

669.1
Л852

Министерство образования и науки Российской Федерации

Сибирский федеральный университет

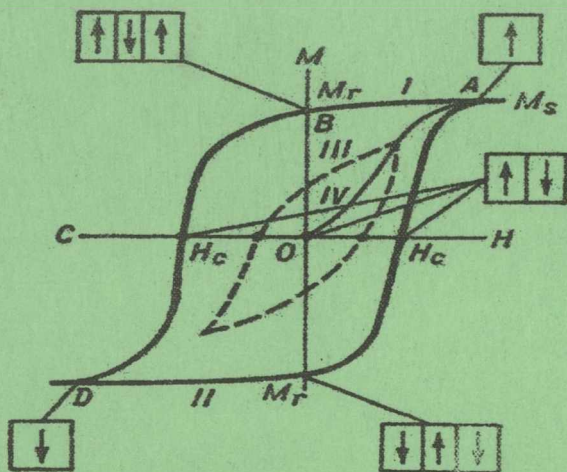


УНИВЕРСИТЕТ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
SIBIRIAN FEDERAL UNIVERSITY

А.Н. Лупик

Термо- и гальванозффекты
в железоникелевых сплавах

Монография

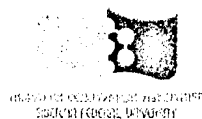


Красноярск, Лесосибирск

2012

Министерство образования и науки Российской Федерации

Сибирский федеральный университет



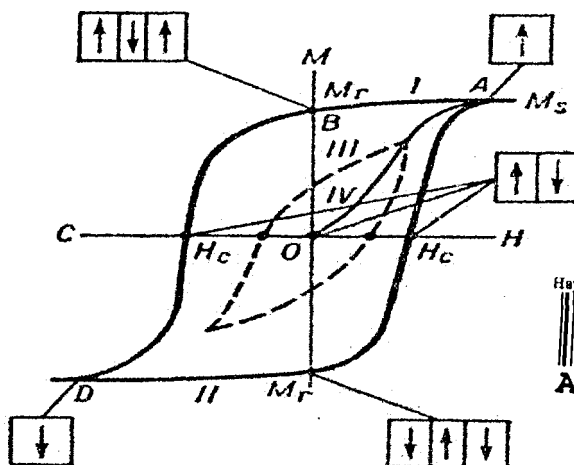
АБОНЕМЕНТУ НАУЧНОЙ
ЛИТЕРАТУРЫ

А.Н. Лупик

Термо- и гальваноэффекты

в железоникелевых сплавах

Монография



Научная библиотека СФУ



A1251632B

Красноярск, Лесосибирск

2012

УДК 669.16 14
ББК 34.22
Л 852

Рецензенты:

Ю.Ю. Логинов, доктор физ.-мат. наук, профессор;

Л.Н. Бадуленко, канд. физ.-мат. наук, профессор

Л 852 Термо- и гальваномагнитные эффекты в железоникелевых сплавах: монография/ А.Н. Лупик. - Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2012. – 227 с.

ISBN 978–5–7638–2574–9

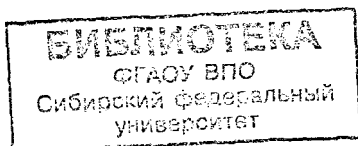
В монографии приведены результаты исследования комплексного воздействия внешних магнитных полей, упругих растягивающих сил и упругой деформации кручения на термоэлектродвижущую силу и электросопротивление железоникелевых проволочных образцов разного состава. Из эффектов, измеренных в ходе эксперимента, интересны следующие: 1) изменение электросопротивления намагниченных до насыщения образцов при их упругом растяжении (кручении); 2) изменение термоэдс намагниченных до насыщения образцов при их упругом растяжении (кручении). Имеет место корреляция знаков и величин этих эффектов: увеличению электросопротивления соответствует уменьшение термоэдс и, наоборот. Обнаружены новые аномалии этих эффектов в инварной области и выявлены их причины. Высказаны предложения об учете обнаруженных эффектов при исследованиях кинетических явлений в ферромагнетиках и их практическом применении.

Предназначена для студентов физических специальностей вузов, аспирантов и исследователей в области физики магнитных явлений.

524092

УДК 669.15
ББК 34.22

ISBN 978–5–7638–2574–9



© А.Н. Лупик, 2012
© Сибирский
федеральный
университет, 2012

О г л а в л е н и е

	Введение	5
Глава 1	Сведения о свойствах и деформации вещества	14
1.1	Разрежение и сжатие газов	14
1.2	Свойства жидкости и следствия её деформации	16
1.3	Свойства плазмы при внешних воздействиях	29
1.4	Изменение физических свойств твердых тел под влиянием внешних воздействий	34
1.4.1	Сведения о строении твердых тел	34
1.4.2	Механические свойства	41
1.4.3	Тепловые свойства	44
1.4.4	Электрические свойства	46
1.4.5	Магнитные свойства	47
1.4.6	Оптические свойства	54
Глава 2	Некоторые явления в веществе и их применение	56
2.1	Механические явления	58
2.2	Молекулярные явления	64
2.3	Гидроаэродинамические явления	72
2.4	Колебательные и волновые явления	74
2.5	Электрические явления	77
2.6	Магнитные явления	80
Глава 3	ТермоэДС железоникелевых сплавов под влиянием деформации растяжения и магнитного поля	85
3.1	Описание экспериментальной установки	85
3.2	Результаты исследования термоэДС железоникелевых сплавов	92
Глава 4	Электросопротивление железоникелевых сплавов при упругом растяжении образцов, помещенных в магнитное поле	113
4.1	Экспериментальная установка	113
4.2	Результаты исследования и их обсуждение	119
4.2.1	Гальваномагнитный эффект в упругодеформированных	119

	сплавах системы железо – никель с положительной магнитострикцией	
4.2.2	Влияние упругих растягивающих напряжений на электросопротивление железоникелевых сплавов	135
4.2.3	Температурная зависимость продольных гальваноэффектов в железоникелевых сплавах	179
4.2.4	Гистерезис продольных гальваноэффектов в сплавах железо – никель	183
4.2.5	Гальваноэффекты в железоникелевых сплавах, легированных молибденом	185
4.2.6	Применение результатов исследования	189
Глава 5	Гальваноэффекты и термоэффекты в железоникелевых сплавах при упругом кручении проволочных образцов	191
5.1	Гальваноэффекты при упругом кручении железоникелевых проволок	191
5.2	Термоэффекты при упругом кручении железоникелевых проволок	208
	Заключение	221
	Список литературы	223

*Светлой памяти моих учителей
Патюковых Зинаиды Михайловны и
Константина Архиповича посвящается...*

ВВЕДЕНИЕ

Философское учение о материи

Мы живем в материальном мире и являемся частью Вселенной. Все составляющие материального мира находятся в постоянном движении. Бесконечная сложность реального мира и его процессов приводит к бесконечности его познания. Содержательный анализ понятия "материя" всегда был в поле зрения различных философских учений [24]. Натурфилософы Фалес, Анаксимен, Гераклит, Демокрит первыми пытались выявить некое "начало": воду, воздух, огонь, атомы. Платон впервые использовал краеугольный термин философии – "*материя*".

Сложились различные концепции материи: атомистическая, эфирная, вещественная. Французские материалисты XVIII в. материю представляли как вечную и несотворимую, постоянно движущуюся по законам механики, как основу реального мира.

Разрабатывая научное определение материи, К. Маркс и Ф. Энгельс [26] имели в виду объективный мир в целом, всю совокупность составляющих его тел. Материя понималась как единственно существующая субстанция. В.И. Ленин развил это учение и сформулировал понятие материи: это философская категория для обозначения объективной реальности, которая дана человеку в его ощущениях [4]. Все предметы существуют независимо от сознания человека и способны отражаться им.

Всеобщими атрибутами и основными способами существования материи являются движение, пространство и время. Материя способна к качественным изменениям, она находится в движении. Движение не случайное, а неотъемлемое свойство материи. Пространство и время

сами по себе как формы движения не существуют и существовать не могут. Взятые в абстракции от движущейся материи, они превращаются в пустые представления. Вплоть до XX в. естествоиспытатели сравнивали пространство с пустотой, время считали текущим равномерно, отрывали их друг от друга, от материи и движения.

Создав теорию относительности, А. Эйнштейн показал, что время и пространство существуют не сами по себе, а находятся в тесной взаимосвязи, теряя свою самостоятельность и выступая при этом как стороны единого целого. Эта теория ввела понятие единого четырехмерного пространства – времени. Пространство есть форма бытия материи, характеризующая ее протяженность, сосуществование и взаимодействие материальных тел во всех системах. Время – форма бытия материи, выражающая длительность ее существования, последовательность смены состояний всех материальных систем.

Движение представляет собой необходимое, неотъемлемое свойство материи, без которого она не может существовать. Иными словами, движение есть атрибут материи. Движение абсолютно и относительно. Возможны три типа движения: от простого к сложному, по восходящей линии (развитие); по нисходящей линии (процесс старения живого организма); переход к движению либо первого, либо второго типа.

Источником изменений (движения) является взаимодействие противоположностей, например, изменчивости и устойчивости. Под изменчивостью мы понимаем смену свойств, состояний и отношений, принадлежащих материальным и идеальным системам. Устойчивость есть сохранение свойств, состояний и отношений этих систем. Движение включает в себя и изменчивость, и устойчивость одновременно. Основой гегелевской диалектики выступает закон единства и борьбы противоположностей. Не изменчивость и не устойчивость, а их взаимодействие, единство и взаимоисключение,

"борьба" – источник процесса движения. Это проявление наблюдается в природе и обществе.

Развитие квантовой физики, космологии и т.д. ставит перед наукой все новые и новые вопросы, ответы на которые будут получены при условии совершенствования учения о материи и ее свойствах. Решение многих проблем, возможно, будет связано с созданием физической теории, более общей, чем теория относительности и квантовая теория поля.

Определение материи

Анализ истории возникновения и развития понятия материи показывает, что оно результат процесса деятельности человека по познанию окружающего его мира. Различные определения материи обеспечивают все более глубокое понимание целостности рассматриваемого понятия.

Существуют различные аспекты философского осмысления материи. Достаточно распространено такое определение: "Материя – это философская категория для обозначения объективной реальности, данной нам в ощущениях и существующей независимо от сознания" [4]. Это определение носит ярко выраженный мировоззренческий характер и раскрывает отношение человека к миру, содержит в себе возможность для индивида сопоставлять свое существование с существованием других людей, познавать и практически использовать общие понятия, представления, ценности, знание в целом, общечеловеческий опыт, регулирующие его отношение с окружающей реальностью. Вышеприведенное определение не исходит из понятия вещества или набора его свойств, а делает главный акцент на возможности познания мира, воспроизводит теоретико-познавательную ситуацию, и поэтому его относят к гносеологическим.

Одним из опорных понятий в рассматриваемом определении является сознание, содержательный анализ которого позволяет более

полно представить противоположное ему понятие объективной реальности. Абсолютная противоположность материи и сознания проявляется в том, что в образах сознания отсутствуют сами материальные объекты, хотя имеется информация о них; это особая субъективная реальность, особый мир, развивающийся и функционирующий по специфическим законам. На основе репродуктивных образов в результате творческой деятельности сознания создаются идеальные образы, не имеющие аналогов в действительности, но способные приобрести материальный статус.

В онтологическом смысле материя – это бесконечное множество всех существующих в мире объектов и систем, субстрат любых свойств, связей, отношений и форм движения; в мире нет ничего кроме движущейся материи. Подобный подход к определению материи показывает относительную противоположность между материей и сознанием, природой и духом. Так, индивидуальное сознание через свою субстратную основу осуществляет нераздельную связь духовного и материального. Современная наука выявляет все более глубокие связи сознания, психики с биохимическими и биофизическими процессами в нервных клетках, устанавливаются экспериментальным путем энергетическая и информационная связь с биосферой и космосом.

Существуют многочисленные гипотетические теории о возможности разумной жизни на других планетарных системах. Сознание в онтологическом смысле рассматривается как один из атрибутов материи. А поскольку атрибуты извечно присущи определяемому, то сознание тоже вечно. Можно говорить только о различных его проявлениях, как актуальных, так и потенциальных. Это вовсе не означает одухотворение природы. Так, невозможно говорить о наличии сознательной жизни в неорганической природе. Но в онтологическом смысле сознание есть коренное, неустранимое свойство материи, означающее возможность самосознания природы.

Это коренное атрибутивное свойство актуализируется природой в своей наивысшей форме — социальной, а человек выступает в качестве субъекта этого всеобщего свойства материи.

В контексте изложенного понятно стремление некоторых авторов внести в содержание основного вопроса философии личностный аспект, согласно которому усматривается формирование новой концепции материи. Каковым будет содержание этой концепции, покажет будущее, но главное в том, что человеческая мысль движется к синтезу самых разных стратегий исследования материи [24].

*Современные представления о материи, движении,
пространстве и времени*

Специальная теория относительности установила зависимость инертной массы (т.е. массы движущегося тела) от скорости движения тела. Существует ли зависимость между движением и гравитационной массой, фигурирующей в законе всемирного тяготения [22]?

Оказалось, что метрика пространства-времени зависит от напряженности гравитационного поля, которое создается веществом. Массы вещества создают особое поле тяготения, благодаря которому материя влияет на свойства пространства и времени. Например, было установлено, что на Солнце все происходит медленнее, чем на Земле, из-за более высокого гравитационного потенциала на его поверхности. В 1919 г. во время солнечного затмения наблюдалось отклонение луча света вблизи поверхности Солнца, что свидетельствовало об изменении свойств пространства.

Вывод А. Эйнштейна гласил: в зависимости от гравитационных масс время замедляется или ускоряется, а пространство искривляется. Кривизна пространства измеряется отклонением от классических правил геометрии Евклида. Так, например, в евклидовой геометрии предполагается, что сумма углов треугольника составляет 180° . Однако сумма углов треугольника, изображенного на

поверхности сферы, больше 180° , а на седловидной поверхности – меньше 180° . Поверхность сферы в неевклидовой геометрии называется поверхностью положительной кривизны, а поверхность седла – отрицательной. Величина поля тяготения в каждой точке пространства зависит от его кривизны. Инерциальное движение точки в таком пространстве осуществляется не прямолинейно и равномерно, а по геодезической линии искривленного пространства.

Идею искривленного пространства положительной кривизны предложил Б. Риман, отрицательной – Н.И. Лобачевский. Еще в 1829 г. Лобачевский в работе «Начала геометрии» доказал, что возможна непротиворечивая геометрия, отличная от считавшейся единственно возможной евклидовой геометрии. Ученый показал, что свойства пространства зависят от свойств движущейся материи, окончательный же ответ на вопрос о свойствах пространства, по мнению Н.И. Лобачевского, должны дать астрономические наблюдения. Немного позже, в 1867 г., вышла в свет работа Б. Римана «О гипотезах, лежащих в основании геометрии», в которой он также высказывал идею зависимости свойств пространства от материальных тел. Физическое пространство может быть искривлено, однако искривлено ли оно на самом деле, должен, по мнению Б. Римана, решить эксперимент [22].

Общая теория относительности А. Эйнштейна соединила в рамках одной концепции понятия инерции, гравитации и метрики пространства-времени. Выводы общей и специальной теории относительности и неевклидовой геометрии полностью дискредитировали понятия абсолютного пространства и абсолютного времени.

Новая парадигма предполагает рассмотрение пространства и времени как систем отношений между взаимодействующими объектами. Пространство и время неразрывно связаны друг с другом и составляют единый пространственно-временной континуум. Выводы

общей теории относительности получили экспериментальное подтверждение после открытия явления красного смещения спектров звезд и отклонения луча света под действием поля тяготения.

Несмотря на достаточно убедительные доказательства общей теории относительности и ее всеобщее признание в физике продолжают попытки создания альтернативных теорий тяготения и гравитации. Основание для этого дает сама теория А. Эйнштейна. Например, фундаментальные свойства нашего мира, как однонаправленность времени или трехмерность пространства, рассматриваются теорией относительности [22].

Кроме того, в основе теории относительности лежит предположение: «скорость света в вакууме является максимально возможной скоростью физических процессов». Однако нет никаких доказательств абсолютности запрета на существование сверхсветовых скоростей. В связи с этим в современной физике рассматривается гипотеза тахионов – частиц, которые движутся с большей скоростью, чем скорость света. Гипотеза тахионов допускает, что досветовые и сверхсветовые частицы представляют собой принципиально различные типы частиц, которые нельзя преобразовать друг в друга путем изменения их скорости. Иными словами, тахионы рождаются и умирают, не преодолевая световой барьер, всегда имея скорость больше скорости света. Существование подобных частиц с совершенно непривычными для нас свойствами меняет описание процессов, протекающих в природе. Парадоксальность тахионов не может служить основанием для вывода о невозможности их существования; важно то, что теоретически мыслимые свойства тахионов не противоречат законам, лежащим в основе современной физики [22].

Новые концепции тяготения и гравитации пока не обладают большим эвристическим потенциалом, эстетической привлекательностью и простотой, т.е. не соответствуют принятым в

современной науке критериям отбора и предпочтения теорий. Тем не менее, не вызывает сомнения, что поиски альтернативных теорий будут продолжаться.

Идею о едином пространственно-временном континууме в конце XIX в. предложил немецкий математик и физик Г. Минковский (мир Минковского). В этом мире положение тела может быть определено с помощью четырех величин: трех пространственных и одной временной.

Понятие многомерного пространства существует пока только как математическое, а не как физическое. Основания трехмерности наблюдаемого пространства ищут в структуре некоторых фундаментальных процессов, например в строении электромагнитной волны и фундаментальных частиц. Российский исследователь Л.М. Гиндилис утверждает, что мы можем изучать n -мерные миры лишь мысленно, а возможности их экспериментального исследования для нас закрыты: при $n > 4$ не могут существовать замкнутые устойчивые орбиты движения тел. Планеты должны либо падать на центральное тело в планетной системе, либо уходить в бесконечность, т.е. в многомерных мирах невозможно существование аналогов планетных систем и атомов. Следовательно, невозможна жизнь. Таким образом, единственное значение параметра n , которое совместимо с существованием жизни во Вселенной, равно 4; именно этот мир мы и наблюдаем [22].

Физика как наука различает полевые формы существования материи (гравитационное поле, электромагнитное поле, электрическое поле, магнитное поле, вакуум и др.) и материю в форме вещества (твердые тела, жидкости, газы, плазма, элементарные частицы и др.). Вещество откликается на воздействие различных внешних сил изменением своих параметров и свойств: объёма, плотности, формы, температуры, давления, намагниченности, термоздс, электросопротивления и др. В нашей монографии объектом изучения

выступают твердые тела (железоникелевые сплавы), подвергнутые упругой деформации растяжением и кручением, поэтому вопросы поведения твердых тел при упругих деформациях различных видов изложены более подробно, чем для газов и жидкостей.

ГЛАВА 1 СВЕДЕНИЯ О СВОЙСТВАХ И ДЕФОРМАЦИИ ВЕЩЕСТВА

1.1 Разрежение и сжатие газов

Разрежение и сжатие газов подчиняется газовым законам, полученным опытным путем. Закон Бойля–Мариотта – один из основных газовых законов, согласно которому при постоянной температуре объём V данной массы идеального газа обратно пропорционален его давлению p , т.е. $pV=C=\text{const}$ (рис.1.1). Постоянная C пропорциональна массе газа (числу молей) и его абсолютной температуре. Закон установлен по опытным данным английским учёным Р. Бойлем (1662) и независимо от него французским учёным Э. Мариоттом (1676). Закон Бойля — Мариотта следует из кинетической теории газов, если принять, что размеры молекул пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием между ними и отсутствует межмолекулярное взаимодействие. Иными словами, закон Бойля – Мариотта выполняется строго для идеального газа. Для реальных газов, у которых влиянием размеров молекул и их взаимодействием пренебрегать нельзя, закон Бойля – Мариотта выполняется приближённо, тем лучше, чем дальше от критического состояния находится газ. Исследуемая масса газа находится в поле тяготения Земли, что приводит к добавочному давлению верхних слоев газа на нижние.

Давление (P) — физическая величина, характеризующая состояние сплошной среды и численно равная силе, действующей на единицу площади поверхности перпендикулярно этой поверхности. В простейшем случае равновесной неподвижной среды или идеальной движущейся среды давление не зависит от ориентации поверхности. В данной точке давление определяется как отношение нормальной составляющей силы, действующей на малый элемент поверхности, к

его площади. Среднее давление по всей поверхности есть отношение силы к площади

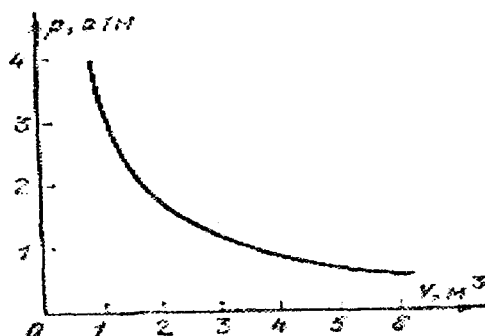


Рис. 1.1 Зависимость давления от объема (и наоборот) некоторой массы газа при постоянной температуре

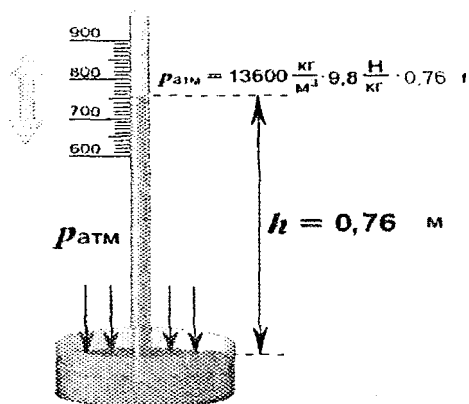


Рис. 1.2 Опыт Торичелли

поверхности. Давление является интенсивной физической величиной; в системе СИ измеряется в паскалях (Па). Атмосферное давление – гидростатическое давление атмосферы на все находящиеся в ней предметы и земную поверхность. Атмосферное давление создается гравитационным притяжением воздуха к Земле.

В 1643 г. Торричелли показал, что воздух имеет вес. Совместно с В. Вивиани Торричелли провёл первый опыт по измерению атмосферного давления, изобретая трубку Торричелли (первый ртутный барометр), – стеклянную трубку, в которой нет воздуха. В такой трубке ртуть поднимается на высоту около 760 мм (рис.1.2). На земной поверхности атмосферное давление изменяется от места к месту и во времени. Особенно важны определяющие погоду неперiodические изменения атмосферного давления, связанные с возникновением, развитием и разрушением медленно движущихся областей высокого давления (антициклонов) и относительно быстро перемещающихся огромных вихрей (циклонов), в которых господствует пониженное давление. Отмечены колебания атмосферного давления на уровне моря в пределах 684 – 809 мм рт. ст. Нормальным атмосферным давлением называют давление в 760 мм рт. ст. (101 325 Па). Атмосферное давление уменьшается по мере увеличения высоты, поскольку оно создаётся лишь вышележащим слоем атмосферы. Зависимость давления от высоты описывается барометрической формулой. Для идеального газа, имеющего постоянную температуру T и находящегося в однородном поле тяжести (во всех точках его объёма ускорение свободного падения g одинаково), барометрическая формула имеет следующий вид:

$$p = p_0 \exp \left[-Mg \frac{h - h_0}{RT} \right],$$

где p — давление газа в слое, расположенном на высоте h ; p_0 — давление на нулевом уровне ($h = h_0$); M — молярная масса газа; R — газовая постоянная; T — абсолютная температура.

1.2 Свойства жидкости и следствия её деформации

Молекулы вещества в жидком состоянии расположены почти вплотную друг к другу [13]. В отличие от твердых кристаллических тел,

в которых молекулы образуют упорядоченные структуры во всем объеме кристалла и могут совершать тепловые колебания около фиксированных центров, молекулы жидкости обладают большей свободой. Каждая молекула жидкости, так же как и в твердом теле, «зажата» со всех сторон соседними молекулами и совершает тепловые колебания около некоторого положения равновесия. Однако время от времени любая молекула может переместиться на соседнее вакантное место. Такие перескоки в жидкостях происходят довольно часто, поэтому молекулы не привязаны к определенным центрам, как в кристаллах, и могут перемещаться по всему объему жидкости. Этим объясняется текучесть жидкостей. Из-за сильного взаимодействия близко расположенные молекулы могут образовывать локальные (неустойчивые) упорядоченные группы, содержащие несколько молекул. Это явление называется ближним порядком (рис. 1.3).

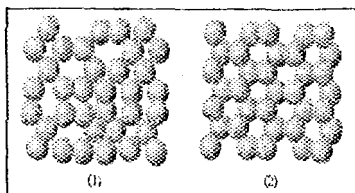


Рис. 1.3 Пример ближнего порядка молекул жидкости и дальнего порядка молекул кристаллического вещества: 1 – вода; 2 – лед

Отличие газообразного вещества от жидкости на примере воды иллюстрирует рис. 1.4. Молекула воды H_2O состоит из одного атома кислорода и двух атомов водорода, расположенных под углом 104° .

Среднее расстояние между молекулами пара в десятки раз превышает среднее расстояние между молекулами воды. В отличие от рис. 1.3, где молекулы воды изображены в виде шариков, рис. 1.4 дает представление о структуре молекулы воды.

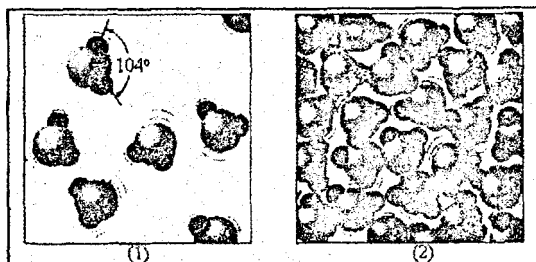


Рис. 1.4 Водяной пар (1) и вода (2). Молекулы воды увеличены примерно в $5 \cdot 10^7$ раз

Вследствие плотной упаковки молекул сжимаемость жидкостей, т.е. изменение объема при изменении давления, очень мала [13]; она в десятки и сотни тысяч раз меньше, чем в газах. Давление, производимое на жидкость, заключенную в сосуд, передаётся без изменения в каждую точку объёма этой жидкости (закон Паскаля, справедлив также и для газов). Эта особенность, наряду с очень малой сжимаемостью, используется в гидравлике.

Жидкости, как и твердые тела, изменяют свой объем при изменении температуры. Для не очень больших интервалов температур относительное изменение объема $\Delta V/V_0$ пропорционально изменению температуры ΔT :

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \beta \Delta T.$$

Коэффициент β называют температурным коэффициентом объемного расширения. Этот коэффициент у жидкостей в десятки раз больше, чем у твердых тел. У воды, например, при температуре 20°C $\beta_{\text{в}} \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, у стали $\beta_{\text{ст}} \approx 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, у кварцевого стекла $\beta_{\text{кв}} \approx 9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Тепловое расширение воды имеет интересную и важную для жизни на Земле аномалию. При температуре ниже 4°C вода расширяется при понижении температуры ($\beta < 0$). Максимум плотности $\rho_{\text{в}} = 103 \text{ кг/м}^3$ вода имеет при температуре 4°C . При замерзании вода расширяется, поэтому лед остается плавать на поверхности

замерзающего водоема. Температура замерзающей воды подо льдом равна 0 °С. В более плотных слоях воды у дна водоема температура оказывается около 4°С. Благодаря этому может существовать жизнь в воде замерзающих водоемов. Наиболее интересной особенностью жидкостей является наличие свободной поверхности. Жидкость, в отличие от газов, не заполняет весь объем сосуда, в который она налита. Между жидкостью и газом (или паром) образуется граница раздела, которая находится в особых условиях по сравнению с остальной массой жидкости. Молекулы в пограничном слое жидкости, в отличие от молекул в ее глубине, окружены другими молекулами той же жидкости не со всех сторон. Силы межмолекулярного взаимодействия, действующие на одну из молекул внутри жидкости со стороны соседних молекул, в среднем взаимно скомпенсированы. Любая молекула в пограничном слое притягивается молекулами, находящимися внутри жидкости (силами, действующими на данную молекулу жидкости со стороны молекул газа (или пара), можно пренебречь). В результате появляется некоторая равнодействующая сила, направленная вглубь жидкости. Если молекула переместится с поверхности внутрь жидкости, силы межмолекулярного взаимодействия совершат положительную работу. Наоборот, чтобы вытащить некоторое количество молекул из глубины жидкости на поверхность (т.е. увеличить площадь поверхности жидкости), нужно затратить положительную работу внешних сил $\Delta A_{\text{вн}}$, пропорциональную изменению ΔS площади поверхности: $\Delta A_{\text{вн}} = \sigma \Delta S$.

Коэффициент σ называется коэффициентом поверхностного натяжения ($\sigma > 0$) – это работа, необходимая для увеличения площади поверхности жидкости при постоянной температуре на единицу. В СИ σ измеряется в джоулях на метр квадратный (Дж/м^2) или в ньютонах на метр ($1\text{Н/м} = 1\text{Дж/м}^2$). Следовательно, молекулы поверхностного слоя жидкости обладают избыточной по сравнению с молекулами

внутри жидкости потенциальной энергией. Потенциальная энергия E_p поверхности жидкости зависит от площади: $E_p = A \cdot v_n = \sigma S$.

Из механики известно, что равновесным состояниям системы соответствует минимальное значение ее потенциальной энергии. Отсюда следует, что свободная поверхность жидкости стремится сократить свою площадь. По этой причине свободная капля жидкости принимает шарообразную форму. Жидкость ведет себя так, как будто по касательной к ее поверхности действуют силы, сокращающие (стягивающие) эту поверхность. Эти силы называются силами поверхностного натяжения. Наличие сил поверхностного натяжения делает поверхность жидкости похожей на упругую растянутую пленку с той только разницей, что упругие силы в пленке зависят от площади ее поверхности (т. е. от того, как пленка деформирована), а силы поверхностного натяжения не зависят от площади поверхности жидкости. Некоторые жидкости, как, например, мыльная вода, обладают способностью образовывать тонкие пленки. Всем хорошо известные мыльные пузыри имеют правильную сферическую форму – в этом тоже проявляется действие сил поверхностного натяжения. Если в мыльный раствор опустить проволочную рамку, одна из сторон которой подвижна, то вся она затянется пленкой жидкости (рис. 1.5). Силы поверхностного натяжения стремятся сократить поверхность пленки. Для равновесия подвижной стороны рамки к ней нужно приложить внешнюю силу. Если под действием силы перекаладина переместиться на Δx , то будет произведена работа $\Delta A_{\text{внеш}} = F_{\text{внеш}} \Delta x = \Delta E_p = \sigma \Delta S$, где $\Delta S = 2L \Delta x$ – приращение площади поверхности обеих сторон мыльной пленки. Так как модули сил одинаковы, можно записать:

$$F_n \Delta x = \sigma 2L \Delta x \text{ или } \sigma = \frac{F_n}{2L}$$