. Подобным образом способны покидать поверхность твердых, а также жидких тел не только инородные молекулы, но и молекулы и атомы самого тела (при испарении).

Вследствие случайного характера толчка, приводящего к вылету молекулы, направление вылетающей молекулы также определяется законами случая — молекулы могут вылетать в направлении и перпендикулярном и наклонном к поверхности стенки. Совершенно естественно, что молекула газа, находившаяся некоторое время в адсорбционном слое, одинаково часто будет вылетать со слагающей скоростью, направленной как в сторону движения газа, так и в противоположную. Это есть следствие того, что вылет молекулы зависит исключительно от ее взаимодействия с твердой стенкой, а не от поведения окружающего газа.

В результате каждая молекула, ударяющаяся о твердую стенку и покидающая ее через некоторое время по «законам испарения», теряет, передавая стенке, в среднем то количество движения в направлении потока газа, которым она первоначально обладала. Таким образом, при каждом ударе в среднем передается количество движения, равное произведению массы молекулы на среднюю скорость u того слоя газа, в котором произошло последнее ее соударение с соседями перед ударом о твердую стенку. Легко отсюда вычислить среднюю скорость молекул газа, расположенных непосредственно вблизи твердой стенки. Эти молекулы можно разделить на две категории, численно равные. Молекулы первой категории, двигающиеся по направлению к стенке, имеют в среднем параллельную стенке слагающую скорости движения u относительно этой стенки. Вторая половина молекул, наоборот, только что вылетела, испарившись из адсорбционного слоя, покрывающего твердую стенку. Средняя слагающая скорости такой молекулы (также относительно твердой стенки) в любом направлении, параллельном твердой стенке, равна нулю. Следовательно, в среднем па-

параллельная стенке слагающая скорости одной молекулы газа, находящейся в непосредственной близости к твердой стенке (но не «прилипшей» к ней), равна $u/2$. Из этого рассуждения мы видим, что существует скачок скорости на границе газа с твердой стенкой.

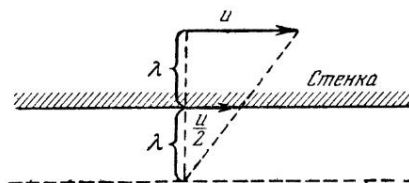


Рис. 33. Распределение скоростей газовых молекул вблизи твердой стенки

Если предположить (что не совсем верно), что градиент скорости во всех слоях газа, вплоть до самой твердой стенки, постоянен, то можно оценить влияние скольжения газа по твердой стенке на сопротивление движению этой стенки следующим образом. Так как, согласно предыдущему, на расстоянии средней длины пробега газовых молекул λ средняя упорядоченная слагающая скорости молекул газа изменяется от u до $u/2$,

где $u/2$ равно средней скорости газовых молекул у стенки, то, следовательно, градиент скорости в газе будет такой же, как если бы твердой стенки не было и за ней на расстоянии

еще одной длины свободного пробега λ был расположен слой газа, находящийся в покое. Такое распределение средней упорядоченной скорости движения молекул газа вблизи твердой стенки изображено на рис. 33.

Когда газ находится между двумя стенками AA и BB (рис. 34), распределение скоростей слоев газа изобра-

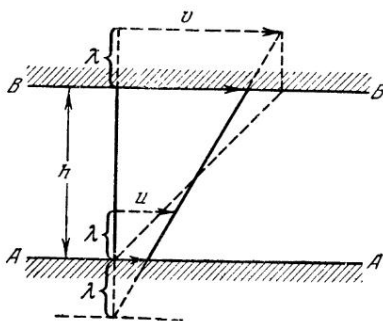


Рис. 34. Распределение средних (упорядоченных) слагающих скоростей газовых молекул между двумя стенками

жаются сплошной линией и градиент скорости в этом слое можно вычислить, разделив разность скоростей обеих пластинок v на расстояние, превышающее расстояние между пластинами h на удвоенную длину свободного пробега¹. Отсюда следует, что сопротивление F при относительном движении двух параллельных пластин площадью S можно вычислить, используя разность скоростей их движения v , по формуле

$$F = \eta S \frac{v}{h+2\lambda}. \quad (20)$$

Если бы не было скольжения, профиль скоростей выглядел бы так, как показано на рис. 34 пунктиром.

При обычном атмосферном давлении, когда средняя длина пробега $\lambda < 0,1$ мк, а расстояние между пластинами h превышает десятки микронов, длина пробега очень мала по сравнению с величиной зазора. В этом случае членом 2λ по сравнению с h в знаменателе формулы (20) можно пренебречь и пользоваться, следовательно, той же формулой (7), что и для пластин, разделенных прослойкой жидкости, пренебрегая скольжением газа на границе твердой стенки.

Однако при опытах в пространстве, в котором находится разреженный газ, длина пробега может сильно возрасти. Так, например, при давлении $0,001$ см рт. ст. средняя длина пробега молекул воздуха становится равной нескольким сантиметрам. При этом можно ясно обнаружить различие законов трения, которое получается в зависимости от того, учитываем ли мы или нет скольжение газа по твердой стенке, если мы возьмем крайний случай, когда толщина зазора h мала по сравнению со средней длиной свободного пробега молекул газа λ . Тогда, пренебрегая в формуле (20) толщиной зазора h по сравнению с 2λ , получим выражение

$$F = \eta S \frac{v}{2\lambda}. \quad (21)$$

Так как средняя длина пробега молекул газа λ обратно пропорциональна его плотности, то в этом случае трение между параллельными пластинами не будет зависеть от их взаимного расстояния, а будет изменяться пропорционально плотности того разреженного газа, который ме-

¹ Этот вывод верен только приближенно. В действительности соответствующее расстояние несколько больше удвоенной длины свободного пробега.

жду ними находится. Этот последний результат разъясняет тот парадокс, который мы отметили, обсуждая закон внутреннего трения газов Максвелла.

Зависимость трения от плотности разреженного воздуха используется при измерении высокого вакуума. Один из приборов, в котором использован этот принцип действия, основан на измерении постепенного затухания колебаний диска D , подвешенного горизонтально в центре O на тонкой нити a (рис. 35). Диск может совершать колебания, вращаясь вокруг проходящей через центр вертикальной оси, поворачиваясь попеременно то в одну, то в другую сторону и находясь между двумя параллельными пластинами (на рис. 35 не изображены). Быстрота, с которой уменьшаются последовательно наблюдаемые углы поворота диска, совершающего такое вращательное колебание в достаточно разреженной атмосфере, пропорциональна плотности или давлению газа и поэтому может служить для измерения этого давления. Существование скачка скорости на границе движущегося газа было впервые предсказано теоретически Максвеллом и найдено на опыте Кундгом и Варбургом.

Детальное исследование поведения газа при его течении вблизи твердой стенки в связи с явлениями скольжения на ее границе принадлежит А. К. Тимирязеву. Точная теория этого явления впервые была разработана С. П. Бакановым и автором.

О движении разреженного газа в пористых телах

Скольжение газа по стенке необходимо учитывать не только в случаях, когда газ сильно разрежен, но и при среднем и даже при обычном атмосферном давлении, если наблюдается течение газа в достаточно узких порах. Такие узкие поры имеются во многих телах, например в стеклянных и керамических фильтрах, угольных пластинках (применяемых, в частности, в качестве электродов), необожженном фарфоре, различных порошках и т. п.).

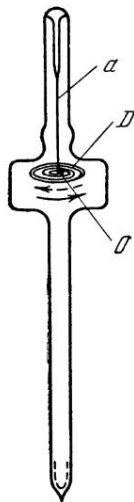


Рис. 35.
Манометр
с кварцевой
нитью

Для оценки размеров пор может служить измерение того сопротивления, которое они оказывают протеканию через них газов или жидкостей. Из-за неправильной формы пор к ним не только нельзя применять непосредственно формулу Пуазейля, чтобы таким образом подсчитать скорость движения через них жидкостей или газов, но даже само понятие радиуса пор не имеет точного смысла. К сожалению, оно довольно широко применяется в технических и научных исследованиях без должного учета крайней условности, можно сказать фиктивности, его в подобных случаях. Между тем размер пор можно вообще оценивать иным способом. Для этого в большинстве случаев достаточно знать их объем δ и общую поверхность S_0 их стенок (отнесенные к единице объема тела)¹.

Эти величины важны еще потому, что позволяют характеризовать размеры тех частиц, из которых состоят такие пористые тела, как порошки, бумага, образованные совокупностью частиц близкой между собой формы. Так, у порошков, образованных частицами, форма которых близка к форме шариков радиуса r , общая поверхность частиц в единице объема выражается формулой

$$S_0 = 4\pi Nr^2, \quad (22)$$

где N — число частиц в единице объема. Их суммарный удельный объем

$$V = \frac{4\pi}{3} Nr^3. \quad (23)$$

Эта величина безразмерна, так как представляет собой объем частиц, отнесенный к единице объема тела. Но по определению коэффициент пористости δ равен отношению объема пор ко всему объему пористого тела. Следовательно, учитывая формулу (23), получим следующие равенства:

$$V = 1 - \delta, \quad (24)$$

$$N = \frac{3(1 - \delta)}{4\pi r^3}. \quad (25)$$

Подставляя значение N в формулу (22), найдем, что

$$S_0 = \frac{3(1 - \delta)}{r}. \quad (26)$$

¹ Величина δ/S_0 тождественна с так называемым гидравлическим радиусом пор.

Полученная формула позволяет найти средний радиус частиц, характеризующий их крупность, если найдены значения S_0 и δ .

Аналогично этому для волокнистых материалов типа бумаги можно найти средний радиус волокон r из соотношения, вывод которого предоставляем читателю:

$$S_0 = \frac{2(1-\delta)}{r}. \quad (27)$$

Мы видим, что удельная поверхность порошков непосредственно связана с материальными составными частями, образующими в этом случае пористое тело.

Объем пор, деленный на объем всего тела, так называемый коэффициент пористости δ , поддается сравнительно простому измерению, поэтому мы не будем на этом останавливаться.

Какие существуют способы для измерения поверхности пор, отнесенной к объему всего тела, или, иначе, его удельной поверхности? Одним из способов этой оценки служит измерение количества азота, которое адсорбируется телом при температуре жидкого воздуха. При определенном давлении молекулы азота покрывают поверхность твердой стенки плотно упакованным слоем толщиной в одну молекулу. Для такого слоя известно количество азота на 1 см^2 поверхности. Деля общее количество адсорбированного азота на количество его, адсорбированное на 1 см^2 , можно найти общую и удельную поверхность тела. Но, будучи весьма надежным и точным, этот способ требует специальной аппаратуры, которую нелегко изготовить и наладить. Кроме того, его нельзя применить для измерения удельной поверхности порошков со сравнительно грубыми частицами, так как в этом случае количество адсорбированного азота очень мало и не может быть точно измерено. Наконец, этот способ требует большой затраты времени на каждое измерение.

Проще способ, при котором измеряется сопротивление течению через пористые тела жидкости определенной вязкости, например воды, керосина, бензола. Этот способ основан на полуэмпирической формуле Козени, связывающей расход газа, отнесенный к единице градиента давления, вдоль его потока в пористом теле, обратно пропорциональной зависимостью с квадратом удельной поверхности.

Однако необходимо указать следующие ограничения, а также недостатки этого метода.

1. Он дает правильные результаты только тогда, когда частицы порошка сами не пористые. Поэтому этот метод не позволяет измерить всю «истинную» удельную поверхность таких порошков, как силикагель. Метод позволяет в этом случае измерить только «наружную» поверхность зерен порошка, в то время как различные десорбционные методы (например, основанный на измерении адсорбции азота) позволяют измерить всю поверхность порошка, включая поверхность пор, пронизывающих отдельные его частицы.

Однако сочетание обоих методов — адсорбционного и фильтрационного — весьма полезно, так как позволяет одновременно узнать не только «истинную» поверхность пор, но и характер пористости зерен порошка и средний размер самих зерен (если предполагать зерна шарообразными, то отношение объема зерен к поверхности будет равно $\frac{1}{3}$ их радиуса — результат, вытекающий из формул элементарной стереометрии).

2. В телах с очень тонкими порами даже такая маловязкая жидкость, как вода, встречает при своем течении весьма большое сопротивление, что затрудняет быстрое измерение скорости фильтрации.

3. Формула Козени предполагает, что законы течения жидкости в порах, даже в самых узких, остаются теми же, что и в сравнительно широких капиллярах и щелях, для которых эти законы проверены. Однако некоторые опыты показывают, что это не всегда оправдывается. Если бы это предположение было верно, то скорость фильтрации различных жидкостей через одни и те же пористые тела под одинаковым давлением была бы обратно пропорциональна вязкости этих жидкостей. Этот вывод действительно оправдывается при фильтрации жидкостей через сравнительно грубые порошки, в которых средний диаметр частиц превышает 1 мк, или через пористые тела с удельной поверхностью менее $10^4 \text{ см}^2/\text{см}^3$. Как показали, однако, опыты Н. А. Крылова и автора, при течения жидкости через керамические или угольные пластинки с удельной поверхностью больше $10^5 \text{ см}^2/\text{см}^3$ наблюдаются резкие отклонения от этой закономерности. В частности, прибавление к жидкости некоторых растворенных веществ в количествах, не способных заметно изменить ее вязкость, резко меняло скорость фильтрации.

Весьма интересны наблюдения Н. А. Крылова, в которых измерялась скорость фильтрации воды через угольный фильтр до и после обработки его пор бензольным раствором олеиновой кислоты. После обработки пор олеиновой кислотой фильтрация ускоряется в несколько раз.

Из этого опыта можно заключить, что вязкость воды в тонких порах не равна ее «нормальному» объемному значению, она зависит от природы поверхности стенок пор. Покрытие стенок пор гидрофобным (водоотталкивающим) слоем олеиновой кислоты облегчает течение жидкости в таких порах¹. Из всего этого следует, что по скорости фильтрации жидкости нельзя определять удельную поверхность тонкопористых тел.

На первый взгляд кажется, что этот недостаток метода фильтрации, так же как и прежде упомянутые, может быть устранен, если измерять скорость фильтрации через пористые тела не жидкости, а воздуха или других газов. Для сравнительно грубопористых тел, например песка с песчинками среднего диаметра (0,1 мм и выше), этот способ вполне применим и при сопоставлении с методом, основанным на фильтрации жидкостей, дает сходные результаты. Применение же метода газовой фильтрации к тонкопористым телам обнаруживает очень большие отклонения. Так, например, скорость фильтрации воздуха через керамический фильтр с удельной поверхностью $10^5 \text{ см}^2/\text{см}^3$ превышает скорость фильтрации бензола при том же давлении не в 100 раз, как этого требует соотношение вязкостей воздуха и бензола, а в 1000 раз.

Сравнение с другими, более надежными способами оценки удельной поверхности показывает, что близкий к истине результат получается из скорости фильтрации бензола; фильтрация воздуха дает заниженное значение. Это следует особо подчеркнуть, так как метод измерения удельной поверхности порошков, основанный на измерении их воздухопроницаемости, начал распространяться в некоторых отраслях промышленности (например, цементной), вводя в заблуждение инженерно-технических работников, применяющих его для оценки, например, среднего размера зерен порошков.

¹ Д. М. Толстой считает возможным объяснять это явление скольжением на границе вода — олеиновая кислота.

В чем причина неприменимости метода воздухопроницаемости к измерению поверхности тонкопористых тел? Причина заключается в том, что формула Козени верна только тогда, когда жидкость (или газ) при своем течении в порах тела не скользит по их стенкам и частицы жидкости, непосредственно прилегающие к стенкам пор, находятся в покое.

Как мы видели, при рассмотрении трения газов всегда наблюдается скольжение. Только для пор, размеры которых велики по сравнению с длиной свободного пробега молекул газа, влиянием этого скольжения можно пренебречь; для тел же с более узкими порами этого сделать нельзя. Уменьшить влияние скольжения на скорость фильтрации можно, применяя фильтрацию при высоких давлениях, когда средняя длина пробега газовых молекул уменьшается. Однако этот способ сопряжен с большим усложнением аппаратуры и процедуры измерений и поэтому не может быть рекомендован.

Другой выход указал автор этой книги. Цель нового способа измерения удельной поверхности пористых тел заключается в том, чтобы наблюдать противоположный предельный случай движения газа через пористое тело, при котором средняя длина пробега велика по сравнению с просветами пор. Такое течение можно осуществить, если заставлять течь через пористую перегородку воздух, засасываемый обычным водоструйным или форвакуумным насосом, и вследствие этого разреженный в 100—1000 раз по сравнению с нормальным состоянием. Первый прибор разработан для этой цели совместно с Р. М. Фридлянд в Институте физической химии АН СССР и в Агрофизическом институте ВАСХНИЛ. Этот прибор в дальнейшем был значительно усовершенствован Н. Н. Захаваевой и М. В. Талаевым и внедрен в практику многих лабораторий и заводов (рис. 36).

При движении достаточно разреженного газа через пористое тело молекулы газа в порах тела соударяются друг с другом во много раз реже, чем со стенками пор, вследствие чего столкновениями молекул газа между собой можно пренебречь. В этом случае движение отдельных молекул газа в системе пор рассматриваемого тела будет происходить в з а и м н о з а в и с и м о, т. е. каждая молекула будет двигаться через пористую перегородку так, как если бы других молекул там

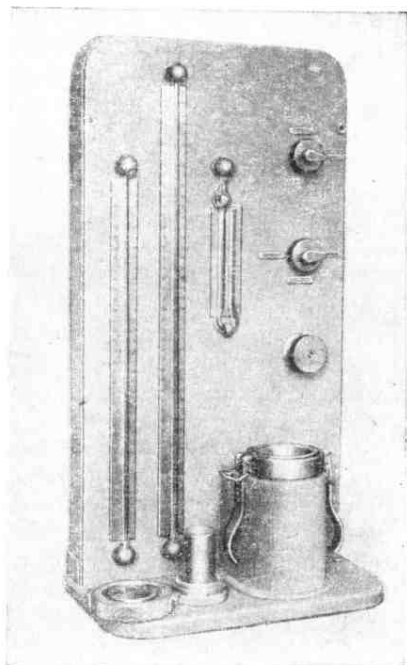
не было. При этом расчет скорости фильтрации разреженного газа через пористые тела делается особенно простым. Он привел к формуле

$$w = 1,5 \frac{\delta^2 A \sqrt{M}}{S_0 \sqrt{RT}} \cdot \frac{\Delta p}{L}, \quad (28)$$

где w — расход газа, $g/сек$; M — его молекулярный вес; T — абсолютная температура; R — универсальная газовая постоянная; Δp — разность давлений с обеих сторон перегородки толщиной L ; A — площадь сечения тела

Эта формула выведена в предположении, что каждое соударение молекулы газа с поверхностью пор приводит к «прилипанию» и поэтому направление молекулы после ее «испарения» не

Рис. 36. Прибор для измерения удельной поверхности пористых тел и порошков по сопротивлению течению разреженного воздуха



зависит от направления удара. Аппаратуру и методы для измерения удельной поверхности пор по скорости фильтрации разреженного воздуха применяют во многих исследовательских лабораториях, институтах и на заводах. Эта методика выгодно отличается простотой аппаратуры, легкостью и быстротой измерений. Кроме того, этот метод применим с достаточной точностью в широком диапазоне удельных поверхностей, включающем такие сравнительно грубопористые тела, как песчаники, и такие тонкопористые тела, как сажа с удельной поверхностью в сотни m^2/g . Следует отметить, что этот метод, как и метод, основанный на фильтрации жидкостей, позволяет измерить только наружную

поверхность зерен пористого тела, без учета поверхности пор в самых зернах (например, в силикагелях).

Однако зачастую именно эта наружная поверхность зерен материала и представляет интерес, так как от нее зависит протекание многих процессов. Так, например, сопротивление движению жидкости через подобного рода материал зависит именно от наружной поверхности зерен, так как во внутренних порах зерен жидкость почти неподвижна и эти внутренние поры не принимают заметного участия в фильтрации жидкости через среду. Таким образом, коэффициент фильтрации воды через тонкопористые грунты можно вычислить, определив удельную поверхность методом фильтрации разреженного воздуха, что занимает не больше часа времени. Непосредственное же определение коэффициента фильтрации требует многих дней и даже недель.

Наружная удельная поверхность влияет также и на ход некоторых физико-химических процессов. Например, скорость каталитических реакций в потоке газовой смеси, проходящей через зерненный катализатор¹, определяется величиной наружной поверхности зерен.

Закон вязкости жидкостей Бачинского

Рассмотрим теперь основные закономерности вязкости жидкостей. Здесь прежде всего бросается в глаза то, что коэффициент внутреннего трения жидкостей значительно выше, чем газов. Например, вязкость жидкой воды при 0° приблизительно в 200 раз выше вязкости водяных паров при той же температуре (см. табл. 1). Другое отличие вязкости жидкостей от вязкости газов заключается в том, что вязкость жидкостей всегда падает с повышением температуры, тогда как у газов при повышении температуры вязкость возрастает. Поэтому при 100° жидкая вода всего в 25 раз более вязка, чем газообразная, а не в 200 раз, как при 0°.

Совершенно очевидно, что эти коренные различия зависят от строения жидкостей и газов, в первую очередь от их плотности.

¹ Катализатором называется тело, изменяющее скорость химической реакции, но само в ней не участвующее. Чаще всего явление катализа связано с адсорбцией — сгущением реагирующих веществ на поверхности катализатора под влиянием сил молекулярного притяжения.

Основные работы в области теории вязкости жидкостей принадлежат ученым нашей страны. Первой работой в этой области, сыгравшей крупнейшую роль в ее развитии, был труд А. И. Бачинского, опубликованный в 1911 г. Бачинский показал хорошую приложимость ко многим жидкостям следующей формулы для вязкости:

$$\eta = \frac{b}{V - \omega}, \quad (29)$$

где V — так называемый молярный объем жидкости, т. е. объем, занимаемый таким количеством вещества, вес которого в граммах численно равен ее молекулярному весу; b и ω — константы, зависящие от рода жидкости. Чтобы лучше понять рассуждения Бачинского, приведшие его к выводу этой формулы, вернемся к основному выводу кинетической теории газов, согласно которому вязкость газа не зависит от его плотности. Этот результат можно объяснить тем, что при увеличении плотности газа, а следовательно, при увеличении числа его молекул в единице объема число молекул, залетающих из одного слоя газа в движущийся с другой скоростью соседний и передающих при соударениях с находящимися там молекулами избыточное количество движения, возрастает пропорционально числу молекул в единице объема. Но пропорционально тому же числу уменьшается средняя длина свободного пробега газовых молекул, и потому те молекулы, которые являются переносчиками избыточного количества движения, переносят его в среднем из слоев, менее удаленных от того слоя, в который они попадают. Поэтому переносимое каждой такой молекулой в среднем и з б ы т о ч н о е количество движения пропорционально уменьшается. В результате общий обмен количеством движения в единицу времени остается неизменным.

Такая взаимная компенсация действий двух противоположных факторов наблюдается только до тех пор, пока размеры молекул остаются весьма малыми по сравнению со средней длиной свободного пробега. Для достаточно плотных газов, где это условие уже перестает соблюдаться, начинает играть роль дополнительный механизм передачи количества движения, влияние которого в разреженном газе относительно мало.

Чтобы легче понять этот механизм, рассмотрим следующий простой опыт. На одной прямой линии лежит

несколько бильярдных упругих шаров a_1, a_2, a_3, a_4 (рис.37). О самый крайний из них слева ударяет какой-нибудь бильярдный шар a , направление движения которого V совпадает с прямой, на которой расположены все остальные шары. Допустим, что удар центральный. При упругом ударе ударившийся шар остановится, передав все свое количество движения второму шару, который начнет двигаться направо с той же скоростью, что и первый шар; второй шар точно таким же способом при ударе передаст свое количество движения третьему шару, и таким путем

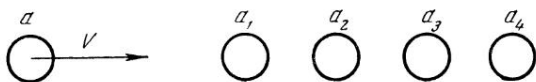


Рис. 37. Передача количества движения при ударах упругих шаров

количество движения будет распространяться вправо, передаваясь от одного шара к другому.

Очевидно, в том случае, когда расстояния между соседними шарами велики по сравнению с их диаметром D , скорость, с которой передается количество движения, мало отличается от скорости, с которой движется каждый шар между двумя ударами. Чем плотнее расположены шары, тем меньше время передачи количества движения на одно и то же расстояние A . Увеличение скорости передачи количества движения можно легко рассчитать, предполагая длительность удара настолько малой, что ею можно пренебрегать. В этом случае скорость передачи количества движения увеличится в $\frac{A}{A - ND}$ раз, где N — число шаров, расположенных на протяжении длины A .

Обращаясь от этой грубой аналогии к тому, что происходит в газе, состоящем из отдельных движущихся и соударяющихся молекул, можно принять, что скорость передачи количества движения пропорциональна вязкости газа. Правда, в газе молекулы нигде не выстраиваются на одной прямой, но это и не существенно, так как и при единичных соударениях происходит передача количества движения и этот процесс ускоряется благодаря размерам самих молекул.

Так как молекулы расположены беспорядочно и движутся в пространстве по всем трем измерениям, мерой величины зазоров, остающихся незаполненными, в которых и должны двигаться молекулы от одного удара к другому, перенося таким образом количество движения от слоя к слою, должен служить с в о б о д н ы й о б ъ е м, т. е. объем газа, содержащего N молекул, за вычетом суммарного объема, который способны занять все находящиеся в нем молекулы при наиболее плотном расположении. При этом расстояние, проходимое молекулой от одного соударения до другого, стремится к нулю одновременно со свободным объемом, определяемым таким способом. Однако под наиболее плотной упаковкой здесь нельзя разумеать ту действительно наиболее плотную упаковку, которая получается, когда шарообразные молекулы располагаются в правильном порядке (каждая соприкасается с двенадцатью своими соседями). В газе и жидкости при беспорядочном расположении и движении молекул такая плотная упаковка ни при каких условиях получиться не может. Поэтому, как показывают расчеты, среднее расстояние, проходимое молекулой от одного удара до другого, будет приблизительно пропорционально объему газа V за вычетом четырехкратного объема V_0 самих молекул, расположенных в нем и представляемых как правильные шары. На основании изложенного мы можем написать, что скорость передачи количества движения, а следовательно, и коэффициент внутреннего трения газа η будут увеличены пропорционально отношению

$$\frac{V}{V - V_0}.$$

Здесь удобно подразумевать молекулярный объем газа, вес которого в граммах V численно равен его молекулярному весу и который, следовательно, содержит одинаковое для всех веществ число молекул N . При этом для вязкости η получим выражение

$$\eta = \eta_0 \frac{V}{V - V_0}, \quad (30)$$

где η_0 — вязкость разреженного газа.

Формула (30) близка к формуле (29), впервые предложенной Бачинским для жидкостей. Более строгое теоретическое рассуждение, развитое его учеником М. Ф. Широ-

ковым, приводит к формуле, еще более близкой к формуле (29). В нашем рассуждении мы воспроизвели только основную идею вывода Широкова, опустив все остальное, включая, конечно, и математические расчеты. Из этого вывода, впрочем, следует, что формула Бачинского более применима к плотным газам; для жидкостей же от нее могут быть отклонения, что и наблюдается в действительности.

Как показал Бачинский, формула (29) приложима ко многим жидкостям. В то же время она не приложима к такой наиболее распространенной жидкости, как вода, и к некоторым другим (спирты, жирные кислоты и др.).

Изучение особенностей жидкостей, не подчиняющихся формуле Бачинского, дало основание предположить, что для всех них характерна так называемая ассоциация молекул. Под этим разумеют способность молекул благодаря наличию сил молекулярного притяжения как бы слипаться друг с другом, образуя агрегаты из тесно связанных между собой двух или трех молекул. В отличие, однако, от агрегатов, связанных силами химического средства, такие группы или ассоциации молекул существуют в связанном состоянии сравнительно недолго, распадаясь под действием толчков окружающих молекул.

Выводы Широкова, так же как и наши упрощенные рассуждения, основывающиеся на грубой аналогии с ударами бильярдных шаров, не учитывают возможности образования молекулами ассоциированных групп. Естественно поэтому, что ассоциированные жидкости не подчиняются формуле Бачинского.

Особый механизм вязкости жидкостей по Френкелю

В формуле Бачинского выражена идея, согласно которой основное отличие жидкостей от газов состоит в том, что молекулы жидкости расположены более тесно. Эта идея является одной из важнейших и плодотворнейших для понимания соотношения свойств жидкостей и газов. Сходство этих свойств не исключает, однако, существования принципиальных различий и возможности одновременно указать на близость по ряду свойств жидкостей к твердым телам. Этот, другой, также плодотворный, подход к изучению жидкостей развил советский физик

Я. И. Френкель, применив его, в частности, к развитию теории вязкости жидкостей.

Отличия жидкого вещества от газообразного и сходство первого с твердыми телами связаны с тем, что по плотности жидкости ближе к твердым телам, чем к газам. Дальнейшие принципиальные отличия природы жидкого состояния от газообразного, одновременно сближающие жидкости с твердыми телами, таковы: относительно большая роль молекулярных сил притяжения; в движении молекул жидкости сильнее выражен колебательный характер движения, свойственный твердым телам, чем поступательный, свойственный газам; третье отличие связано с различным характером расположения молекул у газов и жидкостей.

Первое отличие — причина остальных двух. Оно в то же время служит причиной ассоциации молекул, вызывающей отклонение свойств ряда жидкостей от свойств тех жидкостей, которые подчиняются формуле Бачинского. В газах вследствие большего среднего расстояния между молекулами последние большую часть своего движения находят вне заметного действия молекулярных сил, поэтому движение молекул газа от удара до удара происходит по закону инерции — прямолинейно.

Наоборот, в жидких, как и в твердых, телах каждая молекула находится в близком окружении нескольких своих соседей. При этом равнодействующая этих сил стремится придать молекуле определенное положение равновесия. Однако беспорядочное тепловое движение, существующее при любой температуре и при любом агрегатном состоянии тела, сказывается и у жидкости, вследствие чего каждая молекула не остается неподвижной в своем положении равновесия, а непрерывно колеблется вокруг него, то удаляясь, то приближаясь. Такое колебательное движение молекул жидкости нарушается в некоторый момент, когда под влиянием особо сильного удара соседних молекул или под влиянием нескольких случайных ударов в близких друг другу направлениях молекула удалится из своего положения равновесия на такое большое расстояние, что окажется более близкой к какому-то другому, соседнему положению равновесия, которое в данный момент свободно от присутствия какой-либо другой молекулы. В результате молекула перескакивает из одного положения равновесия в другое, вблизи которого

она будет находиться некоторое время, также совершая непрерывное колебательное движение.

Таким образом, каждая молекула будет вести смешанное, «оседло-кочевое» существование, переходя от одного «оседлого» существования скачком в другое, соседнее. Если жидкость в целом находится в покое, то каждая молекула будет менять места своей стоянки, т. е. «кочевать» совершенно беспорядочным образом, не стремясь при своем движении придерживаться какого-либо одного направления. В этом отношении движение жидкости будет аналогично движению молекул газа.

Но отличие будет состоять в том, что, вместо прямолинейного пробега от одного соударения до другого, разделенных расстояниями, обычно значительно превышающими расстояние между соседними молекулами, молекулы жидкости перескакивают из одного положения в соседнее, отделенное расстоянием одного порядка с расстоянием между соседними молекулами. Другое отличие заключается в том, что для жидкости эти скачки разделены периодами чисто колебательного движения, продолжительность которых во много раз больше продолжительности самого скачка.

Существование такого беспорядочного «кочевого» движения, или миграции, молекул жидкостей объясняет явление диффузии растворенных молекул в жидкостях. То, что диффузия совершается в жидкостях во много раз медленнее, чем в газах, объясняется теми двумя отличиями «кочевого» движения молекул в жидкостях от движения газовых молекул, о которых мы только что говорили.

Рассмотрим теперь жидкость, находящуюся между двумя пластинами (рис. 38), из которых нижняя aa неподвижна, а верхняя bb движется параллельно самой себе вправо со скоростью U . Рассмотрим судьбу какой-нибудь одной молекулы A , совершающей колебания вблизи некоторого положения равновесия. Так как в жидкости существует сила внутреннего трения, то эта молекула находится под действием силы f , стремящейся переместить ее вправо, в положение B , изображенное пунктиром. Без действия этой силы молекула имела бы равные шансы при переходе в новое положение равновесия переместиться как вправо, так и влево. При наличии же действующей вправо силы эти шансы делаются неравными. Шансы за

то, что молекула переместится вправо, увеличиваются при одновременном уменьшении шансов противоположного смещения.

В результате из всех молекул, расположенных в том же слое, что и рассматриваемые, больше половины переместится вправо и, таким образом, в среднем соответствующий слой будет иметь некоторую скорость, превышающую

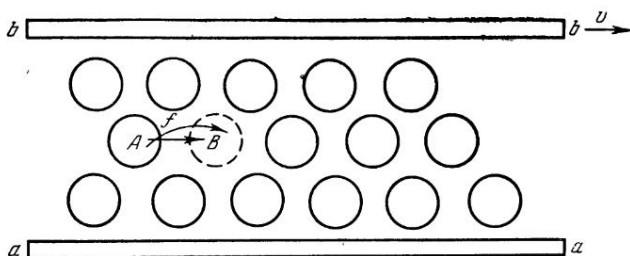


Рис. 38. Механизм вязкости жидкостей

среднюю скорость молекул расположенного ниже слоя. Эта разность средних скоростей соседних слоев $v_2 - v_1$ будет, как легко представить, пропорциональна действующей силе f . Обозначив коэффициент пропорциональности c , напомним формулу

$$f = c(v_2 - v_1). \quad (31)$$

Заменяя f через F/N , где N — число молекул, приходящих на площадь S , F — сила трения, приложенная к той же площади, а $v_2 - v_1$ — через $G\Delta h$, где G — градиент скорости, Δh — расстояние между соседними слоями, получим формулу

$$F = c \frac{N}{S} \Delta h G S. \quad (32)$$

Полученная формула аналогична формуле (7) сопротивления вследствие внутреннего трения. Получится полное совпадение, если за коэффициент внутреннего трения принять величину, равную выражению $\frac{cN\Delta h}{S}$.

Величина c , которой, таким образом, пропорциональна вязкость, зависит от того, насколько сильно действующая на молекулу в касательном направлении сила увеличи-

вает шансы на перескакивание молекулы из одного положения равновесия в другое — в направлении действующей силы. Величина c зависит, следовательно, от того, чему равна разность числа скачков вправо и влево, совершаемых молекулой за единицу времени. Эта разность

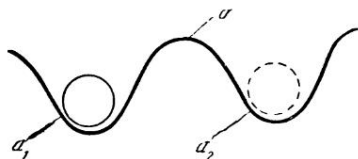


Рис. 39. Механизм движения молекул в жидкостях

будет, очевидно, тем меньше, чем реже молекула перескакивает вообще из одного положения «оседлого» существования в другое, соседнее. Эта частота перескоков тем больше, чем больше средняя кинетическая энергия колебательного теплового движения молекулы kT , пропорциональная абсолютной температуре¹ жидкости T ; напротив, частота перескоков тем реже, чем больше работы u надо затратить для того, чтобы молекула могла вырваться из какого-то одного положения равновесия и достигнуть такого «перевала», после которого она способна попасть в другое положение устойчивого равновесия, будучи предоставлена самой себе.

Чтобы наглядно представить это соотношение, вообразим ряд ямочек, разделенных как бы грядками (рис. 39). Если какой-то тяжелый шарик ляжет в одну из этих ямок a_1 , то для того, чтобы он мог попасть в соседнюю ямку a_2 , должна быть затрачена как минимум работа u подъема его до «перевала» хребта b , разделяющего обе ямки.

Нечто аналогичное, мы имеем и в случае перескакивания молекулы из одного положения равновесия в соседнее. Все эти рассуждения после соответствующих расчетов приводят к следующей формуле, выражающей зависимость вязкости от абсолютной температуры жидкости:

$$\eta = Ae^{u/kT}. \quad (33)$$

Изложенная выше картина молекулярного движения в жидкости, приведшая к формуле (33), была впервые развита у нас Я. И. Френкелем. За рубежом сходные представления особенно систематически развивал Эйринг и

¹ Как показал Больцман, носящая его имя постоянная k , равная $1,38 \cdot 10^{-16} \text{ эрг/град}$, не зависит от рода молекул и температуры.

и др. Формула Френкеля довольно хорошо согласуется с измерениями вязкости многих жидкостей при различных температурах, в том числе и для ассоциированных. В дальнейшем эта теория была видоизменена как самим автором, так и рядом других, что позволило улучшить ее согласие с опытом. Все же основную ценность имеет, пожалуй, не столько сама формула, сколько те новые представления о характере молекулярного движения в жидкостях и механизме вязкости жидкостей, которые были развиты Френкелем.

Эти представления дополнил А. З. Голик, показавший с предельной ясностью и точностью влияние на вязкость жидкостей и растворов типа расположения молекул и молекулярных сил взаимодействия, характеризующихся критической температурой. При этом в обширных работах Голика и его учеников было показано, что наиболее простые закономерности, связывающие вязкость и состав жидкости, получаются в том случае, когда рассматривается группа жидкостей структуры, сходной по данным рентгеноструктурного анализа.

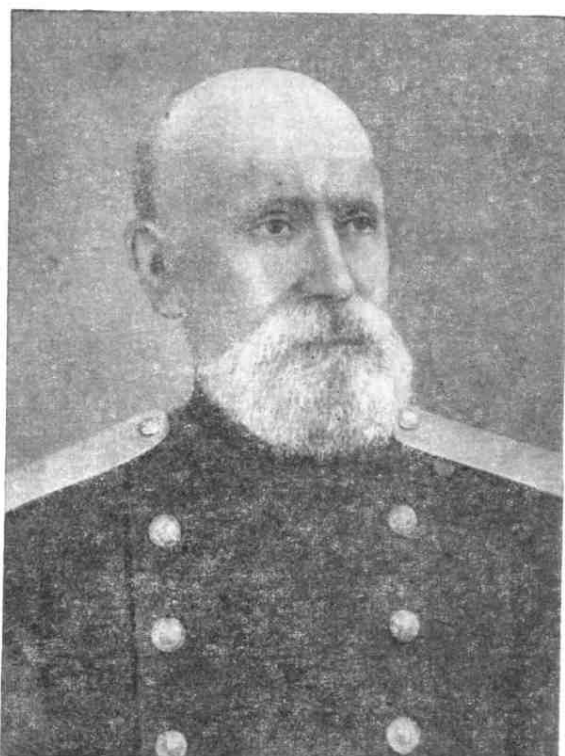
II

ВНЕШНЕЕ ТРЕНИЕ И СМАЗКА

Внешнее трение. Гидродинамическая теория смазки Петрова-Рейнольдса

Мы видели, что в жидкостях и газах при неодинаковой скорости течения соседних слоев и при наличии градиента скорости возникает внутреннее трение, для которого наиболее характерно непрерывное изменение скорости от слоя к слою, без резких скачков. В отличие от этого, при взаимном скольжении двух твердых тел мы имеем резкий скачок скорости между соприкасающимися телами. Трение в этом случае зависит только от состояния поверхности обоих трущихся тел, но не от того, что происходит в слоях, расположенных на некоторой глубине под их поверхностью. Такое трение поэтому естественно назвать внешним.

Однако очень часто трение двух твердых тел, например двух взаимно перемещающихся деталей машины, только кажется внешним при обычных, сравнительно грубых методах наблюдения. В действительности два твердых тела очень часто, а в практике это стараются осуществить почти всегда, разделены слоем некоторой вязкой жидкости (смазки) определенной толщины. Таким образом, при более тщательном рассмотрении то, что кажется нам внешним трением, по существу должно быть отнесено к внутреннему трению, к тому случаю трения, который был нами рассмотрен выше. Впервые эту общую весьма плодотворную и глубокую мысль о том, что внешнее трение твердых тел, в особенности в машинах при наличии смазочных веществ, сводится к внутреннему трению, высказал выдающийся инженер и ученый



Николай Павлович Петров (1836—1920)

Н. П. Петров. Он развил эту идею в виде стройной, математически обоснованной теории.

Как инженер путей сообщения, Н. П. Петров заинтересовался случаем трения между вращающимся валом, расположенным внутри цилиндрического подшипника, и подшипником в вагонных буксах. Между поверхностью вала и подшипником всегда остается некоторый зазор, заполненный смазкой. Если образующийся зазор заполнен вязким маслом, трение, преодолеваемое при вращении вала в неподвижном подшипнике, будет определяться исключительно внутренним трением в прослойке смазочной жидкости. Н. П. Петров рассмотрел при этом наиболее простой, но в то же время весьма важный случай, когда

центры поперечных сечений вала и подшипника совпадают, т. е. вал и подшипник строго соосны и эксцентриситет их расположения отсутствует (рис. 40). Идея Петрова сейчас кажется очень простой и естественной, но в его время представление о вязкости только еще начало развиваться и некоторые основные положения, которые

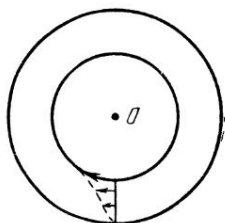


Рис. 40. Трение при соосности вала и подшипника (стрелками указаны скорости перемещения смазки)

теперь общеприняты, тогда еще не были установлены. В частности, не было твердо установлено, что на границе твердого тела и вязкой жидкости скольжение отсутствует. Сама возможность применения основных уравнений вязкости к тонкому слою масла в зазоре была по тем временам весьма смелой, новаторской мыслью.

Н. П. Петров рассматривает в своей работе вначале общий случай, при котором имеется скольжение между смазочной прослойкой и поверхностями вала и подшипника. В настоящее время ограничиваются только

тем частным случаем, предусмотренным еще и самим Петровым, когда этого скольжения нет. В этом случае силу трения можно вычислить очень просто. В особенности просто вычисление, если толщина зазора h очень мала по сравнению с радиусом вала и, следовательно, отдельные участки зазора можно рассматривать как плоскопараллельные, т. е. пренебрегать их кривизной. Силу трения F , действующую на какой-нибудь из таких участков площади S , можно вычислить по формуле, аналогичной формуле (7):

$$F = \eta S \frac{v}{h} = 2\pi\eta S \frac{R}{h} n,$$

где v — окружная скорость вращения вала; n — число оборотов в единицу времени.

Так как речь идет о сопротивлении вращению, то необходимо характеризовать его не самой силой трения F , а ее моментом M , равным силе трения, умноженной на плечо этой силы, совпадающее в нашем случае с радиусом вала R . При этом все моменты трения, действующие на разные участки суммарной поверхности вала $2\pi RL$ длиной L , можно складывать алгебраически, не обращая внимания на различное направление в пространстве раз-

ных участков поверхности. Таким образом, мы найдем для суммарного момента силы трения M величину

$$M = \frac{4\pi^2 L R^3 \eta n}{h}. \quad (34)$$

Мы видим, что сила трения пропорциональна вязкости смазочного вещества, числу оборотов вала в единицу времени n и, кроме того, зависит от ширины зазора h между поверхностями вала и подшипника. Полученная зависимость справедлива в опытах с трением в подшипниках скольжения для достаточно больших скоростей. Но по мере уменьшения скорости вращения обнаруживаются отклонения от этой формулы, момент трения начинает убывать медленнее числа оборотов вала.

Чем объясняются эти отклонения? Строго говоря, мы должны были бы начать с того, чтобы задать обратный вопрос: чем объясняется согласие между формулой Петрова и результатами опытов с трением цилиндрических подшипников при больших скоростях? Действительно, в этих опытах обычно речь идет о нагруженных валах или подшипниках, которые под действием собственного веса и веса связанных с ними частей стремятся занять наиболее низкое положение, а вовсе не соосное с подшипником. При этом должно произойти выжимание смазочной пленки из зазора, т. е. наряду с внутренним трением должно появиться внешнее. Это неизбежно должно было бы вызвать отклонения от закона Петрова, а кроме того, — что практически еще важнее — поверхности вала и подшипника взаимно подвергнутся износу, т. е. постепенному истиранию и выкрашиванию, ведущим к нарушению гладкости, размеров и формы поверхностей, а иногда и к их сцеплению и заеданию.

Почему же всего этого нет по крайней мере при достаточно больших скоростях? Опыты, сделанные много позже, показали, что при достаточно быстром вращении вала в подшипнике вал поднимается и занимает положение, близкое к соосному с подшипником. Причину этого явления мы рассмотрим в следующем параграфе.

Клиновое действие смазочного слоя

Источником «подъемной силы», отделяющей вал от подшипника, очевидно, может служить только смазочный слой масла, заполняющий зазор. В этом и лежит

ключ к объяснению самого явления¹. Чтобы понять это явление, рассмотрим более подробно на рис. 41, что происходит, когда внутри подшипника B вращается цилиндрический вал C , ось которого O расположена на некотором расстоянии от оси подшипника O_1 . Поверхность вала,

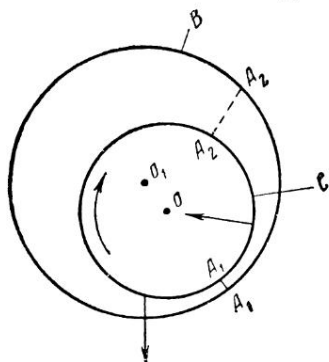


Рис. 41. Трение в цилиндрическом подшипнике скольжения

увлекая слои смазки, заставляет их участвовать в своем вращательном движении. Скорости движения масляных слоев при этом постепенно убывают от максимальной (на поверхности вала) до равной нулю (в непосредственном соседстве с поверхностью подшипника). Однако профиль скоростей здесь не может иметь ту простейшую, почти прямолинейную форму, которую он имел бы при соосности вала и подшипника (см. рис. 40), т. е. в слу-

чае, близком к случаю параллельных пластинок.

Действительно, если бы профиль скоростей был везде прямолинейным, то средняя скорость течения масла в зазоре была бы во всех его сечениях (например, A_1 и A_2 на рис. 41) одинаковой и равной половине скорости v движения точек на поверхности вала. Очевидно, объем жидкости, который при этом проходил бы через какое-либо поперечное сечение зазора в единицу времени и равнялся площади зазора, умноженной на среднюю скорость течения в нем, был бы неодинаков в различных сечениях. Он был бы наименьшим в минимальных по ширине сечениях зазора и наибольшим в сечениях зазора, максимальных по ширине. Это, однако, невозможно, потому что в таком случае количество жидкости, вытекающей в пространство между двумя сечениями зазора через одно из них (A_2A_2), было бы больше количества жидкости, вытекающей из этого же объема за то же время через другое

¹ Соответствующее клиновое действие смазки рассмотрел теоретически Рейнольдс. Его расчеты были упрощены и несколько продолжены Зоммерфельдом. Однако строгое и одновременно изящное математическое решение задачи было дано только Н. Е. Жуковским и С. А. Чаплыгиным.

сечение (A_1A_1). Жидкость должна была бы непрерывно накапливаться в этой части зазора, что невозможно. Это несоответствие приводит к тому, что в тех местах, где по ходу вращения вала зазор сужается, развивается повышенное давление. Повышенное давление уменьшает приток жидкости со стороны широкого сечения и увеличивает отток со стороны более узкого. Наоборот, в тех местах где по ходу вращения вала зазор расширяется, образуется зона пониженного давления жидкости.

В результате этого поверхность вращающегося вала оказывается под действием дополнительных сил, на одних участках направленных к центру вала (F_1), на других — от центра (F_2). Эти силы, будучи направлены перпендикулярно к поверхности вала, не могут непосредственно изменить сопротивление его вращению в вязкой жидкости. Однако эти силы стремятся переместить расположение оси вращения вала, поэтому вал покидает под их действием то наинизшее положение внутри подшипника, которое он занимал бы, если бы находился только под действием собственного вала или нагрузки, которую несет. Из рис. 41 следует, что вал должен переместиться по направлению его вращения (указанному стрелкой), т. е. влево по ходу вращения.

Это обстоятельство весьма существенно. Действительно, под действием только сил трения, которые принимают наибольшую величину там, где зазор узкий, вал стремился бы перемещаться в противоположную сторону, как бы катясь по внутренней поверхности подшипника. И действительно, такое перемещение вала в сторону, противоположную направлению вращения, можно наблюдать, когда зазор между валом и подшипником не заполнен вязкой жидкостью, способной давать начало действиям, зависящим от вязкости жидкости. Наблюдаемое на практике смещение вала влево, т. е. по ходу вращения, для случая смазанного подшипника служит, таким образом, замечательным и весьма убедительным подтверждением правильности излагаемых соображений.

В присутствии смазочной прослойки силы трения, направленные вдоль участков поверхности вала навстречу направлению его вращения, не исчезают и имеют большую величину в нижней части поверхности вала, т. е. там, где зазор более тонок. Если вал все же движется

в сторону вращения, то это происходит потому, что силы, возникающие от непосредственного действия внутреннего трения смазочной прослойки, оказывают меньшее влияние, чем силы давления, выражающие косвенный результат действия сил внутреннего трения в смазочной прослойке.

Но самым важным обстоятельством является не смещение вала по ходу вращения, при котором область контакта вала и цилиндра перемещается относительно поверхности подшипника, удаляясь от его наиболее низко

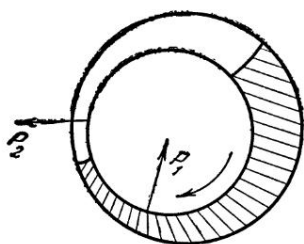


Рис. 42. Механизм грузо-подъемности подшипника скольжения

расположенных точек, а одновременно происходящее смещение вала, сопровождаемое утолщением зазора между ним и поверхностью подшипника. Вал при этом как бы оказывается подвешенным внутри вязкой прослойки; он непосредственно уже не опирается на поверхность подшипника.

Чем же, спрашивается, уравнивается при этом действующая на вал нагрузка и, следовательно, какие

силы вызывают такое «подвешивание» вала? Роль этих сил выполняют те же силы добавочного давления P_1 возникающие благодаря неравномерности зазора. Эти силы в области сужения зазора направлены вверх и, следовательно, стремятся поднять вал, уравнивая действие его нагрузки. На это можно возразить, что в обратную сторону должны действовать те силы P_2 , которые получаются благодаря пониженному давлению, начинающемуся от области наиболее узкого зазора и простирающемуся в область его расширения.

Однако нетрудно увидеть, что даже если бы эти силы были столь же велики, как и первые силы, их действие должно быть меньше, так как благодаря боковому смещению вала они составляют с вертикальным направлением меньший угол (рис. 42). Таким образом, слагающая тех и других сил, направленная вертикально вверх, не равна нулю и способна уравновесить нагрузку, действующую на вал. Однако главное заключается не в этом. Точные расчеты показывают, что, помимо этого, сами

силы, действующие в зоне расширяющегося зазора, могут быть в определенных случаях меньше, чем силы, действующие в зоне сужения зазора. В эту сторону прежде всего действует разрыв масляной пленки в зоне, где давление, понижаясь, переходит через нуль и становится отрицательным. В результате разрыва получается неполный охват вала смазкой (рис. 42, заштрихованная часть) и исчезает действие на него соответствующих сил пониженного давления P_2 .

Неполный охват вала смазочной прослойкой, являющийся в практических случаях не исключением, а правилом, вносит существенное изменение в ту картину распределения скоростей и усилий в смазочном слое, которую

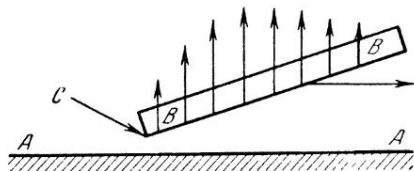


Рис. 43. Клиновое действие смазки при скольжении ползуна («сухаря»)

мы имели бы при полном охвате. Особенно подробно рассмотрел явление разрыва масляной пленки и его влияние на смазочное действие В. Я. Климов.

Рассмотрим теперь случай так называемого ползуна, или «сухаря». Такой случай мы имеем при движении по плоской горизонтальной поверхности AA ползуна BB , наклоненного к горизонту, вследствие чего возникает только сужающаяся (по ходу нижней поверхности) область зазора (рис. 43). Точка наибольшего сближения находится в задней части ползуна, за которой область зазора обрывается. В этом случае при движении ползуна вправо, когда между ним и подстилающей плоскостью имеется вязкая смазочная прослойка, развивается только область зазора с повышенным давлением жидкости. Это повышенное давление (обозначенное на рис. 43 стрелками) обеспечивает в процессе скольжения постоянный зазор между ползуном и плоскостью, по которой он скользит, уравнивая несомую ползуном нагрузку. Таким образом, грузоподъемность ползуна возникает

благодаря действию вязкости смазочной прослойки между ним и сопряженной поверхностью.

Вернемся теперь к случаю цилиндрического подшипника. Влияние сил внутреннего трения смазочной прослойки возрастает по мере увеличения скорости движения и вязкости жидкости. Чем больше произведение ηv , тем больше то расстояние, на которое вал оказывается удаленным от внутренней поверхности подшипника, т. е. тем больше ширина h минимального зазора. Нагрузка P на единицу продольного сечения вала площади $2RL$, естественно, действует в противоположную сторону. Положение вала внутри подшипника зависит поэтому от величины отношения

$$z = \frac{\eta v}{P}. \quad (35)$$

С ростом этой величины при увеличении числителя или уменьшении знаменателя толщина минимального зазора приближается к максимальному значению, равному разности радиусов подшипника и вала. В пределе поверхности вала и подшипника становятся соосными: эксцентриситет расположения вала внутри подшипника исчезает.

Таким образом, точные расчеты показывают, что случай, впервые рассмотренный Петровым, действительно способен автоматически реализоваться благодаря действию вязкой смазочной прослойки при достаточно высокой скорости вращения вала и при не слишком большой нагрузке. В этом предельном случае большого значения величины z строго приложима и формула Петрова

$$M = \frac{4\pi^2 LR^3 \eta n}{h},$$

позволяющая рассчитывать момент сил сопротивления вращению вала, зависящих от внутреннего трения смазочной прослойки.

В технике принято оценивать силы трения, деля их на нагрузку. В данном случае суммарную силу трения можно получить, разделив момент трения на радиус вала, равный плечу действующих на его поверхность сил внутреннего трения смазочного слоя. Разделив вычисленную таким образом силу трения на суммарную нагрузку

$2PLR$, получим для коэффициента трения f выражение

$$f = \frac{4\pi^2 LR^2 \eta v}{2PLR} = \frac{\pi \eta v}{P} = \pi z. \quad (36)$$

Таким образом, для случая, рассмотренного Петровым и соответствующего большим скоростям вращения вала в подшипнике, коэффициент трения увеличивается пропорционально вязкости и окружной скорости вала v и уменьшается обратно пропорционально нагрузке, т. е. оказывается пропорциональным той же величине z , от которой зависит положение вала внутри подшипников. На первый взгляд кажется, что из изложенного можно сделать практический вывод о том, что для уменьшения трения в подшипниках необходимо применять смазочные масла с минимальной вязкостью.

Однако можно сразу же заметить, что подобный вывод способен привести к явно нелепому результату, а именно, что наибольший коэффициент трения будет тогда, когда никакой смазки нет и зазор между валом и подшипником вообще ничем не заполнен. Неправильность подобного вывода объясняется тем, что при уменьшении вязкости смазки уменьшается величина z , а вследствие этого увеличивается эксцентриситет положения вала в подшипнике и соответственно уменьшается минимальный зазор между их поверхностями. При этом может наступить момент, когда начнет сказываться не идеально гладкая форма поверхностей вала и подшипника и будет происходить зацепление наиболее высоких выступов этих поверхностей. Вследствие этого сила трения, сопротивляющаяся вращению вала, будет превышать значение, зависящее от внутреннего трения в смазочной прослойке.

В результате при дальнейшем уменьшении z коэффициент и сила трения будут возрастать и, следовательно, кривая, изображающая зависимость f от z , будет иметь форму, изображенную на рис. 44 и обнаруживающую существование минимума трения. Этот минимум соответствует определенному значению $z = z_0$, зависящему от гладкости поверхностей вала и подшипника. Чем лучше они обработаны, тем меньше значение z_0 и тем ниже значение минимального коэффициента трения. Однако в области этого минимума трение в подшипнике уже не определяется гидродинамической теорией смазки — наступает полужидкостное трение.

Точные расчеты, основанные на изложенной теории, подтверждают, что коэффициент трения f зависит только от величины z , но показывают в то же время, что если учитывать разрыв масляного слоя в области отрицательных давлений в нем, то минимума трения не должно наблюдаться. Только при отсутствии разрыва масляной пленки наблюдался бы минимум трения. Однако такой случай в практике встречается очень редко и существование минимума трения объясняется обстоятельствами (шероховатость поверхностей трения), которых гидродинамическая теория смазки не учитывает.

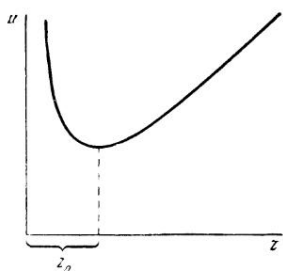


Рис. 44. График для расчета коэффициента трения подшипника скольжения

Основной практический вывод из этой теории заключается в том, что для получения минимального коэффициента трения величина z должна иметь определенное числовое значение z_0 . Обычно удельная нагрузка P и число оборотов n задаются техническими требованиями, и задача заключается в том, чтобы подобрать для данных условий оптимальную смазку, дающую наименьший коэффициент трения. Очевидно, для решения этой задачи надо воспользоваться формулой

$$\eta = z_0 \frac{P}{v},$$

позволяющей, зная удельную нагрузку на вал P и скорость его вращения v , определить оптимальную вязкость смазки η .

Этот вывод имеет чрезвычайно большое значение для смазки любых цилиндрических подшипников в большинстве двигателей. В первую очередь и наиболее широко этот вывод был применен к смазке цапф вагонов на железнодорожном транспорте. Легко понять, какую большую экономию в топливе и какой выигрыш в скорости можно получить, применяя оптимальную смазку взамен случайно выбранной, которая может давать коэффициент трения в несколько раз больше минимального. Сам Петров сумел извлечь большую пользу из теории смазки, обосновав при ее помощи возможность и рациональность за-

мены дорогостоящих растительных смазочных масел значительно более дешевыми маслами, получаемыми из нефти. Возможность подобной замены зависит только от получения нефтяных масел надлежащей вязкости.

Значение смазки заключается в уменьшении не только коэффициента трения, но и износа. При сухом трении, т. е. в отсутствии смазки поверхности вала и подшипника чрезвычайно быстро повреждаются, теряют гладкую и правильную форму. Это явление изнашивания является результатом того, что при непосредственном контакте твердых тел происходит сцепление участков поверхностей, которое при относительном скольжении поверхностей твердых тел ведет к задирам и другим повреждениям. Введение смазки достаточной вязкости устраняет, как мы видели выше, непосредственный контакт при вращении вала в подшипнике или при движении ползуна по сопряженной плоскости, а поэтому устраняет сцепление, а следовательно, и износ поверхностей.

Некоторый износ может, однако, сохраниться в том случае, когда на поверхностях имеются отдельные выступы (хотя бы и микроскопических размеров), которые при достаточно узком зазоре между поверхностями могут задевать друг друга. Продукты износа — твердые частицы, — попадая в зазор, могут действовать подобно частицам абразивного порошка и вызывать дальнейшую порчу поверхностей. Поэтому при смазке важно, чтобы толщина минимального зазора превышала высоту неровностей поверхности. Для этого применяется два средства. Во-первых, трущимся поверхностям стараются придать возможно более гладкую форму. Так, в деталях двигателей внутреннего сгорания, в частности в авиационных, применяют поверхности, максимальная высота неровностей которых достигает нередко только десятых долей микрона. Во-вторых, применяют смазки такой вязкости, при которой толщина минимального зазора будет превышать высоту максимальных выступов трущихся поверхностей.

Все же эти средства не всегда достигают своей цели. Мы видели, что положение вала в подшипнике определяется величиной z ; при ее малости минимальный зазор также может быть весьма мал. Так как величина z содержит в качестве сомножителя скорость вращения вала, то понятно, что никакая смазка не способна обеспечить

должной толщины зазора в начале движения, происходящего после остановки вращения вала. Таким образом, для сохранности поверхностей вала и подшипника момент пуска наиболее опасен.

Следует также иметь в виду, что в некоторых случаях такие остановки происходят периодически в процессе работы деталей, например при возвратно-поступательном вращении, а также при других видах возвратно-поступательного движения. В моменты изменения направления движения скорость становится равной нулю и, следовательно исчезают силы, которые способны обеспечить поддержание хотя бы минимальной ширины зазора. Этим объясняется то, что максимальный износ внутренних стенок цилиндров двигателей сосредоточен в местах a_1 и a_2 , где происходит остановка и направление движения поршня изменяется на обратное (рис. 45).

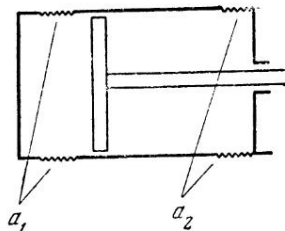


Рис. 45. Износ стенок цилиндра двигателя

Именно в этих местах происходит остановка и направление движения поршня изменяется на обратное (рис. 45).

Воздушная смазка

Из предыдущего видно, что единственное свойство, которым должна обладать смазка для проявления клинового действия и вытекающей из него грузоподъемности, — это вязкость. Поэтому аналогичный эффект должен иметь место и в отсутствие жидкого смазочного слоя благодаря смазочному действию воздуха. Но так как вязкость воздуха в десятки тысяч раз меньше вязкости смазочных масел, удовлетворительная смазка цилиндрических подшипников получается только при весьма больших скоростях и малых нагрузках. Но именно случаи больших скоростей представляют здесь особый интерес, так как для них обычная жидкостная смазка непригодна вследствие чрезмерно высокого сопротивления трения и развивающегося при этом интенсивного выделения тепла.

Особое значение имеет смазка воздухом для суперцентрифуг с числом оборотов в минуту несколько десятков тысяч и более, применяемых для освобождения жидкостей от нерастворимых примесей и для определения молекулярного веса растворов веществ с большими молеку-

лами. Однако в такого рода приборах ось вращения, обычно расположена вертикально, в отличие от ранее рассмотренного цилиндрического подшипника скольжения с радиальной нагрузкой, т. е., где нагрузка направлена параллельно одному из радиусов сечения вала и, следовательно, перпендикулярно к его оси. При осевой нагрузке цилиндрический подшипник, даже заполненный весьма вязкой смазкой, не может служить опорой так как клиновое действие смазочного слоя может уравновесить только горизонтально направленную силу. Если же мы возьмем в качестве подшипника горизонтальную плоскую поверхность или вогнутую поверхность вращения, например в виде части сферы (рис. 46), то в этом случае при симметричном положении пяты вала в подшипнике внутреннее трение в смазке никакой равнодействующей силы вызывать не будет и грузоподъемность такого

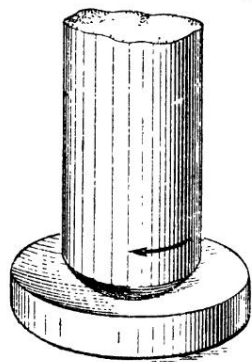


Рис. 46.
Пята и подпятник

подшипника будет равна нулю. Этот вывод будет тем более верен, если в зазоре между пятой и подпятником, в качестве смазки, вместо масла, находится воздух.

Чтобы в этом случае создать воздушную подушку между пятой и подпятником, уравновешивающую нагрузку вала, прибегают к нагнетанию воздуха в зазор извне при помощи специального компрессора. Однако этот метод, требующий специального сложного оборудования, неудобен. Кроме того, малейшее нарушение подачи воздуха от компрессора неизбежно вызовет аварию.

Отечественная техника пошла по иному пути — придания подпятнику аэродинамической грузоподъемности за счет деформации его первоначально плоской поверхности. При этом нарушается равномерность ширины зазора во всех его вертикальных сечениях, зазор в некоторых направлениях становится суженным. Так, С. А. Шейнберг разработал по этой схеме подпятник (для плоской пяты) следующего устройства (рис. 47). Он состоит из колодки 1, которая снабжена тремя (или более) радиальными ребрами 2 и к которой винтами 3, расположенными

(по одному) между ребрами, привинчена круглая плоско-параллельная пластинка 4.

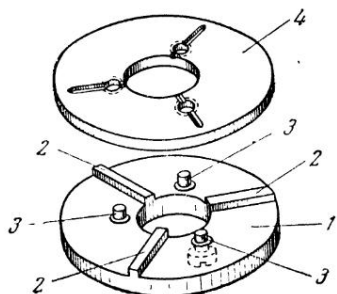


Рис. 47. Устройство воздушного опорного подшипника

Последняя при затягивании винтов упруго изгибается, принимая волнообразную форму.

При вращении пяты вокруг вертикальной оси воздух в областях сужения зазора развивает повышенное давление, создавая воздушную подушку, поднимающую пяту над поверхностью подшипника. Едва ли нужно прибавлять, что в случае подобных «аэродинамических опор», работающих без жидкой смазки и на очень высоких обо-

ротах, поверхностям пяты и подшипника необходимо придавать весьма правильную и гладкую форму и избегать попадания в область зазора мельчайших инородных частиц.

Сухое, или истинно внешнее, трение

При отсутствии смазочной прослойки (роль последней может играть не только специально введенная жидкая прослойка, но и случайные загрязнения, пленки влаги и т. п.) два твердых тела оказываются в непосредственном контакте при любой скорости относительного скольжения. Такой режим трения называется *сухим* трением. Его закономерности отличны от закономерностей «жидкостного» трения или режима «совершенной» смазки. Это различие в основном объясняется следующим: при внутреннем трении скорость частиц тела меняется непрерывно, без скачков и ее изменение характеризуется градиентом скорости; при сухом, или истинно внешнем, трении при переходе от одного тела к другому в месте их взаимного контакта наблюдается скачок скорости, характеризующий скорость скольжения одного тела относительно другого. Поэтому все случаи трения, когда два твердых тела находятся во взаимном контакте, как, например, трение при наличии смазки при весьма малых ско-

ростях, подчиняются тем же закономерностям, что и сухое трение.

Больше того. Для характера наблюдаемых закономерностей важен даже не факт взаимного контакта трущихся тел, а наличие скачка скорости, хотя бы внутри смазочного слоя, если последний находится между обоими телами, разделяя их. Мы увидим далее, что такое поведение достаточно тонкого смазочного слоя, сближающее его свойство со свойствами пластичного твердого тела, возможно и в том случае, когда смазочная жидкость в большей толще, «в объеме» ведет себя, как подобает жидкости, не обнаруживая никаких скачков скорости при переходе от слоя к слою. Закономерности сухого, или внешнего, трения переходят в закономерности жидкостного трения при определенной, хотя и весьма малой толщине смазочной прослойки, зависящей от рода смазочной жидкости (см. стр. 187—188).

Каковы же закономерности внешнего трения?

Статическое трение

Первый основной закон внешнего трения в сущности никогда не формулировался в виде закона главным образом потому, что он настолько легко и просто обнаруживается буквально на каждом шагу, что трудно указать хотя бы приближенно дату его открытия. Закон этот состоит в том, что сила внешнего трения при безграничном уменьшении скорости относительного скольжения и приближении ее к нулю вовсе не стремится к нулю, а приближается к некоторому конечному значению.

Это предельное значение силы трения при исчезающе малой скорости можно легко определить, измерив ту минимальную силу, которая нужна, чтобы нарушить состояние относительного покоя и возобновить процесс скольжения. Естественно, что эта сила необходима для преодоления равной ей и противоположной силы, сопротивляющейся нарушению покоя и началу относительного движения. В противоположности силе трения в рассматривавшихся случаях движения тел, эта последняя сила сопротивляется относительному перемещению двух тел, когда они находятся в состоянии покоя, т. е. до начала относительного движения, поэтому ее принято называть **т р е н и е м п о к о я** или статическим трением. Эта

сила уравнивает внешнюю силу до тех пор, пока не началось непрерывное относительное перемещение обоих тел под влиянием последней.

Отсюда следует, что трение покоя в зависимости от величины внешней силы может принимать любые значения между нулем и некоторым максимальным значением и одновременно иметь весьма различные направления в пространстве.

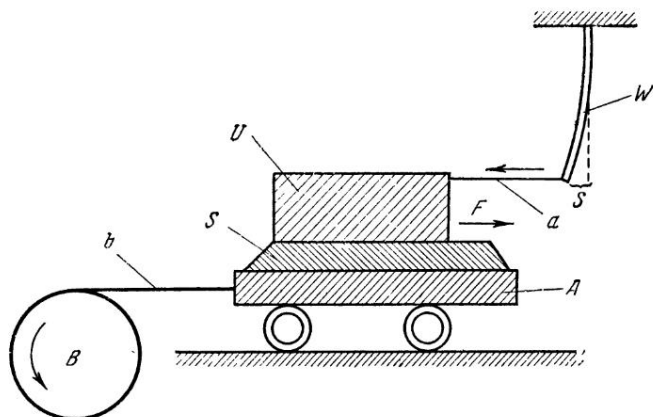


Рис. 48. Схема трибометра

Определенным является только предельное значение силы трения, равное минимальному, или рубежному, значению внешней силы, необходимому для того, чтобы привести тело в состояние движения. Под трением покоя, или статическим трением, обычно и разумеют это предельное, или зарубежное, значение.

В отличие от силы трения движения, статическое трение не имеет определенного направления в пространстве¹. Трение покоя — величина того же рода, что и пределы прочности или пластичности, равные минимальным значениям внешней силы, под действием которой данное тело либо разрушается, теряя целостность, либо начинает пластически деформироваться, как бы течет, независимо от направления деформирующей силы.

¹ Однако при трении кристаллов, как показала Галаунбреннер (Краков), рубежное значение трения покоя зависит от направления приложения сдвигающей силы относительно кристаллографических направлений соответствующей плоскости.

Для измерения статического трения всего удобнее пользоваться трибометром (рис. 48), применявшимся, в частности, в работах В. П. Лазарева. Исследуемое тело с плоской поверхностью S помещается на тележку A , что позволяет посредством нити b приводить ее в медленное и плавное движение, например при помощи часового механизма, вращающего вал B . При этом одновременно увлекается другое тело U .

При помощи нити a или действуя непосредственно тело U при своем движении изгибает стержень W или деформирует (изменяет форму) другое упругое тело, например пружину. Стержень W , стремясь вернуться к первоначальной форме, развивает противодействие, возрастающее по мере перемещения тела U и тянущее его назад, в сторону, противоположную его движению под действием опорной поверхности S , с силой F пропорциональной деформации s .

Когда противодействие стержня, играющего роль динамометра (измерителя силы), превысит по величине статическое трение, тело U начнет скользить по поверхности S и, следовательно, перестанет участвовать в ее движении. Так как трение при движении с малой скоростью, как правило, либо равно статическому трению, либо меньше его, изгиб стержня перестанет увеличиваться. Поэтому, заметив максимальную деформацию стержня, можно определить и величину статического трения, если предварительно установить значение коэффициента k в формуле

$$F = ks.$$

Для измерения изгиба стержня s всего удобнее (если s мало) пользоваться микроскопом со шкалой, помещенной в окуляр микроскопа и позволяющей отсчитывать отклонения определенной точки свободного конца упругого стержня.

Таким образом, первым законом внешнего трения мы считаем существование конечного, не равного нулю трения покоя. Значение этого закона настолько широко и справедливость его настолько очевидна, что для его доказательства достаточно было бы представить себе, как изменились бы повседневно наблюдаемые нами явления, если бы трения покоя не было. В этом воображаемом случае мы прежде всего заметили бы, что предметы,

обычно сколь угодно долго сохраняющие свою неподвижность на столе или полу, постепенно перемещались бы, падая со стола после достижения его края или скапливаясь в местах пола, занимающих наинизшее положение (например, у стены).

В таком мире без статического трения ни на один узел нельзя было бы положиться, как бы хорошо и искусно он ни был бы завязан. Ведущие колеса любого локомотива или автомобиля непрерывно буксовали бы, обеспечивая продвижение вперед только за счет силы кинетического трения (трения движения), которая могла бы сопровождать скольжение буксующих колес относительно рельсов или грунта. Это приводило бы к огромному износу и быстрой порче колес, рельсов или покрышек, не говоря о тех потерях энергии и мощности двигателей, которые вызывались бы развитием тепла при трении скольжения и которых нет при трении покоя. По аналогичной причине ременные и фрикционные передачи также действовали бы совершенно неудовлетворительно. Самые привычные действия человека в быту или при работе были бы либо крайне затруднены, можно сказать, до неузнаваемости, либо стали бы невозможны: всякий цилиндрический стержень выскальзывал бы из рук и пользоваться ручкой или карандашом для письма было бы невозможно.

Ощущения человека, стоящего на полу при отсутствии трения покоя, были бы мало похожи на ощущения, испытываемые человеком, попавшим в скользкой обуви на лед, — пример, часто приводимый в популярных книгах. Коэффициент статического трения стали, кожи, дерева по льду весьма велик, будучи не намного меньше коэффициента трения по стали в редко реализующемся случае полного отсутствия смазки и загрязнений. Скользкость льда (подробнее см. стр. 213), связанная с весьма низким коэффициентом трения движения, обнаруживается только после начала движения, во время скольжения.

Это малоизвестное обстоятельство дает повод проанализировать, что собственно значит «поскользнуться», — явление весьма заурядное, но над истинным смыслом и объяснением которого стоит подумать. Наоборот, в воображаемом мире без статического трения стоять неподвижно на горизонтальном полу было бы невозможно, но зато некоторая устойчивость возникала бы при скользя-

щих движениях вследствие появления кинетического трения.

Все эти примеры ясно показывают, что мир без трения покоя — есть мир воображаемый, не существующий, резко отличный от реального мира, с бесчисленными проявлениями трения покоя. Мы видели выше, что при внутреннем трении и явлениях сопротивления движению твердых тел, на нем основанных, сила трения пропорциональна скорости движения, уничтожаясь вместе с ней. Поэтому наличие статического трения указывает дополнительно на явления истинно внешнего трения, явления существенно иной природы, нежели явления внутреннего трения; эти два вида трения должны подчиняться различным закономерностям.

Закон Амонтона и его приложения

Каковы же эти закономерности внешнего трения? Они впервые были установлены опытным путем Амонтоном¹ в 1699 г. и выражаются в следующем. Статическое трение F пропорционально силе давления N между обоими телами:

$$F = \mu N, \quad (37)$$

где коэффициент пропорциональности μ , называемый коэффициентом трения, зависит от природы и состояния поверхностей обоих тел на площадках контакта, но не от числа точек контакта или формы поверхностей вблизи них.

К этому закону мы присоединим добавление, которое, собственно говоря, не принадлежит Амонтону, но практически столь часто применяется и имеет настолько важное значение, что должно быть также отнесено к основным законам внешнего трения. Кинетическое трение при достаточно малых скоростях настолько близко к статическому, что к нему также применима формула (37), причем коэффициент трения μ сравнительно мало меняется с изменением скорости².

¹ В менее общей форме эти законы были установлены и сформулированы Леонардо да Винчи.

² Сравнительно сильно растет μ с увеличением скорости для резины и некоторых других полимеров, как показали Шаламах и Бартепев. Однако существование статического трения как предела кинетического при уменьшении скорости было и для этих случаев доказано С. Б. Ратнером.

Справедливость формулы (37) для статического трения можно продемонстрировать следующим образом. Пусть на плоской и однородной по своим свойствам поверхности лежат предметы, различающиеся формой и весом, но не природой и состоянием поверхности. Рассмотрим силы, действующие на любой из этих предметов при постепенном увеличении наклона α нашей плоскости AA (рис. 49).

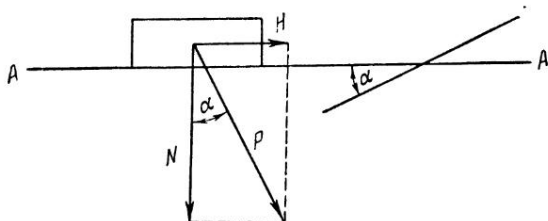


Рис. 49. Угол трения и его измерение на наклонной плоскости

Разложим силу тяжести P , действующую на любой из предметов, лежащих на плоскости, по правилу разложения сил на две составляющие: одну составляющую N , перпендикулярную к плоскости и играющую роль силы «нагрузки», и другую составляющую H , параллельную плоскости. При помощи тригонометрии найдем

$$H = \operatorname{tg} \alpha N, \quad (38)$$

где α — угол наклона нашей плоскости к горизонту.

Скольжение частиц начнется тогда, когда H станет равным статическому трению F , т. е. согласно формуле (37), когда $\operatorname{tg} \alpha$ делается равным коэффициенту трения покоя μ . Соответствующее значение называют углом трения покоя. Если μ , а следовательно, и α не зависят от веса и формы тела, то скольжение всех предметов должно начаться одновременно при определенном наклоне нашей плоскости. Опыт приблизительно подтверждает это следствие закона трения (37), а тем самым и самый закон. Угол трения α равен также углу между перпендикуляром к плоскости и направлением силы, при превышении которого нарушается состояние покоя.

Мы, очевидно, получаем то же значение угла трения и в том случае, когда поверхность остается неподвижной,

а направление действующей силы, если заменить силу веса другой внешней силой P , меняется, постепенно отклоняясь от вертикального (рис. 50). Однако положение в пространстве предельного направления соответствующей силы неопределенно, так как может лежать в любой плоскости, проходящей через перпендикуляр к нашей поверхности. Очевидно, совокупность всех возможных предельных направлений действующей силы образует конус трения с углом раскрытия α . Этот конус полезно иметь в виду, так как он замечателен тем, что ограничивает внутри себя все те направления действующей силы, которые не способны нарушать состояние покоя тела с соответствующим коэффициентом трения.

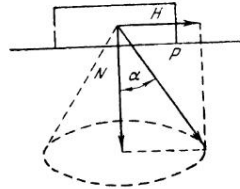


Рис. 50. Конус трения

Закон трения Амонтона имеет разнообразные применения в технике. Рассмотрим некоторые примеры.

Способность локомотива тянуть за собой подвижной состав, преодолевая силы сопротивления и трения, ограничивается возможностью наступления скольжения — боксования между ведущими колесами и рельсами. Боксование начнется, когда сила сопротивления движению состава, зависящая от сопротивления движению состава со стороны воздуха, от трения в буксах и от трения качения колес по рельсам и преодолеваемая силой тяги, достигнет величины равнодействующей сил трения покоя между ведущими колесами и рельсами.

Название «трение покоя» в данном случае звучит парадоксально — ведь при движении поезда колеса катятся по рельсам, а не стоят неподвижно. Однако при качении точки контакта находятся в относительном покое (если не вдаваться в детали механизма качения). Этот относительный покой при боксовании и может нарушиться. Поэтому к боксованию и применим в первом приближении закон статического трения Амонтона. При этом речь идет о случае статического трения, соответствующем продолжительности контакта, равной нулю (см. стр. 170). Поэтому при боксовании коэффициент статического трения меньше, чем при обычных условиях его определения при неподвижных колесах (когда время

контакта не равно нулю); он меняется с изменением скорости вращения колес, т. е. со скоростью поезда, падая с увеличением последней.

Отсюда ясно, что, уменьшая коэффициент трения ведущих колес о рельсы, мы уменьшаем возможную силу тяги локомотива. Такое явление может происходить не только тогда, когда локомотив попадает на участок пути, случайно запачканный маслом, но и во время дождя и снега, также уменьшающих «сцепление» колес с рельсами, т. е. снижающих соответствующий коэффициент трения. Увеличивая вес локомотива, мы, наоборот, увеличиваем, в соответствии с законом Амонтона, силу тяги.

Важные выводы относительно факторов, влияющих на сцепление ведущих колес с рельсами, были получены в Лаборатории поверхностных явлений Института физической химии АН СССР С. И. Косиковым. Исследования показали, что огромные изменения коэффициента трения по рельсам (0,2—0,7) часто определяются не масляными загрязнениями, а взаимодействием мельчайших твердых частиц, покрывающих рельсы, с атмосферной влагой. Эти частицы образуются в результате измалывания под колесами более грубых частиц угля и песка, попадающих из топки паровоза или приносимых ветром. Систематические наблюдения в течение суток показали, что имеется определенная связь между изменениями коэффициента трения и относительной влажности окружающего воздуха: чем больше влажность, тем больше коэффициент трения. Эта связь, по С. И. Косикову, объясняется, по-видимому, тем, что с ростом влажности облегчается выдавливание пылинок из зазора между рельсом и бандажом колеса, приводящее к металлическому контакту.

Наивысший коэффициент трения получается либо при максимальной влажности, либо в отсутствие запыления рельсов. Отсюда видно, какой большой технико-экономический эффект можно получить, если очищать рельсы от порошкообразных загрязнений.

Существование статического трения, подчиняющегося формуле Амонтона, объясняет хорошо знакомый всем факт, что сдвинуть тяжелое тело с места легче рядом ударов или толчков, чем непрерывно действующим усилием. При ударе, например, молотком, развиваемое усилие сосредоточено в очень короткий промежуток времени и потому может легко достигнуть необходимого для преодоления

силы трения высокого значения, которое трудно развивать длительно. По существу, пользуясь молотком, мы превращаем импульс FT , сообщаемый силой мышц F за время ускорения молотка T , в равный ему импульс $f\tau$, сообщаемый при ударе телу, которое мы желаем сдвинуть, за весьма малое время τ удара. Отсюда следует, что

$$\frac{f}{F} = \frac{T}{\tau}.$$

Поскольку T много больше τ , эффективная сила f может превысить статическое трение f_0 , если даже сила мышц F для этого по величине недостаточна. Конечно, при этом один удар сдвинет тело весьма мало, если масса тела велика, так как чем больше масса тела M , тем меньше сообщаемая ему импульсом $f\tau$ кинетическая энергия и, как следствие, пройденный до остановки путь.

В самом деле, при ударе импульс $f\tau$ за вычетом импульса $f_0\tau$ силы трения за то же время, по закону Ньютона, сообщит телу количество движения

$$(f - f_0)\tau = Mv,$$

где v — скорость тела по окончании удара. Отсюда для кинетической энергии K , приобретенной телом в результате удара, получим выражение

$$K = \frac{Mv^2}{2} = \frac{M}{2} \frac{(f - f_0)^2 \tau^2}{M^2} = \frac{(f - f_0)^2 \tau^2}{2M}.$$

Дальнейшее движение тела по инерции будет тормозиться силой трения f_0 , и остановка произойдет, когда тело пройдет путь s , на котором его кинетическая энергия полностью израсходуется на преодоление работы силы трения f_0 . Следовательно, пройденный путь можно найти из уравнения

$$\frac{(f - f_0)^2 \tau^2}{2M} = f_0 s, \quad (39)$$

откуда

$$s = \frac{(f - f_0)^2 \tau^2}{2f_0 M}. \quad (40)$$

Мы видим, что пройденный путь действительно уменьшается с увеличением массы тела и очень сильно зависит от силы удара.

В некоторых случаях масса тела может быть мала и тем не менее сила трения велика. Таковы случаи заклинивания, когда, например, нельзя вытащить топор, заклинившийся в полене из-за силы трения топора о поверхность щели в полене. В этом случае серия постукиваний — наиболее легкий и быстрый способ вытащить заклинившееся тело.

Преодолеть трение можно не только ударами в направлении, совпадающем с направлением сдвигающего усилия, но и в направлении, противоположном действию внешнего давления и силы тяжести. Достигаемое при этом, хотя бы кратковременное, ослабление (или даже уничтожение) давления N между соприкасающимися телами позволит силе, действующей в направлении, касательном к поверхности контакта, преодолеть силу трения, временно, по закону Амонта, также ослабленную, и произвести сдвиг.

Тот же эффект кратковременных ослаблений давления можно наблюдать, помещая какое-нибудь тело, например пластинку, на поверхность, совершающую частные колебания в поперечном направлении. Это тело, участвуя в колебаниях опорной поверхности, находится под воздействием силы инерции переменного направления. В одни моменты сила инерции направлена вниз (увеличивает давление), в другие — вверх (ослабляет его). Если наибольшая величина силы инерции близка весу тела или превышает его, то даже под действием малой горизонтальной силы тело начнет скользить. В этом случае скольжение, однако, не будет непрерывным и плавным, а будет состоять из последовательных «рывков» или проскальзываний, приуроченных к фазам колебаний, вызывающим значительное ослабление давления скользящего тела на опорную поверхность.

Аналогичное явление может наблюдаться и тогда, когда эта поверхность совершает неправильные колебания и испытывает тряску, состоящую из повторяющихся беспорядочных толчков. Этим может, например, объясняться сползание за ночь чернильницы, забытой на наклонной поверхности шопитра. Тряска поверхности шопитра сообщается ей через пол со стороны как промышленных, так и природных («микросейсм») источников сотрясений. Тряска может вызвать сползание предметов с наклонных поверхностей даже и тогда, когда размахи перемещения

самой поверхности вследствие своей малости невидимы.

Периодические уничтожения сил трения под влиянием вибраций могут коренным образом изменять свойства систем, подобных муке, песку, грунтам, почвам, состоящих из множества мелких частиц, находящихся во взаимном контакте. Это и понятно, так как сопротивление таких тел изменениям формы зависит в основном от сил трения (и прилипания), действующих в многочисленных местах контакта. Поэтому куча песка или муки, помещенная на вибрирующую платформу, расплзается, приобретая текучесть, подобную текучести жидкости. Это также наглядно видно, если в стакан с каким-нибудь порошком бросить металлический шарик. Он останется лежать на поверхности порошка, сколько бы мы ни ждали. Если, однако, поставить стакан на вибрирующую платформу, то шарик тотчас начнет погружаться в порошок и через некоторое время опустится на дно стакана.

На этом явлении основан способ отделения от зерна шелухи и других более легких примесей. Для этой цели массе зерна сообщают вибрацию, например приводя зерно в контакт с вибрирующими стержнями, своего рода камертонами, колебания которых непрерывно поддерживают, не давая им затухать.

На этом же явлении основан очень важный прием применения вибраций в технике строительных работ для более плотной укладки сыпучих тел, например при вибрационной укладке бетона для уменьшения водопроницаемости грунтов. В недавнее время советская техника обогатилась новым изобретением в этой области, автором которого является Д. Д. Баркан. Это уже реализованное в промышленности изобретение состоит в облегчении и ускорении опускания в грунт свай или труб посредством сообщения им вибраций с частотой в несколько десятков колебаний в секунду. Такие колебания легко возбуждать, заставляя быстро вращаться тело, центр тяжести которого не совпадает с осью вращения. В результате наложения вибраций скорость опускания в грунт свай возрастает во много раз при резком снижении применяемого усилия.

В результате этих и ряда других работ складывается новое самостоятельное направление в технике — вибротехника.

Смазочное действие мономолекулярных слоев органических соединений

Сила трения резко меняется при самых ничтожных загрязнениях поверхности. Только при исключительно тщательной очистке стальных поверхностей коэффициент трения между ними принимает значение, приблизительно равное 0,7—0,8. Достаточно поместить вблизи этих поверхностей какое-нибудь летучее органическое вещество, например валерьяновую или уксусную кислоту, как коэффициент трения начнет быстро падать и достигает через

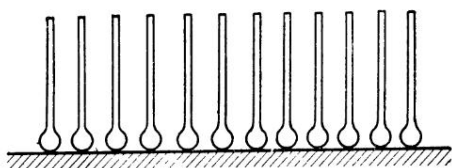


Рис. 51. Молекулярный ворс (ориентированный монослой молекул)

некоторое время значения около 0,2. Падение коэффициента трения объясняется тем, что молекулы жирной кислоты, испаряясь и диффундируя через воздух, попадают в сферу молекулярного притяжения металлических поверхностей и покрывают их тончайшим слоем.

Толщина слоя, полученного таким путем — улавливанием молекул паров из воздуха, редко превышает толщину одного слоя молекул, плотно покрывающих поверхность и расположенных своими длинными осями перпендикулярно к ней. Этот ориентированный монослой, или «молекулярный ворс» (рис. 51), несмотря на ничтожную толщину (порядка одной — двух миллионных долей миллиметра), способен уменьшать коэффициент трения в несколько раз. Такие мономолекулярные слои органических молекул, резко понижая коэффициент трения, одновременно способны уничтожать скачки при скольжении. Последнее действие адсорбционных слоев указывает на то, что в их присутствии коэффициент трения перестает заметно увеличиваться с продолжительностью контакта. Это обстоятельство, по-видимому, связано с прекращением непосредственного металлического контакта, что затрудняет миграцию атомов металла под действием

взаимного притяжения обеих поверхностей. Сказывается и то, что смазочное действие молекулярного ворса улучшается с повышением продолжительности контакта.

Молекулярные слои смазки можно наносить на поверхность не только посредством паров органических веществ, но и другими способами. Например, можно покрывать поверхность сравнительно толстым слоем жирной кислоты или металлического мыла (продукта ее взаимодействия с металлом), после чего стереть мягким материалом (чистым полотном) избыток веществ. При тщательном стирании избытка вещества поверхность способна сохранить на себе его слой толщиной только в одну молекулу, удерживаемый за счет молекулярных сил или в некоторых случаях сил остаточного химического сродства.

Еще один способ заключается в приведении металлической поверхности в контакт с раствором органических молекул в веществе, подобном медицинскому маслу, молекулы которого лишены способности интенсивно притягиваться к другим поверхностям, в отличие от молекул стеариновой кислоты или мыл. В этом случае поверхность металла покрывается также слоем как бы прилипших к поверхности «поверхностно-активных» молекул, т. е. молекул, способных притягиваться и удерживаться вблизи поверхности раздела жидкости и твердой стенки.

Адсорбционная смазка

Рассмотренное в предыдущем параграфе явление скопления растворенных молекул на поверхности раздела жидкости с твердым телом является другим частным случаем весьма распространенных и важных явлений адсорбции¹. Слой молекул, скопившихся у поверхности твердого тела, вытеснивших оттуда молекулы растворителя и как бы прилипших к ней, и в этом случае называется адсорбционным слоем. Количество вещества в адсорбционном слое, приходящегося на единицу площади поверхности адсорбента, как бы избирательно притягивающего посторонние молекулы, называется удельной адсорбцией и служит мерой ее величины. Как пока-

¹ Адсорбция из газов рассмотрена в разделе «О движении разреженного газа в пористых телах» (стр. 73).

зывает опыт, удельная адсорбция возрастает с увеличением концентрации растворенных молекул, т. е. их числа в единице объема раствора.

Откладывая по оси абсцисс объемную концентрацию C адсорбирующихся молекул (их количество в единице объема раствора), а по оси ординат удельную адсорбцию Γ , наблюдаемую при какой-то постоянной температуре, получаем графическое изображение так называемой и з о т е р м ы а д с о р б ц и и (рис. 52).

Молекулы каждого вещества характеризуются определенной формой изотермы адсорбции.

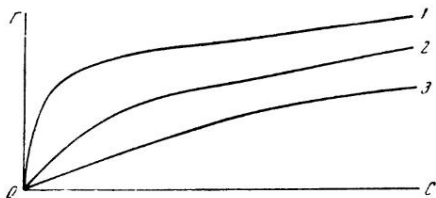


Рис. 52. Изотермы адсорбции

Для одних веществ изотерма (кривая 1) круто поднимается вверх, уже при малых концентрациях достигая заметной величины; для других веществ изотермы (кривые 2 и 3) поднимаются значительно более полого и та же адсорбция достигается при гораздо большей концентрации. В первом случае вещество называется более поверхностно-активным, чем в остальных.

Для изотермы характерно то, что после периода подъема кривой она стремится стать параллельной оси абсцисс. Это указывается на то, что адсорбционный слой как бы достигает насыщения, при котором дальнейшее увеличение содержания молекул в объеме раствора не увеличивает заметно количества молекул в адсорбционном слое. Такой характер изотерм адсорбции наблюдается также и в других случаях, например при адсорбции паров на поверхности твердого тела. Подобный характер адсорбционной изотермы объясняется тем, что силы, удерживающие адсорбируемые молекулы вблизи твердой поверхности, очень быстро ослабевают с увеличением расстояния. Поэтому, когда в результате адсорбции образуется адсорбционный слой толщиной в одну молекулу, дальнейшего роста адсорбции путем образования второго слоя адсорбированных

молекул обычно не происходит, так как второй слой молекул слишком удален от поверхности твердого тела, чтобы прочно им удерживаться.

Второй слой может начать образовываться в основном вследствие притяжения его молекул к молекулам нижележащего первого слоя. Подобное явление будет похоже на явление конденсации паров на поверхности жидкости, но отличаться от него тем, что, вместо толстого объема жидкости, берется ее слой толщиной в одну молекулу. Свойства такого слоя обычно значительно отличаются от свойств поверхности жидкости, и потому конденсация на нем паров жидкости происходит несколько иначе. Большей частью конденсация начинается при таком содержании паров жидкости, которое несколько (на 5—10%) ниже упругости паров, насыщающих пространство при той же температуре¹. Итак, последующие адсорбционные слои образуются при упругости пара, довольно близкой к упругости насыщенного пара. В то же время для молекул с высокой поверхностной активностью образование первого слоя, его как бы насыщение, заканчивается при упругости пара, во много раз меньшей упругости насыщенного пара. Таким образом, в большом интервале упругости пара — от весьма малой до соответствующей почти насыщенным парам — адсорбционный слой сохраняет толщину, равную одной молекуле.

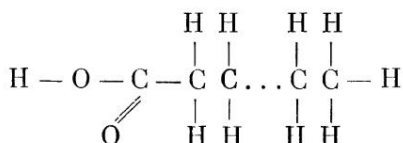
Аналогичное явление происходит и при адсорбции из растворов на поверхности твердого тела; слои, следующие за первым, образуются здесь при концентрациях растворенных молекул, близких к концентрациям, соответствующим насыщению раствора растворенными молекулами.

Замечательные результаты получены при исследовании вещества в количестве, уменьшающемся в насыщенном адсорбционном слое. Деля вес вещества на его плотность, можно было определить объем, а следовательно, и толщину мономолекулярного адсорбционного слоя. Эта толщина дает представление о размерах молекулы в адсорбционном слое в направлении, перпендикулярном к поверхности адсорбента.

Особенно простые закономерности получаются, когда сравниваются толщины мономолекулярного адсорбцион-

¹ Однако конденсация заканчивается образованием толстых слоев или капель при упругости пара, обычно превышающей упругость насыщающих паров.

ного слоя для представителей одного гомологического ряда соединений. Примером такого гомологического ряда соединений служат жирные кислоты. Различные представители этого ряда обладают одной и той же группой атомов COOH (карбоксильная группа), но отличаются числом присоединенных к этому радикалу атомов углерода и водорода. Современная наука хорошо знает расположение атомов в такого рода соединениях. На основании полученных данных молекулы жирной кислоты могут быть изображены следующей схемой, так называемой структурной формулой¹:



Мы видим, что молекула жирной кислоты состоит из группы атомов COOH с присоединенной к нему углеводородной цепью, хребет которой составляет цепочка атомов углерода; на конце хвоста оказывается группа CH_3 , так называемая метильная группа.

Различные представители гомологического ряда жирных кислот отличаются один от другого числом углеродных атомов, определяющим длину углеводородной цепи. Самым первым представителем ряда жирных кислот (с наименьшим молекулярным весом) является всем хорошо известная уксусная кислота, состоящая только из группы COOH и минимального «хвоста», образованного одной метильной группой CH_3 . Стеариновая кислота, входящая в состав ряда органических веществ животного происхождения, обладает цепочкой, содержащей 17 углеродных атомов, т. е., кроме указанных двух групп атомов, она содержит 15 групп CH_2 . В соответствии со своим строением молекулы жирных кислот, как правило, имеют удлиненную форму; длина их приблизительно пропорциональна числу углеродных атомов в цепи.

¹ Основоположником учения о пространственном расположении атомов в молекулах химических соединений был русский химик А. М. Бутлеров; черточки в приведенной схеме изображают валентные связи соответствующих атомов.

Исследования адсорбционного слоя стеариновой кислоты на различных твердых поверхностях показали, что толщина его изменяется пропорционально числу углеродных атомов в цепи соответствующей молекулы адсорбированного вещества. При этом площадь, приходящаяся в адсорбированном слое на одну молекулу, остается одинаковой для всех членов гомологического ряда жирных кислот.

Обнаруженные закономерности приводят к очень простой картине расположения молекул в адсорбционном слое. Молекулы обращены к твердой поверхности своими карбоксильными группами, т. е. группами COOH , хвосты же молекул расположены приблизительно перпендикулярно к поверхности адсорбента. Таким образом, при насыщении адсорбционного монослоя образуется большое число плотно (бок о бок) расположенных молекул с цепями, ориентированными параллельно друг другу и перпендикулярно к поверхности адсорбента.

Такое строение адсорбционного слоя молекул жирных кислот объясняется в основном силами притяжения между карбоксильной группой молекулы и поверхностью адсорбента, например металла. Только в том случае, когда цепи молекул располагаются перпендикулярно к поверхности адсорбента, эта поверхность приходит во взаимодействие с максимальным числом молекул жирной кислоты, в максимальной степени удовлетворяя их стремлению притянуться к поверхности металла.

Подобное строение адсорбционного монослоя позволяет легко понять очень сильное (в 10 и более раз) понижение коэффициента трения при образовании этого слоя на твердых поверхностях, тем более сильное, чем длиннее соответствующая молекула. Действительно, ориентированные параллельно друг другу цепи молекул как бы скрепляются силами молекулярного притяжения, что обеспечивает необходимую прочность всего слоя, позволяющую ему выдерживать, не продавливаясь, нагрузку (силу давления), развивающуюся между соприкасающимися телами. Однако при большой длине цепей они способны несколько наклоняться под влиянием начинающегося скольжения поверхностей, разделенных такими слоями, а также несколько изгибаться. Благодаря этому скольжение может облегчаться по сравнению со скольжением несмазанных поверхностей.

Как особенно четко показали опыты Г. И. Измайловой в лаборатории автора, даже при таком малом заполнении адсорбционного слоя, когда молекулы в нем расположены «лежа», трение снижается в несколько раз, притом очень резко, при ничтожных концентрациях жирной кислоты

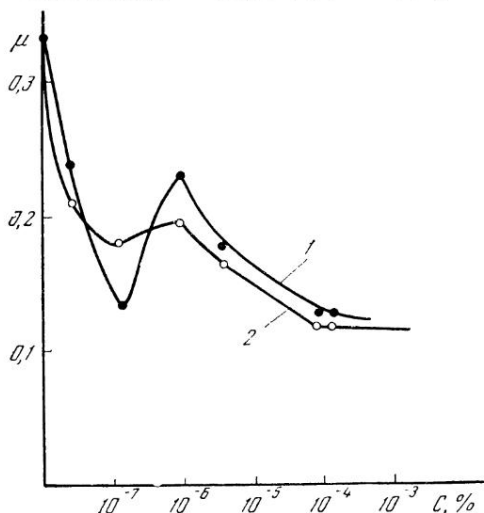


Рис. 53. Зависимость коэффициента статического трения стекла по стеклу от объемной концентрации C пальмитиновой кислоты

1 — при 66°; 2 — при 20°

в объеме раствора. Замечательно, что при дальнейшем росте концентрации поверхностно-активного вещества в объеме, а следовательно, и в адсорбционном слое коэффициент трения возрастает и, достигнув некоторого максимума, снова падает до еще более низкого значения (рис. 53). Такое, на первый взгляд загадочное, изменение коэффициента трения с концентрацией можно объяснить тем, что с ростом числа молекул в адсорбционном слое «лежащих» мест перестает хватать и часть их вынуждена ориентироваться «стоя», т. е. перпендикулярно к поверхности. При таком неодинаковом положении различных молекул адсорбционный слой становится как бы шероховатым, что и вызывает рост трения до некоторого макси-

му. Когда же при полном «насыщении» адсорбционного монослоя все молекулы становятся торчком (что позволяет им разместиться наиболее плотно), адсорбционный слой приобретает максимальную гладкость и обеспечивает минимальное значение трения.

Наглядное представление о механизме смазочного действия таких мономолекулярных адсорбционных слоев дает схематическая картина двух «щеток», соприкасающихся своим ворсом и легко скользящих одна относительно другой (рис. 54).

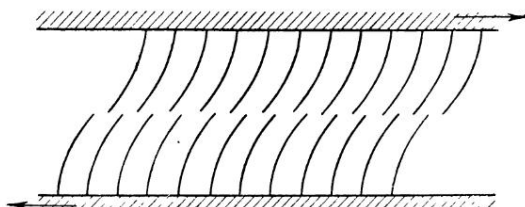


Рис. 54. Модель смазочного действия монослоев органических молекул

Закон Амонтона приложим к трению поверхностей в присутствии адсорбционных слоев с еще большей точностью, чем в отсутствие последних. При этом чем больше углеродных атомов в составе молекулы или чем больше ее длина, тем больше падает коэффициент трения.

Аналогичные явления и закономерности наблюдаются и при образовании адсорбционных слоев других гомологических рядов органических соединений, например нормальных парафинов, спиртов и пр. Соответствующие молекулы парафинов и спиртов отличаются от молекул жирных кислот только тем, что, вместо карбоксильной группы COOH , у первых стоит вторая метильная группа CH_3 , у вторых — гидроксил OH .

Весьма поразительно, насколько резко влияет слой толщиной всего в одну молекулу, т. е. приблизительно в миллионную долю миллиметра, на коэффициент статического трения.

Так, по данным В. Гарди и других исследователей, коэффициент статического трения стали по стали ($f \approx 0,75 \div 0,80$) или стекла по стеклу ($f \approx 1$) падает после покрытия поверхности ориентированными адсорбционными слоями стеариновой кислоты до 0,1, а для жирных

кислот с еще бoльшим молекулярным весом — до значительно меньшей величины.

Такой поразительный результат заслуживает того, чтобы над ним задуматься, и позволяет сделать ряд важных выводов относительно механизма трения. Этот результат прежде всего показывает, что трение нельзя объяснить, как предлагал еще Эйлер и как считают еще многие и сейчас, взаимным зацеплением шероховатостей, существующих на поверхности любых, даже весьма гладких тел.

Точные исследования показали, что даже для полированных металлических поверхностей высота неровностей вследствие несовершенства процесса полировки достигает нескольких сотысячных долей миллиметра. Ясно, что адсорбционный слой толщиной $0,000001$ — $0,000002$ мм, будучи в десятки раз меньше этих выступов, не может существенно уменьшить их высоту или крутизну, т. е. смягчить микрошероховатость тела.

Возникает, однако, вопрос: нельзя ли все же объяснить шероховатостью ту часть силы трения, которая остается после образования адсорбционного смазочного слоя, хотя бы таким образом пришлось объяснять шероховатостью сравнительно небольшую часть¹ силы трения сухих поверхностей?

Решение этого вопроса можно, в частности, искать на следующем пути.

Представим себе, что мы каким-то способом будем последовательно наносить на оба соприкасающихся твердых тела правильно ориентированные слои однородных молекул, например жирной кислоты. В результате смазочная прослойка между обоими телами при контакте будет соответствовать уже не двум ориентированным монослоям, а большему их числу. Если коэффициент трения в какой-то мере зависит от микрошероховатости поверхности, то очевидно, что помещение между трущимися телами смазочной прослойки слоистого строения толщиной, скажем, в 50 или 100 слоев должно еще более резко снизить коэффициент трения.

¹ Так как при увеличении длины молекулы коэффициент трения падает, при этом возникает дополнительная трудность, связанная с неопределенностью той доли сухого трения, которую следует приписывать микрошероховатости.

Подобный эксперимент удалось сделать, пользуясь методом искусственного построения многослойных («мультимолекулярных») пленок, разработанным И. Лэнгмюром и К. Блоджет. Опишем вкратце этот метод вследствие его важности для исследований в области смазочного действия.

Нерастворимые мономолекулярные слои на поверхности воды

Возьмем стеклянную фотографическую кювету, наполненную чистой свежеперегнанной водой. Постараемся нанести на поверхность воды очень небольшое количество стеариновой кислоты или другого органического нелетучего вещества. Это можно сделать, выливая на поверхность воды немного весьма разбавленного раствора стеариновой кислоты или другого вещества в летучем растворителе, например в бензоле.

Молекулы стеариновой кислоты, попавшие на поверхность воды и не обладающие ни растворимостью в ней, ни летучестью, распространяются в силу свойственного всем молекулам теплового движения по поверхности воды в корыте. Стремление молекул стеариновой кислоты разбежаться

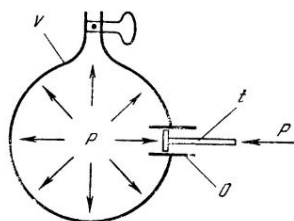


Рис. 55. Измерение давления газа

в стороны по поверхности, чтобы равномерно распределиться по всей предоставленной в их распоряжение площади, аналогично стремлению молекул газа распространяться по предоставленному им объему, заполняя его равномерно и оказывая давление на стенки сосуда.

В случае газа давление на стенки весьма легко обнаруживается при помощи поршня t , запирающего какое-нибудь отверстие O в стенках сосуда V (рис. 55). Давление P , которое нужно приложить извне к поршню, чтобы уравновесить его и помешать газу вытолкнуть, может служить мерой давления газа на поршень, а следовательно, и на другие участки стенок сосуда.

У молекул стеариновой кислоты на поверхности воды, образующих, когда они находятся в малом количестве, как бы газ двух измерений («плоский газ»), можно также измерять давление этого газа. Для этого Агнесой Покельси и ее

последователями был разработан следующий метод (рис. 56 и 57)¹. Берется четырехугольное корыто $abcd$, в середине которого помещается перпендикулярно к длинным бортам легкий, например из тонкой жести, барьер ef , перегородаживающий на две части поверхность жидкости, заполняющей корыто до краев. Барьер связан со стерженьком rt , верхний конец которого t прикреплен к тонкой проволоочке uv , натянутой горизонтально между двумя опорами.

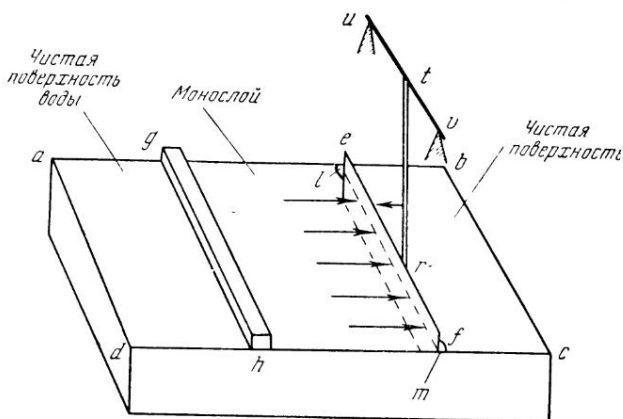


Рис. 56. Измерение двухмерного давления

Если молекулы стеариновой кислоты или другого нерастворимого и нелетучего вещества нанесены на поверхность воды с одной стороны барьера, то под влиянием «двухмерного газа» барьер отклонится до тех пор, пока противодействие F проволоки uv ее закручиванию не уравновесит давление, действующее на барьер со стороны участка корыта, покрытого монослоем. Закручивание проволоки пропорционально действующей силе, поэтому измеряя угол закручивания, можно вычислить эту силу, а деля последнюю на длину барьера, определить действующее на него плоское (двухмерное) давление.

Для точности измерения необходимо, чтобы барьер не касался бортов и чтобы стеариновая кислота не могла

¹ С помощью этого метода важные результаты были получены И. Лэнгмюром, Н. Дево, В. Гаркинсом, Н. Адамом, Д. Л. Талмудом и А. А. Трапезниковым. Значительное усовершенствование в него было внесено А. С. Ахматовым.

проникнуть в зазор между барьером и стенками корыта на другую половину сосуда. Для этого применяются изогнутые ленточки из фольги или тонкие нити l и m , пропитанные вазелином. Плавающая на поверхности воды, эти нити,

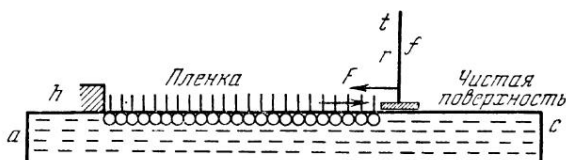


Рис. 57. К измерению двухмерного давления

как показано на рис. 56, запирают поверхностным молекулам проход между бортами сосуда и барьером.

При помощи такого прибора изучена зависимость двухмерного давления, производимого молекулами вещества, нанесенного на поверхности воды, от количества вещества, приходящегося на единицу площади. Можно также, вместо количества вещества на единицу поверхности, рассматривать обратную ему величину — площадь A , приходящуюся на одну молекулу. Полученная кривая представлена на рис. 58. Она показывает, что вначале, когда вещества, нанесенного на поверхность воды, мало, давление его подчиняется закону, аналогичному закону Бойля — Мариотта для газов, — оно обратно пропорционально площади, приходящейся на одну молекулу вещества.

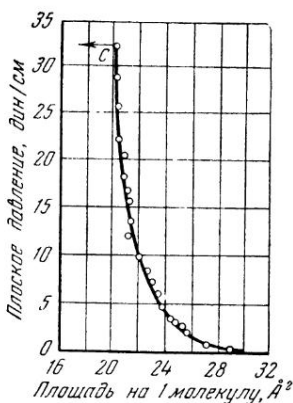


Рис. 58 Зависимость двухмерного давления от площади для стеариновой кислоты на слабом растворе соляной кислоты

При уменьшении этой площади, что можно сделать при помощи вспомогательного барьера gh (см. рис. 56), посредством которого можно уменьшать поверхность жидкости, занятой нашим веществом, наступает, однако, такой момент, когда дальнейшее сжатие двухмерного слоя не вызывает повышения давления. Здесь мы имеем резкое

отличие от того, что наблюдаем при сжатии любого трехмерного тела — газа, жидкости или твердого тела. В последнем случае давление по мере сжатия неограниченно увеличивается.

Причина иного поведения двухмерного слоя заключается в том, что при достаточном уплотнении молекулы его располагаются своими осями перпендикулярно к поверхности жидкости, как и в случае адсорбционного слоя на твердом теле. При дальнейшем уменьшении площади поверхности (точка C на рис. 58) избыточное число молекул

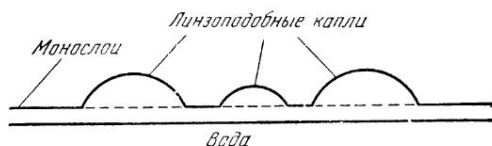


Рис. 59. Линзоподобные капли на монослой, нанесенном на поверхности воды

монослоя, потеряв как бы свою «жилплощадь», переходит во второй этаж, т. е. располагается над монослоем. Впрочем, не следует думать, что постепенно образуется второй слой, а после его равномерного заполнения — третий и т. д. На самом деле наблюдение при помощи микроскопа или даже простым глазом показывает, что избыточное количество вещества, вытесненное из монослоя на его поверхность, скапливается в отдельные линзоподобные капли, плавающие на поверхности жидкости с нанесенным на нее монослоем, который, конечно, для глаза невидим (рис. 59).

Как можно убедиться в существовании невидимого монослоя между этими линзоподобными каплями? Это всего проще сделать, посыпав поверхность воды каким-нибудь очень мелким порошком, например тальком. Если при этом подуть на поверхность, то по затрудненности движения частиц талька можно судить о наличии на поверхности воды тончайшего монослоя. Впрочем, этот способ дает весьма различные результаты в зависимости от механических свойств монослоя, его прочности и вязкости.

Чтобы констатировать наличие монослоя независимо от механических свойств последнего целесообразнее помещать на поверхности воды крупинки камфары. Камфара растворяется в воде, но, находясь на ее поверхности, показывает, что в первую очередь с большей скоростью

растворение идет вдоль поверхности. Так как, кроме того, кристаллические частицы камфары неправильной формы (острые углы и выступы, на которых процесс растворения происходит всего быстрее), то вокруг самой частички камфары образуются сопровождающие растворение потоки жидкости, направленные вдоль поверхности. Вследствие случайностей, связанных с неправильной формой частиц, течение происходит то в одну, то в другую сторону. В то же время это течение заставляет мелкие частицы камфары двигаться в сторону, противоположную вызванному ею течению, подобно тому как движется под влиянием выбрасываемых газов ракета или реактивный снаряд. В результате этого частички камфары мечутся по поверхности жидкости, как бы танцуя. Такой «танец» камфары всегда можно наблюдать на поверхности достаточно чистой воды. Наличие на поверхности воды постороннего вещества, даже задолго до образования плотно упакованного монослоя, вызывает прекращение «танца» камфары.

Исследования площади, занимаемой молекулами представителей различных гомологических рядов, например ряда жирных кислот, в момент прекращения роста давления, а также в момент начала быстрого роста давления, когда молекулы приближаются к состоянию плотной упаковки, показали, что эта площадь приблизительно одинакова для различных представителей одного и того же гомологического ряда. Таким образом, эти слои неразстворимых молекул на поверхности воды обнаруживают способность образовывать такой же молекулярный ворс, как и на поверхности металлов и других твердых тел. Причина этого явления на поверхности воды заключается в действии сил притяжения между молекулами воды и карбоксильной или другой «полярной» группой молекул соответствующего органического соединения.

Одинаковое строение и одинаковый характер сил, действующих между монослоем и подкладкой для различных даже по агрегатному состоянию подкладок, позволяют осуществить очень легко перенос мономолекулярного ориентированного слоя с поверхности воды на плоскую поверхность какого-нибудь твердого тела, например стекла, стали или хрома. Для этого достаточно погрузить в корытце *ВВ* с водой соответствующую пластинку *А* и после образования на поверхности воды при помощи летучего растворителя ориентированного монослоя вытащить

пластинку вверх (рис. 60). Вначале пластинка увлекает за собой слой воды вместе с расположенным на поверхности

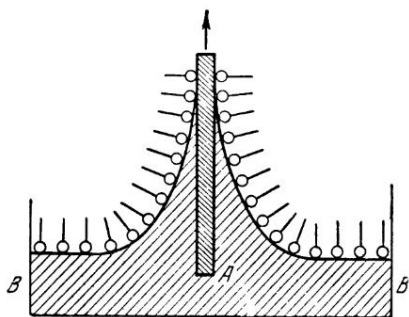


Рис. 60. Метод переноса монослоя на поверхность пластинки

последней монослоем; однако вода быстро стекает, как бы выталкиваясь силами притяжения, действующими между монослоем и твердой поверхностью и перевешивающими в этом случае силы притяжения воды к тому же твердому телу¹. В результате на поверхности твердого тела остается перенесенный

на нее с поверхности воды монослой.

Опыты с трением поверхностей, покрытых монослоем, дают результаты, аналогичные тем, которые наблюдаются при образовании подобных слоев путем адсорбции на тех же поверхностях.

Смазочное действие мультимолекулярных² (многомолекулярных) слоев

Метод переноса монослоев с поверхности воды, как было показано Лэнгмюром и Блуджет, может быть применен для получения многослойных, так называемых м у л ь-

¹ В других случаях может перевесить притяжение воды к твердому телу. Так, например, при нанесении на поверхность стекла целлюлозных пленок и контакте с водой последняя проникает между пленкой и стеклом, как бы расклинивая их. Это явление, доставляющее неудобства при применении таких защитных пленок, родственно расклинивающему давлению, о котором речь ниже (см. стр. 208).

² Мы считаем нужным применять термин «мультимолекулярный» к этим слоям, так как они получают многократно повторяемой процедурой «купания» и являются многомолекулярными слоями, состоящими из одинаковых по строению мономолекулярных слоев. Термин «полимолекулярный» слой мы оставляем для тех многомолекулярных слоев жидкости, которые образуются «естественно» на поверхности твердого тела, и поэтому вследствие иного способа получения не обязательно состоят из напластования одинаковых монослоев.

г и м о л е к у л я р н ы х п л е н о к. Для этого следует, вытащив пластинку (см. рис. 60), снова погрузить ее в жидкость, предварительно уменьшив площадь поверхности воды, покрытую органическим веществом, настолько, чтобы площадь, приходящаяся на одну молекулу, снова понизилась до значения, которое было до вытаскивания пластинки. При таком опускании пластинки, уже

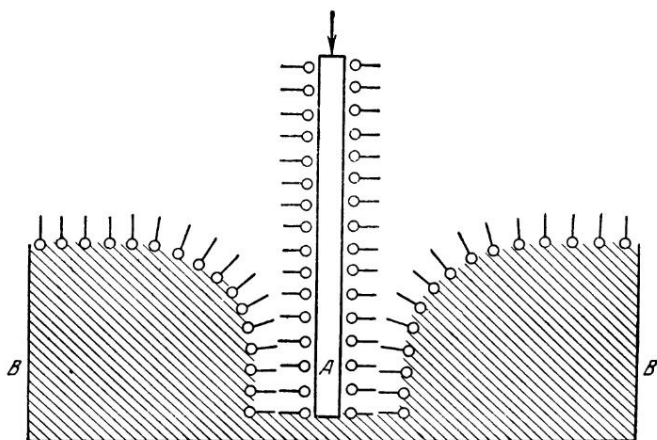


Рис. 61. К получению мультимолекулярных слоев

покрытой ориентированным монослоем, обнаруживается изменение природы поверхности этой пластинки вследствие покрывающего ее монослоя с торчащими наружу метильными группами. Это изменение природы поверхности сказывается в том, что, как видно из рис. 61, поверхность воды в корыте не смачивает эту поверхность, причем форма мениска такая же, как у воды вблизи поверхности парафина.

При погружении пластинки на нее садится второй монослой органических молекул, но уже с другим направлением молекул. Метильные хвосты второго слоя оказываются повернутыми в сторону твердой поверхности, а полярные карбоксильные группы — торчащими (по отношению к пластинке) наружу, т. е. в глубь жидкости. Таким образом, на поверхности пластинки оказываются

два монослоя, обращенные один к другому метильными группами.

Если после этого пластинку снова вытаскивать, то при определенных условиях на нее садится третий монослой, ориентированный, подобно первому монослою, метильными хвостами наружу (рис. 62).

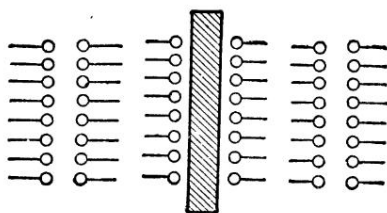


Рис. 62. Трехмолекулярный слой

группы молекул, т. е. природа поверхности в обоих случаях окажется в основном одинаковой. Отсюда вытекает, что операцию погружения можно повторять много раз, каждый раз нанося по два слоя. В результате многократного повторения такой операции «купанья» пластинку можно покрыть мультимолекулярной пленкой (рис. 63).

Общее число монослоев, входящих в состав всего покрытия, можно доводить до тысячи, получая таким образом суммарную толщину около 2 мк и более. Подобное однородное строение такого толстого мультимолекулярного слоя получается только при определенных условиях и для определенных веществ. В первую очередь необходимо брать вещества, находящиеся при температуре опыта в твердом состоянии, например стеариновую кислоту. Нанесение чистой стеариновой кислоты по этому способу представляет значительные трудности. Наоборот, можно легко наносить слои стеариновой кислоты, наполовину превратившейся в мыло — соль щелочноземельных метал-

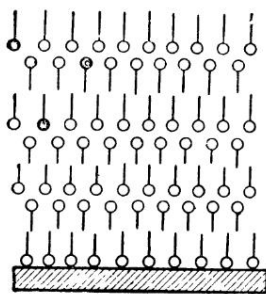


Рис. 63. Строение мультимолекулярной пленки

лов — кальция или бария¹. Эти химические изменения стеариновой кислоты происходят тогда, когда в воде, несущей в корыте соответствующий монослой стеариновой кислоты, находятся в небольших количествах в растворенном состоянии соли кальция или бария.

Проведенные В. П. Лазаревым и автором измерения коэффициента трения в присутствии подобных мультимолекулярных слоев показали, что он совершенно не зависит от числа слоев, оставаясь одним и тем же в присутствии и одного слоя и 61 слоя.

Этот результат² несовместим с представлением о зависимости силы трения от шероховатости поверхности³. Если бы такая зависимость существовала, то покрытие поверхности монослоем стеариновой кислоты вызвало бы сравнительно небольшое уменьшение трения и, наоборот, дальнейшее увеличение толщины смазочной прослойки снижало бы коэффициент трения все больше и больше. Мы видели, что на самом деле картина получается обратной. Монослой вызывает очень резкое падение коэффициента трения. Дальнейшее же утолщение смазочной прослойки никакого влияния не оказывает. Следует добавить, что вывод о независимости коэффициента трения от числа монослоев, а следовательно, и от шероховатости относится к так называемому истинному коэффициенту трения, в отличие от расчетного (см. стр. 141—143). Наоборот, этот расчетный коэффициент трения может меняться, хотя и не в сторону возрастания, при увеличении шероховатости (см. стр. 166—169).

Внешнее трение и молекулярные силы

Рассмотрим теперь вопрос о причинах и о механизме внешнего трения. Широко распространенное довольно естественное предположение, что сила трения объясняется шероховатостью поверхности всех тел, находится, как мы видели, в противоречии с опытом по влиянию на

¹ Химическая реакция образования мыла в этом случае заключается в замене двух атомов водорода, входящих в состав двух молекул стеариновой кислоты, на один атом кальция или бария.

² См. стр. 155—160.

³ Грубая шероховатость с высотой гребешков больше нескольких микронов обычно повышает трение.

трение смазочных прослоек. Другое противоречие заключается в том, что если посредством обработки делать поверхность все более и более гладкой, то сила трения не только не уменьшается, но для весьма хорошо отполированных плоских поверхностей, например стеклянных, даже возрастает. Таким образом, часто высказываемое предположение, что для идеально гладких поверхностей сила трения равнялась бы нулю, в корне неверно. Не реже высказывается мнение, что сила трения между твердыми телами есть результат действия сил молекулярного

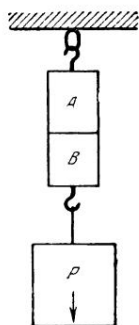


Рис. 64. Слипание свинцовых цилиндров

притяжения между соприкасающимися телами, препятствующими их относительному перемещению, подобно тому как эти же силы препятствуют относительному перемещению частей одного и того же тела, обеспечивая его прочность и взаимное сцепление его частиц.

Само существование сил молекулярного притяжения не подлежит никакому сомнению. Чрезвычайно простыми опытами нетрудно показать способность твердых тел слипаться под влиянием этих сил. Так, если привести в контакт два свинцовых цилиндра, прижав их один к другому плоскими основаниями и слегка поворачивая один относительно другого, то цилиндры прочно прилипнут один

другому; укрепив верхний цилиндр неподвижно, можно убедиться, что нижний цилиндр *B* способен выдержать груз *P* в несколько килограммов, не отрываясь от верхнего цилиндра *A* (рис. 64). Одновременно появляется и сопротивление цилиндров относительному скольжению, не зависящее от нагрузки (и даже при отрицательной нагрузке).

Таким образом, появляются резкие нарушения закона трения Амонтона. Производя подобные опыты под колоколом воздушного насоса, можно убедиться и в том, что этот случай прилипания никак не связан с влиянием атмосферного давления, которое способно иногда вызывать аналогичные, но меньшие по величине эффекты.

На действии сил молекулярного притяжения основано образование маленьких комочков или агрегатов из мельчайших частиц тонких порошков. Такая способность

к агрегированию чрезвычайно резко выражена, например, для порошков сульфата бария, некоторых сортов сажи и некоторых других веществ, частицы которых весьма малы. В обоих примерах действие сил прилипания весьма заметно, в противоположность обычно наблюдающимся случаям контакта твердых тел, по двум различным причинам. У свинцовых цилиндров силы прилипания были бы очень малы, если бы мы не прижимали поверхности одну к другой или если бы взяли более твердый металл, например сталь. Совершенно очевидно, что в этом случае силы прилипания делаются заметными благодаря искусственному увеличению площади контакта их между собой. У твердых металлов, даже с весьма точно изготовленными плоскими поверхностями, как, например, мерительные плитки или калибры, простой контакт недостаточен для значительных сил прилипания; когда желательно такое прилипание осуществить, поверхность смазывают тонким слоем жира, например, с тыльной стороны руки. В этом случае прижатие плоских калибров одного к другому и легкое относительное поворачивание их приводят к прочному сцеплению. Прием этот используется в практике для получения составных калибров любой желаемой длины.

Такое поведение калибров объясняется тем, что силы молекулярного притяжения действуют интенсивно только на таких малых расстояниях, что даже при контакте плоских поверхностей необходимая степень прилегания осуществляется только на участках поверхности, общая площадь которых ничтожно мала. Применяемая для смазывания калибров тончайшая пленка жира заполняет зазоры между калибрами если не целиком, то на значительной части их поверхности и обеспечивает действие сил молекулярного притяжения должной величины.

Смазывание калибров жиром имеет смысл и по другой причине. Если калибры с весьма плоскими и чистыми поверхностями прижать один к другому, то при благоприятных условиях, особенно если выждать некоторое время, поверхности могут все же слипнуться благодаря действию молекулярных сил на сближенных участках поверхностей.

Разъединить такие поверхности удастся с большим трудом; после разъединения поверхности оказываются поврежденными, что указывает на то, что разрыв между

ними произошел по свежему месту вследствие как бы их срастания в отдельных точках контакта. Когда между поверхностями находится смазочная прослойка жира, этого не может произойти, так как плоскости наименьшего сцепления почти всегда располагаются внутри смазочной прослойки. Кроме того, смазочная прослойка, понижая коэффициент трения, облегчает скользящие движения поверхности одного калибра относительно другого, движения, которыми обычно пользуются не только для того, чтобы при наличии давления лучше «сцепить» калибры один с другим, но и для того, чтобы легче разъединить их, сочетая такие скользящие движения с действием отрывающего усилия.

В случае весьма мелких частиц какого-нибудь порошка, например кварцевого песка, площадь контакта не только не будет больше, чем при контакте более грубых частиц или обычных тел, но, наоборот, из-за их неправильной формы будет меньше. Даже для частиц с плоскими гранями площадь контакта мала из-за малой вероятности (при беспорядочном расположении частиц) контакта их плоских граней. Несравненно вероятнее контакт граней с ребрами и углами соседних частиц. Более заметное действие силы прилипания объясняется у таких тонких порошков только тем, что хотя силы прилипания соответственно меньшей площади контакта становятся меньше, но действие других сил, например силы тяжести, на подобные частицы уменьшается соответственно малым размерам частиц в еще большей степени. Поэтому на первый план выступает действие сил молекулярного притяжения. В сущности говоря, для частиц ряда порошков, вроде сажи, трудно говорить о площади контакта, так как частицы их скорее можно уподобить маленьким шарикам, чем телам с плоским ограничением, которое делало бы возможным контакт на каких-то плоских участках их поверхностей.

Спрашивается, как же можно говорить о силах взаимного молекулярного притяжения при контакте двух шариков, который по существу может иметь место только в одной точке? Здесь следует вспомнить, что силы притяжения, действующие между молекулами, имеют хотя и очень малый, но все-таки определенный радиус действия. Вернее, существует определенный закон, по которому силы молекулярного притяжения убывают по мере уве-

личения расстояния между молекулами. Это убывание происходит с увеличением расстояния между молекулами весьма быстро, гораздо быстрее, чем в случае сил всемирного тяготения или притяжения разноименных электрических зарядов.

Как известно, сила всемирного тяготения, действующая между любыми материальными частицами, так же как и сила притяжения разноименных электрических зарядов, убывает обратно пропорционально квадрату расстояния между ними (предполагается, что размеры соответствующих частиц малы по сравнению с расстояниями между ними, так как иначе понятие расстояния между телами теряет определенный смысл). В отличие от этого, силы межмолекулярного притяжения в наиболее типичных случаях убывают обратно пропорционально седьмой и даже (при больших расстояниях) восьмой степени расстояния. Так, при увеличении расстояния в два (или три) раза силы всемирного тяготения уменьшаются в четыре (или девять) раз, силы же молекулярного притяжения уменьшаются в 128 (2187) или 256 (6561) раз.

Однако отсюда нельзя делать вывод, что при близком расположении поверхностей двух твердых тел силы притяжения на разных участках будут убывать обратно пропорционально седьмой или восьмой степени величин зазора в рассматриваемых участках. При вычислении величин молекулярного взаимодействия поверхностей, разделенных каким-нибудь зазором h , необходимо по правилу сложения сил производить сложение взаимодействий не только пар молекул aa_1 , расположенных на поверхностях обоих тел одно против другого с обеих сторон зазора (рис. 65),¹ но и взаимодействий пар молекул bb_1 , расположенных не прямо одна против другой, а также пар молекул cc_1 , расположенных на некотором расстоянии под поверхностью.

Сложение всех этих взаимодействий по правилу сложения сил приводит, как показывают точные расчеты, к следующим результатам.

Если две плоские поверхности расположены параллельно одна другой и, следовательно, разделены зазором равномерной ширины n , то силы молекулярного притяжения убывают с увеличением ширины зазора обратно пропорционально третьей или даже четвертой степени этой величины. Однако весьма редко поверхности

имеют такую правильную форму и расположены столь строго параллельно одна другой, чтобы зазор между ними мог иметь равномерную ширину. Несравненно чаще, можно сказать в подавляющем числе случаев, величина зазора вблизи места контакта или сближения двух твердых поверхностей оказывается неравномерной. Типичным примером зазора такой формы является контакт двух шариков.

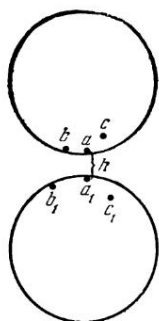


Рис. 65. Молекулярное взаимодействие при отсутствии контакта

В этом случае, когда контакт имеет место как бы в одной точке, суммарная сила молекулярного притяжения может быть найдена, если сложить силы, действующие в разных участках зазора и убывающие по определенному закону в зависимости от величины зазора на соответствующем участке. Таким образом, суммарное взаимодействие будет иметь определенную величину, несмотря на то, что контакт носит точечный характер.

Более того, суммарное молекулярное взаимодействие двух шариков или плоских поверхностей будет иметь определенную величину даже тогда, когда никакого контакта между ними нет и поверхности разделены зазором. При этом сила взаимодействия, как показывают расчеты, должна убывать обратно пропорционально квадрату или даже кубу величины зазора в наиболее узком его месте, становясь чрезвычайно малой уже при зазорах порядка микрона.

Все же эти силы не так малы, чтобы ими можно было всегда пренебрегать. Однако не только измерение таких сил молекулярного взаимодействия между двумя телами, разделенными узким зазором, представляло до последнего времени нерешенную задачу экспериментальной физики, но даже не было известно ни одной сколько-нибудь серьезной попытки ее разрешения. Между тем подобная задача могла быть поставлена, когда было впервые развито представление о силах молекулярного взаимодействия, убывающих с расстоянием по определенному закону. Такое представление было развито в трудах французских математиков Клеро и Лапласа почти 200 лет назад. В то же время аналогичная задача проверки закона

всемирного тяготения Ньютона была разрешена вскоре после открытия Ньютоном этого закона.

Основная трудность измерения молекулярных взаимодействий между твердыми телами заключается в том, что эти силы крайне быстро убывают с расстоянием. Поэтому при их измерении надо сочетать чувствительность прибора, измеряющего силы, с требованиями постоянства в момент измерения ширины весьма малого зазора между двумя телами, одно из которых укреплено на коромысле микрометрических весов, а другое — на неподвижной подставке.

Впервые удалось найти принцип измерения, сочетающий оба, на первый взгляд, несовместимых требования, в Лаборатории поверхностных сил Института физической химии АН СССР. В основе этого способа лежит опубликованная еще в 1948 г. идея автоматического поддержания постоянной ширины зазора посредством фотоэлектрического устройства, своего рода искусственного глаза, осуществлявшего управление положением коромысла весов. В момент измерения поддерживается положение коромысла, обеспечивающее желательную ширину зазора, выбор и изменение которой от одного измерения к другому также обеспечиваются посредством управляющего устройства.

О силе молекулярного притяжения можно было судить по силе электрического тока в цепи управляющего устройства, так как именно этот ток, уравнивая молекулярную силу, обеспечивал неподвижность коромысла при измерениях.

На этом примере мы видим, что идея автоматизации на основе кибернетики — учения об управлении, — так широко внедряемая в производственные процессы, также плодотворна и в применении к сложным измерениям. Описанная методика¹ была применена автором книги совместно с И. И. Абрикосовой к измерениям молекулярного притяжения между рядом твердых тел.

Эта работа дала толчок к развитию Е. М. Лифшицем первой строгой теории молекулярного притяжения твердых тел на основе учета флуктуационных электромагнитных полей, существующих во всех телах и хорошо

¹ В ее разработке активное участие принимала Ф. Б. Лейб.

известных радиолюбителям как причина «шумов» в радиотехнических схемах.

Формулы теории Е. М. Лифшица оказались в хорошем согласии с нашими опытами.

Итак, силы молекулярного притяжения могут действовать между двумя шариками, находящимися или даже не находящимися в контакте. При этом, как показывают расчеты, равнодействующая сила молекулярного притяжения при прочих равных условиях, т. е. для шариков данной природы, прямо пропорциональна радиусу шариков. Если мы вспомним, что сила тяжести, действующая на шарик и пропорциональная его объему, должна меняться пропорционально кубу радиуса, то мы легко придем к выводу, что, по мере того как мы берем все более мелкие частицы, равнодействующая силы молекулярного взаимодействия их будет убывать медленнее, чем вес каждого из них. В результате для частиц, радиус которых достаточно мал (приблизительно меньше микрона), силы притяжения берут перевес над силами тяжести. Поэтому такого рода частицы могут слипаться и, образуя комки, не разрушаться под действием силы тяжести отдельных частиц. Любопытно отметить, что в ряде случаев (например, для некоторых сортов сажки) эти комки имеют весьма правильную, шарообразную форму.

Вернемся к обсуждению возможного влияния сил молекулярного притяжения или сцепления на трение. Мы уже видели (стр. 134), что в тех случаях, когда за счет взаимного сдавливания поверхностей пластичных тел, например, свинца, обеспечено повышение площади действительного контакта, то, как следствие, одновременно возникают силы прилипания и отклонения от закона Амонтона. Сопротивление скольжению в этих условиях сохраняется и тогда, когда «нагрузка», прижимающая оба соприкасающихся тела, становится равной нулю.

Отклонения от закона Амонтона наблюдаются и при трении частиц весьма мелких порошков по плоской поверхности. Это можно доказать весьма простым опытом, впервые проведенным В. П. Лазаревым. Он помещал подобные частицы на поверхность, наклон которой к горизонту можно менять по схеме измерения угла трения, изображенной на рис. 49. При этом было обнаружено, что угол трения α и коэффициент трения μ тем больше, чем меньше диаметр частиц d (рис. 66). Для достаточно

малых частиц соскальзывания не наблюдаются даже при вертикальном положении плоскости. Это показывает, что не только коэффициент трения становится зависящим от размера частиц, но и прямо нарушается закон Амонтона. Последнее связано с тем, что равнодействующая сил молекулярного притяжения становится соизмеримой с весом частиц или даже превышает его.

Естественна мысль обобщить закон Амонтона (что и будет сделано ниже) так, чтобы отклонения от него не наблюдались и в тех случаях, когда относительно велико действие молекулярных сил, т. е. учесть их действие.

Однако мы должны отнестись к этому вопросу не только с чисто математической стороны, как к уточнению закона Амонтона. Мы можем и должны рассматривать этот вопрос глубже, с точки зрения происхождения сил трения, а также с целью вывести закон Амонтона теоретически, т. е. понять причину его соблюдения в обычных условиях. Если оказывается необходимым вводить в закон Амонтона поправку на молекулярные силы тогда, когда эти силы делаются значительными, то отсюда следует логически, что невозможно привлекать эти же самые силы к истолкованию самого закона Амонтона, и, следовательно, не эти силы непосредственно определяют величину коэффициента трения μ .

Механизм внешнего трения

На первый взгляд кажется, что мы зашли в тупик. С одной стороны, мы показали, что нельзя приписать силы трения взаимному зацеплению микровыступов, имеющих на поверхности любых твердых тел, с другой — мы отвергли объяснение силы трения, подчиняющейся закону Амонтона, молекулярными силами притяжения. Что же в таком случае остается для возможного объяснения сил трения?

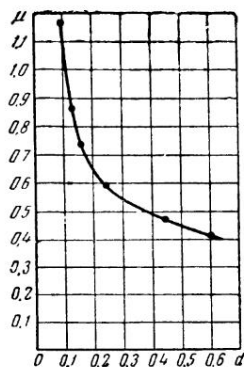


Рис. 66. Зависимость коэффициента трения (кварцит по стеклу) от диаметра частиц

Оба фактора — сравнительно грубая шероховатость и силы молекулярного притяжения — способны только вызвать дополнительное увеличение силы трения, часто сопровождающееся нарушением закона Амонтона, но не объяснить трение «идеально гладких» поверхностей¹ и приложимость самого закона Амонтона. Для обоих этих факторов, второстепенное значение которых для объяснения внешнего трения мы показали, характерно то общее, что оба фактора по существу не связаны с атомно-молекулярным строением твердых тел и не учитывают его характера. Для шероховатости это очевидно. Для молекулярных сил справедливость сделанного замечания будет показана ниже.

Отсюда можно сделать такой вывод: внешнее трение, подобно внутреннему трению, есть явление молекулярное, вытекающее из дискретной, атомно-молекулярной структуры материи и необъяснимое без ее рассмотрения, только на основе более грубых представлений или общих рассуждений о молекулярных силах. Этот вывод полностью согласуется с тем, что было нами сказано об общем характере или природе сил трения. Как указывает Энгельс, трение наряду с ударом есть основной механизм перехода механического движения в молекулярное. Отсюда ясно, что теория трения может строиться только на основе учения об атомно-молекулярном строении тел.

Несомненно, что такой учет молекулярного строения и сил молекулярного взаимодействия с целью развития строго количественной теории внешнего трения — задача весьма сложная, в особенности если теория должна позволять теоретическим путем предвычислять коэффициенты трения тел, строение которых известно. Однако с таким же положением мы встречаемся, рассматривая и другие молекулярно-физические явления, природа которых более ясна и которые значительно ранее сделались предметом

¹ Примером «идеально гладкой» поверхности в нашем смысле может служить не только поверхность жидкости, но, например, поверхность свежевытянутой в пламени горелки стеклянной или кварцевой нити. По некоторым опытным данным, поверхность замерзшей ртути сохраняет степень гладкости, близкую к той, которой она обладала в жидком состоянии. Для таких «идеально гладких» поверхностей коэффициент трения весьма велик — около единицы, даже при ничтожной площади контакта, как в случае скрепленных тонких нитей.

теоретической трактовки. Так, мы до сего времени не умеем, зная химический состав жидкости, вычислять ее вязкость или поверхностное натяжение. В подобных случаях по необходимости ограничиваются более скромной задачей: теория освещает общий характер явления и зависимость соответствующей величины от основных влияющих на нее факторов, например зависимость вязкости жидкостей от температуры.

Для подобной же цели освещения молекулярного механизма внешнего трения был предложен ряд теоретических схем. Мы ограничимся схемой, предложенной в свое время автором книги, так как она не только объяснила основные закономерности внешнего трения, но привела к обобщению закона Амонтона в виде так называемого двухчленного закона трения, который был опятами В. П. Лазарева, А. С. Ахматова и других ученых точно проверен и применен к предсказанию и объяснению дальнейших закономерностей внешнего трения.

Применение модели к обоснованию законов внешнего трения

Наша теоретическая схема основана на рассмотрении следующей наглядной модели. На рис. 67 незаштрихован-

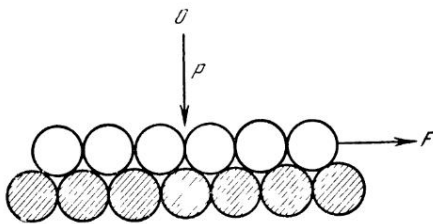


Рис. 67. К молекулярному механизму трения

ные кружки изображают атомы (или молекулы) одного тела, заштрихованные — другого. Предполагается, что форма и размер атомов при контакте не меняются¹, что

¹ Это предположение согласуется с современными взглядами на силы отталкивания между атомами, которые появляются при их «контакте» и крайне резко возрастают при их дальнейшем сближении, что приводит к постоянству размеров атомов (при не слишком больших давлениях).

целость каждого тела обеспечивается силами молекулярного сцепления или притяжения¹, но что молекулярным сцеплением атомов обоих тел можно пренебречь, в противоположность силам притяжения, действующим между атомами одного и того же тела. Все эти силы действуют по линии, соединяющей центры соответствующей пары атомов. Поскольку эта модель должна о б ъ я с н и т ь происхождение сил трения, никаких сил трения в точках

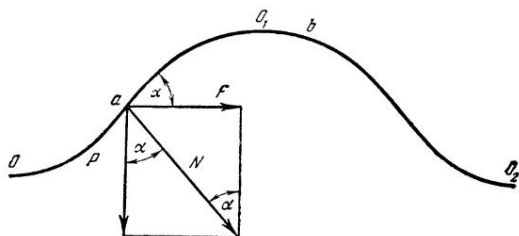


Рис. 68. К молекулярному механизму трения

контакта соседних атомов, естественно, не допускается. При этом под действием собственного веса P верхнее тело займет положение, при котором центр тяжести тела окажется в наиболее низком положении O (рис. 68).

Под действием горизонтальной силы F верхнее тело сдвинется из этого, самого низкого положения в новое и центр тяжести опишет некоторую кривую линию OO_1 .

Условием равновесия в новом положении будет известное условие равновесия тела, находящегося на наклонной поверхности; оно заключается в том, что равнодействующая N сил, действующих на тело (и уничтожаемая противодействием поверхности), должна быть перпендикулярной к направлению касательной плоскости к поверхности в месте нахождения тела.

Отсюда легко выводится формула

$$\frac{F}{P} = \operatorname{tg} \alpha, \quad (41)$$

¹ Эти силы ослабевают с расстоянием значительно медленнее сил отталкивания

где α равно, очевидно, углу наклона касательной к поверхности к горизонту¹. Применяя это условие к нашему случаю, мы найдем положение центра тяжести a на описываемой им траектории. Очевидно, однако, что если отношение F/P превысит некоторый предел, равный $\operatorname{tg} \alpha_m$, где α_m — максимальный наклон траектории центра тяжести, то равновесия быть не может ни при каком положении центра тяжести и, следовательно, начнется непрерывное скольжение верхнего тела по нижнему.

Отсюда мы не только приходим к существованию статического трения, но и находим выражение для его коэффициента μ :

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha_m. \quad (42)$$

Таким образом, мы свели трение в основном к той молекулярной шероховатости, которая является неизбежным следствием атомного строения тел. Из нашего объяснения трения вытекает, в частности, — если пренебречь изменением расположения молекул вследствие теплового расширения и считать размах теплового колебания малым по сравнению с межатомными расстояниями, — независимость (в первом приближении) коэффициента трения от температуры, хорошо подтверждаемая на опыте при температурах, не слишком близких к температуре размягчения тел.

Предложенная модель показывает, что основное отличие механизма внешнего трения от механизма внутреннего трения состоит в том, что в последнем переход молекулы из одного положения равновесия в соседнее происходит в результате теплового колебательного движения, а в первом — в результате значительного предварительного взаимного смещения молекул соприкасающихся тел под

¹ Несмотря на внешнее сходство, эта формула и ее физическое содержание отличны от формулы (38). Здесь вес тела P уравнивается на наклонной плоскости, лишенной трения, горизонтальной силой тяги F . Там вес тела P уравнивался силой трения F , действовавшей вдоль наклонной плоскости. Схема рис. 49 служит для измерения коэффициента трения, а схема рис. 68 — для его объяснения и истолкования. Во избежание недоразумений, следует оговорить, что в дальнейшем, так же как и в формуле (38), сила, прижимающая трущиеся тела одно к другому и перпендикулярная к плоскости их касания, будет снова обозначаться через N .

действием сдвигающей силы. Именно поэтому коэффициент внутреннего трения (в жидкостях) падает с повышением температуры, коэффициент же внешнего трения с изменением температуры меняется сравнительно очень мало (если с температурой не меняется природа и состояние поверхности, например, если не происходит образования окисных пленок или размягчения тел).

Механизм рассеяния избыточной кинетической энергии, которую приобретают молекулы или атомы, «перевалив» (см. рис. 68) через горб b и «падая» в следующую ямку около точки O_2 , в обоих случаях можно полагать сходным (см. стр. 84—89).

Таким образом, механизм развития энергии беспорядочного теплового движения молекул при трении в своей основе одинаков при внутреннем и при внешнем трении. Различие обоих случаев, по-видимому, связано с тем, что при внешнем трении твердых тел переход из одного положения равновесия в другое совершают одновременно группы молекул, связанных между собой силами молекулярного сцепления, тогда как при внутреннем трении в жидкостях переход этот совершается отдельными атомами не одновременно и в основном независимо друг от друга.

Итак, мы видим, что истинный коэффициент трения зависит от молекулярно-атомной шероховатости поверхностей. Этот вывод позволяет понять, почему даже для полированных поверхностей коэффициент трения сохраняет высокое значение. Действительная причина этого заключается в том, что все тела природы состоят из отдельных атомов и молекул. Грубо говоря, строение каждого тела можно представить в виде упакованных в определенном порядке отдельных шариков, изображающих атомы и молекулы тела в контакте друг с другом.

Так, например, у обычной поваренной соли каждый атом натрия находится в контакте с восемью атомами хлора, точно так же как каждый атом хлора находится в контакте с восемью атомами натрия (рис. 69); мы имеем то, что называется плотной кубической упаковкой атомов. Разрежем такой кристалл хлористого натрия на две части плоскостью, параллельной нижней грани, и спросим себя, какой путь должен описывать центр тяжести верхней половины кристалла, если заставить эту половину скользить относительно нижней пластины, находясь с ней

в непрерывном контакте. Предположим при этом, что при движении не происходит поворота верхней половины кристалла относительно нижней и что взаимная ориентировка ребер и граней обеих частей кристалла остается строго неизменной.

Соприкасающиеся при скольжении поверхности вследствие атомной структуры будут вести себя как две шероховатые плоскости, выступы которых соответствуют расположенным на их поверхностях атомам натрия или хлора. Следовательно, центр тяжести верхней половины кристалла должен при скольжении этой половины по нижней описывать волнообразную кривую *abcd* (рис. 70), наклоны наиболее крутых участков которой будут довольно велики, несмотря на то, что выступы поверхности имеют в данном случае атомные размеры.

Нечто аналогичное (хотя и не во всех отношениях) происходит при скольжении любых твердых поверхностей, находящихся в контакте одна с другой. Путь движения центра тяжести верхнего тела относительно нижнего всегда имеет форму волнообразной кривой, высота горбов которой зависит от размеров атомов и молекул, расположенных на поверхностях контакта. Такая

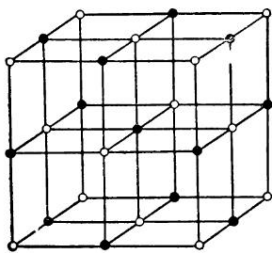


Рис. 69. Структура хлористого натрия
● — атом натрия; ⊙ — атом хлора



Рис. 70. Траектория центра тяжести тела, скользящего по «плоскости» поверхности

волнообразность движения является следствием уже не грубой шероховатости поверхности, а молекулярной шероховатости, которую невозможно устранить никакой полировкой, так как она неизбежно связана с атомно-молекулярным строением твердых тел. Даже идеально гладкие поверхности, т. е. доведенные до такой степени гладкости, которая совместима с существованием атомов и молекул, обладают молекулярной шероховатостью и, как следст-

вие, имеют определенный коэффициент статического трения.

Таким образом, мы нашли выход из создавшегося в теории трения затруднения.

Найденное нами объяснение сил трения имеет преимущество наглядности, давая модель явления, но оно одновременно создает повод для того, чтобы задать следующие вопросы:

1. Можно ли объяснить силу трения, пользуясь только геометрическими представлениями и не вводя в рассуждение никаких других сил, действующих между атомами и молекулами?

2. При непрерывном скольжении двух твердых тел центр тяжести верхнего из них описывает волнообразную траекторию, на одних участках которой тело поднимается, на других опускается. На движение центра тяжести не затрачивается никакой работы, так как работа, затраченная при подъемах центра тяжести, возвращается обратно при его опускании (рис. 70). Спрашивается: куда же затрачивается работа силы трения движения?

3. Как объяснить трение поликристаллических тел, состоящих из отдельных, иногда очень маленьких кристалликов, взаимное расположение граней и осей которых совершенно беспорядочно, или трение аморфных тел (как, например, стекло), в которых атомы и молекулы расположены не правильными рядами и слоями, как в кристаллах, а беспорядочно, вернее, с той степенью упорядоченности, которая вытекает из их тесной упаковки в контакте друг с другом?

Рассмотрим эти вопросы по порядку. Характер молекулярной шероховатости определяется, естественно, формой атомов и их взаимным расположением. Доказано, что представление об атомах как о шариках определенного радиуса является лишь некоторым приближением. Однако возможность такого приближения зависит от того, что на близких расстояниях между центрами атомов появляются силы отталкивания, которые чрезвычайно быстро возрастают по мере дальнейшего сближения атомов. Эти силы отталкивания объясняются тем, что атом состоит из центрального, положительно заряженного ядра, окруженного электронной «оболочкой», образованной одной или несколькими отрицательно заряженными частицами — электронами.

При сближении двух атомов вращающиеся электроны, расположенные в наружных частях электронной оболочки атомов, сближаются настолько, что нарушается их первоначальное расположение и движение. Электрические силы отталкивания, действующие между электронами, а также и энергия их движения обуславливают сопротивление такому изменению строения атомов, что и служит причиной появления мощных сил отталкивания между атомами, электронные оболочки которых сближаются. Быстрый рост этих сил с дальнейшим сближением атомов позволяет в первом грубом приближении считать электронные оболочки как бы несжимаемыми и приписывать атомам любого вещества некоторые радиусы, определяющие те наименьшие расстояния, на которые могут сблизиться два соседних атома. Таким образом, форма атомов и молекул на самом деле есть проявление действующих между атомами сил отталкивания, возникающих в свою очередь вследствие внутриатомных движений сил электрического отталкивания.

С другой стороны, упаковка, или расположение атомов в кристаллах, зависит не только от «формы» атомов, но и от величины и характера тех сил притяжения (также электрической природы), которые действуют между ними и обеспечивают образование кристаллов из жидкостей или паров данного вещества и прочность кристаллов, их способность сохранять внешнюю форму и соответствующее внутреннее строение, т. е. взаимное расположение составляющих его атомов. Можно показать, что примерно одинаковые по размеру атомы в зависимости от величины и характера действующих между ними сил притяжения могут менять характер своего расположения в пространстве — свою «упаковку».

Отсюда понятно, что атомно-молекулярная шероховатость, объясняющая существование сил трения, есть сама результат действия отталкивательных и притягательных сил между молекулами каждого из соприкасающихся тел.

Таким образом, и силы трения, помимо молекулярной шероховатости, зависят от сил атомно-молекулярного взаимодействия. Это взаимодействие должно быть учтено при дальнейшем развитии теории.

Разберем теперь третий вопрос, относящийся к трению поверхностей поликристаллической структуры. Этот

случай трения твердых тел наиболее реальный; его отличие от рассмотренного выше идеального случая скольжения двух частей одной и той же кристаллической решетки заключается в том, что положение даже соседних атомов верхнего тела по отношению к соответствующим ямкам между поверхностными атомами нижнего тела различно: соседние атомы верхнего тела одновременно находятся в наиболее глубоких местах ямок и в своем движении одновременно не попадают на наиболее крутые участки. Поэтому моменты, в которые происходит как бы перескакивание одного атома из одной ямки в другую, для разных атомов различны.

Это обстоятельство по существу представляет не затруднение теории, а, наоборот, облегчает ее обоснование. Действительно, в этом случае механизм превращения работы движущей силы в энергию молекулярного теплового движения еще ближе к механизму аналогичного явления при внутреннем трении жидкостей. В случае же идеальном, рассмотренном выше, одновременное перескакивание всех атомов верхнего тела в соседние ямки резче меняло бы механизм развития тепла трения.

Конечно, при таком не одновременном переходе различных атомов верхнего тела в новые положения равновесия движение центра тяжести верхнего тела не сможет повторить движения каждого из этих атомов в отдельности, а является как бы равнодействующим всех их. В результате такого сглаживания отдельных микроскачков различных атомов тела при его скольжении движение центра его тяжести теряет характер волнообразного периодического движения и приобретает характер, близкий к прямолинейному и равномерному. Однако в начале движения, при нарушении состояния покоя, т. е. при трогании тела с места, движение центра тяжести не может быть строго горизонтальным. Это было бы несовместимым (что можно доказать строгим рассуждением) с существованием статического трения. Действительно, более детальное рассмотрение показывает, что, несмотря на то, что движение центра тяжести отражает усредненное движение отдельных поверхностных атомов, в начале этого движения центр тяжести поднимается вверх на высоту, меньшую максимальной высоты подъема каждого индивидуального атома поверхности.

Дальнейшее обсуждение и обоснование законов внешнего трения и их применения

Только что описанная картина не только объясняет существование сил статического трения для реальных тел, но и позволяет понять, почему коэффициент статического трения равен коэффициенту кинетического трения при малых скоростях скольжения. Самое главное, что дает нам теория, приведшая к уравнению (42), это возможность обосновать закон Амонтона.

Таким образом, закон Амонтона должен оправдываться строго в тех случаях, когда силы межмолекулярного притяжения, действующие между обоими скользящими телами, можно не принимать в расчет — результат, полностью совпадающий с выводом, который мы раньше сделали из ряда экспериментов. Было показано, напомним, что в тех случаях, когда силы молекулярного притяжения становятся заметными, наступают отклонения от закона Амонтона.

Впрочем, не следует думать, что молекулярное сцепление или притяжение в данном случае никакой роли не играет. Эти силы играют роль, как мы указывали, уже потому, что без них каждое из твердых тел не обладало бы неизменностью своей формы и определенным правильным расположением составляющих его атомов.

Вообще скольжение двух тел может наблюдаться только тогда, когда имеются плоскости как бы наименьшего сопротивления, в которых взаимодействие соприкасающихся тел или частей одного и того же тела ослаблено. Такое ослабление наблюдается и в случае однородных тел, наиболее ясно — в максимально однородных телах, какими и являются монокристаллы, в основе строения которых лежит правильное расположение атомов по «узлам» так называемой кристаллической решетки, узлы которой в свою очередь расположены параллельными слоями. Несмотря на правильность расположения атомов, во всех реальных монокристаллах имеются участки, ослабленные по тем или иным причинам, связанным с условиями образования и роста кристаллов. Эти слабые места (дислокации) часто расположены вблизи поверхности; они предопределяют образование плоскостей скольжения, вдоль которых происходит скольжение двух частей кристалла. Такое скольжение близко совпадает с описанным

выше взаимным скольжением двух кристаллов поваренной соли, отличаясь от него перемещением дислокаций, влияющим на внутрикристаллические скольжения.

Из всего сказанного можно понять, почему явление внутреннего трения, характеризующееся постепенным изменением скорости скольжения от слоя к слою, не может наблюдаться в твердых телах, к каковым в настоящее время относят твердые тела кристаллического строения с правильным расположением атомов или молекул. Во всех таких телах скольжение не может начаться и происходить одновременно между всеми соседними атомными плоскостями, так как имеются слабые плоскости, вдоль которых скольжение наступает при меньшем усилии, чем по другим плоскостям.

Здесь же следует отметить, что при контакте двух твердых тел не всегда более слабой плоскостью является плоскость их соприкосновения. В тех случаях, когда одно из тел достаточно пластично или мягко, скольжение происходит не по площади контакта обоих тел, а внутри того из них, которое имеет более низкое сопротивление скольжению (например, при трении стали по олову или индию).

При этом может происходить как бы намазывание более мягкого тела по более твердому. От этого явления следует отличать случай хрупких тел, скольжение которых может сопровождаться выкрашиванием мельчайших (а иногда и сравнительно крупных) частиц, так называемым износом, главным врагом инженера-механика.

Одной из целей введения смазки между трущимися плоскостями и является предупреждение этих нежелательных явлений. Внутри смазочного слоя возникает плоскость малого сопротивления скольжению, которая предохраняет поверхности от повреждения.

Учет влияния молекулярных взаимодействий на силу трения.

Двучленный закон трения

Рассмотрим вопрос: как следует учитывать действие молекулярных сил притяжения в промежуточном случае, когда эти силы недостаточно велики для того, чтобы исключить скольжение между обоими соприкасающимися телами и вызвать износ их поверхности, но в то же время

не могут считаться исчезающе малыми? В первом приближении эти силы можно учесть очень просто, предположив, что они уменьшаются с расстоянием достаточно медленно для того, чтобы можно было пренебречь ослаблением этих сил при изменениях расстояния на величину порядка атомного диаметра. В этом случае, при перемещении верхнего тела по нижнему, согласно рассмотренной нами выше схеме «молекулярной шероховатости», равнодействующая сил молекулярного притяжения между соприкасающимися поверхностями будет оставаться постоянной.

В то же время эта сила будет затруднять преодоление атомных выступов совершенно в той же мере, что и нагрузка, действующая на тело. Таким образом, молекулярные силы притяжения будут иметь такое же действие на сопротивление скольжению F , как если бы вес тела увеличился на величину этой силы. Поэтому естественно обобщить закон Амонтона (39), согласующийся, как мы видели, с нашим объяснением внешнего трения [см. формулы (41) и (42)], написав его в таком виде¹:

$$F = \mu (N + N_0), \quad (43)$$

где N_0 — равнодействующая сил молекулярного притяжения между обоими телами.

В этой формуле μ следует назвать истинным коэффициентом трения, постоянство которого вытекает из нашей теории. Обычный же, расчетный коэффициент трения μ' , равный отношению всей силы трения к внешней нагрузке

$$\mu' = \frac{F}{N} = \mu \left(1 + \frac{N_0}{N} \right), \quad (44)$$

как видно из формулы, не будет величиной постоянной, а увеличивается, как показывает опыт, с уменьшением нагрузки.

Чтобы использовать формулу (43), формулу так называемого двучленного закона трения, необходимо указать способ подсчета равнодействующей силы молекулярного притяжения N_0 . Мы видели выше, что молекулярные силы притяжения могут сказываться по-разному в двух различных случаях: когда контакт точечный и когда поверхности вследствие изменения своей формы или по

¹ См. сноску на стр. 145.

другим причинам соприкасаются непосредственно на больших участках площади фактического касания. В первом случае сила молекулярного притяжения зависит от радиусов соприкасающихся поверхностей и обычно весьма мала. Поэтому здесь величина N_0 может иметь значение наряду с величиной N , только если нагрузка, прижимающая оба тела друг к другу, крайне мала, что может быть только в случае весьма малых частиц. Отсюда понятна применимость двучленного закона трения к порошкам и сыпучим телам (например, к почвам и грунтам).

В современной технике, однако, чаще идет речь о соприкосновении тел больших размеров, подверженных действию огромных нагрузок, доходящих до сотен тонн. Здесь двучленный закон трения может иметь значение только в том случае, если вследствие большой площади действительного контакта S соответственно возрастет равнодействующая сила молекулярного притяжения N_0 , которую можно положить равной площади истинного контакта S_0 , умноженной на p_0 — силу молекулярного притяжения, действующую на единицу площади действительного контакта. В результате написанная нами формула принимает вид:

$$F = \mu (N + S_0 p_0). \quad (45)$$

Здесь надо предостеречь от смешения площади действительного контакта S_0 с площадью кажущегося или номинального контакта S . Первая почти всегда во много раз меньше последней, так как даже искусственным путем никогда не удастся придать соприкасающимся поверхностям достаточно плоскую и гладкую форму. Поэтому когда мы складываем две металлические пластинки, площадью 1 см^2 каждая, то действительная площадь контакта может составлять сотые доли квадратного миллиметра и даже меньше.

Кроме того, нужно учитывать, что при изменении нагрузки на тело площадь действительного контакта, в отличие от площади кажущегося контакта, обычно почти не меняющейся, будет меняться вследствие изменения формы поверхности. Отсюда вытекает, в частности, что проверка двучленного закона трения в обычных условиях затруднительна. Действительно, если мы будем менять нагрузку и измерять силу трения, откладывая нагрузку по оси абсцисс, а силу трения по оси ординат,

то полученные точки не обязательно должны расположиться по прямой линии, так как величина S_0 сама будет непостоянной, изменяясь с изменением нагрузки N^1 .

Впервые двучленная формула, выражающая линейную зависимость между силой трения и нагрузкой, была предложена французским физиком Кулоном:

$$F = \mu N + A. \quad (46)$$

Мы видим из сравнения с формулой (45) и приведенного рассуждения, что предложенное Кулоном эмпирическое соотношение только по форме сходно, и то не полностью, с двучленным законом трения (45), так как не предусматривает зависимости члена A от истинной площади контакта, а следовательно, и от нагрузки N . Помимо этого, формула (43) указывает на связь второго члена в законе трения с силой прилипания N_0 . Эта связь блестяще подтверждена опытами А. С. Ахматова, в то время как из формулы (46) никакой взаимосвязи между трением и прилипанием не вытекает.

Экспериментальная проверка двучленного закона трения

Спрашивается: как же можно строго проверить двучленный закон трения на опыте? Для этой цели автором совместно с В. П. Лазаревым был применен следующий метод. Для получения большой площади действительного контакта к стеклянной пластинке приплавлялся кусок легкоплавкого тела — металла Вуда или парафина. При этом получалось равномерное прилегание ползунка к плоской поверхности стекла на всей плоскости кажущегося контакта, а площадь действительного контакта получалась настолько большой, что при увеличении действующей нагрузки она не могла возрастать, в отличие от того, что происходит, когда нагрузка, распределяясь на

¹ Это очевидное соображение устраняет вывод Г. И. Епифанова о неправильности двучленного закона трения, к которому он пришел при сравнении опытов по трению стального реза по мягкому металлу, в одном из этих опытов S_0 было постоянно, в другом — переменено.

малой площади действительного контакта, создает большие местные удельные напряжения, способные вызвать пластическое течение материала, увеличивающее площадь контакта.

Таким образом, условия эксперимента обеспечивали большую площадь действительного контакта и ее независимость от внешней нагрузки.

Измерения показали, что в этих условиях график зависимости силы трения F от нагрузки N с весьма большой степенью точности имеет вид прямой. Угловым коэффициентом соответствующей

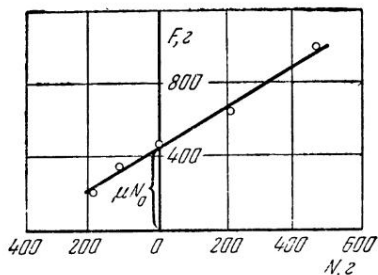


Рис. 71. Зависимость силы трения от нагрузки для металла Вуда по стеклу. Смазка — слой олеиновой кислоты толщиной 0,008 мк из летучего растворителя

прямой равен μ — коэффициенту «истинного» трения. Прямая графика не проходит через начало координат (рис. 71), пересекая ось ординат выше начала координат на величину, равную члену $\mu N_0 = \mu S_0 p_0$ в формулах (43) и (45). Можно было измерять силу трения даже при отрицательной нагрузке, стремящейся оторвать ползунок от поверхности стекла, т. е. получить часть прямой,

расположенную на графике левее оси ординат, в области отрицательных значений N .

Двучленный закон трения оказался строго приложимым как при смазочном слое, образованном твердым или жидким веществом, так и при сухом трении. Широкая приложимость двучленного закона трения к объяснению закономерностей сухого трения шероховатых поверхностей была показана в работах И. В. Крагельского. Приложимость двучленного закона к сухому трению резин была показана С. Ратнером (рис. 72), а также в нашей лаборатории Ю. П. Топоровым для других полимеров.

Наиболее интересные результаты были получены при исследовании применимости двучленного закона трения к случаю смазочной прослойки, нанесившейся на поверхность стекла по методу, описанному на стр. 130—133, в виде мультимолекулярного слоя кислого бариевого или кальциевого мыла стеариновой кислоты.

Опыты показали, что при любом числе нанесенных монослоев получаются прямые, т. е. двучленный закон строго приложим. Оказалось, далее, что с увеличением

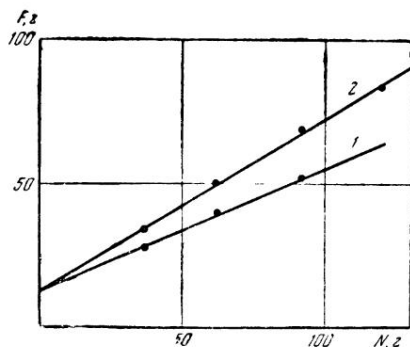


Рис. 72. Зависимость силы трения от нагрузки для резины по металлам (по Ратнеру)

1 — по стали; 2 — по сплаву, содержащему алюминий

числа нанесенных слоев n получающиеся прямые, строго сохраняя свою параллельность, сдвигаются вниз (рис. 73 и 74). Впрочем, смещение этих прямых вниз невелико

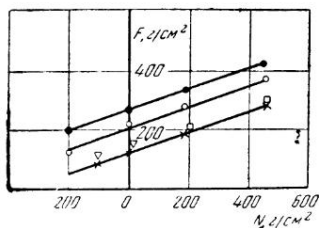


Рис. 73. Зависимость силы трения от нагрузки для парафина по стеклу. Смазка — мультимолекулярные слои кислого кальциевого мыла с числом слоев:

● — 1; ○ — 3; □ — 11; × — 31; ▽ — 61

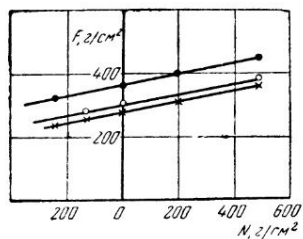


Рис. 74. Зависимость силы трения от нагрузки для парафина по стеклу. Смазка — мультимолекулярные слои кислого бариевого мыла с числом слоев:

● — 3; ○ — 7; × — 21

и наблюдается только при нанесении первых 5—7 монослоев. Дальнейшее увеличение числа слоев никакого влияния на силы трения и положение соответствующей прямой графика не оказывает.

Полученные результаты приводят к очень важным выводам о строении и свойствах подобных мультимолекулярных слоев и о механизме их смазочного действия; одновременно они служат еще более убедительным обоснованием двучленного закона трения и теории, приведшей к его выводу. Параллельное смещение прямых в начале утолщения смазочной прослойки может быть истолковано (на что впервые обратил наше внимание П. А. Ребиндер) как результат ослабления сил молекулярного притяжения, по мере того как с утолщением смазочной прослойки плоскость скольжения удаляется от поверхности стекла. В самом деле, при наличии только смазочного м о н о с л о я на сопротивление скольжению оказывают влияние равнодействующие силы притяжения между парафином (или металлом Вуда), с одной стороны, и стеклом вместе с покрывающим его монослоем стеарата бария (или кальция), с другой. Уменьшение второго члена в двучленном законе трения с утолщением смазочной прослойки можно объяснить только тем, что плоскость скольжения удаляется от поверхности стекла, что ослабляет суммарную силу молекулярного взаимодействия между поверхностями, разделенными этой плоскостью скольжения, вследствие удаления поверхности стекла на большее расстояние h (рис. 75).

После того как толщина смазочной прослойки достигнет толщины 5—7 монослоев, т. е. превысит 0,00001 мм, влияние молекулярных сил, исходящих от стекла, становится настолько малым, что дальнейшее увеличение толщины смазочной прослойки никакого влияния на силу молекулярного притяжения N_0 в двучленном законе трения не оказывает. Изменчивость второго члена в двучленном законе указывает на то, что с изменением толщин смазочной прослойки плоскость скольжения действительно удаляется от поверхности стекла, в чем иначе нельзя было бы быть уверенным.

Если сопоставить этот вывод с постоянством наклона прямых на нашем графике, свидетельствующем о постоянстве коэффициента «истинного» трения μ , то придем к важному следствию, что коэффициент «истинного» трения совершенно одинаков, в каком бы месте мультимолекулярного смазочного слоя ни располагалась плоскость скольжения. Этот вывод подтверждает независимость коэффициента «истинного» трения от сил молекулярного притя-

жения и одновременно свидетельствует о высокой однородности строения подобных мультимолекулярных слоев в их толще.

Не менее интересный результат получен при другом способе введения смазочной прослойки. Смазочное вещество (стеариновая или олеиновая кислота) добавляли

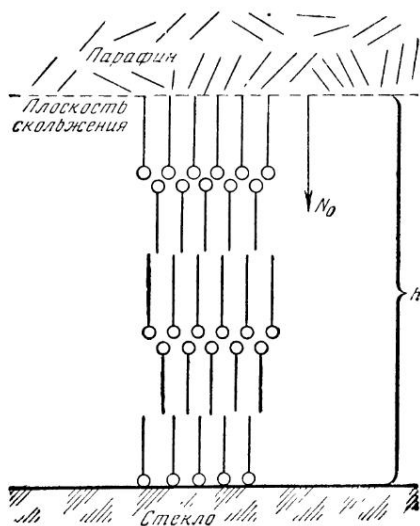


Рис. 75. Смазочное действие мультимолекулярного слоя стеарата бария между стеклом и парафином

в расплавленный парафин и, перед тем как его охладить до затвердения, выжидали некоторое время, необходимое для того, чтобы введенные в парафин поверхностно-активные молекулы успевали адсорбироваться на поверхности стекла. После этого парафин охлаждался, и измерялась сила трения при разных нагрузках. В разных опытах менялось процентное содержание C вводимой в парафин жирной кислоты.

Для всех концентраций кислоты получились (рис. 76) прямые линии, однако не параллельные, а расходящиеся веером и при своем продолжении пересекающиеся в точке, лежащей на оси абсцисс слева от начала координат. Таким образом, мы видим, что здесь получился результат

совершенно иного характера, чем на рис. 73 и 74. Коэффициент трения μ меняется в зависимости от концентрации кислоты, а второй член закона трения ($N_0 = p_0 S_0$), пропорциональный удельной силе прилипания (на единицу площади), остается постоянным.

Однако этот результат делается совершенно понятным, если мы вспомним то, что говорили об образовании

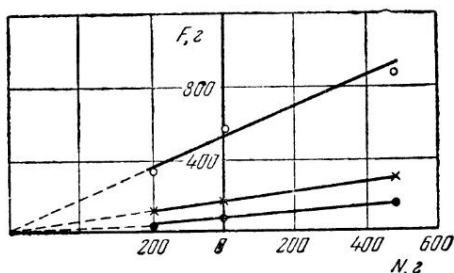


Рис. 76. Зависимость силы трения от нагрузки для парафина по стеклу. Смазка — равновесные адсорбционные слои олеиновой кислоты, растворенной в парафине в концентрации

● — 5%; × — 2%; ○ — 1%;

адсорбционных слоев из растворов. С изменением объемной концентрации поверхностно-активного вещества меняется количество молекул в адсорбционном слое, т. е. степень его заполнения, а следовательно, и строение этого слоя. Можно полагать, что при сравнительно больших заполнениях адсорбционного слоя дальнейшее его заполнение меняет не столько его толщину, которая определяется размерами соответствующих молекул, сколько прочность слоя, способность сопротивляться внедрению инородных молекул между хвостами молекул адсорбционного слоя.

Если принять, что в рассматриваемом случае плоскость скольжения лежит на границе между хвостами молекул адсорбционного слоя, торчащими наружу, и молекулами затвердевшего парафина, то результаты этих экспериментов становятся понятными. С ростом концентрации поверхностно-активного вещества от таких ее значений, при которых адсорбционный слой уже в основном заполнен, силы молекулярного притяжения, действующие по-

перек плоскости скольжения на границе адсорбционного слоя и парафина, сохраняются постоянными (т. е. $N_0 = \text{const}$). Однако коэффициент трения при росте концентрации поверхностно-активного вещества, вводимого в парафин, меняется, так как зависит от прочности связи между соседними молекулами адсорбционного слоя, определяющей способность этих молекул изгибаться и наклоняться, подобно тому, как зависит от прочности этой связи сопротивление введению инородных молекул, что мы отметили выше.

Возможен и другой, хотя и менее строгий, способ проверки двучленного закона трения, состоящий в измерении трения мягкого пластичного тела. Прижав его к твердой плоской поверхности, мы обеспечим большую площадь контакта, которая останется в основном неизменной и после уменьшения нагрузки. Таким образом, если измерять силу трения при разных постепенно уменьшающихся нагрузках, то мы должны получить прямолинейную зависимость, вытекающую из двучленного закона трения (рис. 77, непрерывная прямая BA).

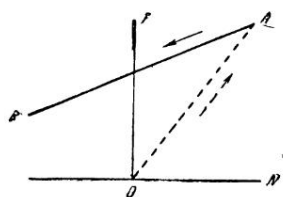


Рис. 77. Закон трения при пластичном контакте

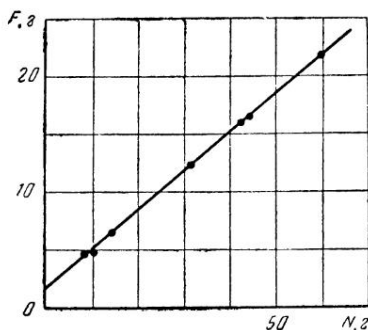


Рис. 78. Зависимость силы трения туалетного мыла с желчью по никелю от нагрузки при номинальной площади контакта $3,6 \text{ см}^2$ (по Воляровичу и Толстому)

Если измерять трение для подобного случая при нагрузках, постепенно возрастающих от нуля, то получается прямая OA другого наклона, проходящая через начало координат (пунктирная прямая на рис. 77). Это

объясняется тем, что в этом случае по мере возрастания нагрузки происходит пластичное течение мягкого вещества около участков действительного контакта. Такое течение происходит до тех пор, пока удельная нагрузка на единицу площади действительного контакта N/S_0 вследствие распределения общей нагрузки N на большую площадь S_0 не упадет до величины p'_0 , ниже которой дальнейшее пластичное течение материала делается невозможным. Таким образом, при постепенном возрастании нагрузки площадь действительного контакта S_0 , приспособляясь к ней, меняется согласно формуле

$$S_0 = \frac{N}{p'_0} \quad (47)$$

пропорционально нагрузке¹ N . В этом случае второй член в двучленном законе трения (45) становится пропорциональным внешней нагрузке N , что объясняет приложимость закона Амонтона, так как при этом формула (45) превращается в формулу

$$F = \mu \left(1 + \frac{p_0}{p'_0} \right) N. \quad (48)$$

На этом примере мы убеждаемся снова, что измерения силы трения с целью выбора между законом Амонтона и двучленным законом трения в обычных условиях, не обеспечивающих постоянства площади действительного контакта, могут не дать правильного ответа на поставленный вопрос. Кажущееся подчинение одночленному закону Амонтона может в действительности быть обязанным строгой приложимости двучленному закону трения.

В связи с этим замечанием интересно отметить попытку, сделанную К. Терцаги и значительно позднее английскими физико-химиками И. Бикерманом и Е. Райдиллом, а еще позднее Ф. Боуденом, объяснить закон Амонтона одним только изменением площади реального контакта с нагрузкой. В самом деле, если предположить, что площадь действительного контакта пропорциональна нагрузке, а

¹ Этот вывод экспериментально доказан И. В. Крагельским для случая пластичных металлов, например свинца, путем измерения площади контакта при помощи определения сопротивления электрическому току, оказываемого площадками действительного контакта, а также другими способами.

сила трения — площади действительного контакта, то закон Амонтона становится очевидным.

Однако эта точка зрения решительно опровергается экспериментами В. П. Лазарева. Кроме того, И. В. Крагельский показал, что для таких упругих металлов, как сталь, площадь истинного контакта меняется не пропорционально нагрузке. Таким образом, обоснование закона Амонтона, данное Терцаги, заведомо неприменимо к упругим металлам.

В случае трения легко деформируемых и «мягких» тел по весьма гладким поверхностям (концевые калибры, оптически полированные стекла) с повышением удельной нагрузки до предела текучести площадь действительного контакта становится равной площади кажущегося контакта, т. е. достигает предела, после которого перестает меняться. В то же время опыт показывает, что и после достижения этого предела сила трения продолжает возрастать, но уже строго линейно.

Наиболее наглядно и строго существование двух членов в законе трения доказывают опыты Ю. П. Топорова и М. Ф. Футран, сравнивавших силу трения (при одинаковых нагрузках и одинаковой природе трущихся тел) для четырех случаев:

1) сухое трение при большой деформируемости участка контакта (что достигалось приданием специальной формы одному из тел);

2) сухое трение при малой деформируемости участка контакта;

3) то же, что в случае 1, но в присутствии смазочного монослоя;

4) то же, что в случае 2, но в присутствии смазочного слоя.

Если бы в законе трения отсутствовал член с площадью реального контакта, то трение в случаях 1 и 2 было бы одинаково. Опыт показал, что, наоборот, трение заметно больше в случае 1.

Если бы в законе трения отсутствовал член с нагрузкой, т. е. если бы был прав Терцаги, то, поскольку монослой не может влиять на площадки контакта, отношение силы трения в случае 1 к силе трения в случае 2 было бы такое же, как отношение сил трения в случаях 3 и 4. Опыт показал обратное — последнее отношение близко к единице.

Наконец, наиболее жесткому испытанию двучленный закон трения был подвергнут в опытах А. С. Ахматова и Лю Чао-цзена с трением плоских калибров при самой различной толщине смазочной прослойки (а также в ее отсутствии). Было показано, что величина N_0 , найденная из измерений силы трения при разных нагрузках графическим путем (легко понятным из рис. 76 и относящегося к нему текста), с точностью до нескольких процентов совпадает с силой прилипания N_0 , измеренной непосредственно.

Все эти опыты опровергают теорию Терцаги и ясно показывают, что сила трения зависит от двух слагающих: члена, зависящего только от нагрузки, а не от площади контакта, и члена, зависящего от площади действительного контакта, а не непосредственно от нагрузки. Двучленный закон трения, строго обоснованный опытным путем, четко выявляет действительную зависимость сил трения от сил молекулярного притяжения и площади действительного контакта.

Применимость двучленного закона трения к внутренним скольжениям в пластичных телах

Если усилие, стремящееся вызвать изменение формы, в простейшем случае сдвиг, пластичного тела превышает некоторое критическое значение, то развивающаяся пластичная деформация сопровождается образованием так называемых плоскостей скольжения. Скольжение по таким плоскостям по своему молекулярному механизму во многом аналогично скольжению при внешнем трении. В частности, как было показано автором еще в 1934 г., в теории трения к «внутренним» скольжениям должен быть применим двучленный закон

$$\tau = \frac{F}{S} = \mu (p + p_0),$$

где S — площадь, по которой преодолевается сопротивление скольжению; $p = \frac{N}{S}$ — давление, действующее на плоскость скольжения перпендикулярно к ней; $p_0 = \frac{N_0}{S}$ — сила, необходимая для разделения тела по плоскости скольжения, т. е. прочность тела на разрыв; τ — прочность тела на сдвиг.

Очевидно, что ту же формулу можно написать так:

$$\tau = \mu p + \tau_0, \quad (48')$$

где $\tau_0 = \mu$; p_0 — прочность на сдвиг при отсутствии давления на плоскость скольжения.

Зависимость эта, выведенная автором в 1934 г., была через восемь лет после этого найдена Бриджменом непосредственно на основании опытов. Некоторые авторы, как например И. В. Крагельский, склонны, однако, забывать, что эта формула получила еще до Бриджмена теоретическое обоснование, указывающее на ее родство, и притом не только формальное, но и по существу, по природе лежащего в ее основе механизма, с двучленным законом трения. Таким образом, подобные ошибки мешают установлению общей и потому более плодотворной точки зрения на явления скольжения, будь то внутри или на границе двух твердых тел. Поскольку при граничной смазке преодолевается также сдвиговая прочность, но только смазочной прослойки, развиваемый автором общий подход к обоим видам скольжения указывает на аналогию сухого и граничного трения, и, наоборот, противоположная точка зрения, проводящая между ними грань, не вытекает из существа дела.

Повторяем, и двучленный закон трения и двучленный закон сдвиговой прочности являются частными случаями единого двучленного закона трения-скольжения. В первом случае чаще (но не всегда) член, не зависящий от давления, является поправочным, во втором случае — обычно, наоборот, основным. Следует отметить как курьез, что Г. И. Епифанов, экспериментально исследуя явления резания металлов и придя к закономерности вида

$$\tau = \tau_0 + \mu p, \quad (48'')$$

настойчиво в многочисленных статьях старается доказать не только отличие формулы (48'') от двучленного закона трения, но и вытекающую в связи с этим неправильность последнего.

При этом Г. И. Епифанов пытается найти, как ясно из сказанного выше, несуществующие различия физического смысла членов, стоящих в правой части обеих формул (48') и (48''). Таким образом, формула Епифанова (48'') ничем, кроме перестановки слагаемых, не отличается от закона (48'), выведенного автором этой книги более чем на 25 лет ранее.

Приложения двучленного закона трения. Трение шероховатых поверхностей

Двучленный закон трения имеет не только теоретическое значение, проливая свет на природу сил трения между твердыми телами, но и большое прикладное значение. Его следует применять там, где нужно рассматривать условия равновесия между двумя телами, прилегающими на большой площади действительного контакта, например при строительстве плотин на стальном основании, а также при расчете прочности клеевых сочленений, могущих подвергаться усилиям, не только перпендикулярным к поверхности контакта, но и параллельным к ней. В этом случае двучленный закон трения устанавливает, что отношение сил, действующих в обоих направлениях при отрыве или соответствующем сдвиге, равно коэффициенту трения μ .

Плодотворность двучленного закона трения ясно показана также в работах И. В. Крагельского, приложившего его, наряду с некоторыми другими общими положениями, к выводу зависимости коэффициента трения твердых тел от их механических свойств, нагрузки и шероховатости.

Рассмотрим, следуя Крагельскому, отдельно случай пластичных металлов (свинец) и металлов упругих (сталь или чугун). Одновременно учтем наличие микрошероховатости, относительно грубой по сравнению с той молекулярной шероховатостью, которую мы рассматривали при обосновании двучленного закона трения. Когда две такие шероховатые плоские поверхности приходят во взаимный контакт, то в первую очередь наступает соприкосновение между наиболее высокими выступами, или гребешками, этих поверхностей. При дальнейшем увеличении нагрузки эти выступы деформируются и в контакт вступают другие, более низкие выступы. Таким образом, и число соприкасающихся выступов, и распределение нагрузки на них будут меняться с изменением суммарной нагрузки.

Если бы сила трения не зависела от площади действительного контакта, а определялась бы, согласно закону Амонтона, только нагрузкой, наличие и характер указан-

ных микроплощадок действительного контакта и их изменение с нагрузкой не играли бы никакой роли. Но мы видели, что площадь действительного контакта играет роль; суммируя силы трения, действующие на отдельных площадках контакта, мы находим всю силу трения.

Очевидно, что если к трению на каждой микроплощадке контакта считать приложимым двучленный закон трения¹, то общая сила трения также может быть представлена суммой двух членов точно такого же вида, как и в самом двучленном законе трения. Необходимо только в качестве площади действительного контакта подразумевать суммарную площадь S_0 всех микроучастков действительного контакта. Для пластичных металлов при этом получается, что действительная площадь контакта пропорциональна полной нагрузке N , т. е. приложима формула (47). Отсюда для расчетного коэффициента трения, равного отношению силы трения F к нагрузке N , из уравнения (48) получается величина, не зависящая от нагрузки:

$$\mu' = \mu \left(1 + \frac{P_0}{P'_0} \right) = \text{const.}$$

Таким образом, для пластичных металлов строго выполняется закон Амонтона; их расчетный коэффициент трения μ' не зависит ни от нагрузки, ни от характера шероховатости поверхности металлов.

Иной результат получается для упругих металлов. В этом случае площадь каждого микроучастка металла увеличивается с ростом приходящейся на этот участок доли нагрузки не прямо пропорционально [как по формуле (47)], а медленнее. В связи с этим суммарная площадь

¹ Очевидно, что вследствие одинаковой формы закона трения при внешних и внутренних скольжениях мы получим одинаковую конечную формулу (за исключением численных значений ее констант) независимо от того, происходит ли скольжение на рассматриваемых микроплощадках между обоими телами или внутри одного из них, под поверхностью контакта, что случается, как правило, если одно из тел значительно «мягче» другого. Поэтому нет существенного различия по форме между выводами молекулярной теории трения (первый случай) и молекулярно-механической теории трения (по терминологии И. В. Крагельского). Различие в существе явлений И. В. Крагельским искусственно преувеличено игнорированием молекулярного механизма, лежащего в основе теоретического обоснования формулы (48').

действительного контакта не может быть вычислена, если известна только нагрузка и упругие свойства материала; необходимо еще знать характер шероховатости и оценить относительное число выступов разной высоты.

Точные подсчеты показывают, что в результате закон Амонтона нарушается и коэффициент трения (расчетный) делается зависимым от нагрузки, шероховатости и упругих свойств материала. При этом оказывается, что с увеличением нагрузки коэффициент трения должен проходить через максимум, после которого он снова убывает.

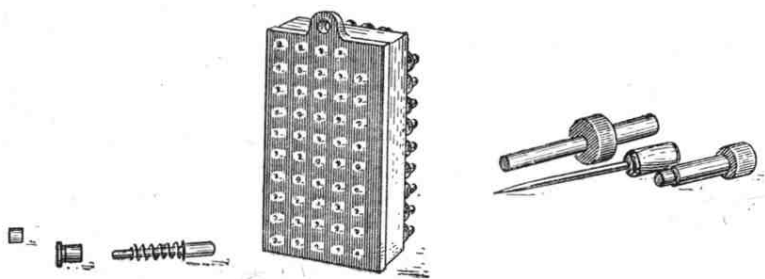


Рис. 79. Модель шероховатой поверхности (по Крагельскому)

Наиболее интересным и неожиданным следствием расчетов является то, что с увеличением шероховатости (в определенных пределах) коэффициент трения не только не увеличивается, но, наоборот, падает. Этот парадоксальный результат объясняется уменьшением площади действительного контакта с ростом шероховатости.

Все эти следствия теории были И. В. Крагельским подтверждены на опыте и положены в основу дальнейших практических выводов.

Для наглядной иллюстрации и проверки выводов теории И. В. Крагельский построил простую модель шероховатой поверхности. Эта модель (рис. 79) состоит из 50 шариков диаметром 3 мм, укрепленных в плите, опорой которой они в результате этого и являются. Устройство для крепления шариков пояснено на рис. 80. Каждый шарик 1 укреплен на наконечнике 2 стержня 3.

Каждый стержень перемещается вверх — вниз, проходя через отверстие в винте 4, который можно ввинчивать в плиту 5 на различную глубину. Это позволяет регулировать давление пружины 6 на наконечник 2

и изменять глубину положения шарика, которое он занимает при отсутствии внешнего воздействия. Устанавливая положения различных шариков на неодинаковой глубине, мы получаем как бы модель шероховатой поверхности с выступами различной высоты. Ставя плиту так, чтобы она опиралась шариками на горизонтальную поверхность, и кладя на нее различные грузы, можно изучать зависимость трения от нагрузки и характера «шероховатости».

Эта модель позволяет убедиться в том, что, когда все шарики выдвинуты одинаково и как бы имитируют плоскую поверхность, коэффициент трения значительно больше, чем когда шарики выдвинуты не одинаково, а также в том, что коэффициент трения модели при увеличении нагрузки переходит через максимум и затем, падая, достигает постоянного значения.

Все эти неожиданные явления объясняются зависимостью числа шариков, находящихся в контакте с опорной плоскостью, а следовательно, и площади истинного контакта от нагрузки и характера «шероховатости».

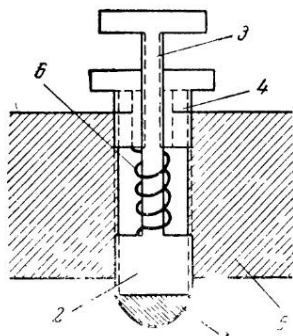


Рис. 80. Крепление сферических опор модели

Отклонения от закона Амонтона

Закон Амонтона не принадлежит к числу особо точных законов. Обычно наблюдаются заметные отклонения от него. Кроме того, коэффициент трения, измеренный опытным путем, сильно зависит от факторов, не предусмотренных в формулировке этого закона. Поэтому, в частности, не легко бывает получить воспроизводимые значения коэффициента трения. Коэффициент трения весьма чувствительно зависит от состояния поверхности (даже от ее весьма незначительных загрязнений). Поэтому объективная ценность приводимых в справочниках значений коэффициентов трения различных металлов друг по другу, а тем более коэффициентов трения таких тел, как дерево или кожа, вызывает законное сомнение. Однако на все это в инженерной практике обычно не обращают

должного внимания, недостаточно критически пользуясь табличными цифрами.

Одним из факторов, которые могут существенно влиять на коэффициент статического трения твердых тел, является продолжительность контакта. С увеличением продолжительности неподвижного контакта, предшествующего измерению, статическое трение, а следовательно и его коэффициент возрастают. Это объясняется тем, что в местах контакта под действием высоких напряжений, вызванных внешней нагрузкой, развиваются пластические деформации, ведущие к увеличению площади фактического контакта.

Как мы видели выше (стр. 152—155), возрастание площади фактического контакта может увеличивать силу трения покоя, чем нарушается закон Амонтона, отрицающий влияние площади контакта на трение. Впрочем, в подобных случаях (например при сдавливании свежеочищенных свинцовых плоскостей) наблюдаются и более прямые нарушения закона Амонтона, выражающиеся в том, что сила трения перестает меняться пропорционально нагрузке. Обе соприкасающиеся поверхности можно расположить так, чтобы сила тяжести P действовала параллельно поверхности контакта и, следовательно

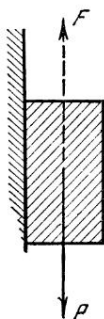


Рис. 81. Трение в отсутствие нагрузки

нагрузка как бы исчезала (рис. 81). Скольжения при этом не наступает, что указывает на наличие силы трения покоя F , несмотря на отсутствие силы, прижимающей оба тела одно к другому. Более того, можно повернуть оба тела так, чтобы сила тяжести стремилась оторвать их одно от другого и все же отрыва не происходило.

На возражение, что здесь мы имеем явление прилипания, а не трения, следует ответить вопросом: как можно различать силы трения или прилипания в том случае, когда действующая сила (в нашем случае сила тяжести) стремится вызвать перемещение одного тела вдоль поверхности другого? Очевидно, что называть в одних случаях сопротивление этому движению статическим трением, а в других случаях, которые от первых четко отграничить невозможно, прилипанием, было бы полнейшим произволом, что привело бы к путанице не только терминов, но и понятий.

Единственно законная формулировка явлений этого рода заключается в том, что появление заметных сил прилипания всегда сопровождается отклонением от закона Амонтона пропорциональности силы трения нагрузке, причем, согласно двучленному закону трения, общей причиной обоих явлений служит значительная площадь действительного контакта. Отсюда ясно, что зависимость коэффициента трения от продолжительности контакта может быть связана с изменением характера контакта со временем.

Увеличение площади контакта, сопровождаемое одновременным появлением сил прилипания и отклонений от закона Амонтона, может наблюдаться не только в результате пластичных деформаций внешней формы обоих тел вблизи точки контакта, но и вследствие присущей атомам и молекулам всех тел подвижности. Подвижность атомов металлов, особенно заметная при приближении к температуре плавления, приводит как бы к холодному свариванию металлов, когда из атомов, мигрирующих вдоль поверхностей металлов по направлению к зоне контакта, образуются своего рода мостики. Такая направленная миграция атомов, в других условияхдвигающихся совершенно беспорядочно, без какого-либо предпочтительного направления в пространстве, объясняется силами притяжения, действующего между любыми атомами на достаточно близких расстояниях. Эти силы притяжения особенно велики там, где накладывается одно на другое, взаимно усиливаясь, притяжение обоих соприкасающихся тел, т. е. вблизи точек контакта.

Подобные явления холодного сваривания играют существенную роль в изготовлении массивных металлических блоков из металлических порошков (порошковая металлургия), а также в методе холодной сварки швов, разработанном академиком Е. О. Патеном.

Другой метод холодной сварки металлов при сдавливании, сопровождающемся совместным пластическим течением свариваемых металлов, был разработан С. Б. Айнбиндером и Э. Ф. Клоковой.

В этом случае «полный» металлический контакт устанавливается не в результате миграции атомов, а вследствие деформации поверхностей и разрыва окисных пленок (вместе с покрывающими последние загрязнениями). Аналогичные явления холодного сваривания

наблюдаются и при контакте весьма чистых и плоских стеклянных пластинок, а также чрезвычайно легко обнаруживаются при контакте таких веществ, как сырой (не вулканизованный) натуральный или синтетический каучук. Зависимость этого явления от особенностей молекулярного строения каучука сказывается в том, что при одинаковой пластичности и сходимости других механических свойств синтетический каучук характеризуется значительно меньшей «липкостью», чем натуральный. Это обстоятельство затрудняет технологические процессы, в которых требуется быстрое и достаточно прочное слипание полосок сырого каучука при их наложении.

По Марку и Юзефовичу (США), самослипание (аутогезия) каучуков и других полимеров объясняется гибкостью их молекулярных цепей, непрерывно меняющих свою форму вследствие теплового движения.

Это приводит к взаимному внедрению и переплетанию концов цепей, находящихся на поверхности складываемых образцов. В опытах С. С. Воюцкого это предположение было детально обосновано и применимо к истолкованию влияния на прочность самослипания продолжительности контакта, температуры, давления и рода полимера. Подобная же взаимная диффузия и переплетение были применены С. С. Воюцким с сотрудниками и автором совместно с С. К. Жеребковым и А. М. Медведевой к объяснению слипания неодинаковых полимеров, например каучука натурального и бутадиенового (искусственного).

Давление может облегчить возрастание сил прилипания даже для весьма упругих и эластичных тел, не обладающих заметной пластичностью. Понятно поэтому и применение высоких давлений для получения блоков из металлических порошков. Одновременное применение нагрева (в порошковой металлургии, при сваривании стеклянных пластинок и блоков и др.) ускоряет сваривание благодаря увеличению подвижности атомов и молекул¹. При достаточно высоком подъеме температуры говорят уже о «спекании».

¹ Изменение формы мелкокристаллических тел, получающиеся при этом, можно наблюдать микроскопически (Ш. И. Лукирский), а еще лучше — при помощи электронного микроскопа (А. Б. Шехтер).

Демонстрация зависимости силы трения от продолжительности контакта

Рост коэффициента трения с увеличением продолжительности контакта играет существенную роль во многих весьма распространенных явлениях. Для иллюстрации одного из них сделаем крайне простой опыт. Возьмем какую-нибудь гладкую палку или линейку, или же стеклянную трубку длиной 0,5—0,7 м и положим ее

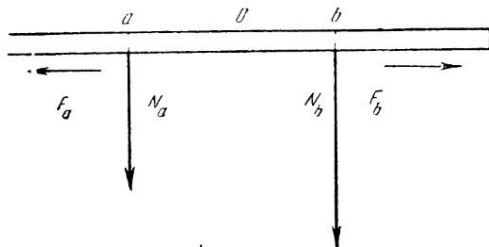


Рис. 82. Опыт с палкой, демонстрирующий, что трение движения меньше трения покоя

горизонтально на двух вытянутых пальцах обеих рук. Будем постепенно сближать пальцы между собой. Если бы было строго приложено закон Амонтона и если бы коэффициент трения при малых скоростях скольжения равнялся коэффициенту трения в состоянии покоя, то легко сообразить, что центр тяжести палки O (рис. 82) должен был бы все время находиться в точности посередине между обоими опорами a и b . В противном случае нагрузки N_a и N_b , приходящиеся на оба пальца, были бы неравными, большая нагрузка приходилась бы на тот палец, который ближе к центру тяжести тела, а следовательно, и силы трения F_a и F_b в обеих точках опоры различались бы между собой. Такое различие заставило бы палку перемещаться в сторону действия большей силы трения до положения, при котором эти силы уравнились бы. При медленном сближении пальцев палка всегда успевала бы занять положение, уравнивающее обе силы трения, а следовательно, и обе нагрузки в точках контакта. Сближая оба пальца до взаимного контакта, мы могли бы этим способом найти центр тяжести палки.

Однако при попытке воспроизвести этот опыт в действительности мы получаем неожиданно совершенно иной

результат. Палка сначала сохраняет состояние покоя относительно одного пальца, потом начинает по нему скользить, одновременно приходя в состояние покоя относительно другого пальца.

Таким образом, палка участвует в движении то одного, то другого пальца, а центр тяжести, оставаясь все время между обеими точками опор, движется, приближаясь то к одной из них, то к другой.

Это на первый взгляд загадочное поведение палки объясняется следующим образом. Если вначале происходит скольжение между палкой и одним из пальцев, то коэффициент трения будет меньше в скользящей опоре. В процессе скольжения центр тяжести приближается к скользящей опоре, нагрузка на нее возрастает, что, наконец, компенсирует меньший коэффициент трения скольжения и доводит силу трения в подвижной опоре до величины силы трения о неподвижную опору.

Малейшее превышение силы трения скользящей опоры по сравнению с силой трения подвижной опоры приводит к тому, что эти опоры меняются ролями: палка перестает скользить относительно первого пальца и начинает двигаться относительно второго. Коэффициент трения по второму пальцу в результате начавшегося скольжения падает, и поэтому скольжение продолжается до тех пор, пока приближение скользящей опоры к центру тяжести не уравнивает силу трения по ней с силой трения по неподвижной опоре. После этого роль опор опять меняется и т. д.

Легко заметить, что чем медленнее сближаются пальцы в описанном опыте, тем на большее расстояние проскальзывает палка относительно очередной скользящей опоры до ее превращения в неподвижную опору. Это, очевидно, связано с тем, что по мере более медленного проведения опыта продолжительность контакта палки с неподвижной опорой возрастает, вследствие чего различие между трением покоя и трением движения увеличивается.

Скачки при трении

От курьезного эксперимента, рассмотренного в предыдущем параграфе, легко перейти к весьма распространенному явлению — так называемым скачкам при скольжении одного твердого тела относительно другого. Это явление можно, в частности, обнаружить, устроив маятник *A*,

способный качаться вокруг горизонтального цилиндрического стержня B , проходящего через цилиндрическую втулку C , связанную с маятником (рис. 83). Если привести горизонтальный стержень в быстрое вращение вокруг его оси, то можно убедиться, что способность маятника совершать правильные колебания под действием собственного веса не только не будет затруднена, но,

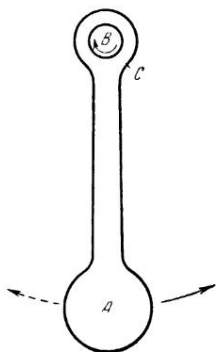


Рис. 83. Маятник на вращающемся опоре

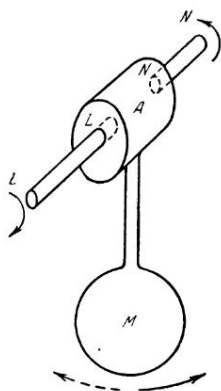


Рис. 84. Компенсация сил трения по методу Жуковского

наоборот, скорее будет облегчена нежели тогда, когда горизонтальный стержень неподвижен.

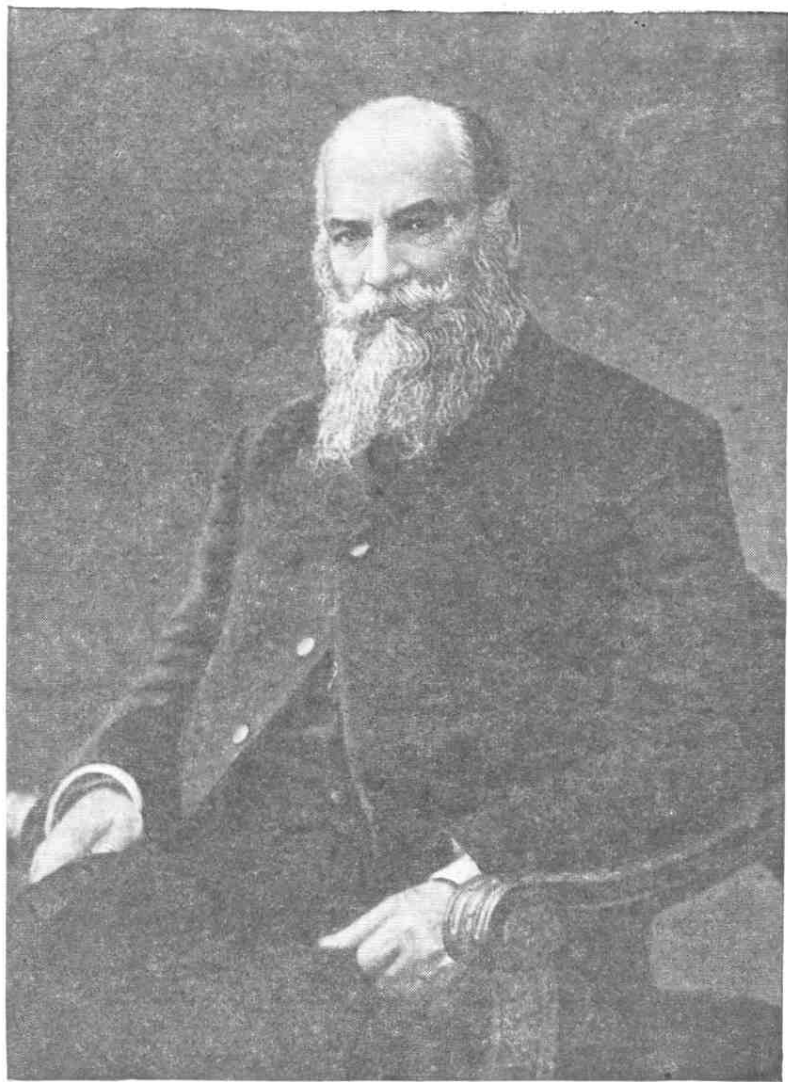
Единственное изменение в характере колебаний маятника будет заключаться в том, что срединное положение маятника между обоими крайними отклонениями будет смещено в сторону направления вращения стержня. Это, очевидно, объясняется действием силы кинетического трения между стержнем и втулкой маятника. Эта сила трения, накладываясь на силу тяжести, отклоняет от вертикали равновесное положение маятника. Таким образом, качание маятника происходит так, как если бы сила тяжести изменила свое направление.

Одновременно обращает на себя внимание резкое уменьшение затухания маятника. Маятник может качаться без повторного толчка значительно дольше, чем на неподвижном стержне. Это объясняется прежде всего тем, что

при быстром вращении стержня скорость относительного скольжения втулки и стержня сохраняет свое направление, вследствие чего сила трения, зависящая от скорости относительного скольжения, не меняет своего направления при изменениях направления движения маятника в пространстве, изменениях, происходящих в крайних — правом и левом — положениях маятника. При этом при больших скоростях вращения стержня изменение скорости скольжения в результате сложения или вычитания сравнительно небольшой скорости движения самой втулки маятника заметно не отражается на величине силы трения. Ввиду всего этого влияние силы трения с большой точностью сводится к кажущимся изменениям направления отвесного положения маятника.

Это явление заслуживает внимания, так как может быть использовано для практических целей уменьшения затухания маятника вследствие трения в опорах. Чтобы подобное устройство не вызывало изменения положения равновесия, удобно сделать так, чтобы втулка A маятника M опиралась на два параллельных стержня LL и NN , вращающихся с одинаковой скоростью в противоположных направлениях (рис. 84). В этом случае силы трения в обеих втулках будут действовать на маятник в противоположных направлениях и благодаря весьма близкой величине взаимно уничтожатся. Поэтому на такой опоре маятник будет качаться, испытывая сопротивление только со стороны окружающего воздуха. Впервые идея подобной компенсации сил трения была развита Н. Е. Жуковским.

Вернемся теперь к маятнику (см. рис. 83), втулка которого насажена на вращающуюся горизонтальную ось. При достаточном уменьшении числа оборотов этой оси мы получим новое явление полного прекращения затухания маятника (маятник Фроуда). Он будет совершать колебания, размах которых не будет уменьшаться со временем, сколько бы мы за ними ни наблюдали. Больше того, если мы остановим маятник вблизи его срединного положения, то он, предоставленный самому себе, под влиянием вращающейся опоры постепенно раскачается и придет в прежнее состояние движения с тем же размахом колебаний. Таким образом, трение об опору компенсирует сопротивление воздуха, стремящееся погасить колебания маятника.



Николай Егорович Жуковский (1847—1921)

На первый взгляд кажется, что это явление, напоминающее перпетуум-мобиле, противоречит закону сохранения энергии. Ведь наличие колебаний указывает на непрерывное развитие тепла трения. Однако закон сохранения энергии нисколько не нарушается. Легко доказать, что для вращения стержня с посаженным на него маятником нужна бóльшая затрата работы, чем для вращения стержня без маятника.

Каковы же, однако, причины, обеспечивающие существование таких колебаний? Впервые объяснение этого явления было предложено советскими физиками С. Э. Хайкиным и Л. Лисовским, учениками Л. И. Мандельштама, разработавшими математическую теорию такого рода колебаний. Физическое существо явления, однако, можно объяснить, не входя в детали математических расчетов. Согласно Хайкину и Лисовскому, явление наблюдается тогда, когда сила трения скольжения между вращающимся стержнем и втулкой маятника падает с увеличением скорости этого скольжения (так называемая падающая характеристика силы трения). В этом случае сила трения будет больше тогда, когда маятник движется от одного крайнего положения к другому в направлении, совпадающем с направлением вращения стержня, и меньше при движении в обратном направлении. Но при совпадающем направлении движения сила трения, с которой стержень действует на втулку маятника, совершает над этой втулкой положительную работу, стремясь увеличить энергию втулки с маятником. При обратном вращении маятника со втулкой (навстречу стержню) на том же протяжении сила трения меньше, и поэтому работа ее, отрицательная по знаку и стремящаяся уменьшить энергию маятника, будет численно меньше.

Таким образом, за каждый полный период колебания маятника получается некоторый выигрыш энергии, покрывающий потери энергии маятника на преодоление сопротивления его движению со стороны воздуха. Благодаря этому сначала размахи колебаний маятника растут до тех пор, пока параллельно возрастающие потери энергии от сопротивления воздуха колебаниям маятника не сделаются равными этому выигрышу энергии. После этого установятся колебания маятника с постоянной амплитудой.

Если мы будем рассматривать движение маятника не

относительно окружающих неподвижных предметов, а относительно вращающегося стержня, как будто участвуя в этом вращении, то колебательное движение маятника будет нам представляться движением непрерывно поступательным, но с периодически меняющейся скоростью. Скорость будет периодически то увеличиваться, то уменьшаться.

Такой же характер относительного движения мы будем наблюдать и тогда, когда поместим какое-нибудь тело (которое назовем ползунком) на движущуюся поверхность SS и будем удерживать его вблизи некоторого положения равновесия посредством, например, какой-нибудь пружины W (рис. 85). В этом случае по растяжению

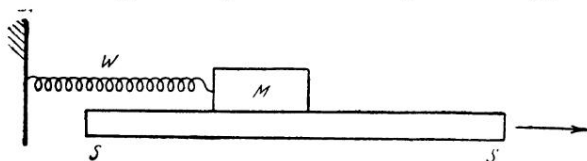


Рис. 85. Прибор для наблюдения скачков при трении скольжения

пружины мы можем пытаться непрерывно измерять и регистрировать силу трения скольжения между нашим ползунком и движущейся поверхностью. В практике лабораторных опытов удобно в качестве движущейся поверхности брать поверхность вращающегося диска. При подобного рода опытах почти всегда наблюдаются колебания тела, а следовательно, и колебания растяжения пружины.

Однако данное выше объяснение далеко не является общим. Часто наблюдаются аналогичные колебания или скачки при трении, когда оно с увеличением скорости не падает, а даже растет. Ключ к объяснению этих случаев дает следующее наблюдение. При малых скоростях вращения диска мы можем обнаружить важную особенность движения ползунка. Она заключается в том, что его скольжение временами прекращается и все движение ползунка относительно поверхности, расположенной ниже, сводится к поочередным проскальзываниям и остановкам. Аналогичное явление можно наблюдать и для случая маятника, посаженного на горизонтальную ось, при достаточно медленном ее вращении. Это явление аналогично

попеременному проскальзыванию палки относительно обоих пальцев в описанном выше опыте (см. стр. 173), и причина обоих явлений заключается в росте сил трения с увеличением продолжительности контакта.

Первая теория подобного скачкообразного скольжения была намечена Томасом и Блоком, поставившими это явление в связь с превышением статического трения над кинетическим, но без учета влияния на это превышение продолжительности неподвижного контакта, учтенного позднее А. Ю. Ишлинским и И. В. Крагельским.

Полная теория скачкообразного скольжения с учетом зависимости силы кинетического трения от скорости была развита автором книги совместно с Д. М. Толстым и В. Э. Пушем. Английский физик Боуден и его сотрудники, много занимавшиеся исследованием этого явления, приписывали скачки при трении металлов образованию металлических мостиков в результате сваривания металлов под влиянием тепла трения, развивающегося в точках контакта. Точным расчетом было доказано, что такое объяснение неправильно. В то же время оно неспособно объяснить скачки при трении неметаллических тел, таких, например, как дерево, и, наконец, оно является излишним, так как одна уже зависимость силы трения от продолжительности контакта способна количественно объяснить все особенности явления.

Оба механизма возникновения скачков при трении, рассмотренные Хайкиным и Лисовским, с одной стороны, Томасом и Блоком, с другой, реально осуществляются. Могут наблюдаться случаи, когда при одних условиях, например при малых скоростях скольжения, осуществляется второй механизм, а при более высоких — первый. Однако чаще определяющим фактором служит возрастание трения с продолжительностью покоя. В особенности это относится к сухому трению. Наоборот, признаком хорошей смазки служит полное исчезновение всяких скачков при трении.

Теория скачкообразного скольжения приводит к важным выводам о том, как избежать подобных скачков. Получающееся плавное скольжение необходимо для работы большинства станков, ряда механизмов и научных приборов.

**Влияние на трение механического зацепления.
Явление предварительных смещений
(эффект Верховского)**

До сих пор мы рассматривали молекулярный механизм трения, при котором сравнительно грубая шероховатость реальных тел учитывалась постольку, поскольку она способна влиять на площадь действительного контакта. Однако наряду с этим находящиеся на реальных телах выступы могут при определенных условиях и непосредственно влиять на силу трения. Эти выступы могут в одних случаях вызывать увеличение силы трения или сил, необходимых для сдвига поверхности вследствие взаимногогибания соприкасающихся выступов обеих поверхностей, усиливая влияние молекулярной шероховатости, которое было рассмотрено выше. В других случаях, при особой форме и сильном взаимном молекулярном сцеплении таких выступов, они не огибают друг друга и скольжение должно сопровождаться их разрушением. В этих условиях сила трения определяется прочностью подобных зацепляющихся микровыступов. Роль такого механического зацепления может быть велика только при сухом трении, при трении же смазанных поверхностей взаимное разрушение сцепляющихся выступов должно отступать на второй план.

Как показал И. В. Крагельский, помимо «механического зацепления», зависящего от внешней формы приведенных в соприкосновение поверхностей, существует другой тип механического зацепления, возникающего вследствие механической неоднородности поверхностных слоев твердого тела. При сдавливании твердого тела более твердый участок способен внедряться в более мягкий участок противоположной поверхности. В результате этого шероховатость поверхности при контакте может не только не сглаживаться, а, наоборот, возрастать. Параллельно с этим будет увеличиваться и влияние механического зацепления на трение.

Изложенное выше объяснение внешнего трения (стр. 141—150) приводит, в частности, к следующему выводу. Если на тело начинает действовать сила, стремящаяся вызвать его скольжение относительно подстилающей поверхности, то эта сила, пока она меньше рубежного значения силы статического трения, способна произвести только чрез-

вычайно малый сдвиг тела в новое положение равновесия. Этот сдвиг тела в направлении действующей силы должен одновременно сопровождаться небольшим подъемом верхнего тела относительно нижнего. С исчезновением действующей силы тело должно вернуться в первоначальное положение равновесия, т. е. происходит как бы «предварительное смещение» верхнего тела в направлении скольжения, носящее упругий характер. Впрочем, более детальное и точное рассмотрение этого явления на основании развитых выше модельных представлений показывает, что по мере роста сила, стремящаяся вызвать смещение тел, постепенно теряет упругий характер. Это выражается в том, что после устранения действующей силы тело не полностью возвращается в начальное положение равновесия, а оказывается несколько смещенным. Получается остаточное смещение, не исчезающее со временем. С увеличением действующей силы остаточное смещение должно составлять все большую долю всего предварительного смещения. Когда внешняя сила становится равной рубежному значению силы статического трения, предварительное смещение начинает увеличиваться пропорционально продолжительности действия этой силы, т. е. наступает непрерывное скольжение под ее влиянием.

Подобное явление предварительных смещений наблюдалось и изучалось рядом авторов, некоторыми из них еще до развития теории трения. Первым был советский исследователь В. Н. Верховский. В дальнейшем это же явление исследовали С. Э. Хайкин совместно с Л. Лисовским, А. Саломоновичем и А. В. Булгодаевым, И. В. Крагельский, П. Томлинсон, Ренкин и др. Этими исследователями для измерения весьма малых по величине предварительных смещений были применены различные высокочувствительные методы измерения. Одновременно менялись в очень широких пределах и условия опыта, в частности нагрузка и площадь контакта.

В особенности интересен метод С. Э. Хайкина с сотрудниками, основанный на идее академика Л. И. Мандельштама. В этом методе используется кварцевая пластинка, приводимая в колебания высокой частоты (до 100 000 колебаний в секунду), причем исследуется влияние на эти колебания воздействия другого тела, находящегося с кварцевой пластинкой в контакте. Этим путем можно

было выяснить характер сил, возникающих при весьма малых относительных смещениях обоих тел. Таким образом, примененный метод был в некотором смысле прямо противоположен методу непосредственного исследования предварительных смещений: тело заставляли смещаться из положения равновесия на определенное малое расстояние относительно другого тела и измеряли возникающие при этом силы противодействия. Все исследования, проведенные разными авторами, привели качественно к одному и тому же результату — доказательству существования предварительных смещений.

Исследования предварительных смещений породили надежду решить вопрос, зависит ли трение только от «молекулярной шероховатости», определяемой расположением и формой поверхностных молекул, или же наряду с этим существенную роль играют неровности более грубого порядка, определяемые шероховатостью поверхности, а в некоторой степени изменением ее при взаимном контакте поверхностей. В первом случае предварительные смещения не могли бы превышать расстояния соседних атомов или молекул, во втором — предварительные смещения могли бы иметь значительно большую величину.

Если для решения этого вопроса обратимся к результатам перечисленных работ, то убедимся, что однозначного ответа получить нельзя, так как предварительные смещения в разных опытах необычайно разнообразны по величине.

И. В. Крагельский обратил внимание на то, что при всем разнообразии полученных результатов имеется более или менее выраженный параллелизм между величиной предварительного смещения и применявшейся нагрузкой (табл. 2, стр. 184).

Зависимость величины предварительных смещений от нагрузки, по Крагельскому, объясняется тем, что с увеличением нагрузки увеличивается шероховатость тел в местах действительного контакта. Это в свою очередь, как мы уже указывали выше, есть следствие того, что поверхности реальных тел никогда не бывают однородными по твердости, в результате чего наиболее твердые участки одной поверхности, внедряясь под действием нагрузки в более мягкие участки другой, увеличивают ее шероховатость и создают взаимное зацепление обеих поверхностей.

Таблица 2

Влияние нагрузки на величину предварительного смещения

Автор	Материалы трущейся пары	Нагрузка, г	Предварительное смещение, см
Томлинсон . . .	Сталь — сталь	0,15	$4,5 \cdot 10^{-8}$
Саломонович . .	Алюминий—серебро	1,0	10^{-6}
Хайкин	Сталь — сталь	30—85	$10^{-7}—10^{-6}$
Ренкин	—	80	$4 \cdot 10^{-6}$
Крагельский . .	Сталь — сталь	5000	$0,5 \cdot 10^{-4}$
Верховский . . .	Латунь — сталь	70000	$(0,7 \div 1,8) \cdot 10^{-4}$
Крагельский . .	Сталь — сталь	75000	$3 \cdot 10^{-4}$

Для выступов больших размеров величина предварительного смещения может быть очень велика. Отсюда ясно, что предварительные смещения, как правило, имеют отношение не только к молекулярному механизму трения, так как они зависят от размеров микровыступов, влияние которых на коэффициент трения объясняется механическим зацеплением, но не молекулярным трением.

Этот вывод особенно убедительно подтверждается опытами Р. Томлинсона, изучавшего трение при вращении вокруг собственной оси стальной иглы, опирающейся на горизонтальную пластину. Учитывая весьма малую площадь контакта иглы с пластиной, которая получается при малой нагрузке, Томлинсон нашел, что явления, аналогичные предварительным смещениям, соответствуют смещениям, не превышающим междуatomных расстояний. В этом случае предварительные смещения, несомненно, связаны только с молекулярным механизмом трения. Следует также иметь в виду, что часть предварительного смещения может объясняться упругими деформациями выступов, находящихся в контакте под влиянием сдвигающей силы. Эти деформации также не могут играть основную роль в механизме внешнего трения.

Может случиться, что некоторые выступы при своем зацеплении не смогут взаимно обогнуть друг друга под влиянием силы тяги и скольжение может начаться только после разрушения этих выступов. Однако, если исключить маловероятный случай выступов с вертикальными стен-

ками, основную роль здесь должно играть молекулярное трение. Только оно способно помешать одному выступу обогнуть поверхность другого. Конечно, наряду с этим должна играть роль и прочность самих выступов.

Между тем прямой связи между силой трения и твердостью поверхности не наблюдается. Скорее, наоборот, мягкие тела обнаруживают более высокий коэффициент трения, что, возможно, связано с тем, что в этом случае под влиянием внешней нагрузки образуется большая площадь действительного контакта. Это указывает на относительно небольшую роль подобного «мертвого» зацепления выступов в явлениях трения.

Можно сформулировать такой вывод: механическое зацепление, по-видимому, неспособно создавать трение без молекулярного зацепления.

Трение движения твердых тел

Мы видели, что одним из основных законов внешнего трения твердых тел является существование статического трения. Если мы обратимся к законам трения движения при внешнем трении твердых тел, то основным отличием внешнего трения от внутреннего будет служить существенно иное влияние скорости на оба вида трения. Внутреннее трение, как мы видели (стр. 11—13), пропорционально скорости относительного скольжения двух тел, разделенных смазочной прослойкой (постоянной толщины). При внешнем же трении скорость обычно незначительно влияет на величину силы трения. В тех случаях, где это влияние обнаруживается, оно обычно может быть объяснено изменениями поверхности скольжения, зависящими от скорости скольжения и сопровождающих его процессов. Так, обычно процесс скольжения сопровождается нагреванием поверхности, окислением, разрушением поверхностных слоев, в том числе смазочных (если они есть), механическим повреждением (износом поверхности) и др. Поэтому неудивительно, что изменение скорости движения, меняя интенсивность указанных процессов, способно существенно изменять и сопротивление движению.

Опыт, однако, показывает, что если наблюдать кинетическое трение при не слишком больших скоростях и в таких условиях, когда характер и природа поверхности

трения в процессе скольжения не меняются, то и сила трения перестает зависеть от скорости.

Одним из удобных методов изучения зависимости сил трения и сопротивления среды от скорости является наблюдение затухания под влиянием этих сил колебаний маятника. Если подвесить груз (например, в виде шара) на тонкой нити к неподвижной опоре и привести его в колебания в определенной вертикальной плоскости, то можно наблюдать, что размахи колебаний, т. е. углы максимального отклонения нити от вертикального положения, будут постепенно убывать, уменьшаясь по определенному закону с каждым колебанием. Это явление «затухания» колебаний есть следствие наличия силы сопротивления воздуха движению маятника, приводящего к превращению энергии видимого движения в тепло. По мере уменьшения размаха (амплитуды) колебаний уменьшается средняя скорость движения и средняя сила сопротивления, от которой зависит быстрота затухания. Определив из наблюдений закон затухания, т. е. закон, согласно которому амплитуда колебаний убывает со временем, можно при помощи вычислений узнать, по какому закону меняется сопротивление с изменением скорости. Этим способом впервые начал изучать законы сопротивления воздуха движению тел Ньютон, который пришел к выводу, что сопротивление пропорционально квадрату скорости [см. формулу (8)].



Рис. 86. Схема наклонного маятника Ахматова

Чрезвычайно точные наблюдения затухания колебаний маятников проводил в Палате мер и весов Д. И. Менделеев.

А. С. Ахматову принадлежит плодотворная идея использовать наблюдения затухания для исследования и установления законов трения движения. Для этой цели он построил наклонный маятник (рис. 86), груз которого колебался не в вертикальной плоскости, а опираясь на

наклонную плоскость, по которой он скользил (или катился, когда его форма была шарообразной).

Как показывают расчеты, если сила трения с изменением скорости не меняется, амплитуда последовательных качаний убывает в арифметической прогрессии до полной остановки. Если же сила трения пропорциональна скорости, амплитуда уменьшается в бесконечно убывающей геометрической прогрессии. Опыты А. С. Ахматова показали, что в случае сухого трения или смазки стеариновой кислотой слоем тоньше $0,1 \text{ мк}$ затухание идет в арифметической прогрессии и, следовательно, трение от скорости не зависит (рис. 87). При повышении толщины слоя смазки трение начинает зависеть от скорости, приближаясь к пропорциональной зависимости.

Подобную пропорциональность силы трения скорости естественно приписать силам внутреннего трения в смазочной прослойке. Наоборот, независимость силы трения от скорости при малых толщинах смазочной прослойки

свидетельствует о том, что здесь вступает в действие иной механизм скольжения, подчиняющийся законам уже не внутреннего, а внешнего трения. Этот механизм скольжения характерен для граничной смазки.

Не всегда указанные особенности влияния скорости на внутреннее и внешнее трение при скольжении позволяют различить эти два случая. Например, при движении так называемого «ползуна» по плоскости (см. рис. 43) толщина зазора, образуемого при жидкостной смазке между ползуном и подстилающей поверхностью, сама зависит от скорости скольжения, возрастая вместе с ней. Поэтому сила трения будет возрастать не пропорционально скорости движения, а медленнее, так как сопротивление

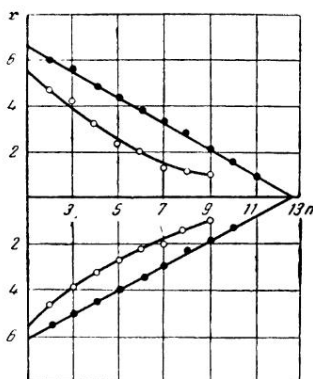


Рис. 87. Затухание колебаний маятника в присутствии граничного слоя стеариновой кислоты толщиной около 25 молекулярных слоев на стали:

● — при $18,5^\circ$, квазитвердое состояние слоя; ○ — при 85° , жидкое состояние слоя.

вязкой жидкости скольжению ползуна будет определяться средним градиентом скорости в зазоре между ними. В подобных случаях, когда скорость движения изменяется от очень малой до высокой, величина зазора между обоими телами должна измениться также от очень малой величины, при которой вследствие непосредственного контакта поверхностей между ними осуществляется внешнее трение, до величины, при которой наблюдается «жидкостное» трение, зависящее от внутреннего трения смазочной прослойки. Таким образом, с увеличением скорости скольжения должен наблюдаться переход от внешнего трения к внутреннему. Обычно это проявляется в значительном уменьшении коэффициента трения движения в некотором интервале скоростей. Однако и здесь положение оказывается значительно сложнее, чем можно было бы думать вначале, на чем мы остановимся в следующем параграфе.

Граничное трение и маслянистость

Если бы при некоторой определенной скорости скольжения происходил переход от внешнего трения к внутреннему, то коэффициент трения после установления режима жидкостного трения делался бы зависимым только от вязкости жидкости и скорости скольжения. Изменения же природы или характера смазочной жидкости, не сопровождающиеся изменением ее вязкости, не могли бы влиять на коэффициент трения. В противоположность этому, при режиме внешнего трения законы жидкостной смазки, заложенные Н. П. Петровым и другими учеными, были бы полностью неприменимы, коэффициент трения определялся бы в первую очередь такими свойствами смазочного вещества, как способность образовывать на твердых поверхностях адсорбционные слои, а также форма и расположение молекул в этих слоях. Однако в результате деятельности инженеров, стремившихся обеспечить хорошую смазку деталей механизмов, и исследователей, испытывавших действия различных смазочных веществ с целью подбора наилучших, накопилось много фактов, показывающих, что дело обстоит сложнее, чем это было изображено выше.

Оказывается, что только тогда, когда толщина смазочной прослойки, даже в наиболее узком месте, превышает

несколько десятых долей микрона, смазочное действие определяется исключительно вязкостью смазки и скоростью движения.

Если же понижение скорости скольжения, увеличение нагрузки или другие причины вызывают уменьшение толщины смазочной прослойки ниже указанного предела, наблюдаются отклонения от гидродинамической теории смазки. В этом случае говорят о граничном трении и граничной смазке.

Наиболее характерное отклонение от законов «жидкостной» смазки проявляется в том, что смазочное действие становится зависящим не только от вязкости смазочного вещества, но и от содержания в нем поверхностно-активных молекул, способных адсорбироваться на трущихся поверхностях. Присутствие таких молекул даже в очень малых количествах, не способных сколько-нибудь заметно менять вязкость смазки, может значительно снижать коэффициент трения и в то же время — что в практическом отношении часто бывает значительно важнее — резко уменьшать износ или повреждение поверхностей при трении.

Для объяснения наблюдаемых при этом явлений было введено понятие так называемой *маслянистости* смазочных средств. Под *маслянистостью* разумеют способность смазочного вещества (или совокупность его свойств, отличных от вязкости) обеспечивать лучшее смазочное действие в условиях, когда смазочная прослойка достаточно тонка и ее действие не определяется одной только вязкостью. Такое, достаточно растяжимое и неопределенное понятие *маслянистости*, конечно, не могло претендовать на объяснение существа дела, а было, скорее, констатацией наблюдавшихся фактов. В этом была и положительная сторона, так как в момент появления понятия «*маслянистость*» и даже долгое время спустя существо дела не могло быть разгадано и не следовало поэтому создавать на этот счет произвольных объяснений. Все же такое положение не могло удовлетворять ни инженеров, ни ученых, стремившихся разгадать природу *маслянистости*.

Появилась попытка более или менее формального сочетания механизма внутреннего, или жидкостного, трения с механизмом внешнего трения в присутствии адсорбционных слоев. Такое механическое сочетание этих двух

случаев трения с целью объяснения всей совокупности запутанных явлений встречалось и сейчас встречается в работах зарубежных исследователей. Эти исследователи считают, что если смазочная прослойка становится достаточно тонкой, то вязкость жидкости не способна своим «буферным» действием предохранить поверхности от всевозможных ударов и зацеплений. В отдельных местах зазоров между трущимися поверхностями выступы соседних поверхностей приходят в контакт. Трение приобретает смешанный характер, слагаясь из жидкостного трения в одних участках зазора и внешнего трения в других его участках.

Так как внешнее трение способно резко понижаться при образовании адсорбционных слоев, то открывается возможность объяснить, почему наряду с вязкостью сказывается влияние растворенных поверхностно-активных веществ. Точно так же понижение износа при введении в масло поверхностно-активных веществ можно объяснить защитным действием адсорбционных слоев.

Однако предложенное объяснение, несмотря на его кажущиеся естественность и простоту, не в состоянии объяснить ряд важнейших явлений. Одно из них состоит в следующем. Представим себе скольжение шара или другого тела с выпуклой поверхностью по подстилающей плоскости в присутствии смазочной жидкости. По наблюдениям Бика, Гивенса и Смита, по мере уменьшения скорости скольжения коэффициент трения вначале оказывается низким и только при скоростях порядка 1 см/сек , т. е. еще при скоростях, значительно более низких, чем обычно встречающиеся в современной технике, наступает резкий подъем коэффициента трения, указывающий на переход к внешнему трению. Фактически опыты Бика и его сотрудников проводились на так называемой четырехшариковой машине (рис. 88), в которой благодаря вращению нагруженного и зажато в держателе C стального шара A в гнезде B из трех других шаров, неподвижно закрепленных в патроне D , в местах контакта шаров возникает трение скольжения. Однако и в области больших скоростей, когда коэффициент трения весьма мал, не выше $0,001$, характер трения резко отличен от жидкостного. Это доказывается уже тем, что подобные низкие коэффициенты трения не наблюдаются при аналогичных скоростях скольжения в случае применения тщательно

очищенного вазелинового масла, не содержащего поверхностно-активных молекул. Введение небольшого количества олеиновой кислоты (доли процента) сразу же меняет картину, так как появляются области с весьма низким коэффициентом трения. Величина критической скорости, выше которой наблюдается этот особый режим трения, весьма сильно зависит от природы добавляемых поверхностно-активных веществ.

Одновременно было показано, что разница в коэффициентах трения при скоростях выше и ниже критической вызывается весьма резким различием толщин смазочной прослойки в обоих случаях. При малых скоростях толщина смазочной прослойки мала и электрический ток между обеими поверхностями проходит легко. При скоростях больше критической смазочная прослойка резко утолщается и прохождение электрического тока прекращается. Зависимость этого явления от добавления малого количества полярных веществ, не влияющих на вязкость масла, показывает особую природу явления, которая не может быть объяснена гидродинамической теорией смазки.

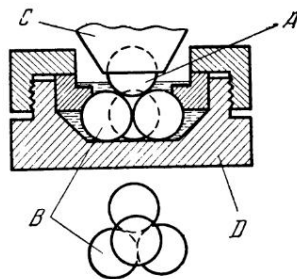


Рис. 88. Четырехшариковая машина для испытания смазочных материалов

Молекулярное клиновое (буферное) действие масляной пленки при кинетическом трении

В описанных выше опытах Бика и его соотрудников особенно следует отметить то обстоятельство, что смазочная прослойка, образующаяся при скоростях выше критической, несмотря на свою сравнительно большую толщину, способна выдерживать очень большое давление, развивающееся в зоне контакта между трущимися поверхностями. Давление это можно оценить, если учесть, что нагрузка, порядка десятков килограммов, распределялась по существу на очень малую площадь, так как речь шла о трении скольжения между шарами диаметром 1 см.

Подобное высокое «буферное» действие, или «грузоподъемность», масляной пленки лежит в основе другого явления, исследованного Е. Ф. Пичугиным и автором. Многие приборы позволяют оценивать микрошероховатость твердой поверхности, например стали, если проводить по поверхности *АА* алмазным или другим твердым острием *С* (рис. 89), связанным с прибором, регистрирующим вертикальные перемещения острия, совершаемые им при огибании микровыступов поверхности. При помощи подобных приборов — профилометров — можно

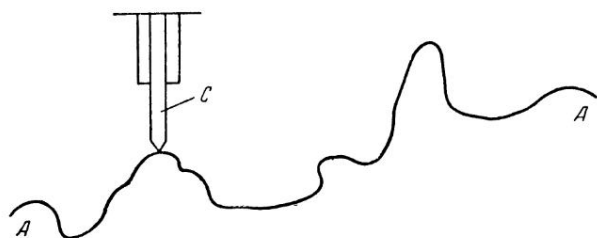


Рис. 89. «Ощупывание» поверхности профилометром

быстро получать и оценку средней высоты выступов поверхности.

В работе Е. Ф. Пичугина и автора было доказано, что средняя высота выступов поверхности, измеренная профилометром, заметно уменьшается, если поверхности перед исследованием покрыть каким-нибудь веществом с хорошей смазочной способностью. Наоборот, этот эффект не заметен, если брать масла, не содержащие поверхностно-активных молекул. Было доказано, что подобное уменьшение высоты выступов, измеренное после омасливания поверхности, зависит не от действительного уменьшения выступов, а объясняется «буферным» действием смазочной пленки, вызывающим кажущееся сглаживание микрорельефа поверхности.

Такое действие смазочной прослойки объясняется тем, что над выступами поверхности *АА* (рис. 90) смазочная пленка, несмотря на ее грузоподъемность, под действием давления ощупывающего острия частично продавливается, сохраняя меньшую толщину, чем над плоскими, а тем более вогнутыми участками поверхности, где про-

давливание смазочной прослойки затруднено. Вследствие этого последовательные положения C , C' , C'' ошупывающей иглы описывают поверхность BB' , представляющую собой смягченный профиль ошупываемой поверхности AA' . Этот эффект заметен только для поверхностей, средняя высота гребешков которых достаточно мала.

Для более грубошероховатых поверхностей высота выступов значительно превышает толщину смазочной прослойки, остающейся между алмазным острием и поверхностью; в этом случае «буферное» действие этой прослойки относительно мало.

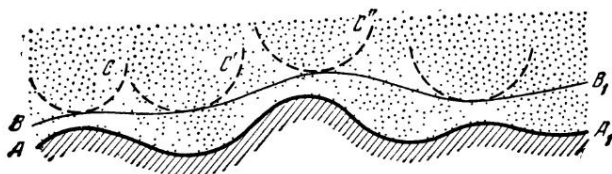


Рис. 90. Буферное действие масляной пленки

То же самое явление лежит в основе предложенного Е. А. Чудаковым и И. В. Крагельским метода оценки шероховатости поверхностей по тому давлению, которое необходимо для установления электрического контакта между металлической поверхностью и скользящим по ней в присутствии смазочной прослойки металлическим шариком. Чем меньше это давление и, следовательно, чем легче продавливается смазочная прослойка, тем больше шероховатость поверхности.

Наличие непрерывной смазочной прослойки, отделяющей подшипник скольжения от вращающегося в нем вала, по величине электрического сопротивления исследовал Л. В. Елин. Для обнаружения кратковременных местных контактов, свидетельствующих о прорывах масляной пленки, Л. В. Елин применил осциллограф, позволяющий наблюдать и регистрировать кратковременные и быстротекущие изменения силы тока, проходящего от подшипника к валу.

Этим методом было установлено, что через несколько минут после начала вращения вала «пробои» масляной пленки прекращаются, и она сохраняет свою непрерывность и сплошность даже при нагрузках менее 150 кг/см^2 .

Только при повышении температуры выше некоторого предела, зависящего от рода масла, смазочная пленка начинает прорываться и наступают электрические «пробой». Однако при температурах выше 200° масляная пленка, как правило, снова приобретает свои «буферные» свойства, предотвращая появление металлических контактов трущихся поверхностей.

Вязкость граничных слоев жидкостей

Ряд явлений указывает на способность смазочной пленки сопротивляться продавливанию. Эта способность, проявляющаяся и в отсутствие скольжения, т. е. в случае взаимно неподвижных поверхностей, особенно резко усиливается при движении, увеличиваясь при этом в десятки раз и более. В то же время эта способность смазочной прослойки и в состоянии движения не может объясняться влиянием вязкости жидкости. При этом толщина смазочной прослойки, проявляющей эту способность, настолько превышает возможную толщину адсорбционных слоев, что становится затруднительным объяснить влияние поверхностно-активных веществ на смазочное действие.

То трудное положение, перед которым мы оказываемся в результате сопоставления различных фактов, заставляет сделать предположение, что свойства тончайших смазочных прослоек толщиной в десятую долю микрона и менее отличаются от свойств той же жидкости в объеме. Отличия эти связаны с тем, что граничные слои жидкости вблизи поверхности твердых тел, например металла, находятся под влиянием молекулярных сил, исходящих из этой поверхности. Так как вязкость, вообще говоря, участвует в смазочном действии, то в первую очередь возникает мысль, не объясняются ли особенности граничной смазки тем, что вязкость граничных слоев значительно превышает вязкость той же жидкости в объеме. Предположение, что вязкость жидкостей вблизи твердых стенок может иметь повышенное значение вследствие особого расположения молекул, было впервые высказано Н. П. Петровым.

Эта идея неоднократно высказывалась и другими, причем были попытки обнаружить изменения вязкости в граничных слоях жидкости непосредственными опытами. В большинстве случаев опыты состояли в измерении

вязкости жидкости по скорости ее истечения через тонкую щель. При широких щелях скорость истечения определяется значением объемной вязкости жидкости. Такого рода измерения аналогичны измерениям вязкости жидкости в цилиндрических капиллярах с применением формулы Пуазейля (см. выше). С уменьшением ширины щели мы должны (при достаточно малой ее ширине) обнаружить, что полученные при этом значения вязкости жидкости будут иные, чем для широкой щели.

Эти опыты приводили к противоречивым результатам. В одних случаях эффект обнаруживался, в других — нет. Однако оба результата следует подвергнуть сомнению. Когда эффект обнаруживался, легко можно было указать источник ошибки, заключающийся чаще всего в загрязнении щели тем или иным веществом, в результате чего течение жидкости постепенно прекращалось. В наиболее чисто поставленных опытах английских физико-химиков Бастоу и Боудена щель сужалась приблизительно до 1 мк , но заметных изменений вязкости обнаружено не было. Однако в опытах Бастоу и Боудена ширину щели измеряли настолько грубо (с точностью, не превышающей $0,25 \text{ мк}$), что результаты измерения не позволяли делать заключений о том, какова вязкость граничных слоев жидкости толщиной $0,1 \text{ мк}$, что, собственно говоря, и представляет основной интерес. Поэтому то значение, которое Боуден и его последователи приписали отрицательным результатам своих экспериментов, следует не только считать преувеличенным, но надо расценивать как простое недоразумение.

Вообще попытку решить поставленную задачу изучения движения жидкости в тонких щелях надо признать малоудачной, так как получить с необходимой точностью равномерную щель шириной порядка $0,1 \text{ мк}$ крайне затруднительно. Кроме того, сквозь такие узкие щели жидкость течет крайне медленно, что затрудняет ее изучение.

Поэтому автор совместно с Г. М. Страховским, Д. С. Малышевой, В. В. Карасевым и Е. Ф. Пичугиным разработали и применили совершенно иной способ измерения вязкости пристенных слоев жидкостей, названный «методом сдувания». Идея этого метода состоит в следующем. Слой жидкости толщиной в несколько микронов наносится на плоскую внутреннюю поверхность какой-нибудь

щели (рис. 91), толщина которой H равна нескольким сотням микронов. Исследуемая жидкость наносится на часть боковой стенки, так что между нею и несмоченной поверхностью стенки образуется прямолинейная граница смачивания O (перпендикулярная к чертежу и направлению сдувания). Посылая через щель равномерный

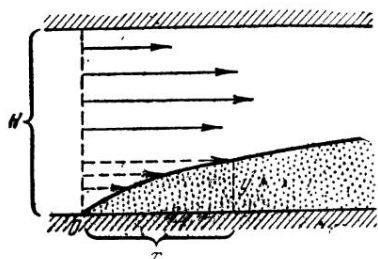


Рис. 91. Схема измерения профиля скоростей и вязкости граничных слоев методом сдувания

поток воздуха (его направление показано стрелками), можно заставить нанесенный слой жидкости придти в движение.

Это движение жидкости отличается особой простотой благодаря тому, что внешнее воздействие воздушного потока приложено только к поверхности слоя жидкости и распределено равномерно, т. е. на каждую единицу по-

верхности жидкости действует одинаковая сила в направлении воздушного потока, параллельного поверхности твердой стенки, на которую нанесен жидкий слой. Благодаря этому усилие сдвига во всей толще нанесенного жидкого слоя также одинаково. Равномерность усилия сдвига во всех частях слоя жидкости приводит к тому, что картина течения в отдельных точках ее носит строго послойный характер (вполне аналогичный движению игральных карт при скашивании колоды). Все слои жидкости, параллельные поверхности твердой стенки, движутся как одно целое с одной и той же скоростью. Скорости v движения подобных слоев увеличиваются по мере удаления от твердой стенки.

В результате подобного движения нанесенный слой жидкости через некоторое время после начала действия воздушного потока принимает форму пологого клина. Как видно на схеме (см. рис. 91), форма поверхности жидкости, получающаяся в результате сдувания за некоторое время τ , позволяет судить о том, по какому закону меняются скорости отдельных слоев жидкости по мере удаления от твердой стенки y . Пунктирные стрелки длиной x равны, как легко понять, $y\tau$ и, следовательно, пропорциональны скоростям v соответствующих слоев. Таким

образом, определяя профиль жидкости после сдувания, т. е. связь между y и x , мы узнаем профиль скоростей внутри этого слоя.

Чтобы измерить профиль весьма тонкого клиновидного слоя жидкости, образующегося в результате сдувания, необходимо пользоваться явлением так называемой интерференции света. Само явление интерференции чрезвычайно

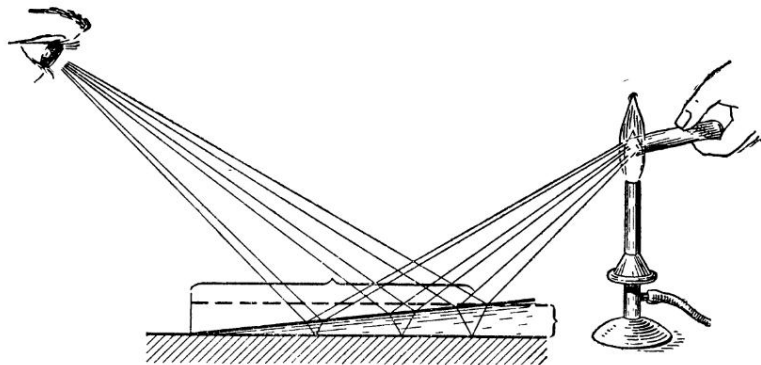


Рис. 92. Интерференция света, отраженного от тонкой клиновидной масляной пленки

легко обнаруживается при помощи пленок, полученных методом сдувания. Для этого достаточно (рис. 92) осветить эту пленку светом определенной длины волны. Такой свет можно получить, вводя, например, в пламя газовой горелки асбестовый фитиль, смоченный раствором поваренной соли. Пламя газовой горелки окрашивается в интенсивный желтый цвет, указывая, что образующиеся в пламени после испарения и разложения соли пары натрия посылают лучи только определенной длины волны $\lambda = 589$ мк. Если взглянуть на пленку, получившуюся после сдувания ее воздушным потоком, то можно обнаружить на ее поверхности ряд плоскопараллельных черных линий. Как известно из оптики, эти полосы «равной толщины» образуются там, где удвоенная толщина пленки равняется нечетному числу полуволн. Первая черная полоса должна находиться там, где толщина пленки $y = \lambda/4$, вторая — где $y = 3\lambda/4$, третья — где $y = 5\lambda/4$ и т. п.

Наблюдение показывает, что полосы интерференции параллельны одна другой, а также границе смачивания твердой поверхности нанесенным слоем и располагаются на равном расстоянии одна от другой (рис. 93). Так как участки пленки, соответствующие двум соседним полосам интерференции, отличаются по толщине всегда на одну

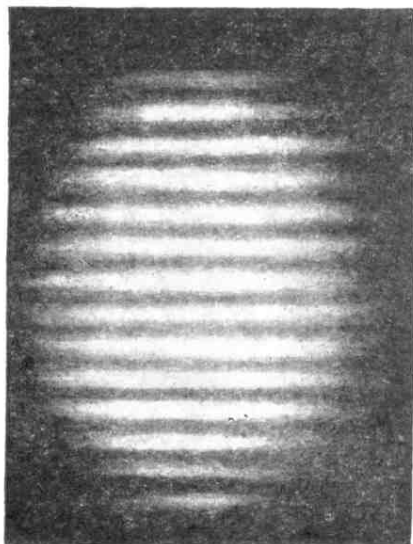


Рис. 93. Полосы интерференции в клиновидной пленке после сдувания

и ту же величину, равную полуволне падающего света, то равенство расстояний между всеми соседними линиями — если учесть, что пленка нанесена на плоскую поверхность, — очевидно, указывает на то, что она имеет всюду одинаковый наклон или крутизну. Следовательно, пленка представляет собой правильный клин, ограниченный с другой стороны, со стороны воздуха, плоской поверхностью раздела.

Если применить к течению слоев жидкой пленки во время сдувания закон внутреннего трения жидкостей Ньютона, то нетрудно видеть, что полученный

результат является очевидным следствием постоянства вязкости во всей толще жидкого слоя. Действительно, по уравнению Ньютона (7)

$$F = \eta SG. \quad (49)$$

Но при плоской форме поверхности нашего жидкого слоя отношение скоростей частиц жидкости v к расстоянию y до стенки (см. рис. 91) всюду постоянно, следовательно, постоянен и градиент скорости. Этого и следовало ожи-

дать, если принять, что вязкость слоя η также всюду одинакова¹.

Полученный результат на первый взгляд вызывает разочарование, так как обнаруживает постоянство вязкости во всем нашем слое, вплоть до твердой стенки. Мы должны, однако, вспомнить, что уже на основании опытов Бастоу и Боудена изменения вязкости можно ожидать только в слое, расположенном на расстоянии от твердой стенки не больше 0,1 мк, максимум 0,2 мк. Наблюдение же полос интерференции слишком грубо для того, чтобы на основании его судить о форме профиля пленки такой толщины, находящейся вблизи самой границы смачивания.

При этом важно отметить, что чем больше при прочих равных условиях (одинаковая продолжительность и интенсивность сдувания и другие условия опыта) крутизна пленки, тем меньше градиент скорости G , а следовательно, согласно формуле Ньютона, тем больше η . Таким образом, по крутизне пленки, определяемой расстоянием соседних полос интерференции, можно судить о пропорциональной ей вязкости слоев жидкости. Однако существует возможность во много раз повысить точность измерения толщины пленки на разных участках, если применить более тонкие методы исследования отраженного от пленки света.

Как показывает теория отражения и интерференции света, для этой цели следует, во-первых, освещать пленку монохроматическим светом, падающим под косым углом, и, во-вторых, желательно использовать наряду с явлением интерференции также явление поляризации света. Такая более тонкая методика была применена В. В. Карасевым и автором для исследования профиля пленок в самом тонком месте. Не имея возможности входить в детали

¹ Если поддерживать постоянный градиент температуры в подкладке, а следовательно, и в пленке в направлении, параллельном границе смачивания, то и вязкость будет меняться в этом же направлении. В результате, как видно из формулы (49), градиент скорости будет также меняться в направлении, параллельном линии смачивания. В результате интерференционные линии сделаются кривыми; по их форме можно сразу определить закон, по которому вязкость жидкости меняется в зависимости от температуры. Этот остроумный метод, предложенный и примененный М. М. Кусаковым, позволяет во много раз ускорить и уточнить процедуру определения температурной зависимости вязкости масел.

этой методики, мы приводим вкратце только полученные при ее помощи результаты.

Оказалось, что некоторые вещества, как, например, вазелиновое масло, из которого удалены путем тщательной очистки даже самые ничтожные следы поверхностно-активных веществ, обнаруживают прямолинейный профиль скоростей, вплоть до расстояний от стенки порядка 0,001 мк (рис. 94). Таким образом, в этом случае вязкость

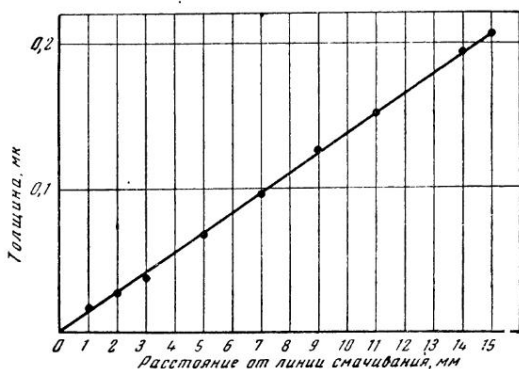


Рис. 94. Профиль пленки вазелинового масла после сдувания

остается практически постоянной вплоть до твердой стенки.

Для других веществ картина получилась иной. Профиль пленки (а следовательно, и профиль скоростей) обнаружил отклонения от прямолинейной формы. Обычно эти отклонения сводятся к тому, что профиль обнаруживает на некотором расстоянии от твердой стенки излом, иногда как бы ступеньку (рис. 95 и 96).

Простые рассуждения и расчеты показывают, что если профиль пленки не прямолинеен, то крутизна его на данном участке пленки пропорциональна вязкости поверхностного слоя жидкости на соответствующем участке, т. е. на расстоянии y от твердой пленки, равном толщине этого участка.

На основании этого мы приходим к выводу, что вязкость пленки при переходе через определенные толщины меняется скачком.

Спрашивается, о чем свидетельствуют полученные неожиданные результаты? Прежде всего они свидетельствуют о том, что вязкость, а следовательно, можно

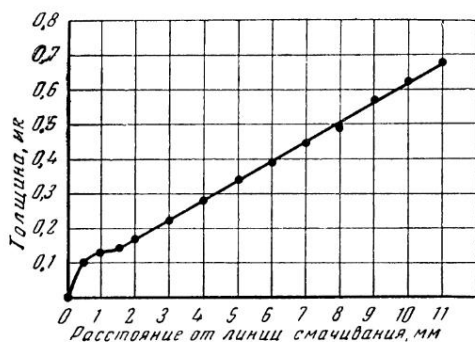


Рис. 95. Профиль пленки амилсебацната после сдувания

полагать, и другие свойства жидкости меняются по мере удаления от твердой стенки не постепенно, а на определенных расстояниях скачком. В простейшем случае получается один подобный скачок, после которого вязкость становится такой же, как для очень толстого слоя жидкости, т. е. такой же, как для жидкости в объеме. В этом случае можно говорить, что граничная пленка имеет резкую границу раздела с объемом жидкости, обладающим нормальными свойствами. На этой границе раздела происходит резко скачкообразное изменение свойств жидкости.

Полученные результаты, с одной стороны, проливают свет на природу маслянистости смазочных средств, частично разрешая эту загадку. Но одновременно эти результаты дают повод для постановки двух новых основных во-

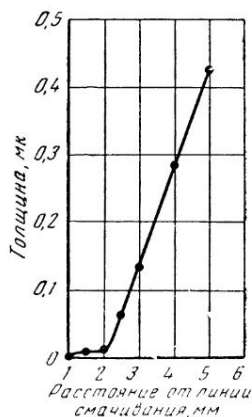


Рис. 96. Профиль пленки дибутилфталата после сдувания

просов. Первый вопрос: что служит причиной изменений вязкости в граничных слоях, изменений, совершающихся скачками на определенных расстояниях от твердой стенки? Второй вопрос заключается в следующем. В граничных пленках вязкость незначительно отличается от вязкости в объеме жидкости. Максимально вязкость меняется в несколько раз. Такое изменение вязкости не может считаться достаточным для того, чтобы объяснить ту грузоподъемность граничной смазочной прослойки, о которой мы говорили выше. Спрашивается, как же можно объяснить эту грузоподъемность и другие явления граничной смазки?

Прежде чем ответить на эти вопросы, которые мы рассмотрим ниже, заметим, что раньше приходилось говорить о маслянистости, как о совокупности каких-то свойств смазочного масла, неизвестно откуда истекающих; открытие же граничных слоев позволяет говорить о маслянистости, как о проявлении или результате свойств граничной пленки — материального носителя этих свойств. В то же время обнаружение резких границ раздела между объемом жидкости и граничными пленками привело к потере последними той расплывчатости, которой их всегда наделяли прежние исследователи, не применявшие достаточно тонких методов обнаружения и исследования особенностей этих пленок.

Граничные фазы и их ориентировочная структура

Рассмотрим первый вопрос, поставленный в предыдущем параграфе. Часто предполагалось, что изменение вязкости жидкости вблизи твердой стенки может явиться результатом действия молекулярных сил притяжения на этот слой со стороны твердой стенки. Это предположение явно не согласуется с нашими результатами, так как, во-первых, по мере удаления от твердой стенки эти силы ослабевают плавно, постепенно спадая до нуля без всяких скачков; во-вторых, влияние этих сил на вязкость на расстояниях порядка сотых долей микрона, как показывают расчеты, слишком ничтожно по сравнению с изменениями вязкости граничных пленок в наших опытах.

На истинные причины явления проливают свет те сведения, которыми мы обладаем в настоящее время относительно расположения молекул в граничных пленках.

Граничные слои с особыми свойствами образуются только в таких средах, у молекул которых удлиненная форма. Такие среды образуют нефтяные масла, в том числе медицинское, соединения, входящие в состав растительных и животных жиров. В объеме жидкости такие удлиненные молекулы в общем расположены беспорядочно. Некоторый порядок в размещении этих молекул, проистекающий от стремления соседних молекул расположиться своими осями параллельно одна другой, приводит к тому, что образуются небольшие группы параллельно ориентированных молекул (рис. 97). Вся жидкость состоит из множества подобных групп, что позволяет говорить об ее микрокристаллическом строении. При этом направления осей молекул, даже в соседних группах, никак не связаны между собой и в этом отношении получается полный беспорядок.

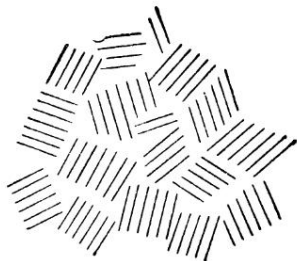


Рис. 97. Микрокристаллическая структура жидкостей

Такая картина расположения молекул была обнаружена при помощи исследования рассеяния рентгеновских лучей в жидкостях, на чем мы останавливаться не можем. При кристаллизации подобных жидкостей, например парафинов или жирных кислот, параллельное расположение молекул распространяется уже на большие области, представляющие собой отдельные кристаллики таких веществ. В этих кристалликах степень упорядоченности больше не только вследствие параллельного расположения осей всех молекул, но и вследствие правильного расположения молекул, как бы в шахматном порядке.

Подобному же исследованию было подвергнуто расположение молекул в тонких смазочных пленках, нанесенных на металл. Для этой цели также было применено наблюдение рассеяния рентгеновских лучей, а также изучение отражения от подобных пленок потока электронов — мельчайших отрицательно заряженных частиц. Этот последний метод оказался еще удобнее и полезнее для исследования тонких пленок, чем метод, основанный на применении рентгеновских лучей: электронные лучи проникают в вещество на значительно меньшую глубину,

что позволяет получить сведения о структуре весьма тонкого поверхностного слоя.

Исследования показали, что в граничных пленках толщиной порядка 0,1 мк наблюдается также параллельное расположение всех молекул, причем это единое направление осей молекул обычно перпендикулярно к поверхности твердой подкладки. Такое расположение наблюдается у жирных кислот, даже жидких, при температуре опыта, а также у других органических веществ.

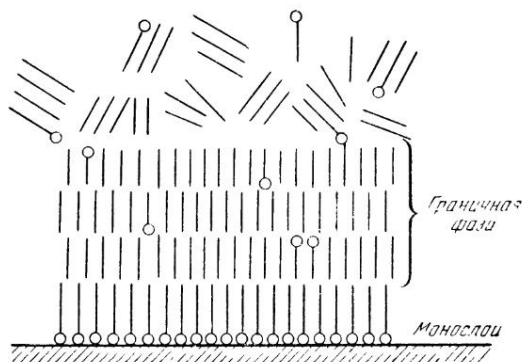


Рис. 98. Влияние адсорбированного монослоя полярных молекул (○) на ориентацию неполярных молекул (|) растворителя

Одним из наиболее интересных опытных фактов является отсутствие ориентации молекул в пленке чистейшего вазелинового масла и появление этой ориентации в пленке толщиной 0,1 мк на металлической подкладке в тех случаях, когда в состав вазелинового масла было добавлено небольшое количество (0,1%) поверхностно-активного вещества, например стеариновой кислоты. Этот результат можно объяснить тем, что поверхностно-активные вещества, адсорбируясь на поверхности металла, образуют ориентированный молекулярный частокол, способный сообщать аналогичную правильную ориентацию также и молекулам выше расположенных слоев вазелинового масла (рис. 98), которые самостоятельно, только под действием твердой стенки, подобной ориентации принимать, как правило, не в состоянии.

Сопоставление этих результатов, касающихся структуры граничных пленок, с измерением их вязкости позволяет не только говорить о полном параллелизме в обоих явлениях, но и высказать убеждение, что изменение вязкости граничных пленок по сравнению с вязкостью жидкости в объеме есть непосредственный результат иного, ориентированного расположения молекул в граничных пленках. Этот результат, подтвержденный также и другими данными, позволяет понять особенности свойств тонких пленок.

Исследование вязкости по методу сдувания имеет то преимущество перед весьма развитым и мощным методом исследования структуры при помощи рентгеновских или электронных лучей, что позволяет более точно установить закон, по которому изменяются свойства пленки по мере удаления от твердой стенки. Только измерения вязкости позволили обнаружить скачкообразный характер изменения свойств граничных слоев при переходе к объемной жидкости.

Этот последний результат имеет особо важное принципиальное значение. Он показывает качественно отличие свойств граничных слоев от нормальной жидкости, из которой они образуются, что позволяет говорить об особом агрегатном состоянии, в котором находятся граничные слои жидкости. Это особое агрегатное состояние имеет, по-видимому, много общего с состоянием веществ в так называемых жидких кристаллах. Поскольку в физической химии принято часть объема, однородную по своим свойствам, но с резким отличием от свойств соседних объемов, называть фазой, законно ввести новое понятие граничных фаз. Таким образом, для разгадки маслянистости необходимо изучать свойства граничных фаз.

Граничные фазы и природа маслянистости

Рассмотрим теперь второй вопрос, поставленный на стр. 202: как объясняется, если исходить из свойств граничных фаз, грузоподъемность граничной смазочной пленки и другие ее действия, облегчающие процесс скольжения? Мы правильно взглянем на дело, если не будем пытаться непосредственно применить повышенное значение вязкости граничных пленок для объяснения их смазоч-

ного действия. Мы должны ограничиться тем, что будем смотреть на эту вязкость в основном как на показатель глубокого изменения структуры в граничных фазах, т. е. изменения расположения молекул в них по сравнению с расположением молекул в объеме жидкости. Оно замечательно не только тем, что оси молекул параллельны, но и послойным размещением самих молекул, подобно игральным картам в колоде. Такое ориентированное расположение молекул приводит к тому, что между соседними слоями образуются как бы плоскости легкого скольжения. И в то же время цельность каждого такого слоя в отдельности, поддерживаемая притяжением тесно, бок-о-бок расположенных осей молекул, препятствует продавливанию каждого слоя молекул в отдельности. Таким образом, становится понятной способность таких слоев обеспечивать хорошее смазочное действие, одновременно облегчая скольжение между трущимися поверхностями и затрудняя утоньшение смазочного зазора и продавливание смазочной прослойки.

Сопротивление скольжению со стороны смазочного слоя подчиняется в условиях граничной смазки закономерностям внешнего трения, а не внутреннего. Это скажется хотя бы в том, что сопротивление скольжению не возрастает пропорционально скорости, а остается более или менее постоянным, не завися от последней¹. В то же время сопротивление скольжению зависит от нагрузки, возрастая приблизительно пропорционально ее величине, что характерно для внешнего трения. Спрашивается: как можно помирить этот результат, очень важный для понимания механизма граничной смазки, с измерениями по методу сдувания, хотя обнаруживающими существование измененной величины вязкости, но не обнаруживающими отклонений от закона внутреннего трения⁴ Ньютона? Это кажущееся противоречие можно понять,⁵ если учесть, что при методе сдувания слой жидкости подвергается усилию только со стороны воздушного потока. При граничной смазке, наоборот, течение смазочного слоя между трущимися телами происходит в совершенно иных условиях, при которых тангенциальные

¹ Опыты Н. Н. Захаваевой в лаборатории автора в А. С. Ахматова (см. стр. 186—187) показали, что, действительно, этот закон появляется, когда толщина смазочной прослойки менее 0,1 мк, т. е. соответствует граничной смазке.

усилия сдвига, действующие на смазочную прослойку, значительно выше и, кроме того, сопровождаются давлением, стремящимся продавить эту прослойку.

В этих условиях возможен переход от течения жидкости, характеризуемого постепенным изменением скорости в зазоре с определенным градиентом скорости, к течению, при котором образуются плоскости скольжения, вследствие чего профиль скоростей может принять ступенчатую форму (рис. 99).

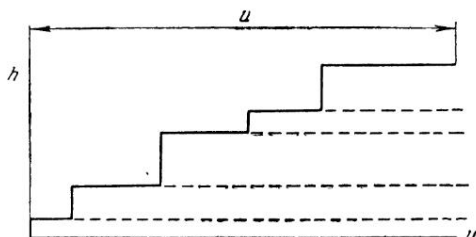


Рис. 99. Профиль скоростей в граничном смазочном слое

Аналогично этому, в твердых телах по мере увеличения действующего усилия сдвига может наблюдаться переход от упругих деформаций сдвига к пластичным деформациям, при которых образуются отдельные плоскости скольжения. В результате этого первоначальная плоская боковая поверхность образца, подвергнутого подобной деформации, приобретает террасоподобную форму.

Таким образом, на основании совокупности полученных опытных данных мы приходим к выводу, что непосредственной причиной маслянистости — высокой смазочной способности в условиях граничной смазки — является образование граничных фаз с правильным послойным расположением ориентированных молекул. Такая точка зрения делает механизм граничной смазки значительно более ясным и простым. Действительно, во-первых, в граничных фазах мы обнаруживаем как бы материального носителя маслянистости, во-вторых, граничные фазы, имея вполне определенную, точно измеримую толщину и определенные свойства открывают путь к вполне конкретному и четкому объяснению явлений граничной смазки.

В заключение рассмотрим еще вопрос о том, как существующие представления позволяют понять влияние поверхностно-активных молекул на маслянистость. В согласии с исследованиями вязкости граничных слоев следует допустить, что граничные фазы, которые могут отсутствовать у жидкости с неполярными молекулами, возникают при введении поверхностно-активных полярных молекул, хотя бы в небольших концентрациях.

Действие поверхностно-активных молекул можно объяснить тем, что они, адсорбируясь на поверхности твердого тела, меняют его взаимодействие с прилегающей жидкостью таким образом, что в результате образуются граничные фазы. Адсорбционные слои служат как бы организаторами граничных фаз, подобно тому как некоторые частицы, вводимые в жидкость, охлажденную при температуре замерзания, способны служить «затравками» — центрами, вокруг которых начинают расти кристаллы жидкости. Различие обоих случаев заключается в том, что при кристаллизации переохлажденной жидкости рост кристаллов от «затравки» прекращается только после исчерпания жидкости, способной замерзнуть. Нарастание же граничных фаз прекращается на вполне определенных расстояниях от твердой стенки.

Расклинивающее и защитное действие смазочных слоев

Рассмотрим теперь один существенный вопрос. Если считать, что граничные фазы способны уменьшать повреждение или износ поверхностей при скольжении за счет того препятствия, которое они создают сближению твердых поверхностей, то спрашивается, почему это свойство граничных фаз не проявляется при достаточно малых скоростях скольжения? Ответ на этот вопрос можно получить, основываясь на исследованиях процессов сближения твердых поверхностей, прижимаемых одна к другой в присутствии прослойки некоторой жидкости. Это явление было исследовано для разнообразных твердых поверхностей и жидкостей А. Д. Малкиной, Н. И. Москвитиным и М. Ф. Фугран в нашей лаборатории и Г. И. Фуксом и его сотрудниками.

Суть этого явления может быть понята на основании детально исследованного А. Д. Малкиной частного слу-

чая, именно явления слипания кварцевых нитей в присутствии воды или водных растворов солей. Если в подобных средах прижимать две кварцевые нити одну к другой, то в первые моменты никакого прилипания не обнаруживается и взаимное разделение нитей наступает под действием любой сколь угодно малой силы. Если, однако, оставить нити в контакте на некоторое время, то для разделения нитей потребуется сила, величина которой прогрессивно возрастает по мере увеличения продолжительности неподвижного контакта нитей.

В работе А. Д. Малкиной показано, что истинной причиной прогрессивного роста сил прилипания служит постепенное утоньшение «смазочной» прослойки между нитями, вследствие чего расстояние между ними непрерывно уменьшается. Это уменьшение расстояния влечет за собой постепенный рост сил молекулярного взаимодействия. Подобная закономерность действия молекулярных сил, как мы указывали раньше, была непосредственно проверена при отсутствии жидких прослоек между твердыми поверхностями.

Процесс утоньшения смазочной прослойки и сближения кварцевых поверхностей, разделенных ею, при температуре ниже 30° продолжается сутками, что можно понять как результат образования на поверхности кварца состоящей из молекул воды граничной фазы (которую в данном случае можно назвать гидратной) с особыми свойствами. Из этих свойств в данном случае проявляется весьма высокое сопротивление продавливанию, последнее может происходить только чрезвычайно медленно. Легко себе представить, что если бы кварцевые нити не были неподвижны, а скользили одна по другой с достаточной скоростью, то продавливание гидратных граничных пленок вообще не успевало бы происходить.

Так как подобные же явления замедленного слипания поверхностей наблюдаются, по данным Г. И. Фукса, и в случае металлических поверхностей, разделенных слоями масел, то естественно объяснять легкое скольжение смазанных поверхностей при не слишком малых скоростях затрудненным продавливанием пленки смазки в условиях непрерывно перемещающейся зоны контакта. В то же время возможность хотя бы медленного слипания позволяет приписать повышенное сопротивление скольжению при малых скоростях или после

периода покоя продавливанию соответствующих граничных масляных пленок под влиянием нагрузки.

Спрашивается, однако: всегда ли поверхности, пребывающие в состоянии неподвижного контакта под известной нагрузкой, должны продавливать разделяющую их смазочную прослойку до наступления соответственного контакта? Если бы это было так, то никакие смазочные средства не могли бы предохранять поверхности от износа в пусковой период, после остановки соответствующих деталей машин. Между тем известно из практики, что в присутствии определенных смазочных веществ, содержащих полярные молекулы, коэффициент трения и износ даже при трогании с места после продолжительного периода покоя остаются весьма низкими, в противоположность случаям, когда применяются смазки с недостаточной маслянистостью.

Способность тонких слоев жидкостей достаточно долгое время сохранять определенную толщину, тем большую, чем меньше производимое на них давление¹, было впервые доказано прямыми опытами М. М. Кусакова и автора. Явление это наблюдается как в случае, когда пленка жидкости расположена между двумя твердыми поверхностями, например металлическими, так и в случае, когда она расположена между неодинаковыми поверхностями, например отделяет твердую стенку от прижимаемого к ней воздушного пузырька. В этом последнем случае, особенно подробно исследованном, можно, используя явление интерференции света, чрезвычайно наглядно не только показать равномерность толщины жидкой пленки на всех ее участках, а также неизменяемость ее толщины со временем, но и точно определить зависимость этой равновесной толщины пленки жидкости от производимого на нее пузырьком или другим телом удельного давления. На рис. 100 приведена схема опыта, а на рис. 101 и 102 — полученные при этом результаты.

На рис. 100 тонкая пленка l образуется между поверхностью тела k , помещенного в сосуде C с жидкостью,

¹ Впервые предположение о существовании такой способности пограничных с твердым телом слоев жидкостей было высказано одним из основоположников почвоведения С. П. Костычевым.

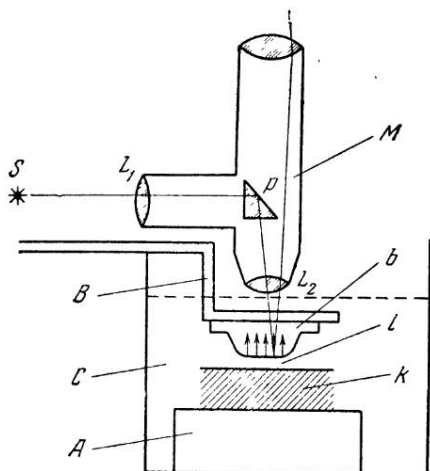


Рис. 100. Схема измерения расклинивающего давления смачивающих пленок

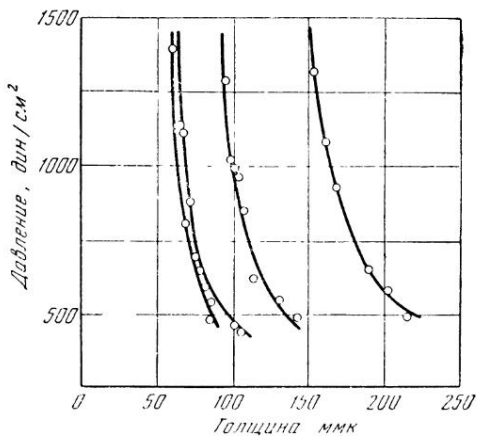


Рис. 101. Изотермы расклинивающего давления водных растворов хлористого натрия на свинцовом стекле. Нормальность растворов:

Слева направо: 0,1; 0,01; 0,001; 0,0001

и пузырьком b , прижимаемым к телу k посредством держателя B . Микроскоп M служит для рассматривания картины интерференции света в пленке l , картины, возникающей при освещении пленки источником монохроматического света S , лучи которого после прохождения через линзу L_1 отражаются призмой p и объективом микроскопа L_2 направляются на пленку. На рис. 101 и 102 по осям абсцисс отложена толщина пленки в миллимикронах, а по осям ординат — давления p , оказываемые на пленку пузырьком и зависящие, как известно из курса физики, от радиуса пузырька r и поверхностного натяжения пленки σ :

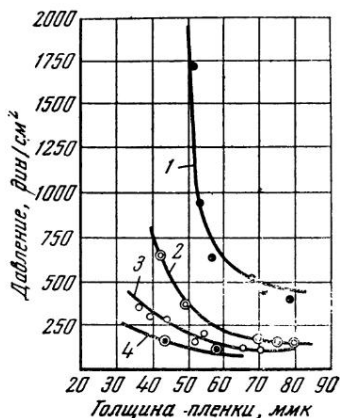


Рис. 102. Влияние твердой подкладки на толщину и давление равновесных полимолекулярных слоев нормального октана (по Кусакову и Титиевской)

1 — сталь; 2 — свинцовое стекло;
3 — алмаз; 4 — кварц

$$p = \frac{2\sigma}{r}.$$

Давление пузырька на пленку в состоянии равновесия равно избыточному давлению, развиваемому пленкой достаточно малой толщины. Это давление было названо *расклинивающим давлением*.

Мы видим, что расклинивающее давление зависит от рода жидкости, от содержания в ней растворенных веществ и от природы подкладки.

Хотя расклинивающее давление выражается не такими высокими цифрами, как грузоподъемность смазочной пленки в процессе скольжения поверхностей (см. выше), тем не менее роль этого явления при смазке механизмов также весьма существенна. Расклинивающее давление, препятствуя контакту деталей механизмов при длительной остановке, облегчает пуск машин и уменьшает происходящий в этот момент износ. Это явление, по-видимому, играет значительную роль и в исследованном П. А. Ребиндером эффекте облегчения разрушения твердых тел под влиянием смачивания жидкостями, содер-

жащими полярные молекулы. Смачивающая жидкость, которая заполняет поверхностные трещины твердого тела, проявляя расклинивающее действие на стенки трещин, стремится их расширить, облегчая тем самым разрушение твердого тела.

Расклинивающее действие жидкостей не находится ни в какой непосредственной связи с вязкостью жидкости, которая в равной степени может препятствовать и утоншению смазочной прослойки и ее утолщению. Это последнее явление играет значительную роль в часовых механизмах, в которых разворачивание спиральных пружин происходит в масляной среде. Отдельные витки при разворачивании спирали должны увеличивать взаимное расстояние (рис. 103), а смазочное масло препятствует этому процессу, так как

он должен сопровождаться втеканием жидкости в зазор между витками пружины. Поэтому чем больше вязкость смазки, тем медленнее, при прочих равных условиях, раскручивается часовая пружина, что может вызвать замедление действия часовых механизмов.

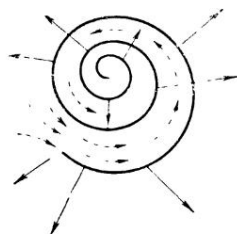


Рис. 103. Влияние вязкости масла на разворачивание часовой пружины. Пунктирные стрелки — направление втекания масла, сплошные — направление разворачивания витков

Отчего лед скользкий?

До сих пор мы говорили о явлениях смазки, в частности граничной, наблюдаемых в результате введения между трущимися поверхностями посторонней жидкости. Однако в некоторых случаях смазочное действие может наблюдаться вследствие образования смазочной прослойки самими трущимися телами. Одним из наиболее простых примеров «самосмазки» служит скольжение твердых тел по льду.

В популярных книгах, в школах и даже в высших учебных заведениях скользкости льда дается совершенно неправильное объяснение, укрепившееся в науке по почину английского инженера и физика Рейнольдса. Рейнольдс высказал мнение, что скользкость льда объясняется его способностью понижать под давлением темпе-

ратуру плавления — аномальное свойство воды, висмута и сурьмы, отличающее их от других тел. Свойство это, заметим здесь, не случайно сопровождается другой известной аномалией указанных тел — способностью расширяться при замерзании, что наглядно доказывается тем, что лед плавает на поверхности воды и, следовательно, легче ее по удельному весу.

Однако предположение, что давление в местах контакта между льдом и каким-либо другим телом, например полозьями санок или коньками, достаточно для того, чтобы понизить температуру плавления на $10-20^\circ$, в результате чего даже на морозе сможет образоваться жидкая прослойка воды, легко опровергнуть ссылкой на общеизвестные факты. Для плавления любого тела необходим подвод тепла, которое тратится на скрытую теплоту плавления. Подвод тепла происходит с некоторой скоростью, т. е. требует определенного времени. Поэтому только в состоянии покоя или скольжения с очень малыми скоростями тепло успевало бы притекать к точкам контакта между льдом и скользящим телом для того, чтобы могла образовываться водная пленка. При больших скоростях, которые развивают, например, конькобежцы, лед не успевал бы таять за недостатком времени для притока тепла извне. Помимо того, высокие давления, требующиеся в местах действительного контакта для понижения температуры плавления льда на $10-20^\circ$, во много раз превышают сопротивление льда пластической деформации; они обуславливали бы такое увеличение площади действительного контакта, что первоначальные высокие удельные давления резко снизились бы и плавление льда не могло бы иметь места.

Несмотря на простоту и неоспоримость указанных соображений, неправильное объяснение скользкости льда, данное Рейнольдсом, еще продолжает повторяться в литературе до последнего времени. Так, например, это объяснение излагается и защищается В. Д. Кузнецовым в «Физике твердого тела», четвертый том которой посвящен трению твердых тел.

Истинные причины скользкости льда были впервые разъяснены в работе советского инженера К. Б. Вейнберга младшего, указавшего, что причиной плавления льда при трении по нему других тел служит развитие тепла, сопровождающее самый процесс скольжения и тре-

ния. Это тепло возникает как раз в местах действительного контакта, и при этом мгновенно, в процессе трения, как результат превращения работы сил трения в тепло. Тепло трения, возникая в местах действительного контакта, расплавляет в этих местах лед, обеспечивая появление смазочных водных прослоек.

Из теории Вейнберга, в противоположность теории Рейнольдса и других, легко понять, почему скользкость льда невелика в состоянии покоя, увеличиваясь при скольжении и сохраняясь при больших скоростях его. В состоянии покоя тепло трения не развивается, смазочная прослойка не появляется и при трогании с места обнаруживается коэффициент трения порядка 0,4.

Итак, согласно К. Б. Вейнбергу, сопротивление при скольжении по льду, например коньков, определяется внутренним трением в образующейся и поддерживаемой за счет того же трения прослойке воды между льдом и поверхностью конька. Это трение должно быть отнесено к разряду жидкостного. Однако эта простая и, казалось бы, единственно возможная точка зрения также находится в противоречии с некоторыми опытными фактами.

Изучение трения стальных поверхностей по льду при разных температурах, нагрузках и скоростях скольжения было проведено в нашей лаборатории Н. Н. Захаваевой. Выявился неожиданный факт: в тех случаях, когда окружающая прибор температура была несколько выше нуля и когда, следовательно, толщина образующейся водной прослойки должна быть максимально велика, сопротивление скольжению было выше, чем при температуре ниже нуля. Между тем по закону внутреннего трения Ньютона сопротивление скольжению должно быть, при прочих равных условиях, обратно пропорционально толщине смазочной прослойки. Таким образом, возникает предположение, что образующаяся при скольжении по льду пленка воды весьма малой толщины, находясь под нормальным давлением, по аналогии с рассмотренными выше граничными фазами не подчиняется законам течения вязких жидкостей.

Дальнейшим указанием в пользу высказанного предположения служит соблюдение при скольжении двучленного закона трения, в частности зависимость силы трения от нагрузки. Соблюдение этого закона трудно согласовать с предположением о жидкостном характере трения.

Поставленный вопрос получил окончательное разрешение в работе С. С. Бутневича и автора, в которой исследовалось трение при скольжении по льду стальных поверхностей в большом интервале температур (от 0 до -150°). Опыты неопровержимо доказали, что возникающая при плавлении льда смазочная прослойка льда подчиняется не законам внутреннего трения жидкости, а законам граничного трения: сила трения, оказывается, не зависит от скорости и пропорциональна нагрузке.

Отличие от «сухого» трения льда, наблюдаемого особенно легко и в чистом виде при низких температурах и малых скоростях скольжения, заключается в резком различии численных значений коэффициента трения. Коэффициент «сухого» трения льда оказался равным около 0,4, а граничного трения льда в присутствии граничной смазочной прослойки воды — около 0,03.

По-видимому, механизм граничной смазки водой, так же как и маслами, основан на скольжениях внутри смазочного слоя по определенным плоскостям скольжения. Образованию этих плоскостей скольжения способствует правильное расположение молекул воды, сохраняющееся и после плавления льда, обладающего кристаллической структурой. Отсутствие такого правильного расположения молекул в сравнительно толстых прослойках воды, образующихся при температурах выше нуля, по-видимому, объясняет затрудненное скольжение в этом случае. Хорошо также известное конькобежцам уменьшение скользкости льда при низких температурах объясняется, по Бутневичу, тем, что при этом уменьшается доля площади действительного контакта, на которой в результате плавления льда образуется смазочная прослойка. Смазочная прослойка образуется только на тех, больших по размеру островках контакта, на которых температура в течение контакта с коньком способна повыситься до нуля. Чем ниже температура, тем больше размер таких островков контакта и тем меньше становится их число. При очень низких температурах смазочная прослойка вообще не образуется и коэффициент суммарного трения достигает максимального значения, равного коэффициенту «сухого» трения льда.

Химическая «самосмазка» и приработка.
Влияние внешней среды на износ.
Эффект Ребиндера

Трение по льду не единственный пример, когда процесс трения вызывает такие изменения поверхности трения, что коэффициент трения падает и скольжение облегчается. Другим аналогичным примером, хотя и иной природы, может служить облегчение трения металлов под влиянием окисления поверхности, усиливающегося в процессе трения. Для некоторых металлов (свинца, меди, молибдена и др.) коэффициент трения окислов значительно ниже, чем самих металлов; кроме того, присутствие этих окислов уменьшает молекулярное сцепление или холодное сваривание металлов при их непосредственном контакте. В подобных случаях окисление металлов является фактором, облегчающим скольжение и уменьшающим повреждение поверхности (износ). Подобными явлениями объясняется влияние на трение состава окружающей атмосферы, например присутствие в ней кислорода, паров воды.

Аналогичны те случаи скольжения, когда химическое изменение трущихся поверхностей металлов происходит в результате их взаимодействия со смазкой или с содержащимися в ней атомами, могущими реагировать с маслом. По-видимому, этим объясняется благотворное влияние на процесс скольжения смазочных масел, молекулы которых содержат легко выделяемые атомы хлора, серы, мышьяка, фосфора и др. В первую очередь при трении вследствие развития высокой температуры подвергаются химическим изменениям с образованием хлоридов, сульфидов, арсенидов, фосфоридов и других соединений наиболее нагруженные участки контакта. В результате химического изменения соответствующие участки становятся мягче и опасность зацепления и износа предотвращается.

В некоторых случаях (по данным Бика) играет роль образование соединений с низкой температурой плавления. Образование в результате химических процессов сплавов (эвтектик) с низкой температурой плавления приводит к тому, что все выступы, которые могут зацепиться или быть повреждены, сглаживаются, поверхности в результате трения становятся более гладкими: происходит химическая приработка или полировка. Влия-

ние химических процессов на приработку и полировку металлов и стекол было впервые широко изучено и поставлено на службу практике академиком И. В. Гребенчиковым. Увеличение гладкости поверхностей не только уменьшает опасность зацепления поверхностных выступов, но и затрудняет продавливание смазочной прослойки, что ведет в дальнейшем к понижению трения и износа поверхностей.

Помимо действия смазок, способствующего приработке и полировке поверхностей при трении вследствие химических процессов, существует открытое и исследованное П. А. Ребиндером аналогичное действие смазочных средств вследствие молекулярного взаимодействия молекул смазки с твердыми поверхностями. В результате этого взаимодействия, по Ребиндеру, поверхностно-активные молекулы смазки способны не только проникать в зачаточные микротрещины, имеющиеся на поверхностях всех реальных тел, но и оказывать механические действия, облегчающие дальнейшее углубление этих трещин и разрушение поверхностей. Если подобные процессы разрушения поверхностей сосредоточены на выступах, находящихся под наибольшими механическими воздействиями, результат оказывается благотворным для дальнейшего протекания трения, так как поверхности сглаживаются — прирабатываются. Но если удельная (на единицу площади) нагрузка на поверхность трения слишком высока, разрушению начинают подвергаться настолько большие участки поверхности и самый процесс идет настолько быстро, что поверхности не только не уменьшают своей первичной шероховатости, но даже увеличивают ее. В этих случаях поверхностно-активные вещества способны проявлять только отрицательное действие, поддерживая непрерывный износ на высоком уровне.

Влияние поверхностно-активных веществ на износ

Рассмотрим обнаруженную впервые В. П. Лазаревым своеобразную двойственность влияния поверхностно-активных веществ, содержащихся в смазочных веществах, на износ, т. е. повреждение поверхностей при трении. С одной стороны, твердо установлено, что в области гра-

ничной смазки, когда смазочная прослойка весьма тонка, поверхностно-активные вещества резко уменьшают износ; с другой стороны, существование понижения твердости говорит о возможности противоположного влияния поверхностно-активных веществ.

Взаимоотношение обоих эффектов лучше всего может быть продемонстрировано и изучено, если применить для испытания на износ в условиях заведомо граничной смазки так называемый проволочный прибор, разработанный В. П. Лазаревым и автором. В этом приборе (рис. 104)

происходит трение между боковой поверхностью цилиндра, вращающегося от мотора вокруг горизонтально расположенной оси O , и проволокой, охватывающей больший или меньший участок поверхности цилиндра; один конец проволоки укреплен неподвижно, а другой натягивается при помощи подвешенного груза P . Неподвижный конец проволоки прикрепляют к динамометру — прибору, позволяющему измерять приложенную силу. Изображенный на рис. 104 динамометр состоит из пружины D , растяжение которой указывает стрелка K по шкале S . Перемещение стрелки по шкале пропорционально действующей на пружину и растягивающей ее силе. По разности между натяжением левого конца проволоки и весом груза, висящего на правом ее конце, можно судить о суммарной силе трения между цилиндром и проволокой.

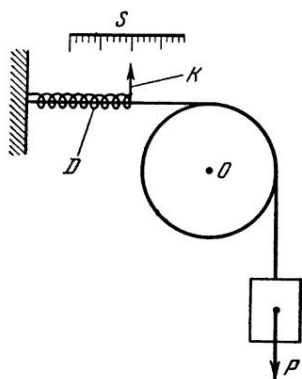


Рис. 104. Схема проволочного прибора для исследования смазочного действия

Одновременно прибор даёт возможность судить об износе поверхности цилиндра при трении о проволоку. Для этого достаточно после испытания в течение определённого времени, например 10 мин, измерить глубину и ширину той борозды, которая обнаруживается на поверхности цилиндра от трения о проволоку. Опыты с таким прибором показывают, что различные жидкости, нанесённые на поверхность цилиндра, могут не только уменьшать коэффициент трения в 2—3 раза, но и одно-

временно чрезвычайно резко снижать износ. Так, например, при смазке поверхности олеиновой кислотой или касторовым маслом износ во много тысяч раз меньше, чем при трении сухих поверхностей. Чистое медицинское масло, наоборот, снижает износ сравнительно незначительно, а некоторые жидкости не снижают износа вовсе, он происходит с той же интенсивностью, как и при сухом трении.

Испытания на подобном приборе позволяют также сделать очень важное заключение о сравнительно малой связи коэффициента трения и износа. Можно привести много примеров, когда два смазочных вещества, дающих одинаковый коэффициент трения, допускают совершенно различный износ. Иногда больший износ дает вещество, обеспечивающее более низкий коэффициент трения. Подобные факты еще раз убедительно показывают, что коэффициент трения нельзя связывать исключительно только с зацеплением микровыступов поверхности, так как в этом случае имелся бы больший параллелизм между трением и повреждением поверхности тела.

Если на подобном проволочном приборе испытывать влияние поверхностно-активных веществ, например жирных кислот, вводимых в вазелиновое масло или керосин, то обнаруживается резкое уменьшение износа под влиянием таких веществ. Уменьшение износа наблюдается и при довольно больших нагрузках, которые можно осуществить, несколько меняя способ применения прибора. Для этой цели заставляют проволоку *SSS* охватывать поверхность вспомогательного ролика *B* (рис. 105). Прижимая при помощи груза *P* ролик к цилиндру с определенной силой, можно обеспечить точечный контакт проволоки с поверхностью вращающегося цилиндра. В этом случае нагрузка распределяется на очень малую площадь смазочной прослойки, причем последняя находится под действием очень высокого удельного давления.

Несмотря на это, и в описанных условиях поверхностно-активные вещества продолжают оказывать действие, уменьшающее износ. Однако, применяя достаточно высокие нагрузки, порядка 5—10 кг и более, можно обнаружить, что в этом случае введение поверхностно-активного вещества начинает давать уже не понижение, а повышение износа, все более прогрессирующее по мере дальнейшего увеличения нагрузки. Таким образом, на этом приборе

можно наблюдать, как с увеличением нагрузки смазочное действие, уменьшающее износ, переходит в противоположный эффект ускорения износа.

Объяснить такое поведение смазочных веществ не представляет, однако, труда, если обратиться к механизму эффекта Ребиндера, обоснованному его работами. Согласно этим работам, облегчение разрушения твердого тела внешними усилиями под действием поверхностно-активных веществ объясняется их проникновением в те микроскопические трещины, которые всегда имеются в поверхностном

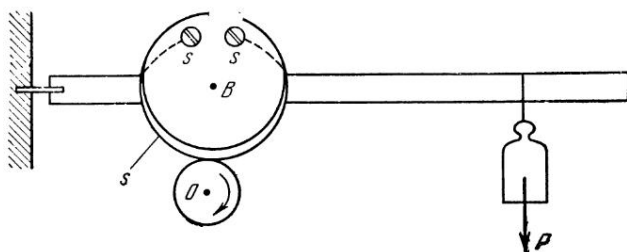


Рис. 105. Случай сосредоточенной нагрузки

слое любого твердого тела и которые разрастаются под влиянием механических усилий, действующих на тело и стремящихся нарушить его целостность.

Проникновение смазочной жидкости, содержащей поверхностно-активные молекулы, в поверхностные микротрещины способно облегчить дальнейшее углубление и расширение этих трещин, ведущее к усилению износа. Это объясняется прежде всего тем, что смазочная прослойка, расположенная внутри трещины, способна развить открытое М. М. Кусаковым, Е. А. Обуховым и автором книги расклинивающее давление, как показано на рис. 106 стрелками P . Это расклинивающее давление, действуя на стенки трещин подобно колуну при колке дров, также способно облегчать износ поверхности твердого тела.

Как было показано в работах М. М. Кусакова и автора, расклинивающее давление раствора, содержащего поверхностно-активные молекулы, способно значительно усиливаться под влиянием растворенных молекул по сравнению с расклинивающим давлением чистого растворителя.

Но одного только действия жидкости или содержащихся в ней поверхностно-активных молекул обычно недостаточно для того, чтобы трещины могли углубляться. Если же одновременно имеется внешнее механическое воздействие, то внешняя среда, усиливая его проявление, облегчает углубление поверхностных трещин.

Понятно поэтому, что влияние поверхностно-активных веществ на износ сказывается тем сильнее, чем больше удельное давление на поверхность трещин. Наоборот,

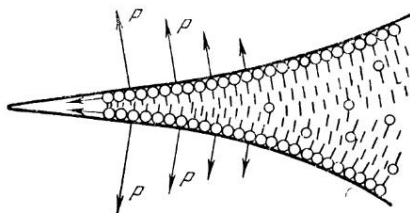


Рис. 106. Механизм понижения прочности под влиянием раствора поверхностно-активных молекул

в отсутствие заметного давления поверхностно-активные вещества не могут самостоятельно вызывать разрушение твердого тела. Смазочное действие определяется толщиной и свойствами смазочной прослойки, расположенной не в микротрещинах поверхности, а между поверхностями обоих трущихся тел. При малых нагрузках смазочная прослойка способна сохранять большую толщину, предупреждая зацепление и соударение выступов и развитие высоких удельных нагрузок, в результате чего перевешивает смазочное действие, а износ получается минимальным. При достаточно высоких нагрузках, наоборот, смазочная пленка не может сохранить всюду достаточно высокую толщину и, несмотря на присутствие в этой пленке поверхностно-активных молекул, начинается зацепление микровыступов. При этом в моменты соударения выступов развиваются высокие местные усилия, ведущие к углублению поверхностных трещин и к износу. Понятно, что в этом случае перевешивает влияние поверхностно-активных веществ, находящихся в микротрещинах поверхности.

Трение верчения и качения

До сих пор мы рассматривали внешнее трение как результат взаимного скольжения двух соприкасающихся твердых тел. Может ли быть трение в тех случаях, когда при движении соприкасающихся тел отсутствует скольжение соприкасающихся участков их поверхностей? Первый пример, который как будто позволяет дать положительный ответ на этот вопрос, — это трение верчения, например трение о пол опоры вращающегося волчка или трение стрелки компаса, вращающейся вокруг острья, служащего его точкой опоры.

Нетрудно понять, что в действительности в этом случае трение также связано со скольжением в местах контакта. Контакт физических тел никогда не может ограничиваться одной геометрической точкой. В результате нагрузки соприкасающиеся поверхности, как бы остры и тверды они ни были, всегда в той или иной мере сплюсчиваются, вследствие чего получается контакт на определенной площадке S (рис. 107), имеющей форму кружка или эллипса. Очевидно, при верчении происходит скольжение всех действительных участков площадки контакта, за исключением какой-то одной точки O , через которую проходит геометрическая ось вращения. Таким образом, сопротивление вращению легко объясняется совокупным действием сил трения f_1, f_2, \dots на всех участках контакта, сил трения, направленных перпендикулярно к линиям a_1O, a_2O, \dots , соединяющим соответствующие участки с направлением геометрической оси вращения. Нетрудно также понять, что порядок сил, сопротивляющихся вращению, пропорционален среднему плечу a_1O, a_2O, \dots всех сил трения отдельных микроплощадок контакта. Это среднее плечо, очевидно, пропорционально радиусу площадки контакта.

Из этого простого рассуждения вытекает важное практическое следствие. Если мы хотим свести к минимуму трение верчения, то должны заботиться об уменьшении площадки контакта, для чего следует применять острия

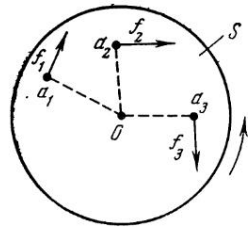


Рис. 107. Распределение сил трения в «точке» опоры вращающегося острья

с малыми радиусами закругления и максимальной твердостью. В часах и измерительных приборах, где необходимо свести трение верчения различных деталей механизмов к минимуму, для подушек и опирающегося на них острия применяют агат, рубин и алмаз. Само собой разумеется, что и введение смазки, уменьшающей силу трения, также имеет значение.

Другим примером наличия сил трения при кажущемся отсутствии скольжения служит очень распространенное явление качения. Так как при качении износ поверхностей и расщепление энергии в тепло обычно во много раз меньше, чем при скольжении, техника уже давно начала заменять, где возможно, трение скольжения трением качения, например применяя колеса вместо полозьев.

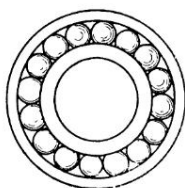


Рис. 108. Шариковый подшипник

Однако долгое время речь шла только о частичном устранении трения скольжения, которое продолжало действовать в осях и втулках.

Изобретение шариковых и роликовых подшипников было крупнейшим шагом вперед в этом направлении, хотя и здесь явления скольжения полностью не исключены. Это следует уже из того (рис. 108), что шарики не могут одновременно катиться без скольжения по тем по-

верхностям меньшего и большего радиуса, между которыми они заключены в подшипнике. Но даже если взять качение шарика или цилиндра по одной гладкой плоской поверхности, то и в этом случае можно указать на причины появления скольжений, сопровождающих «чистое» качение. Под влиянием нагрузки происходит деформация катящегося тела и опорной плоскости (рис. 109). В результате такой деформации создается определенная протяженность участка контакта в направлении движения. Нетрудно показать, что качение не может происходить, не сопровождаясь проскальзываниями на отдельных участках суммарной площади контакта. Таким образом, существование сопротивления качению можно объяснить наличием трения скольжения по опорной поверхности.

Существуют еще и другие явления, создающие сопротивление качению. К ним относятся силы прилипания,

действующие между поверхностью цилиндра и опорной плоскостью. Эти силы непрерывно преодолеваются позади участка контакта (рис. 109), где происходит разъединение поверхностей при качении. На первый взгляд, кажется, что эти явления не могут внести никакого слагающего в сопротивление качению, так как работа, затрачиваемая на преодоление сил молекулярного притяжения при разделении поверхностей, выигрывается в процессе сближения участков поверхностей впереди зоны контакта.



Рис. 109. Деформация в точке опоры цилиндра, катящегося по плоскости

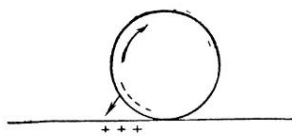


Рис. 110. Разделение зарядов при качении цилиндра по плоскости

В действительности же, как показали исследования Н. А. Кротовой и автора, при контакте разнородных поверхностей может возникать их зарядение разноименными электрическими зарядами. При разделении поверхностей одновременно разделяются и эти разноименные заряды, и мы должны преодолевать их притяжение (рис. 110). Это притяжение преодолевается до тех пор,

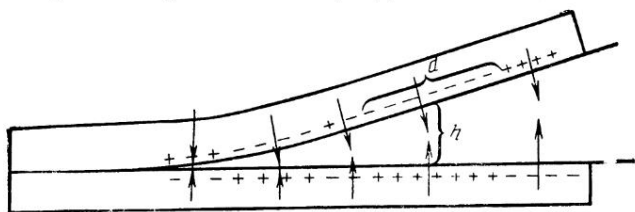


Рис. 111. Заряды, возникающие при расколе слюды

пока заряды не соединятся либо вследствие проводимости поверхностей, либо вследствие разряда через образующийся при разделении поверхностей воздушный зазор. Однако оба вида разряда могут запаздывать, и соответственно этому запаздыванию будет затрачиваться некоторая избыточная работа на преодоление притяжения разноименных зарядов. Эта работа будет производиться за

счет движущей силы и, следовательно, будет увеличивать сопротивление качению¹.

В случае разделения однородных поверхностей, на первый взгляд, кажется, что разноименных зарядов возникнуть не может. Однако они все же возникают из-за неоднородности поверхностей и неравномерного распределения на них отрицательных и положительных зарядов. Вследствие этих двух причин при разделении однородных поверхностей, например при разматывании изоляционной ленты или при расщеплении листочков слюды по плоскости спайности (по плоскости легкого раскола), распределение на поверхности зарядов носит мозаичный характер (рис. 111). В этом случае силы притяжения разноименных зарядов участков, расстояния между которыми h не будут слишком велики (по сравнению с протяженностью a этих участков), будут обнаруживаться и также вызывать сопротивление разделению поверхностей².

Когда раздвижение поверхностей происходит быстро, разряд через воздушный зазор сопровождается свечением и треском. Такой треск можно наблюдать, например, при разматывании изоляционной ленты или отслаивании пластыря. Треск при разрыве тканей, бумаги и некоторых других материалов также, по-видимому, обязан электрическим разрядам аналогичного происхождения.

Наконец, сопротивление качению может быть большим в тех случаях, когда между обоими телами находится достаточно вязкая смазка, и при качении приходится преодолевать силы внутреннего трения, появляющиеся в зазоре между ними, заполненном смазкой.

По сравнению с трением скольжения трение качения, как мы видим, отличается большей сложностью, во-первых, вследствие участия нескольких факторов и, во-вторых, вследствие того, что расчет действия каждого из них при качении значительно сложнее, чем при скольжении. Например, для учета трения проскальзывания в области контакта соприкасающихся тел необходимо точно рассчитать изменение формы тел при контакте и те силы, которые действуют в различных участках зоны контакта.

¹ Точный расчет влияния этого запаздывания на трение качения был выполнен В. П. Смилгой и автором.

² Следует добавить, что, согласно Шнурману, разделение противоположных зарядов может вносить слагающую и в трение скольжения.

Эта сложная математическая задача, однако, успешно решена. В особенности велики в этой области заслуги советских ученых и инженеров (Штаермана, Ишлинского и др.).

Также весьма сложен расчет сил внутреннего трения в смазке, заполняющей зазор между соприкасающимися телами при их качении. Точная теория этого случая для вязкой смазки была разработана академиком П. Л. Капицей, а для пластичной и вязко-пластичной смазки — Л. И. Котовой и автором.

До сих пор мы рассматривали трение, в том числе трение качения, как результат действия сил между поверхностями, либо соприкасающимися непосредственно, либо разделенными смазочной прослойкой. В последнем случае трение определяется явлениями течения, происходящими внутри этой прослойки. Как показал Табор, при трении качения играют роль также и те деформации обоих тел, которые наступают под влиянием внешней нагрузки в области вблизи участка контакта. При качении вследствие перемещения участка контакта непрерывно идут два процесса: деформирование новых и новых областей обоих тел и спад и исчезновение деформации областей, деформированных ранее. При неидеальной упругости, характерной для реальных тел, работа, затрачиваемая на деформацию любого участка каждого тела, не возвращается полностью при уничтожении деформации (упругий гистерезис). Таким образом, при качении должна непрерывно тратиться, переходя в тепло, работа на упругое деформирование.

Эта затрата работы служит основным источником трения качения у тел, которые одновременно легко деформируются и отличаются большим несовершенством упругости — упругим гистерезисом. К таким телам относится прежде всего ряд полимеров, как, например, резина.

Все это легко наблюдать, сравнивая время скатывания цилиндров или шариков с наклонной плоскости, покрытой различными телами. Время и скорость скатывания очень резко меняются в зависимости от рода подстилающего материала. Вследствие сложности этого вопроса мы ограничились этими краткими замечаниями, указывающими в общих чертах природу силы трения качения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г а т ч е к. Е. Вязкость жидкостей. ОНТИ, 1928.
2. Труды Всесоюзного совещания по вязкости жидкостей и коллоидных растворов. Т. I и II. Изд-во АН СССР. М.—Л., 1941—1944.
3. Ф р е н к е л ь Я. И. Кинетическая теория жидкостей. Изд-во АН СССР. М.—Л., 1945.
4. Т и м и р я з е в А. К. Кинетическая теория материи. ГТТИ, 1933.
5. С т е н т о н Т. Е. Общая теория трения. ОНТИ. М.—Л., 1935.
6. Гидродинамическая теория смазки. Сборник классических работ. ГТТИ, 1934.
7. Труды I Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах. Т. I и II. Изд-во АН СССР. М.—Л., 1939—1940.
8. Труды II Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах. Т. I, II и III. Изд-во АН СССР, 1947—1949.
9. К у з н е ц о в В. Д. Физика твердого тела. Т. I, гл. IX, изд. 2. Изд-во «Красное знамя». Томск, 1937.
10. Труды III Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах. Т. I, II и III. Изд-во АН СССР, 1960.
11. К р а г е л ь с к и й И. В. Трение и износ. Машгиз. М., 1962.

ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>От автора</i>	3
<i>Введение</i>	9
Сопротивление движению	9
Внешнее и внутреннее трение	10
Градиент скорости	13
О передаче количества движения	17
Трение и превращения энергии. Виды трения	19

I. Внутреннее трение

Основной закон внутреннего трения	24
О скольжении между жидкостью и твердой стенкой	25
Сопротивление движению твердого тела в жидкости	27
Закон Стокса и его приложения	29
Течение жидкости по трубам	37
Ламинарный и турбулентный режимы течения	40
Применение закона Пуазейля при измерении вязкости	49
Еще о методах измерения вязкости	52
Роль вязкости в некоторых технологических процессах и научных исследованиях	55
Вязкость коллоидных растворов	59
Механизм внутреннего трения газов	62
О скольжении газа на границе с твердой стенкой	66
О движении разреженного газа в пористых телах	73
Закон вязкости жидкостей Бачинского	80
Особый механизм вязкости жидкостей по Френкелю	84

II. Внешнее трение и смазка

Внешнее трение. Гидродинамическая теория смазки Петрова — Рейнольдса	90
Клиновое действие смазочного слоя	93
Воздушная смазка	102
Сухое, или истинно внешнее, трение	104

Статическое трение	105
Закон Амонтона и его приложения	109
Смазочное действие мономолекулярных слоев органических соединений	116
Адсорбционная смазка	117
Нерастворимые мономолекулярные слои на поверхности воды	125
Смазочное действие мультимолекулярных (многомолекулярных) слоев	130
Внешнее трение и молекулярные силы	133
Механизм внешнего трения	141
Применение модели к обоснованию законов внешнего трения	143
Дальнейшее обсуждение и обоснование законов внешнего трения и их применения	151
Учет влияния молекулярных взаимодействий на силу трения. Двучленный закон трения	152
Экспериментальная проверка двучленного закона трения	155
Применимость двучленного закона трения к внутренним скольжениям в пластичных телах	164
Приложения двучленного закона трения. Трение шероховатых поверхностей	166
Отклонения от закона Амонтона	169
Демонстрация зависимости силы трения от продолжительности контакта	173
Скачки при трении	174
Влияние на трение механического зацепления. Явление предварительных смещений (эффект Верховского)	181
Трение движения твердых тел	185
Граничное трение и маслянистость	188
Молекулярное клиновое (буферное) действие масляной пленки при кинетическом трении	191
Вязкость граничных слоев жидкостей	194
Граничные фазы и их ориентированная структура	202
Граничные фазы и природа маслянистости	205
Расклинивающее и защитное действие смазочных слоев	208
Отчего лед скользкий?	213
Химическая «самосмазка» и приработка. Влияние внешней среды на износ. Эффект Ребиндера	217
Влияние поверхностно-активных веществ на износ	218
Трение верчения и качения	223
Литература	228

Борис Владимирович Дерягин

Что такое трение?

Издание 2-е, переработанное и дополненное

*Утверждено к печати
Редколлегией научно-популярной литературы
Академии наук СССР*

Редактор Издательства *Д. М. Беркович*
Художник *И. П. Юдин*
Технический редактор *Г. С. Симкина*
Корректор *Н. Г. Васильева*

РИСО АН СССР № 37—137В Сдано в набор 29/XI 1961 г.
Подписано к печати 15/II—63 г. Формат 84×108^{1/2}. Печ. л. 7,25
Усл. печ. л. 11,89. Уч.-изд. л. 11,6. Тираж 25000 Изд. № 1116.
Т-02078. Тип. зак. № 1412

Цена 35 к.

Издательство Академии наук СССР,
Москва, Б¹-62, Подсосенский пер., 21
2-я типография Издательства АН СССР,
Москва, Г-99, Шубинский пер., 10.

2-я ТИПОГРАФИЯ
Издательства Академии Наук СССР
Москва, Г-99, Шубинский пер., д. 10

При обнаружении недостатков
просим вернуть книгу вместе с этим
ярлыком для обмена

ЦЕНА 35 коп.

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР