Физические эффекты в машиностроении

Справочник

Физические эффекты в машиностроении

Физические ЭФФЕКТЫ в машиностроении

СПРАВОЧНИК



Москва
· Машиностроение ·
1993

ББК 34.4я2
Ф50
УДК 621.03 (035)

Авторы: **В. А. Лукьянец, З. И. Алмазова, Н. П. Бурмистрова, Р. Р. Газизьянов, С. А. Киткаева, Н. В. Слыханова, А. Н. Соболев, С. А. Софронов**

Федеральная целевая программа книгоиздания России.

Рецензент д-р техн. наук В. Н. Крюковский

Ф50 **Физические** эффекты в машиностроении: Справочник/ *В. А. Лукьянец, З. И. Алмазова, Н. П. Бурмистрова* и др.; Под общ. ред. *В. А. Лукьянца*. — М.: Машиностроение. 1993. — 224 с.: ил.

ISBN 5-217-01311-7

Справочник издается впервые. Содержит сведения о физических эффектах, представляющих интерес для решения изобретательских и проектно-конструкторских задач в машиностроении. Схематичное представление каждого эффекта и поисковый аппарат облегчают нахождение и выбор эффектов для конкретных условий задач. Рассмотрены примеры использования справочных данных для информационного поиска требуемых эффектов, структурного синтеза возможных принципов действия и физического анализа технических систем.

Предназначен для инженерно-технических работников проектных и конструкторских организаций, изобретателей и рационализаторов, создающих принципиально новые технические решения; может быть полезен студентам технических вузов, а также разработчикам САПР.

Ф $\frac{2702000000-256}{038\ (01)-93}$ 208—91 ББК 34.4я2

СПРАВОЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ЛУКЬЯНЕЦ Владимир Александрович,
АЛМАЗОВА Зоя Ивановна, БУРМИСТРОВА Нина Павловна и др.

ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Редактор *И. И. Лесниченко*
Переплет художника *Е. К. Самойлова*
Художественный редактор *С. Н. Голубев*
Технический редактор *О. В. Куперман*
Корректоры: *Л. Л. Георгиевская, Л. Я. Шабашова*

ИБ № 7020

Сдано в набор 13.09.90. Подписано в печать 30.04.91.
Формат 60×90 1/16. Бумага офсетная № 2. Гарнитура литературная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 16,0. Усл. кр.-отт. 16,0.
Уч.-изд. л. 16,6. Тираж 5000 экз. С

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Машиностроение»,
107076, Москва. Стромынский пер., 4

Тип. Московский печатник заказ №6254

ISBN 5-217-01311-7

© В. А. Лукьянец, З. И. Алмазова, Н. П. Бурмистрова и др., 1993

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 6

Глава 1. **Теоретические основы использования физических эффектов** . . 8
Определение физического эффекта 8
Основные закономерности проявления физических эффектов . . . 9
Модель физического эффекта 10
Условия взаимосвязи физических эффектов 10
Техническая реализация физических эффектов 12
Структура описания физического эффекта 14

Глава 2. **Методика решения задач** 16

Глава 3. **Описания физических эффектов, преобразующих механические воздействия в механические результаты воздействия** 20
Абсолютно упругий удар 20
Аккумуляция механической энергии при изгибе 21
Аккумуляция механической энергии при кручении 22
Аккумуляция механической энергии при растяжении (сжатии) . . 23
Аэродинамическая подъемная сила 24
Эффект Баушингера 25
Броуновское движение 26
Вибрационное перемещение 28
Влияние ультразвуковых колебаний на трение 29
Гидравлический удар 31
Гидродинамическое сопротивление 33
Гироскопический эффект 34
Давление при контакте 36
Дельта *E*-эффект 37
Эффект Доплера 39
Дросселирование 41
Избирательный перенос при трении 43
Инерция (первый закон Ньютона) 46
Клин 47
Колебания при ударе 48
Кумуляция (эффект Монро) 51
Эффект Магнуса 53
Отдача 55
Эффект Паскаля 56
Пластическая деформация скольжения 57
Реактивная сила при истечении газа или жидкости 59
Рычаг 60
Сверхпластичность 61
Сжимаемость 63
Силовое противодействие (третий закон Ньютона) 65

Силы Кориолиса . . . 66
Скачкообразная деформация (эффект Портевена—Ле Шателье) . . 67
Снижение статической нагрузки (эффект Блага—Лангенеккера) . . 69
Трение качения . . . 70
Трение скольжения . . . 71
Упругая деформация. Изгиб . . . 73
Упругая деформация. Кручение . . . 75
Упругая деформация. Растяжение. Сжатие . . . 76
Упругая деформация. Сдвиг . . . 78
Упругое последействие . . . 79
Ускоренное движение (второй закон Ньютона) . . . 80
Центробежная сила . . . 81
Эффект эжекции . . . 83

Глава **4. Описания физических эффектов, преобразующих механические воздействия в немеханические результаты воздействий** . . . 86
Аэродинамический нагрев . . . 86
Эффект Барнетта . . . 87
Внутреннее трение . . . 88
Эффект Джоуля—Томсона . . . 90
Эффект Дорна . . . 93
Инициирование ударом . . . 94
Магнитогидродинамический эффект . . . 96
Магнитоупругий эффект . . . 97
Механокалорический эффект . . . 99
Нагрев при деформации . . . 101
Потенциал течения . . . 102
Пьезомагнитный эффект . . . 104
Пьезоэлектрический прямой эффект . . . 105
Радиометрический эффект . . . 108
Температурный эффект при трении . . . 109
Тензорезистивный эффект . . . 111
Фотоупругий эффект . . . 113
Электромагнитная индукция для постоянного магнитного поля . . 116

Глава **5. Описания физических эффектов, преобразующих немеханические воздействия в механические результаты воздействий** . . . 118
Акустическая кавитация . . . 118
Эффект Ампера . . . 120
Эффект Архимеда . . . 121
Всемирное тяготение . . . 123
Эффект Видемана . . . 125
Вынужденная конвекция . . . 126
Гидростатическое давление . . . 128
Гравитационный захват . . . 129
Гравитационный коллапс . . . 132
Движение заряженных частиц в однородном электрическом поле 133
Детонация . . . 135
Диффузия . . . 136
Звуковой ветер . . . 138
Звукокапиллярный эффект . . . 140
Изгибные волны . . . 141
Лазерный телекинетический эффект . . . 142
Магнитострикция . . . 145
Механострикция (для постоянного магнитного поля) . . . 147
Память формы . . . 149
Пинч-эффект . . . 152
Пьезоэлектрический обратный эффект . . . 153
Радиационное давление (давление звукового излучения) . . . 155
Эффект Садовского . . . 157

Световое давление . . . 158
Свободная конвекция . . . 159
Силы Лоренца . . . 161
Солнечный парус . . . 162
Эффект суперпозиции . . . 164
Тепловое расширение твердых тел . . . 166
Термоупругий эффект . . . 168
Ультразвуковое диспергирование . . . 169
Ультразвуковое распыление . . . 171
Ультразвуковая коагуляция . . . 173
Электрогидравлический эффект . . . 174
Электроосмос . . . 176
Электрострикция (квадратичный пьезоэффект) . . . 177
Электрофорез . . . 178

Приложения . . . 180
1. Список физических эффектов по наименованиям воздействий . . 180
2. Список физических эффектов по наименованиям результатов воздействий . . . 183
3. Единицы физических величин . . . 188
4. Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц . . . 195
5. Относительные и логарифмические величины и их единицы . . 195
6. Некоторые фундаментальные физические постоянные . . . 197
7. Значения модулей продольной упругости и сдвига и коэффициента Пуассона некоторых поликристаллических материалов при нормальных условиях . . . 197
8. Предел прочности при растяжении некоторых материалов при 20 °С . . . 199
9. Плотность некоторых чистых элементов при нормальном давлении . . . 199
10. Примеры известных проявлений различных видов энергии . . . 200

Список литературы . . . 204

ПРЕДИСЛОВИЕ

Повышение качества выпускаемой продукции, создание и внедрение в производство принципиально новых объектов техники, материалов и передовой технологии являются важнейшими задачами. Их решение неразрывно связано с использованием разнообразных физических эффектов в период разработки изделий и технологических процессов. Поэтому возросла актуальность создания эффективной методологии решения проектно-конструкторских задач с использованием баз данных по физическим эффектам и материалам, на которых они проявляются. В решении этой задачи определенную роль может выполнить справочник «Физические эффекты в машиностроении».

Справочник содержит физические эффекты преобразования энергии: 1) механической в механическую; 2) механической в немеханическую; 3) немеханической в механическую.

При описании отдельного физического эффекта объединена различная информация, предназначенная для решения задач как исследовательского, так и проектно-конструкторского характера.

Справочник познакомит специалистов с известными физическими эффектами, с их практическим использованием в объектах техники и технологии, позволит значительно сократить время на поиск требуемой информации. Для удобства пользования он снабжен справочно-поисковым аппаратом.

Большое число известных физических эффектов, значительный объем информации по каждому из них предопределяют решение проектно-конструкторских задач только с применением средств вычислительной техники. Однако некоторые задачи, рассмотренные в методическом разделе, могут быть решены без ЭВМ.

Гл. 1 и 2 написаны В. А. Лукьянцем и А. Н. Соболевым, гл. 3—5 — З. И. Алмазовой, Н. П. Бурмистровой, Р. Р. Газизьяновым, С. А. Киткаевой, В. А. Лукьянцем, Н. В. Слыхановой, А. Н. Соболевым, С. А. Софроновым.

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

ВВ — взрывчатые вещества
ГП — гравитационное поле
ЗП — звуковое поле
КПД — коэффициент полезного действия
МП — магнитное поле
ПД — принцип действия
СП — силовое поле
ТЗ — техническое задание
ТП — тепловое поле
ТР — техническое решение
ТС — техническая система
УЗ — ультразвуковое поле
ФСх — физическая схема
ФЭ — физический эффект
ЭМП — электромагнитное поле
ЭМИ — электромагнитное излучение
ЭП — электрическое поле

ВНИМАНИЮ ПРЕДПРИЯТИЙ, ОРГАНИЗАЦИЙ И СПЕЦИАЛИСТОВ

В Марийском политехническом институте им. А. М. Горького (г. Йошкар-Ола) собрана различная информация о 1000 физических эффектов. На основе этой информации отдел баз данных может выполнить следующие работы:

1. Сформировать локальную базу данных по физическим эффектам.
2. Выдать требуемую информацию по интересующим физическим эффектам.
3. Разработать информационно-поисковую систему.
4. Разработать автоматизированную систему синтеза физической основы объектов техники.
5. Разработать экспертную систему для исследования перспективных направлений развития объектов техники.

За справками обращаться по адресу: 424024, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3, МарПИ, отдел баз данных. Тел. 9—60—59.

ГЛАВА 1

Теоретические основы использования физических эффектов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

При взаимодействии объектов материального мира протекают физические процессы, сопровождающиеся различными эффектами. Под эффектом понимается «... результат, следствие некоторых причин, действия» (БСЭ, 3-е изд., 1978, т. 30, С. 322). Многие эффекты нашли широкое применение в технике. Для того чтобы теоретически правильно использовать их при решении различных задач на физическом уровне, необходимо знать не только результаты воздействий объектов материального мира (эффекты), но и сами воздействия на другие объекты. Для однозначности толкования понятия ФЭ принято следующее его определение: физический эффект — это закономерность проявления результатов взаимодействия объектов материального мира, осуществляемого посредством физических полей. При этом закономерность проявления характеризуется последовательностью и повторяемостью при идентичности взаимодействия.

Разнообразие процессов и явлений, которые происходят в природе, обусловлено четырьмя типами взаимодействий: всемирным тяготением, электромагнитными, ядерными и слабыми взаимодействиями. Каждому типу взаимодействия соответствуют определенные физические поля. Каждое из этих полей имеет ряд модификаций, обусловливающих особенности взаимодействия материальных объектов. Например, электрическое поле может быть электростатическим, переменным, вихревым и т. д. Все поля и их модификации будем рассматривать как воздействия в отрыве от тех материальных объектов, от которых они исходят.

Воздействие всегда направлено на некоторый материальный объект (в дальнейшем просто «объект»), которым может быть отдельный элемент или совокупность взаимосвязанных элементов, образующих определенную структуру. Так, к объектам могут быть отнесены: системы из макротел (в том числе детали приборов, механизмов и т. д.), макротела (твердое тело, жидкость, кристалл и т. п.), молекула, атом, части атомов и молекул, частицы и т. д.

Результаты воздействия — это эффекты, проявляющиеся на объектах (или в окружающем их пространстве), на которые направлены определенные воздействия. Результатами воздействия являются те же физические поля, которые относятся к воздействиям. Этим обусловливается взаимосвязь между ФЭ, которая используется в объектах техники. К результатам воздействия относятся также изменения параметров объектов (размеров, формы, диэлектрической проницаемости и т. д.). При постоянстве условий взаимодействия и свойств объекта проявляются одни и те же результаты воздействия.

На рис. 1 изображена схема представления отдельного ФЭ, где A — воздействие, B — физический объект, на который оказывается воздействие, C — результат воздействия (эффект). Схематичное изображение ФЭ позволяет наглядно представлять физические процессы, происходящие при взаимодействии материальных объектов, в том числе в объектах техники.

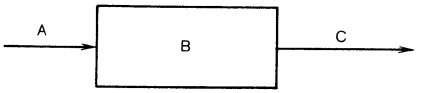


Рис. 1. Структурная схема ФЭ

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

Анализ информации об известных ФЭ позволил выявить следующие общие закономерности их проявления.

1. При одном воздействии на объект может проявляться несколько результатов воздействия. Их число зависит от структуры физического объекта. Чем менее сложен по своей структуре объект, тем меньшее число результатов воздействия на нем проявляется. Изменяя число и состав структурных элементов, при заданном воздействии можно получать необходимые результаты воздействия. Поскольку от одного воздействия могут проявляться ФЭ на разных иерархических уровнях структуры объекта, то возникают внутренние воздействия, а результаты воздействия, как правило, коррелируют с внутренними воздействиями.

Выделение структурных элементов объектов целесообразно использовать при физическом анализе процессов, происходящих в отдельных объектах или в их совокупности, а также при определении, какие ФЭ могут проявляться на известном материале и какие результаты воздействий могут возникать.

Внутреннее воздействие и его результаты широко используются в технике и технологии. Так, для нагревания заготовки может быть использована печь (внешнее воздействие) или нагревание путем пропускания через нее электрического тока (внутреннее воздействие).

2. На один объект может быть оказано несколько воздействий. Их можно подразделить на основные и дополнительные. Основным воздействием на объект является такое, результат от которого представляет другое, отличное от воздействия, физическое поле. Дополнительное воздействие — такое, которое приводит лишь к количественному изменению результата, получаемого от основного воздействия. Дополнительными воздействиями могут являться постоянно действующие воздействия, например гравитационное и тепловое поля, а также воздействия, оказываемые объектами окружающей среды. Например, на ФЭ возникновения магнитного поля при протекании электрического тока, где воздействием является электрическое поле, может быть оказано дополнительное воздействие, например, магнитным полем, что вызовет изменение электрического сопротивления проводника (магниторезистивный эффект). Дополнительные воздействия не могут вызвать данного результата без основного воздействия.

3. На одном объекте могут проявляться несколько ФЭ. Если какое-либо воздействие приводит к новому результату воздействия, то налицо проявление на одном объекте двух разных ФЭ. Эта особенность является основой для многофункционального использования элементов объектов техники. Любые два ФЭ или более, проявляющиеся на одном объекте, оказывают влияние друг на друга. Это влияние объясняется участием структурных элементов объекта в проявлении обоих ФЭ.

4. Значение результата воздействия может регулироваться и обусловливается следующими факторами: количественным изменением воздействия, введением дополнительных воздействий, введением еще одного основного воздействия, изменением структуры объекта, изменением параметров объекта. Это свойство лежит в основе технической реализации таких функций объектов техники, как усиление, ослабление, преобразование, модуляция, выравнивание, проводимость, непроводимость и др.

5. При постоянстве условий воздействия и свойств объекта проявляются одни и те же результаты воздействия, одни и те же значения их параметров. Эта закономерность обусловлена стабильностью структуры объекта, на который оказывается воздействие, и стабильностью свойств элементов его структуры.

МОДЕЛЬ ФИЗИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Модель ФЭ характеризует зависимость результата воздействия (эффекта) от воздействия и должна удовлетворять следующим требованиям:

отражать условия взаимосвязи ФЭ друг с другом;

давать количественную характеристику проявления ФЭ;

обеспечивать описание процесса проявления ФЭ во времени: переходные процессы (наложение воздействия, снятие воздействия) и установившийся процесс;

быть пригодной для использования в инженерной практике, в частности при проектировании;

обеспечивать определение результатов воздействий при заданных воздействиях, значениях варьируемых параметров физического объекта, временных характеристик.

В общем случае модель ФЭ имеет вид:

$$C_i = f(A_{\text{осн}}, A_{\text{доп}}, \langle b_1, b_2, \ldots, b_n \rangle, t),$$

где $A_{\text{осн}}$, $A_{\text{доп}}$— параметры основного и дополнительного воздействий; $\langle b_1, b_2, \ldots, b_n \rangle$ — кортеж параметров физического объекта B; C_i — параметры i-го результата воздействия; t — время, характеризующее проявление ФЭ.

Модель ФЭ позволяет представить обобщенную схему ФЭ (рис. 2).

Для многих ФЭ пока не известны строгие математические зависимости между воздействием и результатом воздействия. В этом случае используются эмпирические зависимости, либо экспериментальные данные.

Для определения различных C_i должны использоваться разные модели ФЭ; при этом изменяемыми параметрами модели будут кортежи варьируемых параметров объекта B.

Модель ФЭ может изменяться при переходе от одного класса объектов на другой. Изменение также будет связано с изменением кортежа $\langle b_1, b_2, \ldots, b_n \rangle$.

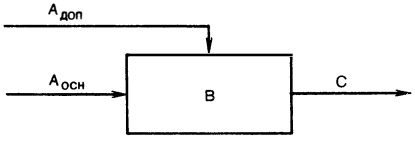


Рис. 2. Обобщенная схема ФЭ

Из модели ФЭ следует, что результат воздействия C_i зависит от используемых марок веществ и материалов. Число известных веществ и материалов, на которых проявляется тот или иной ФЭ, различается сильно. Например, известно свыше 1500 марок пьезоматериалов, тысячи материалов — проводников электрического тока, значительно меньше сверхпроводников и т. д. Однако далеко не все известные марки материалов или веществ, на которых проявляется ФЭ, нашли практическое применение. Это, как правило, только те, которые позволяют получить наибольший эффект и удовлетворяют технологическим, эксплуатационным и экономическим требованиям. В связи с этим поиск новых марок веществ и материалов следует считать важнейшей научной и технической задачей.

Многие вещества и материалы классифицированы относительно определяемых ФЭ, с которыми связаны их свойства, например полупроводники, диэлектрики, парамагнетики, ферромагнетики, сегнетоэлектрики и т. д., что упрощает поиск марок веществ и материалов при решении возникающих задач. Однако перечень свойств, которые их характеризуют, как правило, весьма неполный, что затрудняет принятие решения о применении того или иного материала.

В соответствии с моделью материал или вещество должны характеризоваться параметрами воздействий (основным и дополнительным), результатами воздействий и конструкторско-технологическими требованиями. Интеграция необходимой информации по веществам и материалам возможна только на основе создания базы данных по свойствам веществ и материалов.

УСЛОВИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ ФИЗИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

В большинстве своем объекты техники представляют собой сложные иерархические системы, характеризующиеся множеством структурных элементов и связей между ними. Функционирование таких объектов основы-

вается на проявлении множества взаимосвязанных ФЭ. Существуют следующие условия взаимосвязи ФЭ.

1. $C_n \cap A_{n+1}$,

где C_n — множество результатов воздействия n-го ФЭ; A_{n+1} — множество воздействий $(n+1)$-го ФЭ.

$$C_n = \{C_i\}_{i \in I};$$

где I — число номеров наименований результатов воздействия n-го ФЭ.

$$A_{n+1} = \{a_j\}_{j \in J};$$

где J — число номеров наименований воздействий $(n+1)$-го ФЭ.

При этом должно быть

$$d_{C_i}^{\gamma_i} \cap d_{a_j}^{\lambda_j} \neq 0,$$

где $d_{C_i}^{\gamma_i}$ — значение результата воздействия C_i n-го ФЭ; $d_{a_j}^{\lambda_j}$ — значение воздействия a_j $(n+1)$-го ФЭ; γ_i — множество номеров материалов, на которых проявляется C_i результатов воздействия; λ_j — множество номеров материалов, на которые оказывается воздействие a_j.

2. $\langle b_1, b_2, \ldots, b_k \rangle_{\text{ФЭ}_n} \cap$

$\cap \langle b_1, b_2, \ldots, b_p \rangle_{\text{ФЭ}_m}$,

где $\langle b_1, b_2, \ldots, b_k \rangle$ — множество параметров объекта, на котором проявляется ФЭ_n; $\langle b_1, b_2, \ldots, b_p \rangle$ — множество параметров того же объекта, на котором проявляется ФЭ_m.

При этом изменение параметров, входящих в область пересечения, должно влиять на проявление хотя бы одного C_i для ФЭ_n или ФЭ_m.

Ввиду различия моделей у ФЭ_n и ФЭ_m кортежи параметров, входящих в эти модели, будут различаться. Принимая во внимание, что ФЭ, как правило, имеют несколько C_i и могут зависеть от ряда $A_{\text{доп}}$, можно синтезировать сложные структуры взаимосвязанных ФЭ, обеспечивающих реализацию объекта техники с несколькими входами и выходами, с обратными связями, с использованием комплексов ФЭ для реализации часто встречающихся функций. Совокупность ФЭ будет представлять собой физическую схему объекта (ФСх). ФСх дает представление о том, какие заданные входные параметры объекта техники преобразуются в заданные выходные параметры. Элементами ФСх являются физические объекты, на которых проявляются ФЭ. Взаимосвязи между элементами ФСх характеризуют типы преобразований физических величин. В отличие от электрических и других схем, в которых, как правило, осуществляется преобразование какого-либо одного вида энергии (сигнала), в ФСх могут осуществляться различные преобразования. В этом отношении ФСх имеют много общего с функциональными схемами.

Элементы ФСх являются элементами низшего уровня иерархии. Поэтому она является более детальной, чем принципиальная схема, в которой элементами могут являться сложные объекты техники, функционирование которых основано на использовании ряда ФЭ. Ряд элементов объектов техники (датчики, преобразователи и др.) можно охарактеризовать только с помощью ФСх.

Преобразование заданного воздействия в заданный конечный результат представляет собой рабочую функцию объекта техники. База данных по физическим эффектам позволяет составить список функций, которые могут быть реализованы с их помощью. Наличие такого списка функций позволяет принципиально решить вопрос о возможности физической реализации проектируемого объекта техники. В список функций входят, как правило, обобщенные функции, например нагревание, расширение, колебание, электризация, перемещение и др.

Число функций, которые непосредственно выполняются ФЭ, значительно меньше числа функций, которые выполняются объектами техники и их структурными элементами. Это объясняется тем, что объекты техники выполняют, как правило, более конкретные, частные функции, хотя их выполнение основано на использовании одного и того же ФЭ.

Пример. Строгание металлических заготовок осуществляется на строгальных станках специально для этого предназначенными резцами. Для пиления этих же заготовок используется уже другой инструмент (дисковая пила, ножовочная пила и др.) и другое оборудование (станки). Функции «строгать»

и «пилить» иерархически относятся к более общей функции «резать». Несмотря на различный характер этих двух функций для их реализации используется один и тот же ФЭ, но реализуется он в рассмотренных случаях с помощью различных технических решений.

В свою очередь, последние могут иметь большое число вариантов конструктивного исполнения.

В связи с этим при выборе ФСх для реализации той или иной частной функции необходимо знать иерархическую структуру функций. Она может быть представлена либо в виде дерева функций, либо в виде иерархического словаря функций, например:

разделять
. резать
. . строгать
. . пилить
. . сверлить
. . точить
. . шлифовать
. . . хонинговать
. . . полировать
. дробить
и т. д.

Функции, реализуемые с помощью фонда ФЭ, расположены, как правило, на уровнях ближе к корню дерева функций, выполняемых технической системой (ТС).

При составлении иерархического словаря функций необходимо учитывать имеющиеся синонимы, используемые для названия функций ТС.

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

Использование ФЭ в объектах техники показывает, что параметры результата воздействия существенно зависят от геометрической формы физического объекта, на котором проявляется тот или иной ФЭ. Эта зависимость результата воздействия отражена в модели ФЭ.

Из этого следует, что для каждого ФЭ может быть составлен набор элементов различной геометрической формы, обеспечивающих максимальное проявление результата воздействия. Если проявляется несколько результатов воздействий, то выбираются такие объекты и их геометрические характеристики, на которых обеспечивается максимальное проявление используемого результата воздействия и минимальное проявление неиспользуемых результатов воздействия, чем обеспечивается максимальная передача энергии от одного ФЭ к другому в цепочке ФЭ.

Физический объект определенной геометрической формы будем называть структурным элементом. Совокупность взаимосвязанных структурных элементов представляет собой вариант технического решения, полученного на основе физической схемы.

При выборе геометрической формы объекта осуществляется переход от наименований физических объектов (веществ, материалов) к обобщенным названиям конструктивных элементов, определяемых с учетом их геометрических характеристик (диск, шар, цилиндр, пластина и т. д.). Эти названия являются общепринятыми, применяются при описании объектов техники, используются при выборе наименований деталей или узлов в системе чертежного хозяйства. Элементы при этом не имеют конкретных геометрических размеров. Они характеризуются лишь их соотношением. Например, для отличия цилиндра от диска необходимо знать лишь отношение длины к диаметру. Жидкие и газообразные физические объекты принимают форму поверхностей объектов, ограничивающих их в пространстве. Геометрическая форма их может быть описана так же, как геометрическая форма твердых тел.

Выбор конкретной геометрической формы физического объекта неразрывно связан с выбором пространственной привязки к этой форме как воздействия ($A_{осн}$, $A_{доп}$), так и результата воздействия (C). Только в этом случае будет обеспечено получение максимального результата воздействия. Пространством приложения воздействия и пространством проявления результата воздействия может быть область внутри объекта, какая-то часть его поверхности либо область пространства, окружающего объект. Так в ФЭ возникновения электрического тока под воздействием электрического поля, последнее может быть приложено к физическому объекту, например к твердому телу произвольной геометрической формы: к точкам, линиям, поверхностям, рас-

положенным снаружи или внутри него. При этом расстояние между точками приложения потенциала не равно нулю; площадь поперечного сечения между точками приложения потенциала также не равна нулю. Для описания областей пространства приложения воздействия, проявления результата воздействия, их взаимного расположения и направления выбирается система координат, связанная с геометрической формой физического объекта, например с какой-либо его осью или поверхностью.

Геометрическая характеристика физического объекта, описание пространства приложения воздействия и результата воздействия позволяют создать математическую модель структурного элемента, которая будет иметь вид:

$$C = f(A, \overline{P}_A, \overline{P}_C, \overline{B}),$$

где A — воздействие; $\overline{P}_A$ — вектор параметров пространства приложения воздействия; $\overline{P}_C$ — вектор параметров пространства приложения результата воздействия; $\overline{B}$ — вектор параметров геометрической формы структурного элемента.

Используя в качестве исходной информации физическую схему и наборы элементов различной геометрической формы по каждому ФЭ, имеем

$$St = \{B_1, B_2, \ldots, B_n\},$$

где St — структура изделия; B_i — физические объекты, на которых проявляются ФЭ, входящие в физическую схему; n — число ФЭ в схеме.

Каждый физический объект может быть выполнен в виде нескольких конструктивных элементов ($b_1, b_2, \ldots, b_m$). Тогда множество возможных структур M_{St} изделия можно представить в виде матрицы:

$$\left\| \begin{array}{cccc} b_1^1, & b_1^2, & \ldots, & b_1^{k_1} \\ b_2^1, & b_2^2, & \ldots, & b_2^{k_2} \\ \ldots & \ldots & & \ldots \\ b_n^1, & b_n^2, & \ldots, & b_n^{k_n} \end{array} \right\|$$

При этом

$$M_{St} = \prod_{i=1}^{n} K_i,$$

где K_i — число конструктивных вариантов b_i.

Если в каждой строке матрицы зафиксировать один из элементов, то набор из них будет представлять возможный вариант структуры изделия. Поскольку выбор наилучшего варианта связан с полным перебором содержимого матрицы, то крайне важно сократить число вариантов до приемлемых пределов. Это может быть осуществлено следующим образом. Каждый вариант конструктивного исполнения физического объекта b_i может быть охарактеризован вектором показателей качества:

$$P = (P_1, P_2, \ldots, P_m),$$

где P_i — некоторый показатель качества.

Если составить набор показателей качества $P_{\text{ТЗ}}$, которому должна удовлетворять структура изделия St, то условием допустимости участия некоторого b_j в структуре изделия будет

$$P_i^{bj} \cap P_m^{\text{ТЗ}},$$

где P_i^{bj} — некоторый показатель качества j-го варианта объекта B; $P_m^{\text{ТЗ}}$ — соответствующий показатель качества, содержащийся в техническом задании (ТЗ).

Модель множества возможных технических решений имеет вид:

$$m = \langle P, G, F \rangle,$$

где $G : P \to I$; P — множество возможных технических решений; F — словарь описания структурных элементов; I — множество требований, которым удовлетворяют структурные элементы;

$$\widehat{G} = \left\| \widehat{a}_{i_x} \right\|_{i=\overline{1,I}}^{x \in P} \quad \widehat{a}_{i_x} = a(x),$$

где $a(x)$ — оценка выполнения i-го требования элементом $x \in P$; при этом под оценкой понимается отношение предполагаемого значения требования к базовому.

Для оценки вариантов конструктивного исполнения объектов может быть использовано несколько критериев.

1. Конструктивная сложность (относительная) элементов; например, полый цилиндр сложнее сплошного цилиндра, элемент квадратного сечения сложнее пластины и т. д.

2. Агрегатное состояние физических объектов. Конструкция считается проще, когда она состоит из элементов, выполненных из материалов, находящихся в одном агрегатном состоянии.

3. Относительные размеры элементов; например, стержень длиннее цилиндра, цилиндр длиннее диска и т. п.

4. Материалоемкость элементов. Так, сплошной цилиндр более материалоемок, чем полый (трубка, втулка).

5. Технологичность изготовления.

В зависимости от элементной базы по каждому физическому объекту могут быть выбраны и другие критерии.

СТРУКТУРА ОПИСАНИЯ ФИЗИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Основные закономерности проявления ФЭ, условия их взаимосвязи, принципы технической реализации ФЭ в объектах техники предопределяют структуру описания ФЭ. Она содержит определенные данные.

1. Наименование ФЭ. Носит вспомогательный характер, так как не отражает, как правило, сущности ФЭ. По некоторым ФЭ отсутствуют общепринятые названия.

2. Код ФЭ. Является основным элементом для поиска информации о ФЭ. Он может нести определенную информационную нагрузку, например о типе воздействия и результате воздействия.

3. Наименование воздействия и его характеристика. Наименование физического поля, которое оказывает воздействие на физический объект и показывает его разновидность, например поле электрическое, вихревое. Характеризует воздействие во времени и в пространстве. Указаны те части объекта или пространства, окружающего объект, к которому может быть приложено воздействие, для которых имеется информация о параметрах воздействия, об ограничениях на воздействие.

4. Наименование результата воздействия и его характеристика. По каждому результату воздействия дано его наименование, указана разновидность результата воздействия, например электромагнитное или инфракрасное излучение. Содержит по каждому результату воздействия те же характеристики, что и для воздействия. Дана информация о параметрах каждого результата воздействия и о тех частях объекта или окружающего объект пространства, в которых проявляется результат воздействия.

При сложной структуре физического объекта внешнее воздействие может вызвать такие результаты воздействия, являющиеся результатами взаимодействия элементов структуры объекта, которые проявляются в виде некоторых изменений самого объекта. Например, может изменяться объем или форма объекта, его механические свойства и т. д. Эти изменения могут являться результатом, который требуется достичь.

5. Схема ФЭ. Дает наглядное представление о количестве и типах воздействий и результатов воздействий. Позволяет сравнивать ФЭ между собой. Схемы отдельных ФЭ позволяют в совокупности графически изобразить физическую основу изделия, показать функциональные взаимосвязи между его структурными элементами.

6. Перечень марок материалов и веществ, на которых проявляется ФЭ, и их характеристики. Приведены в основном те марки, которые практически используются в объектах техники или технологии, на которых данный ФЭ наиболее эффективно проявляется. Дана характеристика внутренней структуры материалов и веществ.

7. Описание сущности ФЭ. Содержит популярное описание одной из наиболее распространенных концепций, объясняющих сущность происходящих физических процессов. Информация предназначена для обеспечения анализа ФЭ и принятия решения по применению его в конкретных условиях.

8. Условия проявления ФЭ, внешние факторы, препятствующие его проявлению. Дают представление о возможной сфере применения ФЭ, о требованиях, которые должны предъявляться к изделиям, функционирование которых будет основываться на данном ФЭ.

9. Модель ФЭ. Характеризует взаимосвязь воздействия и результата воздействия, показывает взаимозависимые параметры, совокупность физических констант и ограничений.

Может содержать эмпирические зависимости.

10. Параметры физического объекта (материала, вещества), входящие в модель ФЭ. В табличной форме даны значения физических констант веществ и материалов и свойств, которыми характеризуются воздействия и результаты воздействий. В том случае, когда это важно, приведены зависимости изменения основных параметров эффекта от параметров окружающей среды (температуры, давления, напряженности магнитного поля и т. д.).

11. Варианты геометрической формы физического объекта с пространственной привязкой к ним воздействий и результатов воздействий. Обобщают конструктивные реализации физического объекта (материала, вещества), на которых проявляется ФЭ, с учетом его практического применения. Информация позволяет оценить приемлемость ФЭ для конкретных целей, способствует процессу конструкторской проработки технической реализации ФЭ.

12. Области применения ФЭ. Дано представление о возможных направлениях поиска дополнительной информации по практическому использованию ФЭ. Показана практическая значимость и промышленная освоенность ФЭ.

13. Примеры практического применения ФЭ.

14. Информационные источники данных о сущности ФЭ.

15. Информационные источники данных о практическом применении ФЭ.

ГЛАВА 2

Методика решения задач

Задачи, которые могут быть решены на уровне ФЭ, могут быть подразделены на три класса: информационно-поисковые, структурного синтеза и физического анализа.

Задачи информационного поиска. ФЭ характеризуется тремя векторами параметров, относящихся к воздействию, результату воздействия и физическому объекту, на котором проявляется ФЭ. Класс информационно-поисковых задач будет определяться в зависимости от того, какие из этих трех векторов заданы в качестве исходных данных. В случае, когда заданы все три вектора или не задан ни один из них, следует считать, что постановка задачи отсутствует. Приведем возможные формулировки задач. Необходимо найти или определить:

1) перечень всех ФЭ, имеющих заданное воздействие и проявляющихся на заданных материалах;

2) эффекты, которые вызовет заданный внешний воздействующий фактор на заданных марках материалов;

3) внешние факторы, от воздействия которых может быть получен заданный эффект на заданных материалах;

4) перечень всех ФЭ, имеющих заданный результат воздействия на заданных материалах;

5) марки материалов и веществ, на которых проявляется заданный ФЭ;

6) ФЭ и физические объекты (материалы, вещества), которые обеспечивают заданное преобразование;

7) воздействие, которое требуется для проявления необходимого свойства у заданного материала (вещества);

8) ФЭ, имеющие заданное воздействие;

9) все результаты воздействия, которые можно получить от заданного воздействия;

10) все ФЭ, имеющие заданный результат воздействия;

11) внешние воздействия, от которых может быть получен заданный результат воздействия;

12) физические эффекты, которые могут проявляться на заданных марках материалов;

13) внешние воздействующие факторы, при которых прекратится проявление заданного ФЭ;

14) влияние заданного внешнего воздействующего фактора на проявление ФЭ;

15) влияние заданного внешнего воздействующего фактора на ФСх объекта;

16) перечень ФЭ для реализации заданной технологической операции;

17) характеристики материалов, на которых проявляется данный ФЭ.

Для решения перечисленных задач используются приложения 1 и 2, обеспечивающие поиск ФЭ как по заданным воздействиям, так и по заданным результатам воздействия. Перед обращением к приложениям 1 и 2 должен быть осуществлен переход от формулировки входных и выходных параметров объекта техники к формулировкам на уровне физических полей. При этом подразумевается, что решение задачи достигается найденным ФЭ, т. е. построение цепочек взаимосвязанных ФЭ (синтез) не осуществляется.

По найденному ФЭ выбирается конструктивный вариант физического объекта, на котором он проявляется. Затем выбирается или формируется математическая модель, включающая конструктивные параметры физического объекта. С учетом требуемых значений входных и выходных параметров объекта техники выбирается марка материала либо из описания данного ФЭ, либо из базы данных по свойствам веществ и материалов.

Задачи по синтезу ФСх могут быть подразделены на несколько типов.

1. Синтез вариантов ФСх, пригодных для реализации в заданных технологических возможностях.

2. Синтез новых ФСх.

3. Выявление перспективных направлений развития данного класса объектов техники.

4. Определение физических возможностей реализации ТЗ.

5. Выбор рационального варианта ФСх объекта техники.

6. Поиск возможных преобразований заданных входных параметров объекта техники в выходные параметры.

7. Преобразование ФСх в варианты технических решений.

Рассмотрим процесс решения некоторых задач.

Задача 1. Осуществить синтез физической схемы (ФСх) установки, обеспечивающей получение ультрафиолетового излучения. Источник энергии — электрический ток.

1. По приложению 2 определить формулировку обобщенной функции. В данном случае она совпадает с формулировкой функции ТС.

2. Найти в каталоге группу ФЭ, для которых входным воздействием A_1 будет электрический ток.

3. Проверить на совпадение обобщенной функции с эффектами у найденных ФЭ. В данном случае совпадений не имеется.

4. Для каждого ФЭ, найденного по п. 2, по его эффекту найти новую группу ФЭ, для которых этот эффект будет являться входным воздействием A_2.

5. Осуществить проверку (см. п. 3). Найти результат воздействия C_3, совпадающий с формулировкой обобщенной функции. Если искомый результат (C_3) дает несколько ФЭ, то по условиям задачи строится несколько цепочек ФЭ, а затем по заданным критериям выбирается лучшая из них. Каждая последующая итерация по поиску групп ФЭ (см. п. 2 и 4) дает большое число путей, которые требуется проверить. В некоторых случаях целесообразнее осуществлять очередную итерацию с конца, пользуясь приложением 2. Зная по условиям задачи результат C, можно найти группу ФЭ, которые при различных воздействиях A обеспечивают этот эффект. Затем осуществляют проверку на совпадение найденных воздействий с результатами воздействий C у группы ФЭ, найденной в последней итерации при построении цепочки от начала. Это сокращает число вариантов, которые приходится рассматривать.

При выборе наилучшего варианта ФСх, рекомендуется использовать критерии:

1. Количественное значение физических величин, характеризующих воздействие.

2. Количественное значение физических величин, характеризующих результат воздействия.

3. Основные характеристики физических объектов.

4. КПД преобразования воздействия в эффект.

5. Время преобразования воздействия в эффект.

6. Площадь или объем физического объекта на единицу мощности результата воздействия.

7. Условия существования ФЭ (температура, давление, состав окружающей физической среды, воздействия различных полей, потоков частиц и т. п.).

Задача 2. Осуществить синтез вариантов технических решений по выбранному варианту ФСх. Решение задачи подразделяется на два этапа:

1) компоновка вариантов конструкции объекта и выбор из них наиболее приемлемых;

2) выбор материалов (веществ) и их геометрических характеристик на основе расчетов с использованием математических моделей ФЭ.

Такой подход обеспечивает возможность выбора: варианта модели ФЭ; входных и выходных параметров при использовании конкретной модели; управления процессом синтеза вариантов технических решений.

На первом этапе решения задачи преобразования ФСх в технические решения (ТР) по заданной совокупности взаимосвязанных ФЭ осуществляются выбор конструктивного варианта физического объекта по каждому ФЭ с учетом их взаимной связи и взаимного расположения и выбор вариантов компоновок элементов. При этом обеспечивается наилучшее преобразование входных параметров изделия в выходные с учетом выбранных критериев. Выбор вариантов компоновок может осуществляться по

таким критериям, как пространственная характеристика технического решения (плоская или объемная компоновка, расположение элементов вдоль заданных осей), влияние средних элементов на другие и др. Поскольку между структурными элементами по условиям синтеза ФСх определена взаимосвязь, структура ТР может быть представлена в виде графа, а это, в свою очередь, обеспечивает представление информации о вариантах ТР в виде графических изображений.

Второй этап технических решений связан с выбором конкретных марок материалов и веществ, с установлением размеров элементов для каждого варианта конструкции объекта. Определение размеров осуществляется с помощью моделей ФЭ с учетом ограничений на параметры, которые могут быть заданы конструктором по результатам анализа полученных вариантов компоновок объекта. Каждый ФЭ, входящий в ФСх, на основе которой выбран вариант компоновки, должен описываться той моделью, которая соответствует выбранному варианту конструкции физического объекта (элемента). Таким образом, набор геометрических форм элементов для каждого ФЭ должен иметь набор описывающих его вариантов моделей. На этом шаге обеспечивается выбор таких вариантов конструкций объекта, которые обеспечивают преобразование входов в выходы, имеющие конкретные значения параметров, соответствующих ТЗ.

В зависимости от сложности ФСх можно выделить несколько вариантов расчетов по математическим моделям: 1) пошаговые, когда осуществляется расчет, начиная от первого ФЭ, соответствующего входному параметру объекта, и кончая последующим ФЭ; 2) расчет выделенной группы ФЭ; 3) сквозной расчет всей цепочки ФЭ.

Наличие математических моделей позволяет осуществлять постановку различных оптимизационных задач. По результатам расчетов выбирают лучшие варианты для дальнейшей конструктивно-технологической проработки.

В некоторых случаях физическая схема может содержать такие отдельные ФЭ или группы взаимосвязанных ФЭ, которые имеют конкретные технические реализации. При использовании метода для решения задач по конкретному классу объектов целесообразно иметь набор ФСх по функциональным элементам этого класса, что позволяет обнаруживать в ФСх фрагменты, соответствующие этим элементам. В проводимых расчетах могут использоваться их параметры. Синтез конструкции объекта техники в этом случае расчленяется и может выполняться по частям.

Задачи по физическому анализу можно подразделить на несколько типов.

1. Построение физической схемы заданного объекта техники.

2. Выделение в структуре физической схемы отдельных ФЭ, не обеспечивающих работоспособность объекта техники.

3. Выявление взаимного влияния ФЭ в структуре физической схемы объекта техники.

4. Установление возможностей улучшения характеристик объекта техники без изменения его физической схемы.

5. Выявление возможности функционирования объекта техники в окружающей среде с измененными свойствами.

6. Определение внешних воздействий, которые вызовут недопустимые изменения в функционировании объекта техники.

7. Прогнозирование поведения объекта техники при заданных воздействиях.

8. Анализ отказов в функционировании объекта техники.

9. Выявление ненадежных элементов в объекте техники.

10. Установление возможных предельных значений параметров объекта техники на данной ФСх.

11. Определение побочных эффектов для данной ФСх.

12. Выявление условий работы объекта техники, при которых нарушается его функционирование.

13. Поиск средств защиты объекта техники, обеспечивающих его функционирование.

14. Определение необходимых воздействий, обеспечивающих требуемые изменения свойств объекта техники.

Рассмотрим процесс решения задачи по физическому анализу объекта техники.

Задача. Построить ФСх термического преобразования давления с последу-

ющим анализом ФЭ, принимающих участие в его функционировании.

Термический преобразователь давления (рис. 1) состоит из тонкой проволоки (нагревателя) *1*, укрепленной в стеклянном или металлическом баллоне *2*. На некотором расстоянии от нагревателя помещена термопара *3*. Контакты термопары и нагревателя выведены через баллон для образования внешней цепи. Баллон имеет патрубок, соединенный с вакуумным насосом для откачки среды *4*.

Для физического анализа необходимо осуществить несколько этапов.

1. Разделить объект на функциональные элементы. На этом этапе необходимо определить рабочие функции элементов на каждом иерархическом уровне. Рабочие функции выбирают по приложению 2 для каждого функционального элемента отдельно. Для функционального элемента *1* обобщенная функция — нагревание, для элемента *2* — охлаждение, для элемента *3* — перемещение носителей зарядов, для элемента *4* — теплопередача (тепловое поле, изменение).

2. Определить ФЭ, реализующие рабочие функции элементов на нижних уровнях функционального разбиения. При этом на основе анализа содержательного смысла функций элементов для каждого ФЭ выявляют его компоненты *A*, *B*, *C*. Так как *A* и *B* для каждого функционального элемента определены вполне конкретно, то по приложению 1 необходимо определить *C*. Затем, руководствуясь описанием ФЭ и данными объекта *B*, определить ФЭ, участвующий в работе каждого функционального элемента.

3. Построить ФСх функциональных узлов. Сначала строят ФСх узлов, находящихся на вышестоящем (по сравнению с рассмотренным) уровне. При этом получают линейные или ветвящиеся структуры ФСх узлов и для каждого из них четко определяют *A* и *C* и соответствующие им рабочие функции.

4. Построить структуру ФСх всего рассматриваемого объекта. При этом все ФЭ, выполняющие определенные функции в структуре ФСх, являются основными ФЭ.

5. Определить дополнительные результаты воздействия тех ФЭ, которые непосредственного участия в работе функциональных элементов не принимают. Таким образом, определе-

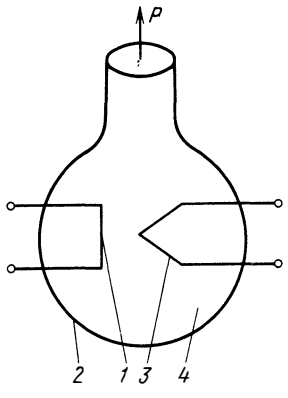


Рис. 1. Термический преобразователь давления

ны входное воздействие *A* и физический объект *B*. Необходимо определить C_1, C_2, C_3. Этот шаг аналогичен поиску ФЭ по второму этапу. По приложению 1 определить *C* и название ФЭ. Так как *B* определено, то при описаниях ФЭ некоторые из них отсекутся по несовместимости физического объекта *B*.

6. Составить матрицу физического анализа, которая представляет собой квадратную симметричную матрицу с заголовками из обозначений узлов, выделенных на третьем этапе. Матрица составляется по следующим правилам. В клетке на пересечении одного и того же узла в числителе указывают номера всех основных ФЭ, которые выделены на четвертом этапе и использованы в структуре ФСх этого узла, а в знаменателе — номера дополнительных ФЭ, выделенных на пятом этапе. В клетке на пересечении разных узлов в числителе указаны ФЭ, через которые осуществляется связь между этими узлами, а в знаменателе — соответствующие им дополнительные ФЭ.

При решении задачи выявления в структуре принципа действия (ПД) неработоспособных ФЭ при изменении значений входных или выходных параметров рабочей функции берется новое значение входного воздействия *A* и с помощью математических моделей ФЭ определяются количественные преобразования физических величин от входного воздействия *A* до конечного результата C_4. При этом определяют ФЭ, которые не обеспечивают допустимого преобразования.

ГЛАВА 3

Описания физических эффектов, преобразующих механические воздействия в механические результаты воздействий

АБСОЛЮТНО УПРУГИЙ УДАР

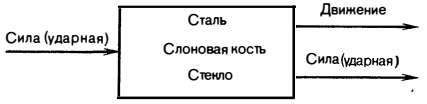


Рис. 1. Структурная схема ФЭ упругого удара

Абсолютно упругий (идеальный) удар — соударение твердых тел, после которого их форма восстанавливается полностью.

Соударение происходит в течение короткого промежутка времени; при этом в зоне контакта возникают большие силы. Указанные условия позволяют пренебрегать постоянно действующими силами и рассматривать соударяющиеся тела как замкнутую систему, в которой выполняется закон сохранения импульса силы (количества движения соударяющихся тел). Потенциальная и внутренняя энергии тел принимаются неизменными по определению. Суммарная кинетическая энергия тел сохраняется, но перераспределяется между телами при ударе.

Скорости тел до и после удара можно найти из уравнений:

$$m_1\bar{v}_1 + m_2\bar{v}_2 = m_1\bar{V}_1 + m_2\bar{V}_2;$$

$$m_1\frac{v_1^2}{2} + m_2\frac{v_2^2}{2} = m_1\frac{V_1^2}{2} + m_2\frac{V_2^2}{2},$$

где m_1, m_2 — масса соударяющихся тел 1 и 2; v_1, v_2 — скорости тел 1 и 2 до удара; V_1, V_2 — скорости тел 1 и 2 после удара.

В качестве расчетной модели часто используется удар двух шаров, сближающихся по прямой, проходящей через их центры (прямой центральный удар). Проекции скоростей шаров на линию сближения при ударе:

$$V_1 = \frac{(m_1 - m_2)\,v_1 + 2m_2v_2}{m_1 + m_2};$$

$$V_2 = \frac{2m_1v_1 + (m_2 - m_1)\,v_2}{m_1 + m_2}.$$

В частности, если массы шаров одинаковы, то при ударе тела обмениваются скоростями: $V_1 = v_2$, $V_2 = v_1$. Если масса тела 2 во много раз больше массы тела 1, то

$$V_1 \approx 2v_2 - v_1, \quad V_2 \approx v_1.$$

При упругом косом центральном ударе шаров, если пренебречь импульсом сил трения, нормальные составляющие скоростей, направленные вдоль линии удара, рассчитываются так же, как при прямом ударе.

В частности, при ударе шара о неподвижную плоскую стенку ($m_2 \gg m_1$, $V_2 = v_2 = 0$) $V_{1\tau} = v_{1\tau}$, $V_{1n} = -v_{1n}$, где n — нормаль к поверхности стенки; τ — касательная к направлению удара.

При ударе реальных тел энергия частично расходуется на образование остаточных напряжений и деформаций, нагрев тел и другие потери. Эти потери учитывают введением коэффициента восстановления, зависящего от физических свойств материалов тел:

$$k = -\frac{V_{1n} - V_{2n}}{v_{1n} - v_{2n}}.$$

Скорости шаров при прямом центральном ударе с учетом потерь;

$$V_1 = v_1 - \frac{(1+k)\,m_2}{m_1 + m_2}(v_1 - v_2);$$

$$V_2 = v_2 + \frac{(1+k)\,m_1}{m_1 + m_2}(v_1 - v_2).$$

Продолжительность удара пропорциональна радиусу шаров и обратно пропорциональна скорости их сближения до удара в степени 1/5.

Значения коэффициента восстановления некоторых материалов: де-

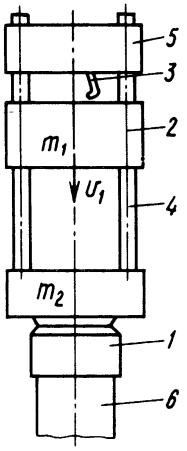


Рис. 2. Свайный молот:

1 — наголовник; *2* — ударная часть; *3* — крюк для подъема ударной части при пуске молота; *4* — направляющая штанга; *5* — траверса; *6* — свая

рево — 0,5; мягкая сталь — 0,55; слоновая кость — 0,89; стекло — 0,94.

Условия соударения зависят от формы тел. Так, для шаров время соприкосновения при ударе велико по сравнению с периодом наинизшего вида колебаний шаров; поэтому колебаниями можно пренебречь. В случае длинных стержней период основного вида колебаний может быть соизмерим с продолжительностью удара, что требует проводить расчеты с использованием волновой теории удара.

ФЭ используется при забивке свай, гвоздей, выталкивании отливок из литейных форм, расчете энергии для бомбардировки тяжелых ядер и др.

Пример применения ФЭ в технике — свайный молот (рис. 2). Сведения о физической сущности эффекта приведены в работе [114], а о применении эффекта — в работе [118].

АККУМУЛЯЦИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ ИЗГИБЕ

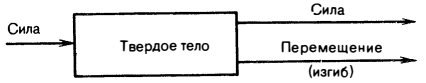


Рис. 3. Структурная схема ФЭ аккумуляции энергии при изгибе

Эффект аккумуляции механической энергии при изгибе представляет собой обратный закон Гука для деформации изгиба. Он позволяет создавать усилие или осуществлять перемещение части тела в процессе деформации.

Деформацией твердого тела называют изменение его размеров и объема, которое может сопровождаться изменением формы тела. При деформации из первоначального положения равновесия в новое происходит смещение частиц, находящихся в узлах кристаллической решетки твердого тела. Этому препятствуют силы взаимодействия между частицами, вследствие чего в деформированном теле возникают внутренние упругие силы.

Если упругодеформированное тело освободить от внешних силовых воздействий и связей, то размеры и форма тела восстановятся.

Классическая модель чистого изгиба — однородный брус, деформированный действием двух равных изгибающих моментов внешних сил, направленных в прямо противоположные стороны (рис. 4). Материал бруса, расположенный ниже нейтральной поверхности, испытывает деформацию сжатия, а материал, расположенный выше, — растянут. После снятия внешней нагрузки под действием внутренних упругих сил, возникших при деформации, брус стремится вернуться в первоначальное положение равновесия. При этом момент сил

$$M = \frac{E}{R} J,$$

где E — модуль упругости (табл. 1); R — радиус кривизны нейтральной поверхности; J — момент инерции поперечного сечения бруса.

Механическое напряжение, совершающее работу по обратной деформации бруса,

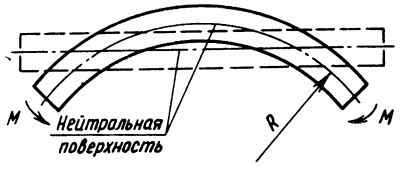


Рис. 4. Схема эффекта аккумуляции энергии при изгибе:

***M* — изгибающий момент; *R* — радиус кривизны**

1. Модуль упругости

Материал	E, ГПа
Стали:	
углеродистые	200—210
легированные	210—220
Алюминий (прокат)	69
Дюралюминий	71
Стекло	56
Гранит	49
Мрамор	56
Дерево (сосна, ель):	
вдоль волокон	10—12
поперек волокон	0,5—1

$$\sigma = E\frac{\xi}{R},$$

где ξ — расстояние до нейтральной поверхности вдоль R.

Ограничения на проявление ФЭ определяются механическими характеристиками материалов, обеспечивающими упругую деформацию.

ФЭ используется в машиностроении, приборостроении, судостроении, строительстве и т. д. На использовании ФЭ основано действие упругих элементов, которые обеспечивают необходимое механическое напряжение, аккумулируют энергию или действуют как амортизаторы.

В приборах в качестве двигателей часто используют спиральные пружины (рис. 5). Внутренний конец пружины закреплен на валике *2*, а наружный — крепится к барабану *3*, внутри которого размещается вся спиральная пружина *1*.

Процесс аккумуляции механической энергии осуществляется путем вращения валика относительно барабана При этом пружина изгибается вокруг валика, и, когда витки плотно навиваются на валик, процесс заканчивается. В деформированном состоянии пружина обладает некоторым запасом упругой энергии. При пуске пружина способна совершать определенную работу, вращая барабан или валик.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [225, 262], а о применении эффекта — в работах [2, 202].

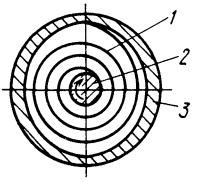


Рис. 5. Заводная спиральная пружина

АККУМУЛЯЦИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ КРУЧЕНИИ



Рис. 6. Структурная схема ФЭ аккумуляции энергии при кручении

Эффект аккумуляции механической энергии при кручении представляет собой обратный закон Гука для деформации кручения. Он позволяет создавать усилие или осуществлять перемещение части тела в процессе деформации.

Модель аккумулятора энергии кручением — это цилиндрический стержень, закрепленный одним концом и деформированный крутящим моментом $M_к$ пары сил, плоскость которых перпендикулярна к оси стержня. Различные сечения стержня повернуты под различными углами относительно закрепленного конца. В случае снятия внешней нагрузки внутренние упругие силы, возникающие в стержне при деформации кручения, возвратят его в исходное состояние равновесия, высвобождая при этом накопленную энергию

$$A = \frac{M_к\varphi}{2} = \frac{M_к^2 l}{2GJ_p},$$

где G — модуль упругости при сдвиге (табл. 2); J_p — полярный момент инерции; φ — угол поворота рассматриваемого сечения стержня; l — длина стержня.

Ограничения на проявления ФЭ определяются допустимыми для мате-

2. Модуль упругости при сдвиге

Материал	G, ГПа
Стали:	
пружинные	80—81
легированные	80—81
Алюминий (прокат)	26—27
Дюралюминий	37
Стекло	22
Дерево (сосна, ель) вдоль волокон	5,5

риала напряжениями при кручении из условий сохранения упругости.

Условием проявления ФЭ является снятие внешней нагрузки, вызвавшей деформацию кручения.

ФЭ применяется в машиностроении, приборостроении (оси, торсионы, винтовые пружины и т. д.).

Термопредохранитель (рис. 7) состоит из высокоэлектропроводного полого цилиндрического корпуса *1*, внутри которого размещена сжатая витая пружина *2*. Корпус *1* подпаян легкоплавким припоем *3* к двум изолированным друг от друга паечным точкам *4* и *5*, размещенным на предохраняемом объекте *6*. Ток, нагревающий объект, замыкается по цепи: проводник *7* — припой *3* — корпус *1* — припой *3* — проводник *8*.

При нагреве объекта до температуры плавления легкоплавкого припоя *3* пружина *2* приподнимает корпус *1* над паечными точками *4* и *5*, размыкая цепь. Нагрев объекта прекращается, чем обеспечивается надежная защита электрического аппарата от перегрева.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [202, 225], а о применении эффекта — в работах [2, 290].

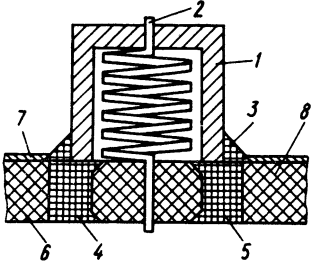


Рис. 7. Термопредохранитель

АККУМУЛЯЦИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ (СЖАТИИ)

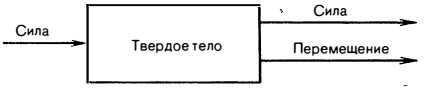


Рис. 8. Структурная схема ФЭ аккумуляции энергии при растяжении (сжатии)

Эффект аккумуляции механической энергии при растяжении (сжатии) представляет собой обратный закон Гука для деформации растяжения (сжатия), он позволяет создавать усилие или осуществлять перемещение части тела в процессе деформации.

Стальной стержень сечением 1 см², предварительно сжатый на 0,1% своей длины, способен развивать усилие 21 кН.

Зависимость результата от воздействия имеет следующий вид:

$$F = E\delta S;$$

$$\sigma = E\delta,$$

где σ — напряжение сжатия (растяжения); δ — относительная деформация; E — модуль упругости (модуль Юнга); S — площадь сечения тела.

Эффект проявляется на материалах, обладающих упругостью и прочностью. Поэтому ограничения на

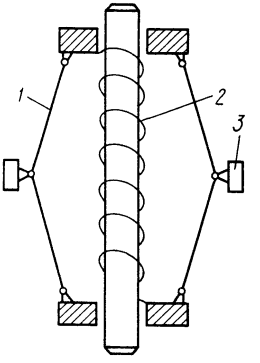


Рис. 9. Схема регулятора скорости: *1* — резиновая связь; *2* — пружина; *3* — груз

3. Механические характеристики материалов

Марка материала	Временное сопротивление $\sigma_в$	Предел текучести $\sigma_{0,2}$	Предел упругости $\sigma_{0,005}$	Предел выносливости σ_{-1}	Модуль упругости E, ГПа	Относительное удлинение δ, %
	МПа					
Л68	660—740	520	500	150	115	12
Л80	610—680	520	420	154	112	10
МНЦ 15—20	800	600			140	2—4
БрКМц3—1	750	420	360	210	115	13
Бр0Ф6,5—0,4	700—800	590—650	—	—	112	7,5—12
Бр0Ф4—0,25	600	540	—	248	100	8
У9А, У10А, У11А, У12А	750—1200	—	—	—	200	—
60С2	1300	1200	—	500	205	6
60С2А	1600	1400	—	—	200	6
65Г	1000	800	—	660	200	8
50ХГА	1300	1200	—	640	200	7
50ХФА	1300	1100	—	520	210	8
65С2ВА	1900	1700	—	—	190	5
36НХТЮ	1200—1300	800—1000	650—750	—	190—200	14—18
36НХТЮ5М	1400—1450	1000—1100	750—850	—	211	8—10
36НХТЮ8М	1450—1480	1100—1150	850—950	—	210	6—7
40КХНМ	2500—2700	2300—2500	1700	—	205—210	3—5
40КНХВТЮ	2000—2200	1800—2000	1500—1600	—	220	4—6

проявление ФЭ для каждого материала различны и обусловлены их механическими характеристиками — пределом упругости, пределом текучести, пределом прочности, пределом выносливости

Условием проявления ФЭ является согласование по времени воздействия и результата воздействия: результат воздействия проявляется после снятия воздействия.

Геометрическая форма упругих элементов разнообразна и зависит от назначения и условий применения элемента в машине или приборе.

Характеристики некоторых материалов, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 3.

ФЭ применяется в машиностроении, приборостроении, строительстве. На его использовании основана работа упругих элементов, которые занимают обычно небольшое место в узлах конструкций, но всегда являются ответственным звеном всех механизмов, включающих эти элементы.

Эффект используется в регуляторе скорости с переменным критическим числом (рис. 9). Резиновая связь *1* возвращает груз *3* в исходное положение с помощью упругих сил, возникших при растяжении.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [146, 238], а о применении эффекта — в работах [2, 202].

АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ПОДЪЕМНАЯ СИЛА

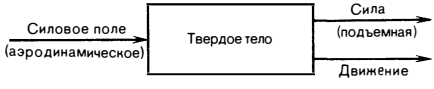


Рис. 10. Структурная схема ФЭ аэродинамической подъемной силы

Суть ФЭ заключается в создании подъемной силы под действием набегающего на тело потока воздуха.

Подъемная сила зависит от формы тела, положения его в потоке, состояния поверхности тела, физических свойств потока (вязкости, сжимаемости), плотности воздуха, размеров обтекаемого тела и скорости потока.

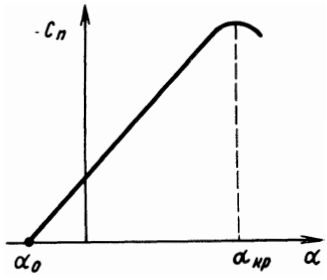


Рис. 11. Аэродинамические характеристики крыла

Влияние этих факторов учитывается формулой

$$F_п = C_п S_м (\rho v^2/2),$$

где $F_п$ — подъемная сила; $C_п$ — аэродинамический коэффициент подъемной силы, зависящей от формы, положения тела в потоке, состояния поверхности тела и физических свойств воздуха; $S_м$ — площадь миделя; $\rho v^2/2$ — скоростной напор, учитывающий влияние плотности воздуха и скорость потока.

Аэродинамические характеристики крыла (зависимость аэродинамических коэффициентов от углов атаки) представлены на рис. 11.

Зависимость $C_п = f(\alpha)$ имеет две характерные точки, которые определяют границы проявления ФЭ. Это точка нулевой подъемной силы (α_0) и точка максимальной подъемной силы ($\alpha_{кр}$). Углы атаки от α_0 до $\alpha_{кр}$ называются летным диапазоном.

Типичной формой тела, на которой проявляется ФЭ, является профиль крыла самолета (рис. 12).

Тела, на которых проявляется ФЭ, могут иметь форму плоской пластинки, цилиндра, шара, крыла.

Эффект проявляется на телах, изготовленных из любых материалов, обес

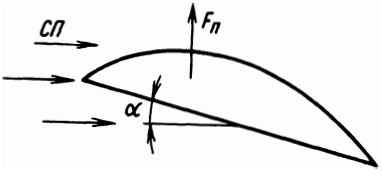


Рис. 12. Профиль крыла самолета

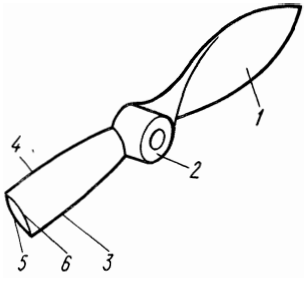


Рис. 13. Воздушный винт

печивающих требуемые механические характеристики.

Аэродинамический принцип создания подъемной силы используется в летательных аппаратах тяжелее воздуха, к которым относятся самолеты, планеры, вертолеты, автожиры и летательные аппараты с машущими крыльями (ортоптеры и орнитоптеры).

Примером применения эффекта является воздушный винт (рис 13). Одна из функций такого винта заключается в преобразовании энергии вращения в энергию поступательного движения (работу сил тяги)

Основной частью воздушного винта являются лопасти *1*, которые создают силу тяги. Передняя кромка лопасти *3* называется ребром атаки, задняя *4* - ребром обтекания. Поверхность *5*, которой лопасть отбрасывает воздух, называется рабочей поверхностью а противоположная ей поверхность *6* — спинкой лопасти

Сечение лопасти имеет форму, подобную профилю крыла.

Втулка *2* винта соединяет лопасти в единое целое и обеспечивает крепление винта на валу редуктора

Сведения о физической сущности эффекта и о его применении приведены в работе [125].

ЭФФЕКТ БАУШИНГЕРА

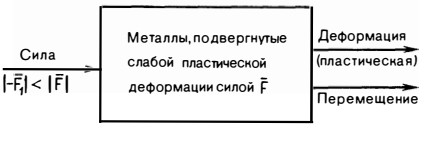


Рис. 14. Структурная схема ФЭ Баушингера

Эффект Баушингера заключается в снижении пределов пропорциональности, упругости и текучести материалов в результате изменения знака нагружения, если первоначальная нагрузка вызвала пластические деформации. Металл, подвергнутый слабой пластической деформации нагрузкой одного знака, обнаруживает при перемене знака нагружения пониженное сопротивление начальным пластическим деформациям (рис. 15).

В результате пластической деформации возникают ориентированные микронапряжения, которые направлены обратно деформирующей нагрузке. При изменении знака нагружения микронапряжения складываются с внешней силой.

С увеличением начальных пластических деформаций снижение механических характеристик уменьшается.

Эффект Баушингера имеет большое значение для сопротивления усталости при знакопеременных нагрузках. В некоторых случаях этот эффект имеет практическое значение и при статических нагрузках.

Примером применения ФЭ может служить технологический наклеп при нагрузках, противоположных по знаку эксплуатационным. В случае работы на сжатие холоднотянутых профилей и труб необходимо учитывать возможность снижения пределов упругости и текучести.

Повторное (6—10 раз) циклическое нагружение до малых пластических деформаций разных знаков стабилизирует характеристики материала.

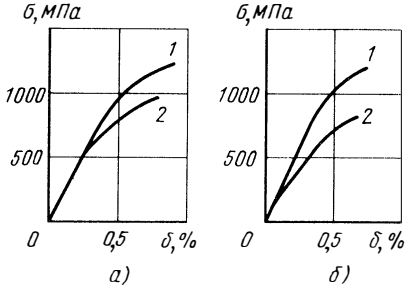


Рис. 15. Эффект Баушингера для стали У10:

а — при растяжении (*1* — растяжение; *2* — растяжение после сжатия до $\sigma_{0,2}$); *б* — при сжатии (*1* — сжатие; *2* — сжатие после растяжения до $\sigma_{0,2}$)

4. Характеристика материалов

Материал	Снижение $\sigma_{0,2}$, %
Стали:	
высокоотпущенные	40—50
низкоотпущенные	15—30
Сплавы:	
магниевые	45—50
алюминиевые	10—20

Дальнейшее нагружение независимо от знака практически не изменяет характеристик. Такие характеристики называются естественными для данного материала; они связаны с характеристиками выносливости.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работе [274], а о применении эффекта — в работе [15].

БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

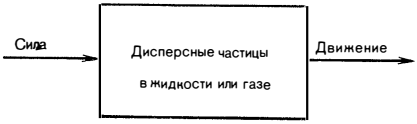


Рис. 16. Структурная схема ФЭ Броуновского движения

Броуновское движение — беспорядочное движение дисперсных частиц, взвешенных в жидкости или газе, под влиянием ударов молекул окружающей среды. Достаточно мелкие частицы, взвешенные в жидкости, при наблюдении под микроскопом представляются находящимися в непрерывном ддижении. Это движение с течением времени не изменяется и продолжается сколь угодно долго. Частицы подвергаются ударам молекул окружающей их среды. Эти удары молекул носят случайный характер и в каждый момент времени оказываются нескомпенсированными. В результате давление с какой-либо стороны оказывается больше или меньше среднего. Поэтому частица приходит в движение.

Частица вместе с молекулами жидкости образуют единую систему, обладающую статистическими свойствами. В соответствии с теоремой о распре-

5. Значения коэффициента диффузии

Диффундирующее вещество	Основной компонент	Температура, К	Коэффициент диффузии, м²/с
Водород (газ)	Кислород (газ)	273	$0{,}7\cdot10^{-4}$
Пары воды	Воздух	273	$0{,}23\cdot10^{-4}$
Пары этилового спирта	»	273	$0{,}1\cdot10^{-4}$
Поваренная соль	Вода	293	$1{,}1\cdot10^{-9}$
Сахар	»	293	$0{,}3\cdot10^{-9}$
Золото	Свинец	293	$4\cdot10^{-14}$

делении энергии по степеням свободы на каждую степень свободы броуновской частицы должна приходиться энергия (1/2) KT (где K — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура). Энергия (3/2) KT, приходящаяся на три поступательные степени свободы частицы, приводит к движению ее центра масс, которое и наблюдается под микроскопом в виде дрожания. Если броуновская частица достаточно жестка и ведет себя как твердое тело, то еще (3/2) KT энергии приходится на ее вращательные степени свободы. Поэтому она испытывает также постоянные изменения ориентации в пространстве.

Броуновское движение — наиболее наглядное экспериментальное подтверждение представлений молекулярно-кинетической теории о хаотическом тепловом движении атомов и молекул. Если промежуток наблюдения τ достаточно велик для того, чтобы силы, действующие на частицу со стороны молекул среды, много раз изменили свое направление, то средний квадрат проекции ее смещения $\overline{\Delta x^2}$ на какую-либо ось (в отсутствие других внешних сил) пропорционален времени τ (закон Эйнштейна):

$$\overline{\Delta x^2} = 2D\tau,$$

где D — коэффициент диффузии; для сферических частиц радиусом a

$$D = KT/(6\pi\eta a),$$

где η — динамическая вязкость среды.

Зависимость результата от воздействия имеет следующий вид:

$$\langle r_n^2\rangle = a^2 n = \frac{a^2}{\Delta\tau}\tau = \alpha\tau = \langle r_\tau^2\rangle, \quad (1)$$

где $\Delta\tau$ — промежуток времени между наблюдениями; $\tau = \Delta\tau_n$ — время, в течение которого средний квадрат удаления a частицы стал равным $\langle r_\tau^2\rangle$.

Для того чтобы охарактеризовать броуновское движение необходимо в формуле (1) определить α. Броуновская частица движется под действием случайной силы, возникающей при беспорядочных ударах молекул о частицу. Уравнение движения частицы в жидкости

$$m\ddot{x} = -b\dot{x} + F_x,$$

где b — коэффициент трения в вязкой жидкости; m — масса частицы; F_x — случайная сила, действующая на нее.

При систематическом движении броуновской частицы со скоростью $\dot{x}$ случайные удары молекул, направленные против скорости частицы, в среднем передают ей больший импульс, чем случайные удары в направлении скорости. Благодаря этому и возникает сила трения, которая описывается величиной $-b\dot{x}$. Так как отклонения броуновской частицы в любом направлении равновероятны, то

$$\langle x^2\rangle = \langle y^2\rangle = \langle z^2\rangle = \langle r^2\rangle/3.$$

Поэтому из (1) получаем, что

$$\langle x^2\rangle = \alpha\tau/3$$

и, следовательно,

$$(\langle x^2\rangle) = \alpha/3, \quad (\langle x^2\rangle) = 0.$$

Вследствие случайного характера силы F_x и координаты частицы x, а также их независимости друг от друга должно быть $\langle F_x x\rangle = 0$.

По теореме о распределении энергии по степеням свободы

$$m(\dot{x})^2 = KT$$

и, следовательно,

$$\alpha = 6KT/b. \quad (2)$$

6. Вязкость некоторых жидкостей и газов

Жидкости и газы	η, мПа·с, при 293 К
Газы	
Водород	0,0088
Азот	0,0175
Кислород	0,0202
Жидкости	
Вода	1,002
Этиловый спирт	1,200
Ртуть	1,554
Глицерин	1450

Поэтому (1) с учетом (2) решает задачу о броуновском движении взвешенных частиц:

$$\langle r^2 \rangle = 6KT\tau/b.$$

С повышением температуры интенсивность теплового движения молекул среды возрастает, а следовательно, растет и интенсивность броуновского движения, обусловленного толчками молекул. С увеличением вязкости среды повышается сопротивление, оказываемое средой движению броуновской частицы. Интенсивность броуновского движения падает. От материала самих частиц броуновское движение не зависит.

Газы и жидкости принимают формы занимаемых ими сосудов.

Сила приложена к частице.

Частица движется в направлении действия силы и (или) вокруг своей оси, проходящей через центр тяжести.

Характеристики некоторых материалов, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 5 и 6.

Теория броуновского движения находит приложение в физико-химии дисперсных систем; на ней основана кинетическая теория коагуляции растворов. Броуновское движение определяет седиментационное равновесие, которое устанавливается в дисперсной системе, находящейся в поле тяжести или в силовом поле ультрацентрифуги. Одно из наиболее важных практических применений броуновского движения связано с оценкой точности измерительных приборов.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [95, 155, 168, 187, 226, 282], а о применении эффекта — в работе [293].

ВИБРАЦИОННОЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ



Рис. 17. Структурная схема ФЭ вибрационного перемещения

Под эффектом вибрационного перемещения понимается перемещение тела под действием колебательных воздействий.

Физическая сущность эффекта — движение тела по шероховатой плоской поверхности под действием гармонической вынуждающей силы — может быть представлена следующей моделью.

Имеется тело массой m, лежащее на горизонтальной шероховатой плоской поверхности, на которое действует горизонтальная сила $F_0 \sin \omega\tau$ с амплитудой F_0 и частотой ω. Если коэффициенты сухого трения f_+ и f_- при скольжении тела вперед и назад по плоскости одинаковы и равны f, то при $F_0 < mgf$ тело останется неподвижным, а при $F_0 > mgf$ будет совершать симметричные колебания относительно некоторого среднего положения. Если допустить, например, что $f_- > f_+$, то симметрия нарушается, и при $F_0 > mgf_+$ тело будет перемещаться в положительном направлении. В случае $f_- < f_+$ при $F_0 > mgf_-$ будет иметь место перемещение в направлении, в котором сила сопротивления меньше. Действительно, в течение некоторого промежутка времени первого полупериода $0 < \omega\tau < \pi$, когда $F_0 \sin \omega\tau > mgf$, тело сдвинется вправо, а в течение второй половины периода $\pi < \omega\tau < 2\pi$, когда $F_0 \sin \omega\tau < 0$, либо останется на месте (если $F_0 < mgf_-$), либо сдвинется влево на меньшее, чем вправо, расстояние, поскольку сопротивление движению влево больше, чем сопротивление движению вправо. Таким образом, за каждый период изменения силы будет происходить некоторое смещение тела вправо.

Условием проявления эффекта вибрационного перемещения является

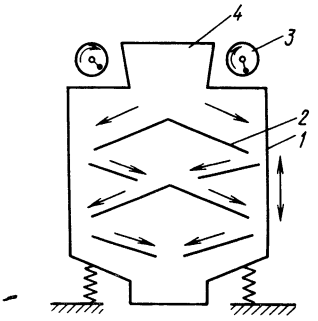


Рис. 18. Вибрационная сушилка

существование асимметрии, обеспечивающей преимущественное, накапливающееся перемещение системы в определенном направлении. Выделяют силовую, кинематическую, структурную, градиентную и другие виды асимметрии. Например, силовая асимметрия может быть обусловлена либо действием постоянной силы, либо наклоном плоскости по отношению к горизонту, либо неоднородностью модуля силы сопротивления движения вправо и влево.

На данном эффекте основаны вибрационные транспортирование отдельных тел и сыпучих материалов в вибрирующих лотках и сосудах, работа устройств, называемых вибрационными преобразователями движения и вибродвигателями, вибрационное погружение свай, шпунта и оболочек, вибрационное разделение частиц сыпучего материала по плотности, размерам и некоторым другим параметрам; движение вибрационных «экипажей».

В сушилке (рис. 18) с вибрирующим в вертикальном направлении корпусом *1* жестко связаны две системы конических тарелок *2*. Колебания системы создаются, например, двумя самосинхронизирующимися вибровозбудителями *3*. Поступающий для просушки через воронку *4* материал совершает путь по тарелкам *2*, показанный стрелками. Сушка материала происходит в потоке нагретого воздуха, который подается по принципу противотока.

Сведения о физической сущности эффекта и о его применении приведены в работах [29, 30].

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ТРЕНИЕ

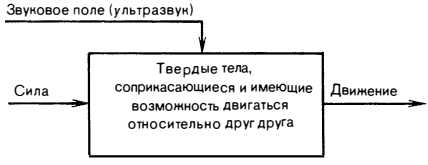


Рис. 19. Структурная схема ФЭ ультразвуковых колебаний при трении

Эффект заключается в том, что если в одном из соприкасающихся и трущихся тел возбудить ультразвуковые колебания с частотой ω, то сила трения уменьшается. Механизм воздействия ультразвуковых колебаний на контактное трение обусловлен изменением кинематики скольжения на контактной поверхности. Это изменение в большой степени зависит от направления введения ультразвуковых колебаний в зону контакта. Возможны два случая.

Первый — когда колебательные смещения ξ ориентированы перпендикулярно к площади соприкосновения тел, а следовательно, и к направлению скорости V их относительного переме-

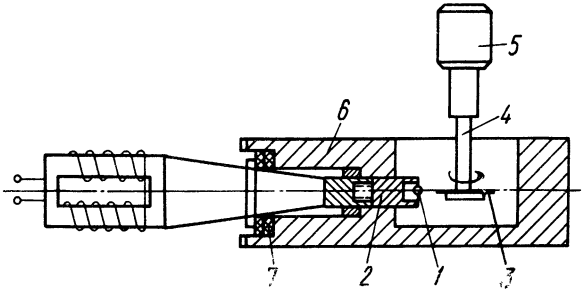


Рис. 20. Схема ультразвукового разрезания алмазов

7. Характеристики волновых свойств материалов

Материал	Скорость продольных волн в стержне	Скорость продольных волн в бесконечном объеме	Скорость волн сдвига	Волновое сопротивление $\cdot 10^{-6}$, г/(см$^2 \cdot$ с)
	м/с			
Алюминий	5080	6260	3080	13,7
Вольфрам	4310	5460	2620	82,0
Железо	5170	5050	3230	40,4
Латунь	4300	5240	2640	37,4
Никель	4785	5630	2960	41,5
Органическое стекло	2140	2670	1121	2,5
Фарфор	4884	5340	3120	11,7

щения. По мере увеличения амплитуды ультразвуковых колебаний ξ_m возрастает амплитуда колебательного ускорения $(2\pi\omega)^2 \xi_m$, а также колебательная сила, амплитуда которой N_m. Если величина N_m превосходит силу контакта $P_к$, то возникает периодический отрыв соприкасающихся тел друг от друга. Сила трения при этом действует не все время, а только в те доли периода колебаний $T = 1/\omega$, когда тела соприкасаются. Можно считать, что в этих условиях имеет место эффективная сила трения F', величина которой меньше F. Если $N_m \gg P$, то эффективная сила трения стремится к нулю.

Во втором случае колебания ориентированы параллельно плоскости соприкосновения тел и постоянной скорости V, поэтому контакт тел не прерывается. Направление ультразвукового смещения в течение одной половины полупериода совпадает с направлением движения тела, а в течение другой половины — противоположно ему, и, следовательно, сила трения оказывается направленной в ту же сторону, что и вызывающая движение тела внешняя сила. Таким образом, сила трения способствует движению тела, уменьшая необходимую для этого внешнюю силу. В этом случае также можно ввести эффективную силу трения $F' < F$.

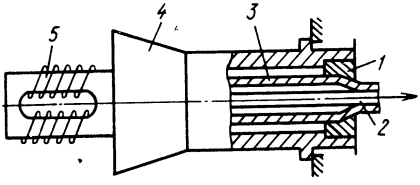


Рис. 21. Принципиальная схема установки для волочения труб с применением ультразвука:

1 — волока; *2* — оправка; *3* — труба; *4* — ультразвуковой концентратор; *5* — магнитострикционный преобразователь

С уменьшением статической нагрузки силы контактного трения снижаются в большей степени.

Эффект зависит от температуры, так как с ее изменением изменяются упругие характеристики материалов и скорости распространения упругих волн в них.

Характеристики некоторых материалов при 20 °С, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 7.

Эффект влияния ультразвуковых колебаний на трение используется для снижения трения, устранения заедания в осях приборов. Снижением трения под действием ультразвука пользуются в промышленных процессах, связанных с пластической деформацией твердых тел, например при волочении, прокатке, резании металла.

В установке для ультразвукового разрезания алмазов (рис. 20) кристалл алмаза *1* впаян твердым припоем в наконечник *2*, который привинчен к концентратору акустической головки. Диск-инструмент *3* укреплен на шпинделе *4*, который приводится в движение электродвигателем *5*. Ванна *6* для абразивной суспензии прикреплена к фланцу концентратора. Уплотнение *7* предотвращает утечку суспензии из ванны.

Установка для волочения труб (рис. 21) позволяет увеличить степень деформации за проход при одновре-

менном снижении усилия волочения.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [173, 224, 257], а о применении эффекта — в работах [224, 257].

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ УДАР

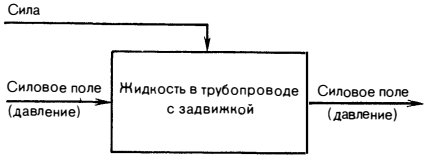


Рис. 22 Структурная схема ФЭ гидравлического удара

Гидравлический удар — результат резкого изменения давления в жидкости, вызванный мгновенным изменением скорости ее течения в трубопроводе.

Явления, происходящие при гидравлическом ударе, объясняются на основе свойства сжимаемости капельных жидкостей. После закрытия задвижки на горизонтальном трубопроводе постоянного диаметра, по которому движется жидкость со средней скоростью V, слой жидкости, находящийся непосредственно у задвижки, мгновенно останавливается. Затем последовательно прекращают движение слои жидкости (завихрения, противотоки) на увеличивающемся со временем расстоянии от задвижки. При этом уплотняется ранее остановившаяся масса жидкости и в результате повышения давления несколько расширяется труба. В трубу войдет дополнительный объем жидкости.

Так как жидкость сжимаема, то вся ее масса в трубопроводе не останавливается мгновенно. Граница объема, включающего в себя остановившуюся жидкость, перемещается от задвижки вдоль трубопровода с некоторой скоростью c, называемой скоростью распространения волны давления.

Прилежащая к задвижке часть объема жидкости $Fc\Delta\tau = F\Delta S$ (F — площадь сечения трубы) за время $\Delta\tau$, остановившись, потеряет количество движения $\rho F\Delta S\bar{V}$.

Давление у задвижки до ее закрытия было p_0, а давление, возникшее после остановки, $p + \Delta p$. Величина Δp, найденная на основании теоремы количества движения, равняется $\Delta p = \rho cV$ (формула Н. Е. Жуковского).

Далее останавливается второй слой жидкости, на который давят следующие слои, и т. д. Таким образом, постепенно повышенное давление, возникшее первоначально непосредственно у задвижки, распространяется далее по всему трубопроводу против течения жидкости со скоростью c.

Если давление в начале трубопровода сохраняется неизменным (в случае, когда трубопроводом забирается вода из открытого бассейна с большой площадью поверхности), то после достижения ударной волной начального сечения трубы, в ней начинается обратное перемещение ударной волны с той же скоростью c, причем это есть уже волна понижения давления. Одновременно в трубе возникает движение жидкости по направлению к начальному сечению. По достижении ударной волной сечения у задвижки давление здесь снижается и делается меньшим, чем первоначальное давление до удара; после этого начинается перемещение ударной волны, но уже волны понижения давления, в направлении к началу трубопровода Циклы повышений и понижений давления будут чередоваться и далее через промежутки времени, равные времени двойного пробега ударной волной длины трубопровода от задвижки до начала трубопровода. Таким образом, при гидравлическом ударе жидкость, находящаяся в трубопроводе, будет совершать колебательные движения, которые в силу гидравлических сопротивлений и вязкости, поглощающих первоначальную энергию жидкости на преодоление трения, будут затухающими.

Увеличение давления при гидравлическом ударе $\Delta p = \rho cV$, где ρ — плотность жидкости; c — скорость распространения ударной волны; V — средняя скорость движения жидкости.

Скорость распространения волны зависит от рода жидкости, материала трубы, ее диаметра и толщины стенок

$$c = \sqrt{\frac{E_{ж}}{\rho}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{E_{ж}}{E_c}\frac{d}{\delta}}},$$

где $E_{ж}$ — модуль упругости жидкости (величина, обратная коэффициенту

8. Плотность жидкостей

Жидкость	T, К	ρ, кг/дм³
Вода	277	1,00
Керосин	293	0.82
Кислота:		
азотная	293	1.502
пальмитиновая	335	0.853
уксусная	293	1.049
Масло:		
вазелиновое	293	0,8
креозот	288	1.04—1,10
машинное	293	0.90—0,92
парафиновое	293	0.87—0,88
скипидарное	293	0.87
Морская вода	293	1,01—1,05
Нефть	293	0,81—0,85
Пектан	293	0,626
Спирт амиловый	293	0,814
Фторбензол	293	1,024
Хлорбензол	293	1,066
Этилацетат	293	0,901

сжимаемости); E_c — модуль упругости материала трубы; δ — толщина стенки трубы; d — диаметр трубы.

ФЭ проявляется, как правило, в трубопроводах гидросистем.

Давление, обеспечивающее движение жидкости в трубопроводе, приложено ко всей жидкости и стенкам трубопровода.

Сила приложена к задвижке. Давление гидроудара возникает в жидкости перед задвижкой в момент перекрытия трубопровода.

Плотность некоторых жидкостей, используемых при практической реализации ФЭ, приведена в табл. 8.

ФЭ проявляется в гидросистемах различного назначения. В большинстве случаев это нежелательное явление, приводящее к разрушению трубопроводов. На основе гидравлического удара разработаны устройства для подъема воды, сжатия воздуха и др.

Используя силу гидравлического удара, устраивают особые насосы, так называемые гидравлические тараны, служащие для поднятия жидкости.

Гидравлический таран — водоподъемное устройство, в котором для подачи воды используется повышение в нем давления при периодически

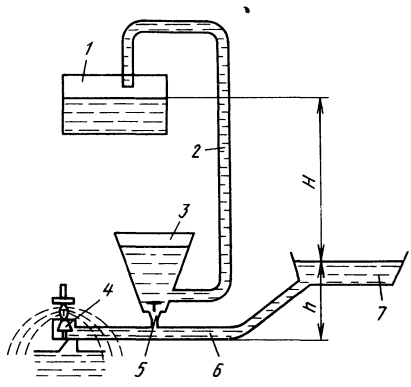


Рис. 23. Схема гидравлического тарана: *1* — верхний бак; *2*, *6* — трубопроводы; *3* — напорный колпак; *4*, *5* — клапаны; *7* — резервуар; *P* — усилие, необходимое для открытия клапана; *h* — высота падения воды; *H* — высота подъема воды

создаваемых гидравлических ударах (рис. 23). В период разгона при кратковременном открытии клапана *4* в подводящей трубе *6* под действием подпора создается поток воды, который сбрасывается через этот клапан. Когда силовое воздействие воды уравновесит массу клапана, он поднимается. Быстрое закрытие клапана *4*, а следовательно, внезапная остановка воды, вызывает гидравлический удар. Резкое повышение давления открывает клапан *5*, через который выходит некоторое количество воды. В рабочем периоде вода по трубопроводу *2* поступает в верхний бак *1*, преодолев напор $H > h$. Сжатый воздух, находящийся в напорном колпаке *3*, выравнивает подачу воды по трубопроводу *2*. В конце второго периода давление в клапанной коробке становится немного меньше, поэтому клапан *5* закрывается, а клапан *4* открывается, что обеспечивает автоматическое повторение цикла. КПД гидравлического тарана зависит от напора и равен 0,92 для отношения $H/h = 1$, и 0,26 для $H/h = 20$.

Гидравлический таран применим при запасе воды, значительно превышающем необходимое количество, и где есть возможность расположить установку ниже уровня источника.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [7, 284], а о применении эффекта — в работе [58].

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

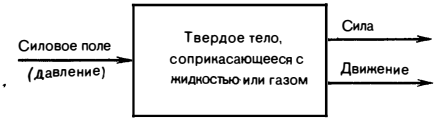


Рис. 24. Структурная схема ФЭ гидравлического сопротивления

Гидродинамическое сопротивление — это сопротивление движению тела в жидкости или сопротивление движению жидкости, соприкасающейся с другими телами.

Гидродинамическое сопротивление $X = C_x \frac{\rho V^2}{2} S$, где ρ — плотность среды; V — скорость движущегося тела (или жидкости относительно неподвижного тела); S — характерная для данного тела площадь сечения; C_x — коэффициент гидродинамического сопротивления.

Безразмерный коэффициент гидродинамического сопротивления зависит от формы тела, его положения относительно направления движения и чисел подобия. Силу, с которой жидкость действует на каждый элемент поверхности движущегося тела, можно разложить на нормальную и касательную составляющие, последняя представляет собой силу трения. Проекция результирующей всех сил на направление движения дает гидродинамическое сопротивление давления, а проекция результирующей всех сил трения на направление движения — гидродинамическое сопротивление трения. Тела, у которых гидродинамическое сопротивление давления мало по сравнению с сопротивлением от сил трения, считаются хорошо обтекаемыми. Гидродинамическое сопротивление плохо обтекаемых тел определяется почти полностью давлением. При движении тел вблизи поверхности воды образуются волны, в результате чего возникает волновое сопротивление.

При протекании жидкости по трубам, каналам и т. д. различают два вида гидродинамического сопротивления: сопротивление по длине, прямо пропорциональное длине участка потока, и местные сопротивления, связанные с изменением структуры потока на коротком участке при обтекании различных препятствий (в виде клапанов, задвижек и т. д.), а также при внезапном расширении или сужении потока, или при изменении направления его течения.

Под действием вязкости слой движущейся жидкости, непосредственно прилегающей к поверхности, прилипает к ней. В случае обтекания потоком какого-либо тела или перемещения потока относительно стенок это приводит к тому, что вблизи твердой поверхности устанавливается переменная по нормали к ней скорость, возрастающая от нуля на этой поверхности до скорости V_1 невозмущенного потока (рис. 25). Эту область, в которой переменна по сечению скорость потока, называют пограничным слоем. Толщина пограничного слоя зависит от числа Рейнольдса (Re).

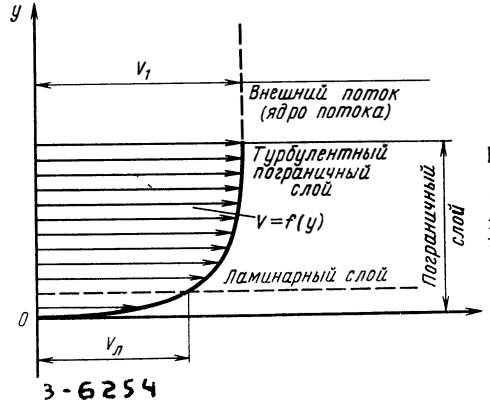


Рис. 25. Движение вязкой жидкости вблизи твердой поверхности:

V — скорость промежуточных слоев жидкости; V_1 — скорость внешнего потока; $V_л$ — скорость ламинарного слоя

9. Коэффициенты гидродинамического сопротивления для некоторых тел

Форма тела	C_x	Re
Шар	0,47 0,22	1 000—300 000 >400 000
Круглый цилиндр бесконечной длины	1,2 0,3	<200 000 >500 000
Куб	1,2	800 000

$$\mathrm{Re} = \frac{V\,d\rho}{\eta} = \frac{Vd}{\nu},$$

где V — средняя скорость потока жидкости; d — диаметр трубы; ρ — плотность жидкости; η — динамическая вязкость жидкости; $\nu = \frac{\eta}{\rho}$ — кинематическая вязкость жидкости.

Гидродинамическое сопротивление оценивается величиной «потерянного» напора h_v, представляющего собой ту часть удельной энергии потока, которая необратимо расходуется на работу сил сопротивления.

Значение h_v по длине трубы вычисляется по формуле Дарси—Вейсбаха:

$$h_v = \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g},$$

где λ — коэффициент сопротивления; l и d — длина и диаметр трубы соответственно; V — средняя скорость; g — ускорение свободного падения.

Коэффициент λ определяется характером течения. При ламинарном течении он зависит только от числа Re (линейный закон сопротивления), а при турбулентном течении — еще и от параметра шероховатости стенок трубы. При очень больших числах Re (порядка 10^6 и более) λ зависит только от шероховатости (квадратичный закон сопротивления). Местные гидродинамические сопротивления оцениваются формулой Вейсбаха $h_v = \xi V^2/(2g)$, где ξ — коэффициент местного сопротивления, различный для разных препятствий и зависящий от числа Re.

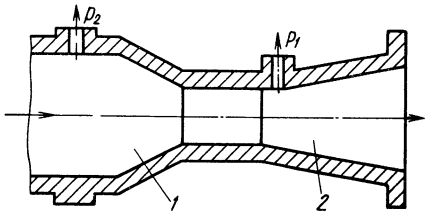


Рис. 26. Труба Вентури:
1 — сопло; 2 — диффузор; p_1 и p_2 — давления до и после сужения

Плотность обтекаемой среды, в которой движется тело, должна быть меньше плотности тела.

ФЭ проявляется в каналах любой геометрической формы с протекающей жидкостью (табл. 9). Сила, препятствующая движению тела, приложена к поверхности тела со стороны набегающего потока жидкости или газа.

Эффект гидродинамического сопротивления учитывается при проектировании и постройке разнообразных технических объектов: гидротехнических сооружений, турбинных установок, нефте-, водопроводных магистралей, насосов и т. д.

Труба Вентури (рис. 26) — устройство, обеспечивающее местное гидродинамическое сопротивление потоку (сужение потока жидкости); применяется для измерения расхода или скорости потока. Скорость потока изменяется благодаря местному гидродинамическому сопротивлению, вызывая изменение давления; в результате возникает перепад давления (p_2 — p_1), который однозначно связан с расходом и скоростью потока. Давление измеряется с помощью дифференциального манометра.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [7, 162], а о применении эффекта — в работе [97].

ГИРОСКОПИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

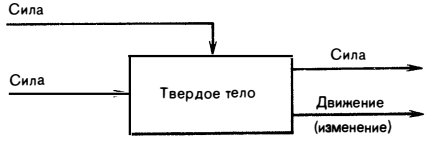


Рис. 27. Структурная схема гироскопического эффекта

Гироскопический эффект — это проявление некоторых сил со стороны вращающегося тела при наложении на него внешнего силового воздействия. Быстровращающееся осесимметричное твердое тело, ось которого может изменять свое направление, принято называть гироскопом. У гироскопов, применяемых в технике, свободный поворот оси обеспечивают, закрепляя гироскоп в специальных устройствах (рамках). Вследствие этого гироскоп может иметь три степени свободы.

Первое свойство уравновешенного гироскопа с тремя степенями свободы состоит в том, что его ось стремится устойчиво сохранять в пространстве приданное ей первоначальное направление при любых перемещениях гироскопа и случайных толчках.

Второе свойство гироскопа проявляется, если к его оси приложить пару сил $P - P$ с моментом $M = Ph$ (h — плечо силы) (рис. 28), то гироскоп начнет дополнительно поворачиваться вокруг оси Y, лежащей в плоскости действия силы и перпендикулярной к собственной оси тела Z. Это дополнительное движение называется прецессией. Прецессия гироскопа будет происходить по отношению к инерциальной системе отсчета с угловой скоростью

$$\omega = M/(I\Omega),$$

где I — момент инерции гироскопа относительно оси Z; Ω — угловая скорость собственного вращения гироскопа относительно той же оси. Величина $H = I\Omega$ называется собственным кинематическим моментом (или моментом количества движения).

Угловая скорость прецессии ω направлена так, что вектор H собственного кинетического момента стремится к совмещению с вектором M пары сил, действующих на гироскоп.

Если гироскоп свободен от постоянно действующих на него сил, т. е. $M = 0$, то $\omega = 0$ и ось гироскопа будет сохранять неизменное положение по отношению к инерциальной системе отсчета. Кратковременное воздействие на ось такого гироскопа пары сил с моментом $M \neq 0$ вызовет смещение оси на малый угол, тем меньший, чем больше будет $H = I\Omega$. С прекращением же этого воздействия $M = 0$, а следовательно, и $\omega = 0$, так что смещение оси прекратится.

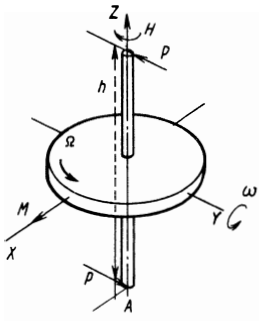


Рис. 28. Прецессия гироскопа

Свойства гироскопа проявляются при выполнении двух условий: 1) ось вращения гироскопа должна иметь возможность изменять свое направление в пространстве; 2) угловая скорость вращения гироскопа вокруг своей оси должна быть велика по сравнению с той угловой скоростью, которую будет иметь сама ось при изменении своего направления.

Физический эффект проявляется на телах, имеющих ось вращения (вращающиеся небесные тела, артиллерийские снаряды, роторы турбин, винты самолетов и т. д.).

Основное воздействие направлено эксцентрично к оси вращения, а дополнительное воздействие приложено к оси вращения.

Результат воздействия проявляется в любой точке вращающегося тела и направлен к оси вращения, перпендикулярно к дополнительному воздействию.

ФЭ широко применяется для автоматического управления движением самолетов, судов, торпед, ракет и в других системах гироскопической стабилизации, для целей навигации (указатели курса, поворота, горизонта, стран света и др.), для измерения угловых или поступательных скоростей движущихся объектов (например, ракет), при прохождении стволов штолен. строительстве метрополитенов, при бурении скважин и т. д.

На гироскопическом эффекте основан принцип так называемой силовой гироскопической стабилизации (рис. 29).

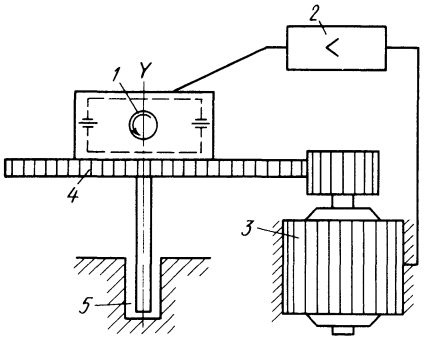


Рис. 29. Гироскопическая система стабилизации:

1 — гироскоп-поплавок; *2* — усилитель; *3* — электродвигатель; *4* — платформа; *5* — основание

При стабилизации вокруг неподвижной оси Y корпус интегрирующего гироскопа *1* размещен на платформе *4*, которую может вращать вокруг оси Y специальный электродвигатель *3*. В системе стабилизации гироскоп играет роль чувствительного элемента, обнаруживающего отклонения объекта от заданного положения, а возвращение в это положение осуществляется электродвигателем, получившим соответствующий сигнал от усилителя *2*. Подобные системы называют индикаторами.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [242, 270], а о применении эффекта — в работах [164, 268].

ДАВЛЕНИЕ ПРИ КОНТАКТЕ



Рис. 30. Структурная схема ФЭ давления

Механическое давление при контакте твердых тел — эффект распределения концентрированной силы по площади контакта. Характер распределения и значения давления зависят от геометрической формы и физико-механических характеристик материалов контактирующих тел.

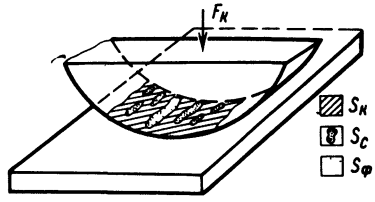


Рис. 31. Схема площади контакта: $S_к$ — номинальная; S_c — контурная; $S_ф$ — фактическая

Общая связь результата с воздействием выражается формулой

$$p = \frac{F_к}{S_к},$$

где p — давление; $F_к$ — сила контакта; $S_к$ — площадь контакта.

Фактическая площадь контакта $S_ф$ может существенно отличаться от расчетной Отличия возникают вследствие отклонения геометрии поверхностей от идеальной (шероховатость, волнистость, овальность и т. п.) и фактической неоднородности строения поверхностных слоев материала.

При соприкосновении плиток Иогансона, являющихся эталоном точности изготовления, фактические пятна контакта локализуются в группы, занимающие 20—30% расчетной площади контакта (рис. 31).

В процессе длительного контакта давление обычно уменьшается вследствие неравномерного износа и деформации выступающих неровностей.

10. Расчетные значения изменений номинального, контурного и фактического давлений при изменении нагрузки контакта пластины из стали ШХ15 площадью 5 см² со сталью 30ХГСА

Изменение нагрузки		Изменение давления		
		p	p_c	$p_ф$
H	%	%		
5—50	900	900	59,6	9,9
5—500	9 900	9 900	142,3	19,9
5—5000	99 900	99 900	299,0	31,9

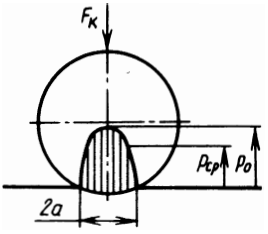


Рис. 32. Гипотетическое распределение давления по Г. Герцу

Контурное $p_с$ давление пятен контакта и фактическое $p_ф$ давление единичных микронеровностей практически не изменяются с ростом нагрузки (табл. 10). Распределение силы контакта происходит в основном путем увеличения пятен контакта и уменьшения пористости материала.

Фактические напряжения материала в зоне контакта могут значительно превышать предел прочности, но разрушения не происходит вследствие создания условий всестороннего сжатия.

Распределение давления осуществляется по площадке, имеющей форму эллипса при контакте тел двойной кривизны. Принято считать (гипотеза Г. Герца), что давление распределено по форме эллипсоида (рис. 32)

$$F_к = \int\limits_{S_к} p\,dS = \frac{2}{3}\pi ab p_0;$$

$$p_0 = \frac{3}{2}\frac{F_к}{\pi ab},$$

где a, b — полуоси эллипса контакта; p_0 — максимальное давление;

$$p_{ср} = \frac{F_к}{\pi ab} = \frac{2}{3}p_0,$$

где $p_{ср}$ — среднее давление.

ФЭ широко используется в машиностроении для передачи концентрированного силового воздействия от элемента к элементу механических устройств при обеспечении приемлемого уровня контактных напряжений в материале по условиям надежности. Наиболее распространенные узлы машин, использующие ФЭ: подшипники качения, зубчатые передачи, кулачки механизмов, шайбы, прокладки и т. п.

На рис. 33 показаны возможные способы использования ФЭ для снижения максимальных контактных напряжений в роликовых опорах: а) распределение давления вдоль цилиндра; б) изменение распределения давления путем увеличения податливости закраин цилиндра; в) изменение распределения давления путем изменения формы контакта.

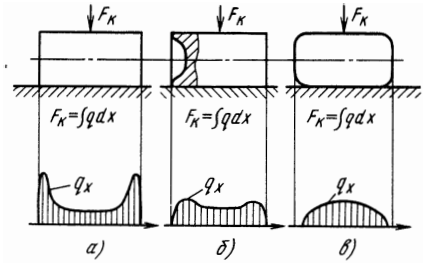


Рис. 33. Способы изменения характера давления в роликовой опоре:

а — жесткий цилиндр; *б* — цилиндр с податливыми закраинами; *в* — модифицированный контакт

Сведения о физической сущности и применении эффекта приведены в работе [134].

ДЕЛЬТА Е-ЭФФЕКТ

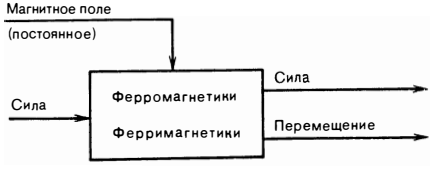


Рис. 34. Структурная схема дельта-*Е*-эффекта

Дельта *Е*-эффект (ΔE-эффект) — изменение модуля упругости ферромагнитных веществ в зависимости от их магнитного состояния. Обычно под ΔE-эффектом понимают изменение модуля Юнга E при намагничивании образцов вдоль оси растяжения-сжатия.

Причина возникновения ΔE-эффекта состоит в том, что под воздействием механических напряжений изменяется доменная структура ферромагнитных веществ. Это приводит к добавочной деформации, связанной с магнитострикцией, помимо основной — упругой, а следовательно, к отклоне-

11. Характеристики магнитострикционных материалов

Материал	Коэффициент магнитомеханической связи k	Магнитострикция при насыщении $\lambda_s \cdot 10^{-6}$	Относительная магнитная проницаемость μ	a, МН/(м^2·Тл)
Никель НП2Т	0,3	—37	35	23
Перминдюр 49КФ (49% Co, 2% V, 49% Fe)	0,5	+70	200	22
Алфер 12Ю (12,5% Al, 87,5% Fe)	0,3	—26	30	8,5
Сплав Никоси (4% Co, 2% Si, 94% Fe)	0,49	—27	210	18
Ферриты-шпинели (Ni, Co, Cu)	0,21—0,32	—26÷—30	20	22

Примечание. Параметр $a = (d\sigma/dB)_\varepsilon$, где σ — магнитострикционное напряжение, создаваемое магнитным полем и деформацией. Параметр a пропорционален магнитной восприимчивости и модулю упругости материала при заданном значении магнитной индукции B; $a = f(B, E, \chi)$.

ниям от закона Гука, изменениям модуля упругости и зависимости от магнитного поля.

Наиболее легко оценить величину ΔE-эффекта в случае, когда ферромагнетик намагничивается от размагниченного состояния до магнитного насыщения. Если E_0 — нормальный модуль упругости, который имеет ферромагнетик, когда магнитные моменты доменов закреплены внешним сильным полем (т. е. возможность изменения их ориентации исключена) и, следовательно, нет магнитострикционного удлинения, то

$$E_0 = \sigma/(\delta l/l)_0,$$

где σ — упругое напряжение; $(\delta l/l)_0$ — соответствующее упругое удлинение.

Если магнитные моменты доменов «свободны» (поле отсутствует), то напряжение σ будет вызывать ориентацию моментов доменов и возникает удлинение $(\delta l/l)_M$, которое имеет магнитострикционную природу. В этом случае

$$E = \sigma/[(\delta l/l)_0 + (\delta l/l)_M];$$

вычитая из последнего выражения величину $E_0 = \sigma/(\delta l/l)_0$, получим

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{(\delta l/l)_M}{(\delta l/l)_0}.$$

ΔE-эффект велик в материалах с высокой магнитострикцией, малой магнитокристаллографической анизотропией и малыми внутренними напряжениями.

ФЭ невозможен в поле магнитного насыщения. С повышением температуры эффект снижается и становится равным нулю в точке Кюри.

ФЭ проявляется на телах любой геометрической формы. В технике обычно применяются кольца, стержни, пластины.

Магнитное поле и деформирующая сила действуют на тело вдоль одной оси (оси деформации). Деформация тела представляет собой сумму деформации под действием силы и деформации под действием магнитного поля.

Характеристики некоторых материалов, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 11.

В машиностроении ФЭ используется для повышения деформируемости некоторых материалов при их обработке. Используется также в приборостроении, радиотехнике, электронной технике, электросвязи и других отраслях.

Сильное постоянное магнитное поле H_0, подавляя малые периодические изменения намагниченности, увеличивает механическую добротность $Q_{мех}$ (в материалах с большим коэффициентом магнитомеханической связи). Это результат ΔE-эффекта. Зависимость $Q_{мех}$ от H_0 используется для управления характеристиками магнитострикционных преобразователей,

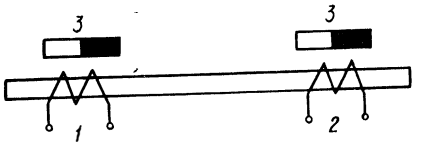


Рис. 35. Схема магнитострикционной линии задержки:

1 — входная катушка; *2* — выходная катушка

например в электромеханических фильтрах (так называемое магнитомеханическое демпфирование).

Возможно создание линий задержки как электрических, так и звуковых сигналов путем использования материалов, обладающих большим ΔE-эффектом. По схеме магнитострикционной линии задержки (рис. 35) входная катушка *1* преобразует электрический сигнал в ультразвуковой, который распространяется по проволоке. В выходной катушке *2* происходит обратный процесс — преобразование ультразвуковой волны в электрический сигнал. Время задержки электрических сигналов определяется расстоянием между входной и выходной катушками. Задержка обусловлена относительно малой скоростью распространения звуковых упругих волн.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [18, 21, 240], а о применении эффекта — в работе [21].

ЭФФЕКТ ДОППЛЕРА



Рис. 36. Структурная схема эффекта Доплера

Эффект Доплера — изменение частоты колебаний ω или длины волны λ, воспринимаемой наблюдателем, при движении источника колебаний и (или) наблюдателя относительно друг друга. Неподвижный источник испускает последовательно импульсы с промежутками между соседними импульсами, равными λ_0. Импульсы распространяются в однородной среде с постоянной скоростью v, не испытывая никаких искажений (т. е. в линейной среде без дисперсии). Тогда неподвижный наблюдатель будет принимать последовательные импульсы через временной промежуток $T_0 = \lambda_0/v$. Если источник движется в сторону наблюдателя со скоростью $V \ll v$, то соседние импульсы оказываются разделенными меньшим промежутком времени $T = \lambda/v$, где $\lambda = \lambda_0 - VT_0$. Если вместо импульсов рассматривать соседние максимумы поля в непрерывной гармонической волне, то при эффекте Доплера частота этой волны $\omega = 2\pi/T$, воспринимаемая наблюдателем, будет больше частоты $\omega_0 = 2\pi/T_0$, испускаемой источником.

При движении источника измененная частота ω связана с частотой излучения ω_0 формулой

$$\omega = \omega_0 \frac{1}{1 - \frac{V_и}{c}\cos\theta}, \qquad (3)$$

где $V_и$ — скорость источника; c — скорость звука в среде; θ — угол между направлением скорости источника и направлением от источника к приемнику (рис. 37, *а*).

При движении приемника измененная частота

$$\omega = \omega_0 \left(1 - \frac{V_п}{c}\cos\tilde{\theta}\right), \qquad (4)$$

где $V_п$ — скорость приемника; $\tilde{\theta}$ — угол между направлением скорости приемника и направлением от источника к приемнику (рис. 37, *б*).

При одновременном движении и источника и приемника измененная частота

$$\omega = \omega_0 \frac{1 - \frac{V_п}{c}\cos\theta}{1 - \frac{V_и}{c}\cos\theta}.$$

При приеме неподвижным приемником звука, рассеянного движущимся телом, измененная частота принимаемой рассеянной волны

$$\omega = \omega_0 \frac{1 - \frac{V_р}{c}\cos\theta}{1 - \frac{V_р}{c}\cos\tilde{\theta}},$$

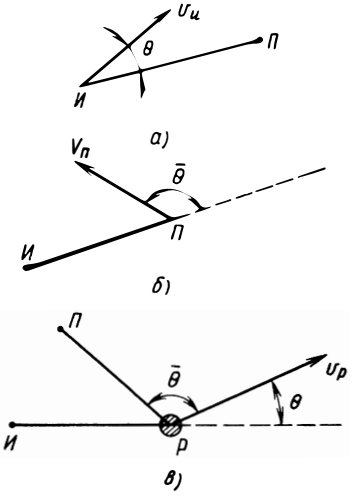


Рис. 37. Схемы эффекта Доплера:

а — для движения источника звука; *б* — для движения приемника звука; *в* — для движения рассеивающего тела; *И* — источник звука; *П* — приемник звука; *Р* — рассеивающее тело

где ω_0 — частота первичной волны, падающей на рассеивающее тело; $V_р$ — скорость тела, θ и $\bar{\theta}$ — углы между направлением падения первичной волны на тело и направлением от тела к приемнику (рис. 37, *в*).

Эффект Доплера обнаруживается для любых волн. Имеет чисто кинетическое происхождение и возникает как для волновых, так и для неволновых движений любой природы при наблюдении их в двух движущихся относительно друг друга системах отсчета.

Из соотношений (3) и (4) можно выяснить все основные физические проявления эффекта Доплера. При $\theta = 0$ или π наблюдается продольный эффект Доплера, когда источник движется прямо на наблюдателя или от него, и изменение частоты максимально. При $\theta = \pi/2$ имеет место поперечный эффект Доплера, который связан с чисто релятивистским эффектом замедления времени и не имеет никакой волновой специфики. В средах с дисперсией волн может возникнуть сложный эффект Доплера.

Дополнительные особенности эффекта Доплера возникают при движении источника со скоростью $V > v$, когда на поверхности конуса углов, удовлетворяющих условию $\cos\theta = v/V$, знаменатель в формуле обращается в нуль, а доплеровская частота ω неограниченно возрастает — аномальный эффект Доплера.

ФЭ проявляется на телах любой геометрической формы.

Сила приложена к телу, электрическое поле (радиоволны) — к поверхности тела, обращенной к источнику излучения.

Тело движется в направлении приложенной силы, отраженное поле (радиоволны) — от поверхности тела.

Характеристики некоторых материалов, обладающих малым коэффициентом отражения, приведены в табл. 12.

Эффект Доплера позволяет измерить скорости движения источников излучения и объектов, рассеивающих волны. В астрофизике эффект Доплера используется для определения скорости движения звезд, а также скорости вращения небесных тел. Эффект Доплера стали применять для определения радиальных (лучевых) скоростей небесных тел. В спектроскопии проявление эффекта Доплера состоит в том, что хаотическое тепловое движение испускающих свет атомов или ионов приводит к уширению наблюдаемых спектральных линий. Измерения доплеровского смещения линий в спектрах излучения удаленных галактик привели к выводу о расширяющейся Вселенной. В спектроскопии доплеровское уширение линий излучения атомов и ионов позво-

12. Характеристики материалов с малым отражением

Материалы	Диапазон длин волн·10^3, м, не более	Коэффициент отражения, %
Пенодиэлектрики	32	0,01
Пенопласты	32	1
Материалы для покрытия полов	32	2
Маты из натурального волоса смешанные с сажей и неопреном	32	2

ляет измерить их температуру. В радио- и гидролокации эффект Доплера используется для измерения скорости движущихся целей, а также при синтезе апертуры. Приборы для определения скорости потока жидкости или газа в различных трубопроводах или каналах с помощью ультразвука называются ультразвуковыми расходомерами. Расходомеры, принцип действия которых основан на использовании эффекта Доплера, применяются для измерения скорости потока при контроле движения гетерогенных сред.

Наиболее просто эффект Доплера обнаружить с помощью интерферометра Майкельсона (рис. 38).

Полупосеребренное зеркало A разделяет падающий на него через линзу L_1 от источника S пучок света на два пучка *1* и *2*. Эти пучки отражаются затем от зеркал B_1 и B_2, одно из которых неподвижное, а другое (зеркало B_2) может перемещаться с помощью винта C, оставаясь параллельным самому себе. Лучи, отраженные от зеркал B_1 и B_2, попадают снова на зеркало A, отчасти проидя его, а отчасти отразившись от него, собираются линзой L_2 в точке S', в которой размещен фотоэлектронный умножитель. Здесь наблюдаются интерференционные полосы. Разность хода лучей определяется разностью длин l_1 и l_2 «плечей» интерферометра.

Если одно из зеркал интерферометра непрерывно передвигать, то будет наблюдаться непрерывное смещение интерференционных полос. Это смещение можно рассматривать как результат биений. Свет, отраженный от преломляющего зеркала, в силу принципа Доплера, меняет частоту. При соединении пучков, следовательно, тоже происходит сложение волн нескольких разных частот.

На использовании эффекта Доплера основан принцип действия расходомера. Он применяется для измерения скорости потока при контроле движения гетерогенных сред. Ультразвуковые (УЗ) колебания, посылаемые по направлению потока, рассеиваются частицами среды и частично отражаются обратно к излучающему преобразователю, рядом с которым помещается второй, приемный. Принятый сигнал отличается от посланного по частоте, а величина частотного сдвига F про-

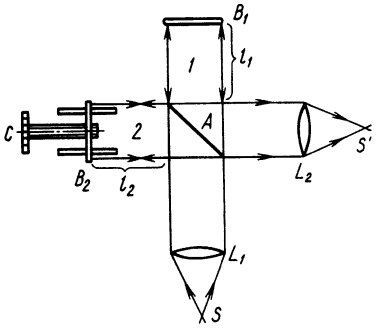


Рис. 38. Схема интерферометра Майкельсона

порциональна скорости движения среды. Такой способ измерения скорости потока применяется, в частности, в медицине для определения скорости кровотока в крупных кровеносных сосудах. Эти измерения можно проводить бесконтактно, путем ввода УЗ-колебаний под углом к контролируемому участку сосуда. Для вычисления истинного значения скорости необходимо учитывать величину этого угла, так как частотный сдвиг определяется проекцией вектора скорости на направление УЗ-луча. При измерении скорости потока доплеровским методом возникает спектр частот, происхождение которого обусловлено сложным характером распределения скоростей в зоне прозвучивания.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [272, 273], а по применению эффекта — в работах [25, 275].

ДРОССЕЛИРОВАНИЕ

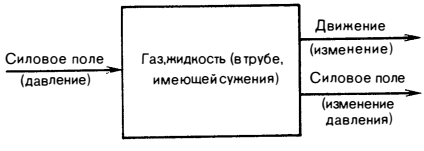


Рис. 39. Структурная схема ФЭ дросселирования

Дросселирование — термодинамический процесс необратимого понижения давления струи рабочего тела при прохождении через сужение в канале

без совершения внешней работы. Если вследствие какого-либо препятствия поперечное сечение струи внезапно сужается, а затем расширяется, давление в потоке снижается, что объясняется значительным трением в месте сужения. Уменьшение давления в потоке не сопровождается внешней работой, поэтому процесс является необратимым. Вследствие быстроты процесса существенного теплообмена с окружающей средой не происходит, что позволяет считать его адиабатическим.

Любой конструктивный элемент, создающий гидравлическое сопротивление (например, резкое сужение и расширение канала, наличие клапанов и задвижек, шероховатость стенок трубы и т. д.), вызывает дросселирование потока. Характер препятствия не влияет на сущность процесса.

При адиабатическом дросселировании газа в месте сужения увеличивается скорость, уменьшается давление и энтальпия. После сужения происходит торможение потока. Кинетическая энергия вновь преобразуется во внутреннюю, и энтальпия возрастает. На достаточном удалении от места дросселирования (перед или за ним) можно считать, что возмущающее влияние местного сопротивления на равномерность потока пренебрежимо мало и что установятся более или менее равновесные состояния газа (жидкости).

Выберем на достаточном удалении от места сужения сечения *I* и *II* (рис. 40) и обозначим усредненные значения скорости, давления и энтальпии в этих сечениях соответственно через V_1 V_2, p_1, p_2, i_1, i_2. Скорости потока V_1 и V_2 различаются мало, поэтому изменением кинетической энергии можно пренебречь. При этом условии состояние потока определится уравнением $i_1 = i_2$, т. е. энтальпия рабочего тела в начальном и конечном его состояниях при адиабатическом дросселировании не изменяется.

Для идеального газа не только энтальпия, но и температура в результате адиабатического дросселирования остается постоянной вследствие того, что энтальпия идеального газа является функцией только температуры. Поэтому можно записать $t_1 = t_2$.

Уравнение для единичного расхода

$$q_в = (i_1 - i_2) + \left(\frac{V_2^2}{2} - \frac{V_1^2}{2}\right) + g(z_1 - z_2) + l_{тр},$$

где $q_в = Q_в/M$ ($Q_в$ — теплота внешняя, M — массовый расход потока); $l_{тр} = L_т/M$ ($L_т$ — техническая работа); g — ускорение свободного падения; $(z_1 - z_2)$ — изменение высоты геометрического канала.

При дросселировании работа расширения рабочего тела полностью затрачивается на образование турбулентных завихрений и преодоление сопротивления трения. Это приводит к возрастанию энтальпии потока. Поэтому в случае адиабатического течения ($q_в = 0$) без совершения технической (внешней) работы уравнение примет вид:

$$(i_1 - i_2) + (V_2^2 - V_1^2)/2 = 0.$$

Интенсивность завихрения потока и сопротивление трения зависят от вязкости рабочего тела. Зависимость вязкости от давления для водорода и гелия приведены в табл. 13.

Силовое поле (давление) приложено к объему газа (жидкости), находящегося в трубе. Результат воздействия — силовое поле (падение давления) — проявляется в объеме газа (жидкости), расположенном за источником гидравлического сопротивления.

ФЭ учитывается при проектировании различных гидросистем, трубопроводов, регуляторов давления и расхода жидкостей и газов, в измерительной технике.

Трубораходомер (рис. 41) — прибор для измерения расхода объема или массы среды, протекающей через прибор в единицу времени. Он используется для контроля и учета жидкости, пара или газа при их производстве,

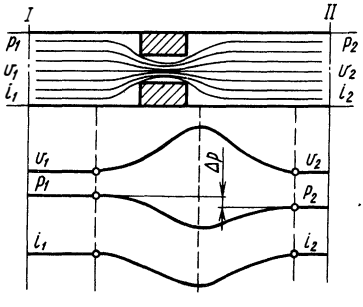


Рис. 40. Схема эффекта дросселирования

13. Вязкость водорода и гелия

Водород (T=55,05 К)		Гелий (T=90,27 К)	
Давление, Па	Вязкость, нПа·с	Давление, Па	Вязкость, нПа·с
101 323,2	3941	101 323,2	9100
974,57	3910	2 053,13	9070
75,86	3564	117,99	8162
15,47	2599	30,4	6209
1,5	562	1,4	669

отпуске, потреблении или хранении, а также служит для регулирования технологических и теплоэнергетических процессов в автоматических системах контроля и регулирования.

Принцип действия расходомера заключается в следующем. В трубопроводе на некотором расстоянии соосно расположены две крыльчатки. По периферии обеих крыльчаток выполнены каналы, оси которых параллельны осям крыльчаток. Первая (со стороны движения потока) крыльчатка приводится во вращение электродвигателем с постоянной угловой скоростью. Вторая крыльчатка укреплена на упругом элементе. Вращающаяся крыльчатка создает в протекающем потоке инерционный момент, поэтому закручиваемый поток газа создает давление на лопасти ведомой крыльчатки и заставляет ее поворачиваться на некоторый угол. Момент на ведомой крыльчатке пропорционален массовому расходу вещества.

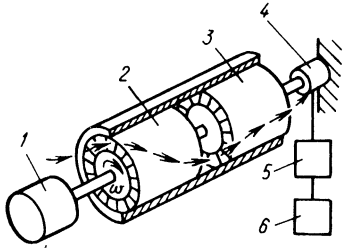


Рис. 41. Трубораскодомер:

1 — электродвигатель; 2 — вращающаяся крыльчатка; 3 — невращающаяся крыльчатка; 4 — упругое звено с чувствительным элементом; 5 — усилитель; 6 — регистрирующий прибор

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [8, 81, 176], а о применении эффекта — в работах [109, 176].

ИЗБИРАТЕЛЬНЫЙ ПЕРЕНОС ПРИ ТРЕНИИ

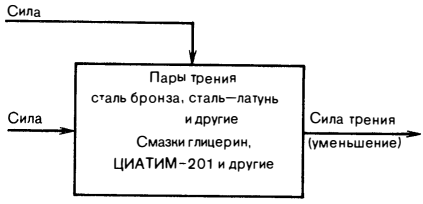


Рис. 42. Структурная схема избирательного переноса

При трении медных сплавов о сталь в условиях граничной смазки, исключающей окисление меди, происходит избирательный перенос меди из твердого раствора медного сплава на сталь и обратный ее перенос со стали на медный сплав, сопровождающийся уменьшением коэффициента трения до жидкостного и приводящий к значительному снижению износа пары трения.

Избирательный перенос представляет собой сложную совокупность механических, физических и физико-химических процессов, происходящих как на трущихся поверхностях, так и в смазочной среде.

В первый период работы пары трения под действием приложенной нагрузки происходит внедрение более жестких неровностей стального образца в относительно мягкую поверхность медного сплава. Возникающие напряжения вызывают появление пластических деформаций в зонах касания. Интенсивно повторяющиеся деформации поверхностного слоя приводят к его усталостному разрушению. Вместе с тем в смазочной среде в результате трибохимических процессов появляются поверхностно-активные вещества, значительно влияющие на усталостное разрушение тонкого поверхностного слоя детали из медного сплава. Одновременно происходит растворение легирующих элементов медного сплава вследствие разности их электродных потенциалов, возникающей при погружении сплава в среду, проявляющую электролитические

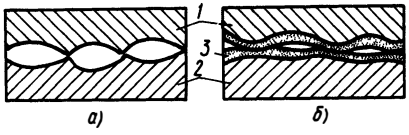


Рис. 43. Схема контакта деталей при граничной смазке (*а*) и избирательном переносе (*б*):
1 — сталь; *2* — бронза; *3* — сервовитная пленка

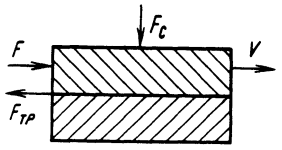


Рис 44. Плоские поверхности

свойства. Процесс механически активируется и наиболее интенсивно протекает на тех участках поверхности, которые подвергаются деформациям. В результате частицы разрушающегося тонкого слоя уходят в смазочный материал. Таким образом, в смазочной среде образуется дисперсная система частиц, обладающих высокой устойчивостью и электрофоретической подвижностью.

В зазоре между поверхностями трения генерируется электрическое поле, обусловленное в основном гальваническими процессами и термоэлектризацией.

В силу диффузии и электрофоретического переноса дисперсные частицы в смазочном материале движутся к поверхности стального образца и осаждаются на ней. Формирующаяся у границы раздела пленка обладает пористой структурой, насыщена смазкой, имеет малые сдвиговые напряжения, не способна к наклепу. Пленка в верхней части не имеет оксидов. При трении ее частицы могут переходить с одной поверхности трения на другую, т. е. схватываться без образования повреждений и увеличения сил трения.

В результате избирательного растворения легирующих элементов поверхностные слои по составу близки к чистой меди, а пленка на поверхности трения медного сплава имеет повышенную плотность вакансий и пониженную плотность дислокаций. После того как на трущихся поверхностях образуется слой защитной сервовитной пленки толщиной 1—2 мкм, наступает установившийся режим избирательного переноса. Сервовитная пленка может образовываться и в узле трения сталь—сталь при работе с металлоплакирующими смазочными материалами, содержащими мелкие частицы бронзы, меди, свинца, серебра и др. В процессе работы последние частично растворяются в смазочном материале и в результате восстановления оксидных пленок прочно схватываются со сталью, образуя сервовитную пленку, которая содержит в порах смазочный материал.

При избирательном переносе контакт осуществляется через пластически деформируемый мягкий и тонкий слой сервовитной пленки *3* (рис. 43). В результате площадь фактического контакта возрастает в десятки раз, а материал деталей трения *1* и *2* в процессе трения практически не участвует, испытывая лишь упругие деформации. Толщина сервовитной пленки соответствует размерам неровностей (или перекрывает их) большинства деталей общего машиностроения.

В режиме избирательного переноса трение происходит без окисления поверхностей. При отсутствии оксидных пленок дислокации в сервовитной пленке легко разряжаются, поэтому она не наклепывается и может многократно деформироваться без разрушения. Сервовитная пленка является мощным катализатором полимеризации. Полимерная пленка образуется из свободных радикалов органических веществ, которые возникают в процессе трибодеструкции смазочного материала. Полимерная пленка обладает высокой несущей способностью и малым сопротивлением сдвигу. Все это значительно снижает трение и изнашивание трущихся поверхностей.

Зависимость результата от воздействия имеет следующий вид:

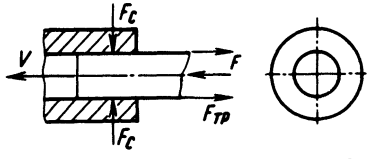


Рис. 45. Цилиндр в трубе

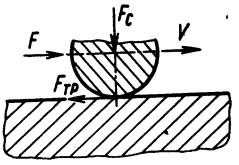


Рис. 46. Цилиндрическая поверхность на плоской поверхности

$$F_{тр} = fF_c,$$

где f — коэффициент трения; F_c — сила, прижимающая трущиеся детали друг к другу.

Сила трения при избирательном переносе обусловлена в основном механическим взаимодействием, так как материал сервовитной пленки находится в состоянии, близком к расплавленному, и молекулярные взаимодействия, обусловливающие трение, незначительны. В свою очередь, составляющая силы трения, обусловленная

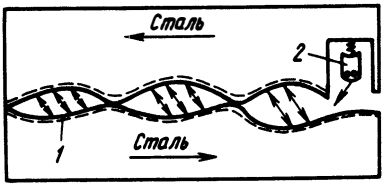


Рис. 47. Схема конструктивного варианта избирательного переноса:
1 — активный слой; *2* — бронзовый элемент, создающий активный слой

механическим взаимодействием поверхностей, обычно весьма мала и составляет несколько процентов от суммарной силы трения. Интенсивность износа материалов оценивают безразмерной величиной, представляющей собой отношение высоты изнашиваемого слоя к длине пройденного пути.

Описанный эффект ограничен по скорости скольжения и температуре

14. Характеристики некоторых материалов

Смазочный материал	Пара трения	Коэффициент трения	Нагрузка, МПа	Скорость скольжения·10^{-2}, м/с	Интенсивность изнашивания
ЦИАТИМ-201	Сталь 30ХГСН2А—бронза БрАЖМц10—3—1,5	0,12—0,3 0,18—0,25	30—150 50—90	3—7 1	— $2\cdot10^{-6}$
ЦИАТИМ-203	Сталь 30ХГСН2А—бронза БрАЖМц10—3—1,5	0,15—0,26	30—150	3	—
	Сталь 30ХГСН2А+твердый хром—бронза БрАЖМц10—3—1,5	0,2—0,3	30—150	—	—
Свинцоль 01	Сталь 30ХГСА—бронза БрАЖМц10—3—1,5	0,1—0,15	30—150	3—7	—
		0,09—0,165	50—70	1	$1\cdot10^{-7}$
ЦИАТИМ-201 +30% MoS_2		0,18—0,3	30—120	3—4,5	—
ВНИИ НП-254		0,092—0,14	50—90	1	$0{,}9\cdot10^{-8}$

При изменении скорости скольжения от $3{,}3 \cdot 10^{-4}$ до 0,1 м/с коэффициент трения уменьшается. При 0,1 м/с $\leqslant V \leqslant$ $\leqslant$ 2 м/с коэффициент трения практически не зависит от скорости скольжения. При $V > 2$ м/с коэффициент трения растет и эффект резко снижается.

При более высоких температурах он нарушается.

Некоторые геометрические формы пар трения приведены на рис. 44—46.

Сила F_c, сжимающая трущиеся детали, перпендикулярна к трущейся поверхности. Сила F, обеспечивающая перемещение одной трущейся поверхности относительно другой, направлена по касательной к трущейся поверхности.

Сила трения $F_{тр}$ направлена по касательной к трущейся поверхности и действует против направления перемещения.

Характеристики некоторых материалов, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 14.

ФЭ используется для повышения износостойкости трущихся поверхностей в подшипниках качения, в тяжелонагруженных шарнирных соединениях, в узлах трения автомобилей и самолетов, в электробурах, в текстильных машинах и т. д.

Конструктивно ФЭ избирательного переноса при трении может быть получен следующим образом (рис. 47). На верхней подвижной детали в углублении размещен элемент *2* из бронзы БрАЖМц, который при трении по нижней детали создает на ней слой меди *1*. В случае даже небольшого износа этого слоя элемент *2* будет его все время восстанавливать. Смазкой служит спирто-глицериновая смесь. По этой схеме работает чугунное уплотнительное кольцо бронзовой буксы и стальной цилиндр стойки шасси некоторых самолетов. Уплотнительное кольцо во время работы имеет очень малый износ, так как на его рабочей поверхности и поверхности цилиндра образуется тонкий налет меди, выделившийся вследствие избирательного переноса при трении бронзовой буксы о стальную стойку шасси.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [53—55, 158], а о применении эффекта — в работах [53, 55, 72].

Избирательный перенос протекает при комнатной и несколько более высоких температурах (до 308 К).

ИНЕРЦИЯ (ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА)



Рис. 48. Структурная схема ФЭ инерции

Эффект инерции — результат возникновения противодействующей силы при силовом воздействии на физическое тело.

Под инерцией понимают стремление тела сохранить неизменным свое состояние по отношению к инерциальной (в первом приближении неподвижной) системе отсчета. То есть если на тело не действуют никакие внешние силы (приложенные со стороны других тел и вообще окружающей среды), или если эти силы уравновешивают друг друга, тело или, по крайней мере, центр его массы сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения. Если на тело действует неуравновешенная система внешних сил, оно постепенно начинает менять свою скорость.

Силы инерции учитываются при конструировании машин так же, как и реальные силы.

В системе координат, движущейся относительно неподвижной с постоянным по величине и направлению ускорением j, действующая на массу $m_и$ сила инерции

$$F_и = -m_и j.$$

Это при условии, что сила тяготения сообщает любым телам, находящимся в данной точке пространства, одинаковое ускорение.

Необходимым условием проявления эффекта является масса тела. Масса — мера инерции тела. Природа массы пока не выяснена. Условно принято считать, что масса элементарной частицы определяется полями, с ней связанными: электромагнитным, ядерным и другими.

Эффект проявляется на телах любых геометрических форм.

15. Плотность материалов

Материал	ρ, кг/дм³
Вольфрам	18
Свинец	11,3
Тантал	16,6
Алюминий	2,7
Титан	4,5

Пространство приложения воздействия: точки, линии, поверхности.

Сила инерции при прямолинейном движении тела приложена к центру его массы.

Плотности некоторых материалов, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 15.

Инерция — одно из фундаментальных свойств материи. Широко используется в технике: в металлообрабатывающем оборудовании, на транспорте, в энергетике, в гироскопических системах, в космонавтике и т. д.

Использование инерции маховика представлено на примере инерционного аккумулятора (рис. 49).

Маховик *1* установлен на подшипнике на оси, соединенной с корпусом *2*. На маховике закреплена полумуфта *3* муфты сцепления, другая полумуфта *4* закреплена на выходном валу, имеющем уплотнение *5*. На выходном валу установлен стакан *6* с дополнительным контактным уплотнением в виде торцового кольца *7*.

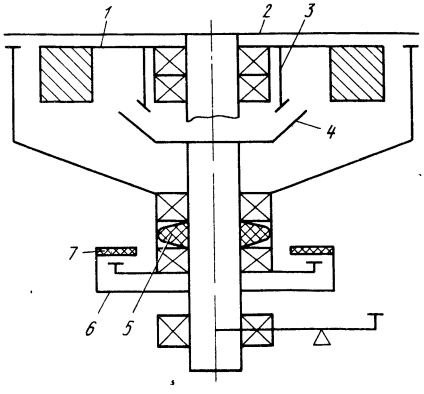


Рис. 49. Инерционный аккумулятор

При раскрутке маховика или отдаче им энергии полумуфты *3* и *4* соединяются друг с другом. Во время выбега маховика вал вместе с полумуфтой перемещается вниз; маховик отсоединяется от вала.

Сведения о физической сущности и применении эффекта приведены в работах [65, 99, 277].

КЛИН

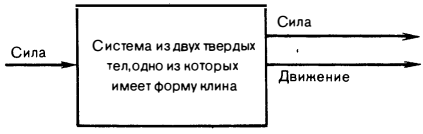


Рис. 50. Структурная схема ФЭ клина

Сущность эффекта клина заключается в преобразовании силы (по величине и направлению) при взаимодействии двух твердых тел путем использования поверхности контакта, наклоненной под острым углом к действующей силе.

Клин имеет форму треугольной призмы (рис. 51, *а*). В поперечном сечении призмы угол α значительно меньше двух остальных углов треугольника KML. Грань KL называется обухом клина, а боковые грани KM и LM называются щеками.

Под действием силы F_1 клин перемещается, углубляясь в другое тело. Это тело оказывает сопротивление движению клина, выражающееся в реакциях N_1 и N_2, направленных перпендикулярно к щекам KM и LM, если не учитывать трения. В случае отсутствия трения силы F_1, N_1 и N_2 взаимно уравновешиваются (рис. 51, *б*) и, если клин равнобочный, т. е. $KM = ML$, то

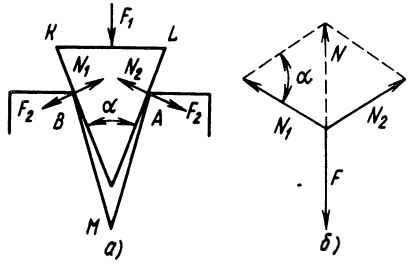


Рис. 51. Схема эффекта клина

16. Характеристики некоторых материалов

Материал	Временное сопротивление разрыву $\sigma_в \cdot 10^{-7}$, Па	Твердость по Бринелю НВ, ГПа	Коэффициент трения пары со смазкой
30Х 45ХН А20	90 105 46	1,87 2,07 1,68	0,05—0,01 (сталь—сталь); 0,05—0,15 (сталь—чугун); 0,07—0,1 (сталь—бронза); 0,03—0,04 (сталь—дерево)
В470-2 В450-7	70 50	2,29—3,00 1,71—2,41	0,07—0,15 (чугун—бронза)
Бр04Ц7С5 Бр08Ц4	18 20	0,60 0,75	0,07—0,1 (бронза—бронза)

$$\frac{N_{1,2}}{F_1} = \frac{KM}{KL},$$

где $N_{1,2} = N_1 = N_2$.

Выигрыш в силе равен отношению длины щеки к длине обуха, т. е. зависит от угла заострения α.

Зависимость результата от воздействия имеет следующий вид:

$$F_2 = F_1 \frac{KM}{KL}.$$

Эффект проявляется при $0 < \alpha < 60°$. С уменьшением угла α эффект, даваемый клином, больше. Влияние силы трения с уменьшением угла заострения возрастает.

Пространство приложения воздействия: сила приложена к обуху клина, а результат воздействия проявляется на щеках клина. В движение приходят как клин, так и соприкасающееся с ним тело.

Характеристики некоторых материалов, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 16.

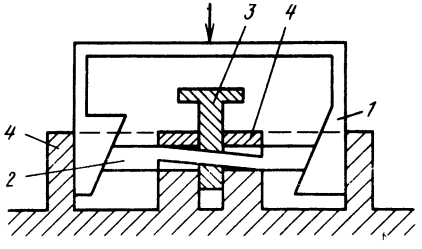


Рис. 52. Пресс

Эффект клина широко используется в машиностроении, автомобилестроении, на транспорте. Клин находит применение в качестве раскалывающего и режущего инструмента, в качестве звеньев механизмов.

В прессе (рис. 52) выходному звену *1* сообщается поступательное движение в направлении стрелки. Клиновыми парами *1* и *2*, *2* и *3* оно преобразуется в поступательное движение звеньев *2* и *3* относительно стойки *4*, причем звено *3* движется навстречу звену *1*. Между звеньями *1* и *3* размещают заготовку.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работе [154], а о применении эффекта — в работе [137].

КОЛЕБАНИЯ ПРИ УДАРЕ

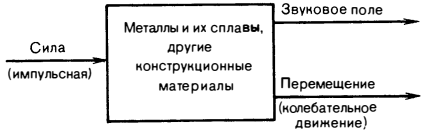


Рис. 53. Структурная схема ФЭ колебаний при ударе

Колебания при ударе — возникновение свободных колебаний системы и (или) различных волновых процессов в системе при кратковременном приложении силы. «Кратковременность» означает, что процесс нагружения заканчивается значительно раньше, чем

выполняется полный цикл свободных колебаний системы основной частоты.

Возможны две трактовки движения в таких системах. В первой считается, что по системе бегут волны, рассеивающиеся на неоднородностях. Таким образом, полное движение представляет собой сумму бегущих в обе стороны волн. Это — трактовка Даламбера, особенно удобная для описания процессов в неограниченных системах, например распространение волны напряжений в протяженной жесткой металлической конструкции (стержни, балки, сваи, элементы арматуры строительных конструкций и т. д.) и в системах, линейные размеры которых значительно больше длины волны. Колебательная трактовка — метод Бернулли — применима лишь для ограниченных систем (колебания камертона, пластины). В ней любое движение рассматривается как сумма собственных колебаний системы.

Зависимость процессов от нескольких переменных — координат и времени t — приводит к уравнению движения в частных производных:

$$\Box q = 2\delta_0 \dot{q} + f,$$

где $\Box = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{V^2} \times \frac{\partial^2}{\partial t^2}$ — оператор Даламбера; V — скорость распространения волны; δ_0 — фактор диссипации; $f = f_0(\vec{r})\,\delta(t - t_0)$ — фактор нагружения; δ — функция Дирака; t_0 — момент удара; $\vec{r}$ — радиус-вектор.

17. Характеристики материалов

	Скорость звука, м/с			Коэффициент поглощения, дБ/км, для частот 2—100 кГц
	в стержне	продольная	поперечная	
Алюминий	5080	6260	3080	6,1
Сталь	5050	6100	—	3,8
Латунь	3490	4430	2123	4,1
Медь	3710	4700	2260	4,5
Кварц	5440	5720	—	12,3
Стекло:				
легкое	5300	5570	3515	48,9
тяжелое	3490	3760	220	32,1
Каучук	—	1479	—	32 000
Пробка	—	500	—	40 000

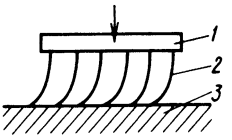


Рис. 54. Вибродвижитель

В приближении без диссипации после удара процессы могут описываться волновым уравнением $\Box q = 0$. Здесь q — обобщенная координата. Это может быть перемещение, напряжение и т. д.

Зависимость результата от воздействия имеет следующий вид:

1) колебательное движение

$$q(\vec{r}, t) = \sum_{s=1}^{\infty} \varphi_s(\vec{r})\,[A_s \cos \omega_s t + B_s \sin \omega_s t] \exp(-k_s t);$$

2) звук (амплитуда, интенсивность) $J = J_0 \exp(-kt)$.

Здесь $\vec{r}$ — радиус-вектор точки тела; t — время; $\varphi_s(\vec{r})$ — функция распределения амплитуды колебаний; A_s и B_s — параметры фазы; ω_s — частота S-й гармоники; k_s — параметр затухания S-й гармоники; k — параметр загухания интенсивности; J и J_0 — текущая и начальная интенсивности звука.

Частота колебаний для струны

$$\omega_s = \frac{S\pi}{l}\sqrt{\frac{\rho}{T}},$$

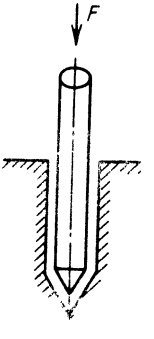


Рис. 55. Схема внедрения свай в грунт и гвоздей в несущую среду

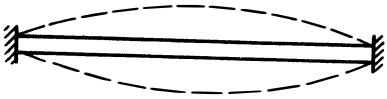


Рис. 56. Струна

где ρ — плотность; T — натяжение; l — длина струны.

ФЭ не проявляется: 1) в вязких средах; 2) в системах со значительной диссипацией (например, колокол в контакте с рукой человека или в очень вязкой жидкости); когда $\omega_0 \leqslant \leqslant \frac{1}{\delta_0}$, где ω_0 — циклическая частота колебаний системы; δ_0 — фактор диссипации; 3) при малом времени действия нагружения (импульс силы таков, что происходит лишь деформация места нагружения).

ФЭ проявляется на телах любой формы. На практике чаще применяются: полусфера, цилиндр, камертон.

Пространство приложения воздействия:

при механическом ударе (сила) — одна или несколько точек; одна или несколько частей поверхности;

при ударе силовым полем — вся поверхность тела.

В колебательное движение приходит все тело или его часть, звуковые сигналы излучаются поверхностью тела. При этом тело должно находиться в жидкой или газообразной среде.

Характеристики некоторых материалов, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 17.

ФЭ применяется в машиностроении, акустике, приборостроении, строительстве и других отраслях.

Основание *1* вибродвижителя (рис. 54) испытывает серию вертикальных ударов. Асимметричная система

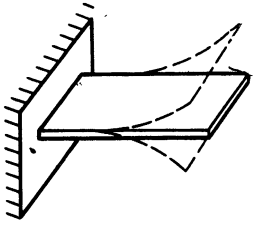


Рис. 57. Пластина

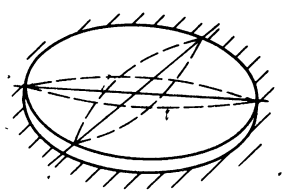


Рис. 58. Мембрана

упругих конструкций *2* закреплена на основании и служит опорой основанию относительно поверхности *3* движения. Движение осуществляется вследствие асимметричности сил трения по отношению к симметричным направлениям движения. Асимметрия сил трения обеспечивается асимметричной системой упругих конструкций в сочетании с ударными волнами, распространяющимися в них.

При забивании свай в грунт (рис. 55) удар по основанию вдоль оси вызывает распространение волны напряжений, амплитуда которых резко возрастает в области острой части. Значительное давление вызывает раздвижение слоев и, следовательно, перемещение сваи в глубь среды.

В этом процессе работа сил трения при равном перемещении зависит от скорости перемещения.

Все источники звука, построенные на основе данного ФЭ, можно условно разделить на несколько групп:

струны — физические системы, состоящие из протяженного (длина намного больше размеров сечения) натянутого упругого тела, закрепленного концами на достаточно жестком основании (рис. 56);

пластины (язычковые камертоны) физические системы, состоящие из протяженного по двум измерениям (длина обычно больше ширины, которая, в свою очередь, намного больше толщины) тела, закрепленного с одной стороны на достаточно жестком основании (рис. 57);

мембраны (барабаны) — плоская упругая пленка, закрепленная с натягом вдоль замкнутой линии (например, окружности) также на жестком основании (рис. 58).

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [27, 141, 184, 214], а о применении эффекта — в работах [127, 146, 261].

КУМУЛЯЦИЯ (ЭФФЕКТ МОНРО)

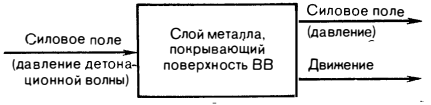


Рис. 59. Структурная схема ФЭ кумуляции

Эффект достигается с помощью зарядов взрывчатых веществ (ВВ) специальной формы (рис. 60—62) с выемкой в противоположной от детонатора части заряда.

Кумуляция — усиленное в определенном направлении действие взрыва. Выемка покрыта металлической оболочкой (облицовкой); в зависимости от диаметра ее толщина варьируется от долей миллиметра до миллиметра.

После взрыва капсюля-детонатора возникает детонационная волна, которая перемещается вдоль оси заряда (рис. 63). Волна разрушает коническую оболочку, начиная от ее вершины, и сообщает материалу оболочки большую скорость. Давление продуктов взрыва, достигающее 10^{10} Па, значительно превосходит предел прочности металла. Поэтому движение металлической оболочки под действием продуктов взрыва подобно течению жидкой пленки. Движущийся металл образует поток, сходящийся под определенным углом к оси конуса, который переходит в тонкую (примерно равную толщине оболочки) металлическую струю, перемещающуюся вдоль оси с очень большой скоростью (10 км/с). Действие этой струи и обусловливает высокую проникающую способность взрыва кумулятивного заряда. Высокоскоростная струя пробивает стальную броню подобно тому, как мощная струя воды проникает в мягкую глину. Глубина проникновения (равная примерно длине струи) пропорциональна образующей конической оболочки. Давление, возникающее при столкновении с броневой плитой, настолько превышает напряжение разрушения, что прочность мишени не играет существенной роли и в расчетах ее можно рассматривать как несжимаемую жидкость.

Расчеты, выполненные на основе гидродинамической теории кумуляции, приводят к следующим формулам. Скорость кумулятивной струи

$$V_к = V_0 \left(\frac{1}{\sin \alpha} + \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \right),$$

где α — угол между образующими конической выемки и ее осью; V_0 — скорость, сообщаемая взрывными газами металлу облицовки выемки; величина V_0 зависит от толщины и плотности материала облицовки, а также от толщины и плотности взрывчатого вещества.

Давление кумулятивной струи на преграду, например при ударе металлической струи с плотностью ρ_0 по преграде из такого же металла,

$$p_к = \frac{1}{4} V_к^2 \rho_0.$$

Толщина пробиваемого слоя

$$B = L \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_п}},$$

где ρ_0 — плотность материала струи; $\rho_п$ — плотность преграды; L — длина кумулятивной струи.

Условием проявления кумулятивного эффекта является наличие кумулятивной выемки в заряде. Эффект зависит от формы выемки (чем острее конус, тем больше скорость кумулятивной струи), от толщины и материала облицовки, от расстояния между зарядом и мишенью.

Пространство приложения воздействия — вершина конической выемки кумулятивного заряда.

Пространство проявления результата воздействия — поверхность пре-

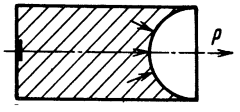


Рис. 60. Заряд с параболической формой выемки

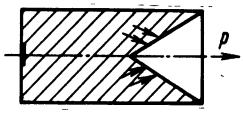


Рис. 61. Заряд с конической формой выемки

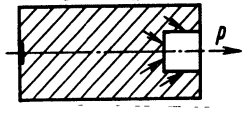


Рис. 62. Заряд с цилиндрической формой выемки

18. Характеристики взрывчатых веществ

Взрывчатое вещество	ρ, кг/дм³	Скорость детонации, м/с
Тетрил	1,71	7850
ТЭН (пентрит)	1,70	8300
Гексоген (циклонит)	1,70	8350
Тринитратолуол	1,56	6900
Состав С-3	1,60	7630

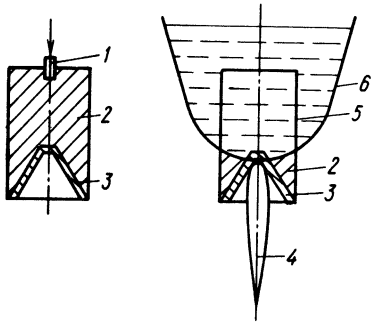


Рис. 63. **Формирование направленной струи при кумулятивном эффекте:**
1 — **детонатор**; *2* — **взрывчатое вещество**; *3* — **металлическая облицовка**; *4* — **кумулятивная струя**; *5* — **продукты взрыва**, *6* — **фронт детонационной волны**

градами, расположенная перпендикулярно к оси выемки кумулятивного заряда. Наибольшей пробивной силы кумулятивная струя достигает на расстоянии от заряда, равном примерно двум диаметрам отверстия выемки.

Характеристики некоторых взрывчатых веществ, применяемых в кумулятивных зарядах, приведены в табл. 18

В качестве облицовки чаще всего используют медь, бериллий, сталь. Их плотности приведены в табл 19

19. Плотность

Материал	ρ, кг/дм³
Медь	7,42
Бериллий	1,84
Сталь	7,5—8,0

Кумулятивный эффект используется в исследовательских целях (получение скорости перемещения вещества — до 90 км/с), в военном деле (бронебойные снаряды), в технике (горное дело, обработка металлов взрывом), строительстве гидротехнических сооружений.

Среди различных способов использования кумулятивного эффекта в технике особое значение имеет сварка металлов и других материалов с помощью кумуляции. Сварка взрывом (ГОСТ 2601—84) основана на движении одной (метаемой) пластины в сторону неподвижной или навстречу движению свариваемых элементов.

При угловой сварке взрывом (рис. 64) лист металла *1*, который нужно приварить к основному листу *2*, помещают под небольшим углом α (2—10°). На всей поверхности привариваемого листа располагают слой взрывчатого вещества *4* (ВВ), инициируемого от детонатора *5*. Лист основания устанавливают на сравнительно жесткую опору *3*. Под воздействием высокого давления, возникающего при детонации ВВ, элементы метаемой пластины последовательно приобретают большую скорость. Пластина соударяется с основным листом. В зоне соударения возникает высокое давление, температура металлов резко возрастает. Они переходят в жидкое состояние. В результате получают полноценное соединение свариваемых пластин.

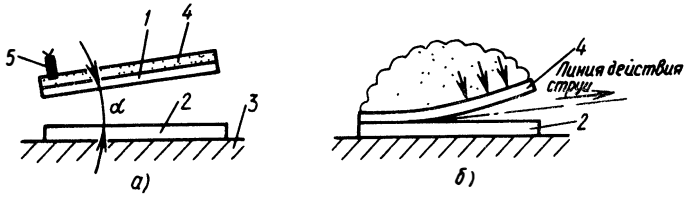


Рис. 64. Схема сварки взрывом:
а — до взрыва; *б* — после взрыва

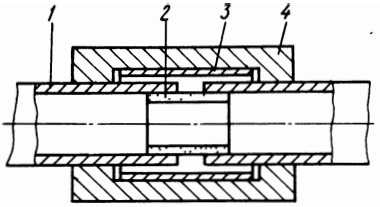


Рис. 65. Схема сварки труб взрывом

При сварке взрывом концы *1* (рис. 65) труб вводят в соединительную муфту *3*. В трубы помещают заряд ВВ *2*. Всю систему устанавливают в разъемную матрицу *4*. После взрыва трубы свариваются с соединительной муфтой.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [181, 210, 219], а о применении эффекта — в работах [140, 197, 210, 251].

ЭФФЕКТ МАГНУСА

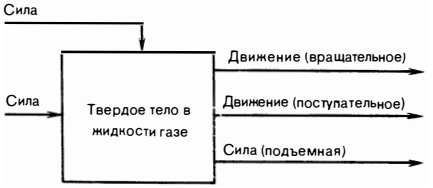


Рис. 66. Структурная схема ФЭ Магнуса

Эффект Магнуса — возникновение подъемной силы, действующей на тело, вращающееся в набегающем на него потоке жидкости (газа).

Вращающийся твердый цилиндр образует в неограниченной массе вязкой жидкости окружное невихревое движение (рис. 67, *а*) с интенсивностью $\Gamma = 2S\omega$, где S и ω — площадь сечения и угловая скорость вращения цилиндра.

Движущийся поступательно (невращающийся) с относительной скоростью V_0 цилиндр обтекается ламинарным потоком, являющимся также невихревым (рис. 67, *б*).

Если цилиндр вращается и одновременно движется поступательно, то два окружающих его невихревых потока наложатся друг на друга и дадут результирующий поток обтекания (рис. 67, *в*).

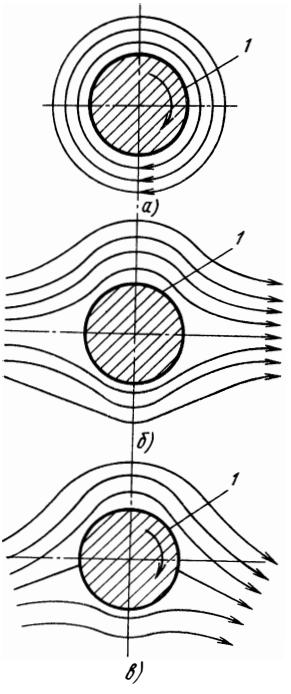


Рис. 67. Схемы эффекта Магнуса (*1* — пограничный слой)

При вращении цилиндра приходит в движение и жидкость. Образуется пограничный слой. Движение в пограничном слое вихревое оно слагается из потенциального движения, на которое накладывается вращение. Сверху цилиндра направление потока совпадает с направлением вращения цилиндра, а снизу — противоположно ему. Частицы в пограничном слое сверху цилиндра ускоряются потоком, что препятствует отрыву пограничного слоя. Снизу поток тормозит движение в пограничном слое, что способствует его отрыву. Отрывающиеся части пограничного слоя уносятся потоком в виде вихрей. Вследствие этого вокруг цилиндра возникает циркуляция скорости в том же направлении, в каком вращается цилиндр. Согласно закону Бернулли давление жидкости на верхнюю часть цилиндра будет меньше, чем на нижнюю. Это приводит к возникновению вертикальной силы, называемой подъемной силой. При изменении направления вращения ци-

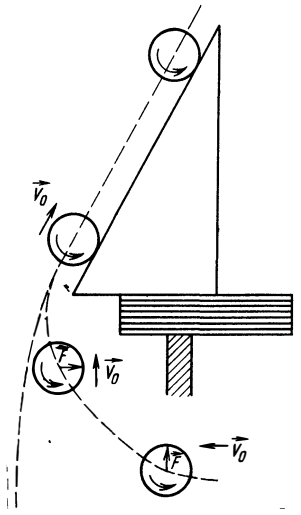


Рис. 68. Схема скатывающегося цилиндра

линдра на противоположное, подъемная сила также меняет направление на противоположное.

В эффекте Магнуса сила $\vec{F}_{под}$ перпендикулярна к скорости потока $\vec{V}_0$. Чтобы найти направление этой силы, нужно вектор относительной скорости $\vec{V}_0$ повернуть на 90° в сторону, противоположную вращению цилиндра.

Эффект Магнуса можно наблюдать на опыте со скатывающимся по наклонной плоскости легким цилиндром (рис. 68). После скатывания по наклонной плоскости центр масс цилиндра движется не по параболе, как двигалась бы материальная точка, а по кривой, уходящей под наклонную плоскость.

Если заменить вращающийся цилиндр вихрем (вращающимся столбом жидкости) с интенсивностью $\Gamma = 2S\omega$, то сила Магнуса будет такой же. Таким образом, на движущийся вихрь со стороны окружающей жидкости действует сила, перпендикулярная к относительной скорости движения V_0 и направленная в сторону, определяемую указанным выше правилом поворота вектора.

В эффекте Магнуса взаимосвязаны: направление и скорость потока, направление и угловая скорость, направление и возникающая сила. Соответственно можно измерять и использовать силу или измерять поток и угловую скорость.

Зависимость результата от воздействия имеет следующий вид (формула Жуковского — Кутта):

$$F_{под} = \Gamma\rho V_0,$$

где Γ — интенсивность движения вокруг цилиндра; ρ — плотность жидкости; V_0 — относительная скорость потока.

Ограничения на проявления ФЭ: обеспечение ламинарного течения жидкости (газа) над объектом при подъемной силе, направленной вверх.

ФЭ проявляется на телах вращения.

Сила, обеспечивающая поступательное движение тела, приложена к его центру масс.

Сила, обеспечивающая вращательное движение тела, приложена симметрично по отношению к центру масс.

Результат воздействия — силовое поле, приложено к поверхности тела, расположенной ниже оси его вращения.

ФЭ применяется в гидроаэромеханике, в технологических процессах разделения веществ на фракции и т. д.

Эффект Магнуса используется для разделения неоднородных жидких сред на легкую и тяжелую фракции. Неоднородную жидкую среду, например дрожжевую суспензию, подвергают воздействию центробежного и гравитационного полей, например, в тарельчатом сепараторе. В процессе этого воздействия поток разделяемой среды пропускают, например под напором насоса, через сепаратор, имеющий распределительную решетку в виде ряда параллельных трущихся слоев с различными последовательно возрастающими при переходе от одного слоя к другому скоростями.

Различие между скоростью движения соседних слоев создает поперечный градиент более 5000 рад/с, который придает вращательное движение относительно своей оси частицам тяжелой фракции. При вращении скорость течения пограничного слоя жидкости, обтекающего ее снизу, замедляется, а сверху ускоряется. Разность скоростей вызывает разность сил давления, т. е. гидродинамическую

подъемную силу, действующую на частицы в поперечном направлении снизу (со стороны приторможенных слоев жидкости) вверх к области повышенных скоростей.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [6, 204, 225, 275], а о применении эффекта — в работе [60].

ОТДАЧА



Рис. 69. Структурная схема ФЭ отдачи

При взаимодействии частей изолированной системы скорости разлета частей обратно пропорциональны их массам. Это следует из закона сохранения количества движения для изолированной от внешних воздействий системы:

$$\sum_i m_i V_i = \text{const},$$

где m_i и V_i — масса и скорость i-й части системы.

Разлет системы на две части может происходить только вдоль общей прямой линии. Увеличение (уменьшение) количества движения одной части равно уменьшению (увеличению) количества движения всех остальных взаимодействующих с ней частей системы. Скорость передачи количества движения от одной взаимодействующей части к другой определяет силу их взаимодействия:

$$\frac{\Delta (m\overline{V})}{\Delta t} = \overline{F}.$$

Сила взаимодействия может возникать также вследствие изменения массы.

Импульсом mV могут обладать все формы материи. Непрерывная отдача массы называется реактивным движением. Например, движение ракеты, падение испаряющейся капли, падение рулона разматывающейся бумаги.

Из закона сохранения импульса вытекает, что центр инерции замкнутой системы тел либо движется прямолинейно и равномерно, либо остается неподвижным:

$$\sum_i m_i \overline{V}_i = \sum_i p_i = p = m\overline{V}_c,$$

где $\sum p_i$ — импульс системы.

Зависимость результата от воздействия имеет следующий вид.

В случае разлета системы на две части

$$\frac{m_1}{m_2} = -\frac{v_2}{v_1},$$

где m_1, m_2, v_1, v_2 — массы и скорости взаимодействующих частей. Знак «—» говорит о взаимопротивоположном направлении скоростей v_1 и v_2.

Эффект отдачи рассматривается только для систем, изолированных от внешних воздействий, или для случая, когда геометрическая сумма действующих на систему внешних сил равна нулю. Части системы могут быть изготовлены из любых материалов и веществ.

ФЭ проявляется при взаимодействии тел любой геометрической формы.

Сила воздействия может быть приложена к части системы по линиям, к поверхностям, к точкам.

При взаимодействии системы из двух и более частей результаты воздействия — вектор силы и вектор движения — приложены к центрам масс частей.

ФЭ применяется в военной технике, на транспорте, в спорте и т. д.

Для уменьшения отдачи, возникающей при выстреле, увеличивают массу орудия. Для системы, делящейся на две части, условие равенства нулю импульса имеет вид:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = 0,$$

где m_1 и m_2 — массы снаряда и орудия. Скорости снаряда и орудия должны быть обратно пропорциональны их массам.

Рассмотрим движение ракеты в пространстве, свободном от гравитации, без учета сопротивления воздуха: m — масса ракеты в данный момент времени; dm — масса отбрасываемых продуктов; c — скорость отбрасывания; dt — время отбрасывания; dv — приращение скорости ракеты.

Сила, действующая на частицу массой dm,

$$F_1 = c\frac{dm}{dt}$$

Противодействие, сообщаемое частице массой m,

$$F_2 = m\frac{av}{dt}.$$

Эти силы равны по величине и противоположны по направлению:

$$F_1 + F_2 = 0, \text{ т. е. } m = \frac{dv}{dt} = -c\frac{am}{dt}.$$

После преобразования и интегрирования получим (для $t = 0$, $V = V_0$, $m = M$) $V = c \ln \frac{M}{m} + V_0$, где M — начальная масса ракеты, V_0 — начальная скорость ракеты.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работе [39], а о применении эффекта — в работе [265].

ЭФФЕКТ ПАСКАЛЯ



Рис. 70. Структурная схема ФЭ Паскаля

Эффект Паскаля состоит в том, что давление, создаваемое поверхностными силами во всех точках внутри жидкости, одинаково. Внутри жидкости, находящейся под действием силы P в емкости (рис. 71), выделен объем цилиндрической формы с осью ab. Выделенный объем составляет часть покоящейся жидкости. Для его равновесия необходимо, чтобы сумма проекций всех сил на любое направление равнялась нулю. Силы, действующие на боковую поверхность цилиндра, перпендикулярны к оси ab; следовательно, их проекция на ось равна нулю. Силы, действующие на основание цилиндра $p_a S_a$ и $p_b S_b$, где p_a и p_b — давление в точках a и b. Так как эти силы перпендикулярны к основаниям, то они направлены вдоль ab, притом в противоположные стороны, а раз цилиндр находится в равновесии, то эти силы уравновешивают друг друга, т. е $p_a S_a = p_b S_b$, т. е. давления в точках a и b равны между собой ($p_a = p_b$). Это рассуждение верно для любых двух точек внутри

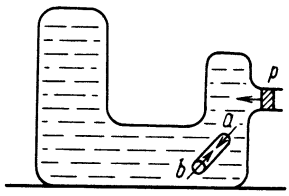


Рис. 71. Емкость с жидкостью

жидкости. Из основного уравнения равновесия жидкости в поле тяжести следует:

$$p = p_0 + \rho g (Z_0 - Z),$$

где ρg — вес жидкости, отнесенный к единице объема; Z и Z_0 — точки в координатной плоскости (YOX).

В случае изменения внешнего давления p_0 на $p' = p_0 + \Delta p_0$, давление во всех точках данной жидкости, находящейся в равновесии, изменится на то же значение Δp_0.

ФЭ проявляется на жидкостях, имеющих любую геометрическую форму.

ФЭ применяется в машиностроении, металлообработке, при производстве пластмассовых изделий и др

На принципе эффекта Паскаля устроен гидравлический пресс (рис. 72) Усилие возникает на поршне рабоче

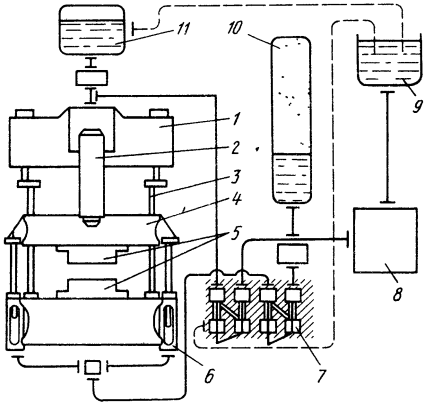


Рис. 72. Принципиальная схема гидравлического пресса:

1 — **рабочий цилиндр;** *2* — **плунжер (поршень);** *3* — **станина,** *4* — **подвижная поперечина;** *5* — **инструмент (штамп);** *6* — **цилиндр обратного хода;** *7* — **клапаны управления;** *8* — **насос;** *9* — **сливной бак;** *10* — **воздухо-гидравлический аккумулятор;** *11* — **наполнительный бак**

цилиндра, в который под высоким давлением поступает жидкость (вода или масло). Поршень связан с рабочим инструментом. Гидравлический пресс может иметь привод от насоса, насосно-аккумуляторной станции, парового, воздушного, гидравлического или электромеханического мультипликатора. Рабочие цилиндры расположены горизонтально или вертикально.

Давление рабочей жидкости для большинства гидравлических прессов составляет 20—32 МПа, достигая в отдельных случаях (для синтеза алмазов) 450 МПа. Стоимость обработки металла на гидравлических прессах ниже, чем при обработке на молотах, а КПД выше.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работе [117], а о применении эффекта — в работе [57].

ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

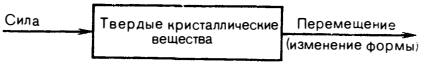


Рис. 73. Структурная схема ФЭ пластической деформации

Пластическая деформация — необратимое изменение формы тела без нарушения его сплошности. Она является следствием принудительного необратимого перемещения групп атомов в отдельных плоскостях тела и представляет собой сложный процесс.

Основной механизм пластической деформации — скольжение одного набора атомных плоскостей относительно другого. Сдвиг одной плоскости скольжения относительно другой происходит не одновременно по всей атомной плоскости, а зарождается где-либо в одном месте и затем распространяется на всю плоскость скольжения.

Распространение локально возникшего сдвига на все сечения кристалла связано с движением дислокаций. Дислокация — нарушение закономерности расположения атомов в кристаллической решетке. Как физический объект она представляет собой край лишней атомной полуплоскости, вдвинутой между основными плоскостями. Такую дислокацию называют краевой. Если на боковой поверхности кристалла появилась ступенька со сдвигом на один вектор трансляции b и сдвиг не прошел сквозь весь кристалл, в нем возникает одна дислокация Если одна часть кристалла сместилась относительно другой на два вектора трансляции и при этом сдвиг локализовался внутри кристалла, то в плоскости скольжения окажутся две дислокации и т д. Ряд дислокаций, расположенных в общей плоскости скольжения, образует линию скольжения в месте выхода дислокации на поверхность Для того чтобы сдвиг распространился сквозь все сечения кристалла, зародившиеся в ограниченной области дислокации должны пройти через всю плоскость скольжения При перемещении в плоскости скольжения краевой дислокации (рис 74) смещение дислокации осуществляется в результате последовательного перемещения связей между атомами.

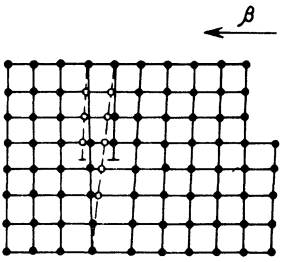


Рис. 74. Перемещение в плоскости скольжения краевой дислокации (β — направление перемещения дислокации)

Сила, заставляющая дислокацию совершать скольжение, определяется работой, которую необходимо затратить для перемещения единицы длины дислокации на единицу расстояния Пусть скалывающее напряжение τ, действующее вдоль направления скольжения, заставляет дислокацию единичной длины пройти площадь $1 \cdot dx$. При этом сила τdx сместит верхнюю часть кристалла относительно нижней на расстояние b и совершит работу $dA = \tau b dx$

Эта работа равна изменению энергии dE кристалла, а поскольку действующая на дислокацию сила $F = -dE/dx$, то из сопоставления предыдущих формул следует, что

$$F = \tau b.$$

Скорость движения дислокаций V растет с увеличением приложенного напряжения.

$$F = \tau b = V\eta,$$

где η — динамическая вязкость.

В процессе деформации дислокации движутся и в конце концов могут совсем выйти из кристалла. В действительности при деформации кристаллы, как правило, не освобождаются от дислокаций, а, наоборот, приобретают их все больше, так как движущиеся дислокации производят новые дислокации.

Пластическая деформация существенно отличается от упругой. При упругом искривлении межатомные расстояния изменяются, в результате чего возникают упругие деформации и повороты решетки. Во втором случае атомы перемещаются в новые положения равновесия, ибо межатомные расстояния сохраняются. Благодаря трансляционному характеру смещений повороты решетки при пластическом искривлении отсутствуют и наблюдаются лишь изменения внешней формы тела.

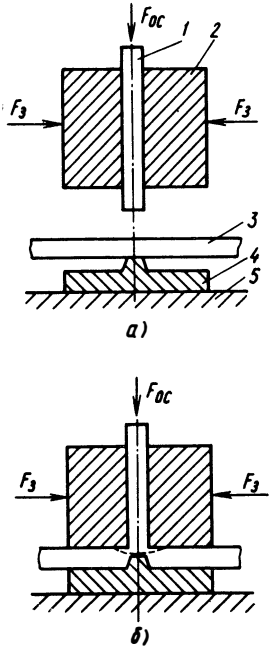


Рис. 75. Схема получения неразъемного соединения прутка и пластины:
а — **начальное положение;** *б* — **конечное положение**

Пластическая деформация начинается после того, как напряжение от приложенной силы достигнет предела текучести. Она возможна в интервале температур от 0 до $T_{пл}$. Пластическая деформация незначительна в области низких температур (зона хладноломкости) и в области температур, близких к температуре плавления $T_{пл}$ (зона разрушения кристаллической структуры).

Повышение скорости деформирования приводит к понижению пластичности. При повышении температуры пластические свойства возрастают.

ФЭ проявляется на телах разнообразной геометрической формы.

Результатом воздействия является перемещение групп атомов в кристаллах в направлении действия внешней нагрузки. Проявляется в виде изменения формы тела.

Эффект пластической деформации широко применяется в металлургии для формообразования, механического упрочнения, отделочной обработки материалов, а также для получения неразъемных соединений металлов.

Получение неразъемного соединения прутка и пластины основано на двустороннем деформировании пластины (рис. 75). С одной стороны пластину *3* (рис. 75, *а*) деформирует присоединяемый пруток *1*, а с другой — рабочий выступ пуансона *4*, расположенный на плите *5*. Перед деформированием пруток и пластину зачищают. Пруток зажимается с силой $F_з$ зажимными губками *2*, а пластина устанавливается на рабочем выступе пуансона. Под действием усилия F_{oc} происходит пластическая деформация обеих деталей — осадка свободного конца прутка с последующим вдавливанием осажденной части в пластину и вдавливание пуансона в пластину. Движение зажимных губок прекращается в момент соприкосновения торцов губок с поверхностью пластины. В конце процесса пластина прижимается к опорной поверхности пуансона.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [31, 236, 243], а о применении — в работах [42, 94, 142, 247].

РЕАКТИВНАЯ СИЛА ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ГАЗА ИЛИ ЖИДКОСТИ

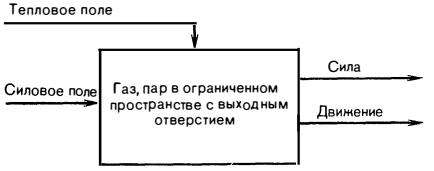


Рис. 76. Структурная схема ФЭ реактивной силы

Реактивная сила возникает при истечении газа или другого рабочего тела из некоторого замкнутого объема в окружающее пространство. Отверстие, через которое истекает рабочее тело, конструктивно выполняют в виде сопла (рис. 77).

Если под влиянием разности давлений внутри и вне камеры рабочее тело (газ или жидкость) через сопло начнет свободно истекать в окружающее пространство, то равновесие внутренних сил, приложенных к стенкам камеры, нарушится. Давление газа на боковые стенки камеры и сопла будет одинаковым, но на торцовую стенку давление окажется больше, чем на противоположную стенку, в которой расположено сопло, и появится реактивная сила тяги R, величина которой определяется количеством m и скоростью истекающего газа V_1. Последняя, в свою очередь, зависит от давления и температуры газа (для газообразного рабочего тела). Если в камере будет иметь место газообразование, компенсирующее расход газа через сопло, то реактивная сила не будет ослабевать по мере истечения газа и заставит камеру перемещаться с большей скоростью V_2.

Тяга в пустоте

$$R_{\text{п}} = mV_{\text{эп}},$$

где $V_{\text{эп}}$ — эффективная скорость истечения газа в пустоте; m — масса топлива или продуктов реакции.

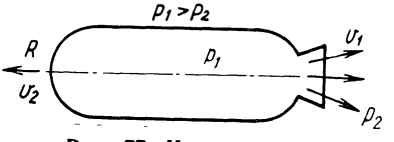


Рис. 77. Цилиндр с соплом

20. Тяга для аргона и гелия в зависимости от давления и скорости истечения газа

Параметр	Аргон			Гелий
Давление в камере, кПа	137,3	274,6	549,2	549,2
Тяга, Н	1,76	2,36	8,9	7,4
Скорость истечения, м/с	580	470	1450	4500

Тяга на произвольной высоте

$$R_h = R_{\text{п}} - p_h S_{\text{а}},$$

где p_h — давление окружающей среды; $S_{\text{а}}$ — площадь выходного сечения камеры.

Условием проявления эффекта является наличие избыточного давления рабочего тела в камере по отношению к окружающей среде. Силовое поле проявляется в виде давления рабочего тела на стенки камеры изнутри. Реактивная сила приложена к стенке камеры, противоположной стенке с соплом.

В табл. 20 приведена тяга для аргона и гелия в зависимости от давления в камере и скорости истечения газа.

В табл. 21 приведены характеристики некоторых топлив при давлении в камере 15 МПа и коэффициенте избытка окислителя $\alpha_{\text{ок}} = 1$.

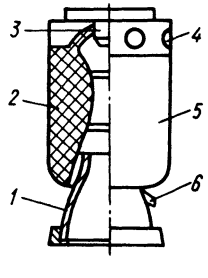


Рис. 78. Схема реактивного двигателя твердого топлива:

***1* — сопло с разворачивающимся тонкостенным насадком; *2* — заряд твердого топлива; *3* — воспламенительное устройство; *4* — сопло отсечки тяги; *5* — корпус; *6* — патрубок впрыска жидкости или вдува газа**

21. Характеристики топлив

Компоненты топлива	Стехиометрическое соотношение компонентов топлива K_{m_0}	Плотность топлива $\rho_т$, кг/м³, при K_{m_0}	Температура продуктов сгорания T, К	Молекулярная масса продуктов сгорания	Удельный импульс тяги $J_у$, м/с	
					$\varepsilon = 300$	$\varepsilon = 3000$
$F_2 + H_2$	18,85	745,1	5106	17,47	4591	4880
$F_2 + N_2H_4$	2,374	1312	4893	19,72	4143	4374
$O_2 + H_2$	7,937	423,7	3704	16,25	4235	4601
O_2 + керосин	3,408	1051	3802	26.07	3428	3774
$O_2 + (CH_3)_2 N_2H_2$	2.137	996.7	3730	23,54	3552	3884

Примечание. ε – степень расширения продуктов сгорания в сопле.

ФЭ используется в современных реактивных двигателях, применяемых в самолето- и ракетостроении, судостроении, в горном деле и т. д.

Ракетный двигатель на твердом топливе (рис. 78) содержит корпус, сопло, запас твердого топлива. Корпус двигателя выполняет несколько функций: является несущим элементом конструкции, камерой сгорания, емкостью для размещения топлива, передает силу тяги двигателя полезной нагрузке.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [50, 59], а о применении эффекта — в работах [40, 131].

РЫЧАГ

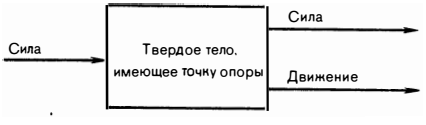


Рис. 79. Структурная схема ФЭ рычага

Сущность эффекта рычага заключается в изменении действующей силы по величине и направлению путем передачи через твердое тело места ее приложения.

Рычаг представляет собой твердое тело с точкой опоры, находящейся под действием сил, расположенных в плоскости, проходящей через эту точку.

Различают рычаг первого рода — двуплечий рычаг (рис. 80, *а*) и рычаг второго рода — одноплечий рычаг (рис. 80, *б*).

Соотношение сил F_1 и F_2 определяется из условия равновесия рычага: а) без учета трения $F_1 l_1 = F_2 l_2$; б) с учетом трения $F_1 l_1 = F_2 l_2 + T_t$ при направлении вращения рычага, показанном стрелкой ω на рис. 80, *а*. Здесь T_t — момент трения, пропорциональный реакции F_r; $F_r = F_1 + F_2$ (для рис. 80, *а*) и $F_r = F_1 - F_2$ (для рис. 80, *б*). При изменении направления вращения рычага и наличия трения соотношение F_1 и F_2 меняется.

Необходимые условия проявления эффекта: а) наличие точки опоры; б) направление действия силы не должно проходить через точку опоры.

ФЭ проявляется на телах различной геометрической формы.

Пространство приложения воздействия: точки, линии, поверхности.

Пространство проявления результата воздействия: точки, линии, поверхности.

Рычаги могут изготовляться из любых материалов, обладающих упругой деформацией.

ФЭ применяется во многих машинах и механизмах, где требуется увеличить (уменьшить) силу и (или) изменить ее направление.

В устройстве (рис. 81) автоматического регулирования выпуска воды из резервуара в зависимости от ее уровня использован эффект рычага. Выпуск воды из резервуара *2* регулируется задвижкой *8*. Положение задвижки при определенном уровне задают вручную маховичком *6* через винтовую пару *7*, рычаг *4*, тягу *5* и рычаг *9*. При изменении уровня воды

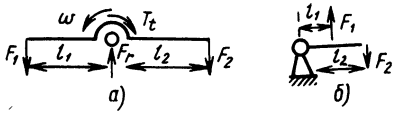


Рис. 80 Виды рычагов:
а — двуплечий; б — одноплечий

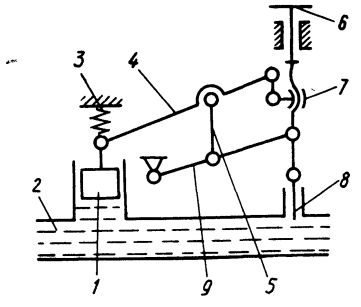


Рис. 81 Регулятор стока воды

меняется давление на поршень *1*, поджатый пружиной *3*. Перемещение поршня через рычаг *4*, тягу *5* и рычаг *9* передается задвижке *8*. Поршень *1* и маховичок *6* соединены через дифференциальный рычаг *4* с задвижкой *8*, что делает возможным ручное и автоматическое регулирование.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [137, 154, 241], а о применении эффекта — в работах [137, 154, 198].

СВЕРХПЛАСТИЧНОСТЬ



Рис. 82. Структурная схема ФЭ сверхпластичности

Сверхпластичность — состояние тела, при котором возможность его деформирования без разрушения резко возрастает.

Состояние сверхпластичности характеризуется:

1) повышенной чувствительностью напряжения течения сверхпластичных материалов к изменению скорости деформации;

2) большим ресурсом деформационной способности δ;

3) напряжением течения материала в состоянии сверхпластичности, значительно меньшим предела текучести, характеризующего тот же материал в пластическом состоянии.

Признаки состояния сверхпластичности проявляются в определенных условиях; из них принципиальное значение имеют структурное состояние деформируемого материала, температурные условия и скорость деформации.

По структурному признаку различают: а) сверхпластичность, обусловленную чрезвычайно мелкозернистой структурой (структурная пластичность); б) сверхпластичность, связанную с фазовыми превращениями (пластичность при превращении).

Механизм деформации в состоянии сверхпластичности представляет собой результат сложного взаимодействия различных процессов движения точечных, линейных и объемных дефектов кристаллической решетки и границ зерен.

На первых стадиях деформация осуществляется в основном в результате межзеренного скольжения, далее увеличивается влияние внутризеренной деформации, которая становится основным механизмом деформации при повышенных и высоких скоростях деформации. Межзеренное скольжение осуществляется при движении зернограничных дислокаций, внутризеренная — при движении дислокаций решетки.

Сплошность деформируемого материала в условиях межзеренного скольжения, сопровождающегося большими относительными перемещениями и вращением зерен, сохраняется за счет процессов аккомодации, имеющих, по-видимому, диффузионную природу Аккомодационными процессами могут быть: процессы диффузионной ползучести, обусловленные объемной и граничной диффузией атомов и вакансий, инициируемой полем внутренних напряжений, которое создается смещающимися относительно друг друга зернами, процессы дислокационной ползучести, происходящие при переползании дислокаций в объеме зерен, в ре-

22. Параметры пластичности материалов

Основа сплава	Содержание легирующих элементов	Марка материала	$\sigma_{m\max}$, МПа	$\dot{\varepsilon}_{m\max}$, $с^{-1}$	T, К	$m_{\max}$	$\delta_{\max}$, %	Размер зерна d, мкм
Al	6,5% Mg, 0,6% Mn	АМг6	22	$1{,}5\cdot10^{-3}$	673	0,38	250	5—20
	6% Zn, 3% Mg	ВА708	50	$5\cdot10^{-3}$	633	0,35	400	5
Be	—	—	16	$9{,}6\cdot10^{-5}$	923	0,5	220	5—10
Co	10% Al (эвтектика)	—	7	$3{,}3\cdot10^{-5}$	1473	0,47	850	0,4
Cu	9,5% Al, 4% Fe	CDA619	3	$5\cdot10^{-2}$	1073	0,64	770	12
	40% Zn	—	6	$3\cdot10^{-3}$	873	0,75	500	3
Fe	16% C, 0,73% Mn	—	40	$1{,}2\cdot10^{-4}$	923	0,55	760	1
	18% Cr, 10% Ni, 0,7% Ti	12Х18Н10Т	80	$4\cdot10^{-3}$	1053	0,50	280	2
Mg	33% Al (эвтектика)	—	14	$3{,}3\cdot10^{-2}$	673	0,88	2100	2,2
Ni	Технически чистый	НП-2	85	$5\cdot10^{-3}$	1073	0,38	180	4
Ti	Технически чистый	ВТ1-0	9 *1	$1{,}8\cdot10^{-3}$ *1	1153 *1	0,47 *1	96 *1	5—10
	5% Al, 2,5% Sn	—	4,5	$6\cdot10^{-5}$	1373	0,72	450	2—3

*1 При испытаниях на осадку; все остальные значения — при испытаниях на растяжение.

зультате ступенчатого перемещения зернограничных дислокаций.

Вязкое поведение металлов в состоянии сверхпластичности связано так или иначе с диффузией, участвующей в процессах аккомодации и в процессах межзеренного и внутризеренного скольжения в качестве звена, контролирующего скорость деформации.

Для описания структурной сверхпластичности чаще всего используют эмпирическое уравнение

$$\sigma = k\dot{\varepsilon}^m,$$

где σ — сопротивление деформации; $\dot{\varepsilon}$ — истинная скорость деформации; m — коэффициент чувствительности напряжения к скорости деформации; k — коэффициент пропорциональности.

Для сверхпластичных материалов m зависит от скорости деформации и в интервале скоростей деформации 10^{-4}—10^{-2} $с^{-1}$ имеет максимальное значение 0,4—0,5. Для развития сверхпластичности необходимо обеспечить такие условия деформации, чтобы m превышало 0,3—0,35. При достаточно большой скорости деформации m ста-

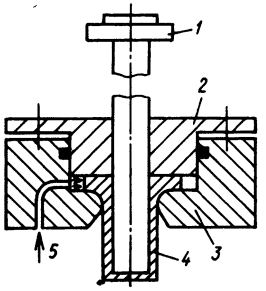


Рис. 83. Схема глубокой вытяжки стакана:

1 — пуансон; *2* — прижим; *3* — матрица; *4* — заготовка; *5* — гидростатическое давление

новится меньше 0,3 и сверхпластичность исчезает.

Условиями проявления ФЭ являются: мелкозернистая структура материала, оптимальная скорость и температура деформации. Температурный интервал существования структурной сверхпластичности находится в пределах от 0,4 $T_{пл}$ до температур, близких к температуре плавления. Наиболее ярко сверхпластичность выражена в сплавах, структура которых представлена двумя фазами в примерно равных объемах.

ФЭ внешне проявляется в изменении формы тела и его геометрических размеров.

Основные параметры, характеризующие состояние сверхпластичности некоторых металлов и сплавов, приведены в табл. 22.

Эффект сверхпластичности используется при формовке деталей сложной конфигурации с большой точностью из труднодеформируемых металлов и сплавов на основе никеля, магния, алюминия, железа.

Может быть использован также для соединения металлических материалов в твердом состоянии.

Штамп обеспечивает изготовление стаканов из материала, находящегося в сверхпластичном состоянии и позволяющего создать гидростатический подпор (рис. 83). Из заготовки в форме диска диаметром 57 мм и толщиной 10 мм можно вытянуть стакан длиной 180 мм с внутренним диаметром 25 мм.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [106, 230, 248], а о применении эффекта — в работах [186, 222, 230].

СЖИМАЕМОСТЬ



Рис. 84. Структурная схема ФЭ сжимаемости

Сжимаемость (объемная упругость) — обратимое изменение объема вещества под действием гидростатического (всестороннего) давления.

Сжимаемостью обладают все вещества. Если вещество в процессе сжатия не испытывает химических, структурных и др. изменений, то при возвращении внешнего давления к исходному значению начальный объем восстанавливается. У твердых тел, имеющих поры, трещины и другие неоднородности структуры, практически обратимая сжимаемость может наблюдаться при достаточно высоком давлении [например, у горных пород при давлении, большем 2—5 кбар (1 кбар = 10^8 Па)]. Величину сжимаемости характеризует коэффициент сжимаемости β, который выражает уменьшение единичного объема тела при увеличении давления p на одну единицу:

$$\beta = -\frac{1}{V}(\Delta V/\Delta p) = \frac{1}{\rho}(\Delta\rho/\Delta p),$$

где ΔV, $\Delta\rho$ — изменение объема V и плотности ρ при изменении p на величину Δp.

Величину $K = 1/\beta$ называют модулем объемной упругости (модулем объемного сжатия, объемным модулем), для твердых тел

$$K = \frac{EG}{3(3G - E)},$$

где E — модуль нормальной упругости (модуль Юнга); G — модуль сдвига.

Для идеальных газов $K = p$ при любой температуре T. В общем случае сжимаемость вещества, а следовательно, K и β зависят от p и T. Как правило, β убывает при увеличении p и растет при повышении T.

Сжатие может происходить как при постоянной температуре (изотермически), так и с одновременным разогревом сжимаемого тела (например, в адиабатном процессе). В последнем

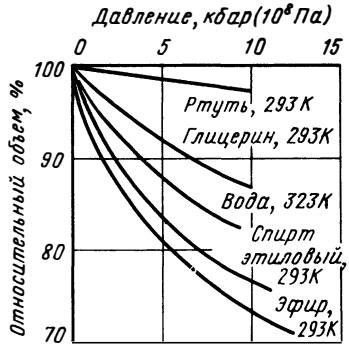


Рис. 85. Зависимость относительного объема жидкости от давления

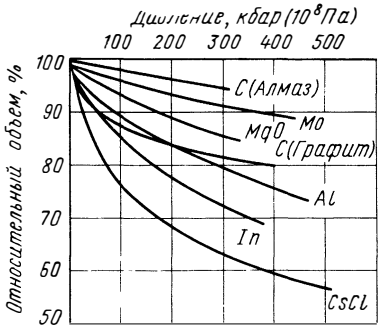


Рис. 86. Зависимость относительного объема твердых тел от давления

случае значения K будут бо́льшими, чем при изотермическом сжатии (для большинства твердых тел при обычной температуре — на несколько процентов).

Для оценки сжимаемости веществ в широком диапазоне давлений используют уравнения, выражающие связь между p, V и T. Определяют сжимаемость непосредственно по изменению объема тел под давлением, при акустических измерениях скорости распространения упругих волн в веществе, при экспериментах по ударному сжатию, дающих зависимость между ρ и p при максимальных полученных в эксперименте давлениях. Сжимаемость можно определить с помощью измерения линейной деформации твердого тела под гидростатическим давлением. Для изотропного тела коэффициент линейной сжимаемости

$$\frac{1}{L}(\Delta L/\Delta p) \approx \frac{1}{3}\beta,$$

где L — линейный размер тела.

Сжимаемость газов, будучи очень большой при давлении до 10^2 МПа, по мере приближения их плотности к плотности жидкостей, становится близкой к сжимаемости жидкостей. Последняя с ростом p уменьшается сначала резко, а затем меняется весьма мало [в интервале (6—13) 10^2 МПа β уменьшается примерно так же, как в интервале от 10^2 кПа до 10^2 МПа (примерно в 2 раза), и при 10—12$\times$ $\times 10^2$ МПа составляет 5—10% от начального значения]. При 30—50$\times$ $\times 10^2$ МПа модули K жидкостей по порядку величины близки к K твердых тел. Для твердых тел при 10 ГПа $\Delta\rho/\rho_0 \approx 15 \div 25\%$. Для отдельных веществ, например, щелочных металлов, $\Delta\rho/\rho \approx 40\%$; для большинства других металлов $\sim$ 6—15%.

Сжимаемость — важнейшая характеристика вещества, которая позволяет судить о зависимости физических свойств от межатомных (межмолекулярных) расстояний.

Ограничения на проявления ФЭ: отсутствие химических структурных и других изменений при сжатии.

Сжимаемости могут подвергаться тела любых геометрических форм.

Эффект проявляется в виде изменения объемов и размеров тел.

Зависимости сжимаемости некоторых материалов от давления приведены на рис. 85 (для жидкостей) и рис. 86 (для твердых тел).

ФЭ применяется в следующих областях: в холодильной технике, тепловых машинах, химико-технологических процессах; проявляется при движении тел с большими скоростями и в других случаях.

Компрессор — устройство для сжатия и подачи воздуха или другого газа под давлением.

Ротационный пластинчатый компрессор (рис. 87) содержит ротор *2* с пазами, в которые свободно входят пластины *3*. Ротор расположен в цилиндре корпуса *4* эксцентрично. При его вращении по часовой стрелке пространства, ограниченные пластинами, а также поверхностями ротора и цилиндра корпуса, в левой части компрессора будут возрастать, что обес-

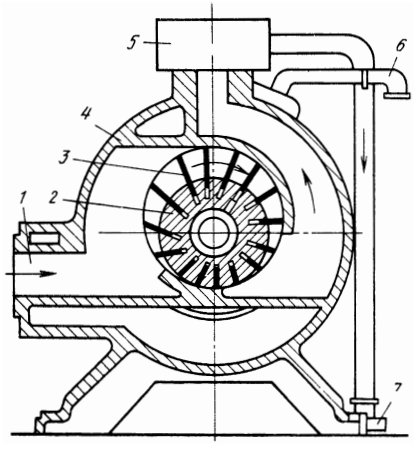


Рис. 87. Ротационный пластинчатый компрессор

печит всасывание газа через отверстие *1*. В правой части компрессора объемы этих пространств уменьшаются, находящийся в них газ сжимается и затем подается из компрессора в холодильник *5* или непосредственно в нагнетательный трубопровод. Корпус ротационного конденсатора охлаждается водой, для подвода и отвода которой предусмотрены трубы *6* и *7*. В ротационном компрессоре всасывание и нагнетание осуществляются одновременно, но в различных местах, разделенных пластинами ротора.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работе [150], а о применении эффекта — в работе [113].

СИЛОВОЕ ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ (ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА)



Рис. 88. Структурная схема ФЭ силового противодействия

Третий закон Ньютона — возникновение противодействия при наличии некоторого действия силы.

Во всех случаях, когда во взаимодействии участвуют только два тела A и B, и тело A сообщает ускорение телу B, обнаруживается, что и тело B сообщает ускорение телу A. В связи с этим Ньютон постулировал следующее общее свойство всех сил взаимодействия: силы, с которыми две материальные точки действуют друг на друга, всегда равны по модулю и направлены в противоположные стороны вдоль прямой, соединяющей эти точки.

Зависимость результата воздействия от воздействия имеет следующий вид:

$$F_{12} = -F_{21},$$

где *1* и *2* — индексы взаимодействующих тел.

Существует конечная максимальная скорость распространения взаимодействия, которая равна скорости света в вакууме. Поэтому третий закон Ньютона имеет определенные пределы применимости. Однако при скоростях тел, значительно меньших скорости света, с которыми имеет дело ньютоновская механика, закон выполняется с большой точностью.

ФЭ проявляется на телах различной геометрической формы.

Взаимодействие тел может происходить либо при их непосредственном соприкосновении, либо на расстоянии. В первом случае взаимодействующие тела тянут или толкают друг друга. Пространство приложения воздействий: точки, линии, поверхности. Во втором случае силы, действующие на тела, существуют даже тогда, когда взаимодействующие тела разделены «пустым» пространством. К силам такого рода относятся, например, гравитационные силы, а также силы взаимодействия наэлектризованных и намагниченных тел. В данном случае

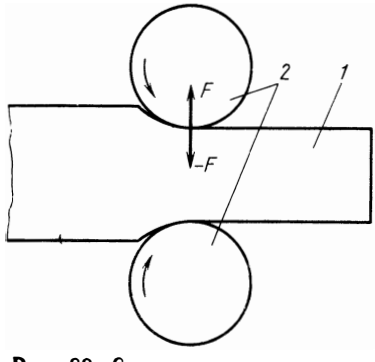


Рис. 89. Схема прокатного стана

воздействие приложено к центру масс

Пространство проявления результата воздействия аналогично пространству приложения воздействия.

Одним из примеров такого взаимодействия тел является прокатный стан — агрегат для обработки давлением металлов между вращающимися валиками. На рис. 89 показана схема прокатки, где *1* — прокатываемый металл, а *2* — валки.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [101, 198, 206, 225], а о применении эффекта — в работах [101, 198, 231].

СИЛЫ КОРИОЛИСА

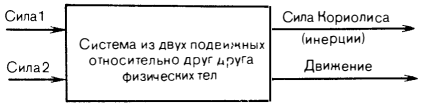


Рис. 90. Структурная схема ФЭ сил Кориолиса

При движении тела относительно вращающейся системы отсчета появляется сила инерции, называемая силой Кориолиса, или Кориолисовой силой инерции. Проявление силы Кориолиса можно рассмотреть на вращающемся вокруг вертикальной оси диске (рис. 91). На нем нанесена радиальная прямая OA и находится движущийся со скоростью $\vec{V}'$ в направлении от O к A шарик. Если диск не вращается, шарик будет катиться вдоль прочерченной прямой. Если же диск привести в равномерное вращение, то шарик будет катиться по кривой OB, причем его скорость $\vec{V}'$ относительно диска будет изменять свое направление. Следовательно, по отношению к вращающейся системе отсчета шарик ведет себя так, как если бы на него (перпендикулярно к его скорости) действовала какая-то сила, которая, однако, не вызвана взаимодействием шарика с каким-либо телом.

Величина Кориолисовой силы пропорциональна массе тела m, относительной скорости движения тела $\vec{V}'$ и угловой скорости вращения системы

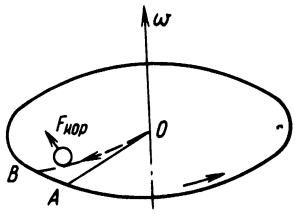


Рис. 91. Схема эффекта Кориолиса

отсчета $\vec{\omega}$, а направление определяется векторным произведением $[\vec{V}', \vec{\omega}]$:

$$\vec{F}_{\text{кор}} = 2m\,[\vec{V}, \vec{\omega}].$$

Сила Кориолиса как сила инерции направлена противоположно кориолисову ускорению $\vec{a}_{\text{кор}}$:

$$\vec{F}_{\text{кор}} = -m\vec{a}_{\text{кор}} = -2m\,[\vec{V}, \vec{\omega}].$$

Сила Кориолиса возникает только тогда, когда система отсчета вращается, а материальная точка движется относительно этой системы. Эта сила всегда перпендикулярна к относительной скорости. Поэтому при относительном движении она не совершает работы. При обращении в нуль относительной скорости тела обращается в нуль и сила Кориолиса.

Эффект может проявляться на телах любой геометрической формы. В объектах техники используются тела следующих геометрических форм: шары, ролики, прямоугольные параллелепипеды.

Пространство приложения воздействия: точки, поверхности тела.

Сила Кориолиса всегда расположена в плоскости, перпендикулярной к оси вращения; приложена к центру масс движущегося тела.

Сила Кориолиса учитывается при проектировании гироскопов, турбин и многих других вращающихся систем. Нашли применение гироскопические измерители угловой скорости и углового ускорения объекта, облегчившие управление его вращательным движением. Влияние Кориолисовой силы положено в основу работы лазерных гироскопов. Во вращающейся системе координат время прохождения электромагнитной волны по замкнутому контуру отличается от времени его

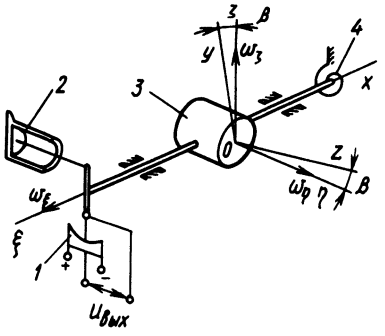


Рис. 92. Датчик угловой скорости:
1 — потенциометрический датчик; *2* — демпфер; *3* — гироскоп; *4* — пружина

прохождения по такому же контуру в покоящейся системе координат.

Датчик угловой скорости (рис. 92) представляет собой гироскоп с двумя степенями свободы, вращение которого вокруг оси рамки (кожуха) ограничено упругой связью с корпусом прибора. На рисунке обозначены: $\xi\eta\zeta$ — система координат, связанная с основным прибором; ω_ξ, ω_η, ω_ζ — проекции угловой скорости вращения основания в этой системе координат; *xyz* — система координат, связанная с рамкой (кожухом). Ось *z* является осью собственного вращения ротора гироскопа, а ось *y* — осью чувствительности прибора.

При вращении основания вокруг оси ζ с угловой скоростью ω_ζ вокруг оси рамки возникает гироскопический момент $M_г$, под действием которого рамка гироскопа поворачивается так, что стремится совместить кратчайшим путем вектор кинетического момента H с вектором угловой скорости ω_ζ. По мере поворота рамки вокруг оси *x* под действием гироскопического момента происходит деформация пружины, в результате чего возникает момент $M_{пр}$, который препятствует отклонению рамки гироскопа. Когда момент пружины уравновесит гироскопический момент, рамка остановится в новом положении равновесия, а угол β ее отклонения будет характеризовать величину измеренной угловой скорости.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [146, 270], а о применении эффекта — в работах [41, 128, 164, 216].

СКАЧКООБРАЗНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ (ЭФФЕКТ ПОРТЕВЕНА—ЛЕ ШАТЕЛЬЕ)

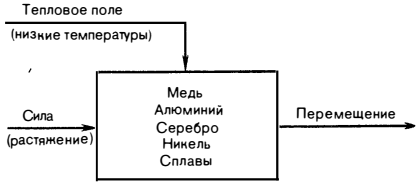


Рис. 93. Структурная схема ФЭ скачкообразной деформации

Скачкообразная деформация — появление у большинства металлов и сплавов нестабильности пластического течения в области температур, близких к абсолютному нулю. Это достаточно общий эффект, наблюдаемый при растяжении твердых тел, имеющих кристаллическую структуру.

Для объяснения физической природы появления скачков было выдвинуто несколько гипотез. К настоящему моменту наименее противоречивой является гипотеза тепловой природы скачков — наличие термической нестабильности процесса деформации приводит к локальному разогреву материала из-за малых значений его теплоемкости и теплопроводности при низких температурах.

Скачкообразность процесса скольжения присуща вообще явлению пластического течения кристаллических тел. Микроскопические скачки деформации при высоких температурах появляются как при ползучести, так и при активном нагружении монокристаллов уже до уровня их пределов текучести. Превращение микроскачков в макроскачки при очень низких температурах обусловлено локальным тепловым размягчением решетки в результате прохождения первичных инициирующих микроскачков. Это приводит к лавинообразному нарастанию деформации и разогреву материала в локальном объеме, а в конечном счете к падению напряжения.

Условием для появления скачков является наличие высоких деформирующих напряжений, при которых создается необходимая степень структурной микронеоднородности решетки,

23. Характеристики материалов

Материал	Модуль сдвига G, ГПа	Предел текучести $\sigma_т$, МПа	Временное сопротивление разрыву $\sigma_в$, МПа, при температуре, К		
			4,2	1,6	300
Алюминий	24,5	56,3—64,4	220	230	30
Никель (99,6%)	77	150	970	990	540
Свинец	5,6	4.9—9,8	72	78	13
Тантал (99,7%)	—	—	1150	1200	620
Медь	41,5	68,5	420	420	230
Титан (99,6%)	—	660	1340	1320	750
Сплав В-95:					
незакаленный	26—27	150	550	610	340
закаленный	26—27	450	830	820	650

связанной с появлением в ней больших амплитуд локальных внутренних напряжений. Однако высокие деформирующие напряжения являются необходимым, но недостаточным условием существования скачков. Во многих случаях при высоком уровне напряжений, приложенных к кристаллу, скачки не возникают, и лишь понижение температуры приводит к их появлению.

Основные закономерности скачкообразной деформации могут быть проиллюстрированы на примере поликристаллического алюминия (рис. 94). Скачки на диаграмме обнаруживаются только после значительной деформации образца, при высоком уровне

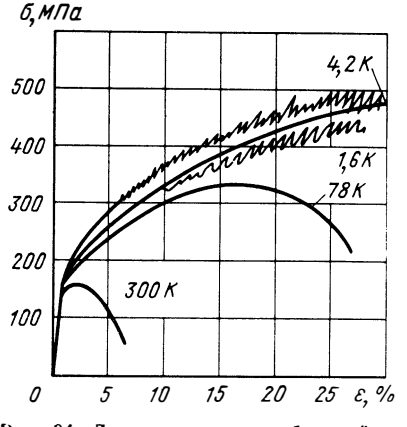


Рис. 94. Диаграмма скачкообразной деформации поликристаллического алюминия

напряжений; они возникают лишь после снижения температуры от 4,2 до 1,6 К. Их амплитуда и число увеличиваются с ростом деформации. Даже снижение температуры от 1,6 до 1,3 К еще продолжает влиять на характер и число скачков.

Скачкообразная деформация начинается при определенной критической температуре и при ее понижении усиливается. У Al, Ti, Ta, Gd скачки возникают при понижении температуры от 4,2 до 1,6 К, у меди и сплавов (α — латунь, сталь Ст2, сплав В-95) — при температуре 4,2 К, у сплава Al—Mg — при температуре 10 К.

Важную роль играет скорость деформации. Ее увеличение приводит к скачкам деформации. При малой скорости деформации скачки отсутствуют. Эффект зависит от размеров образцов; уменьшение их толщины и ширины приводит к снижению числа и даже к исчезновению скачков. Эффект зависит также от микроструктуры вещества, ориентации кристаллов, количества примесей, термической обработки, преддеформаций.

ФЭ проявляется на телах различной геометрической формы.

Пространство проявления результата воздействия — объем кристаллического тела. Внешне проявляется в изменении формы и размеров тела

Характеристики некоторых материалов, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 23.

Эффект скачкообразной деформации может быть использован для исследований прочности и пластичности твер-

дых тел при температурах, близких к абсолютному нулю. Они необходимы для научно обоснованного прогнозирования прочностных характеристик материалов при использовании их в различных областях криогенной и космической техники.

Кроме того, при низкотемпературных исследованиях может быть получена принципиально новая информация о физике пластичности и прочности, процессах упрочнения, динамике дислокаций, значение которой выходит за рамки того интервала температур, в котором проводятся исследования.

Сведения о физической сущности ФЭ приведены в работах [75, 120, 121, 194].

СНИЖЕНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ (ЭФФЕКТ БЛАГА — ЛАНГЕНЕККЕРА)

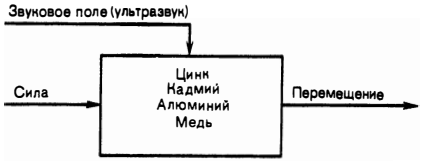


Рис. 95. Структурная схема ФЭ снижения статической нагрузки

Эффект Блага—Лангенеккера заключается в снижении статического напряжения в образце при действии ультразвукового поля.

Пластическая деформация происходит при напряжениях выше пороговых σ и определяется в основном движением дислокаций. По мере увеличения механических напряжений в материале возникают новые дислокации и их плотность в процессе пластической деформации возрастает. В результате взаимодействия дислокаций друг с другом растет их взаимное сопротивление движению, поэтому для дальнейшей деформации необходимы значительно большие напряжения, чем вначале, т. е. материал упрочняется.

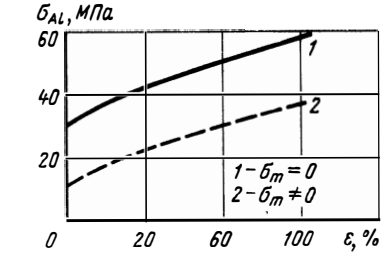


Рис. 96. Влияние ультразвука на деформирующую нагрузку

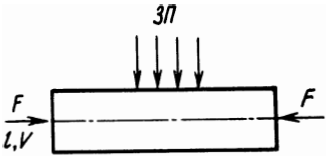


Рис. 97. Стержень

Пластическая деформация характеризуется зависимостью величины деформации ε от приложенного статического напряжения σ. Если на материал, подвергаемый статическому нагружению, воздействовать ультразвуком, создающим переменные напряжения с амплитудой σ_m, характер пластической деформации меняется: уменьшается значение σ, соответствующее данной деформации, снижается предел текучести $\sigma_т$, т. е. материал становится более пластичным. Механизм наблюдаемого явления связан, главным образом, с увеличением подвижности дислокаций под действием ультразвука.

Зависимость статического напряжения от ультразвукового воздействия для Al приведена на рис. 96.

Ограничения на проявление ФЭ: эффект воздействия ультразвука на пластичность материала будет проявляться всякий раз, когда совместное действие напряжений σ и σ_m приводит материал в состояние предельной пластичности. Соотношение величин σ и σ_m может быть различным.

ФЭ проявляется на телах различных геометрических форм (рис. 97, 98).

Ультразвуковое поле прикладывается к торцам тела, к его внутренним

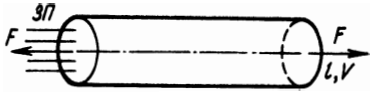


Рис. 98. Цилиндр

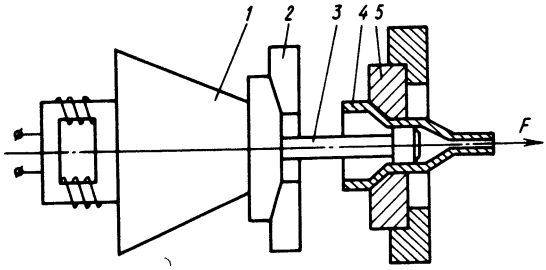


Рис. 99. Установка для волочения труб:
1 — магнитострикционный преобразователь с концентратором; 2 — стойка для упора оправки; 3 — оправка; 4 — труба; 5 — волока

или внешним поверхностям. Оно должно согласовываться по направлению с воздействием силы.

Результат воздействия проявляется в виде деформации тела, т. е. в виде изменения его размеров и (или) формы, которые зависят от вида деформации (растяжение, сжатие, изгиб, кручение, сдвиг) и от схемы нагружения тела.

Данный эффект составляет основу разнообразных технологических процессов обработки металлов. С его помощью выполняются различные виды обработки металлов давлением: волочение труб, прутков, проволоки, прессование, прокатка, выдавливание и т. п. Этот эффект позволяет снизить остаточные напряжения в сварных соединениях.

Эффект используется в установке для волочения труб (рис. 99).

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работе [254], а о применении эффекта — в работе [127].

ТРЕНИЕ КАЧЕНИЯ

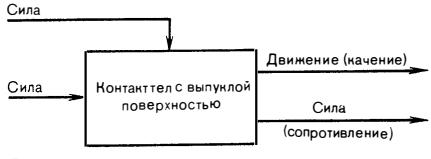


Рис. 100. Структурная схема ФЭ трения качения

Сопротивление качению составляет суть эффекта трения качения. Сопротивление качению возникает в результате деформации контактирующих тел и появления момента силы реакции контакта $M_{тр}$ вследствие смещения ее линии действия относительно линии действия контактной нагрузки N на плечо l (рис. 101).

Момент силы реакции относительно точки O_1 — мгновенного центра вращения — численно равен моменту сопротивления качению

$$M_{тр} = Nl = F_{тр}r,$$

где $F_{тр}$ — сила трения качения; r — радиус колеса.

При расчетах используются коэффициент трения качения (табл. 24)

$$k_{тр} = \frac{M_{тр}}{N}$$

и коэффициент сопротивления качению:

$$f_к = \frac{A_\varphi}{N\,\Delta l},$$

где $A_\varphi = M_{тр}\Delta\varphi$ — работа при повороте на угол $\Delta\varphi$; $\Delta l = r\Delta\varphi$ — путь, пройденный колесом при этом повороте.

Из определения следует

$$f_к = \frac{k_{тр}}{r}.$$

Трение качения обусловлено:

потерями, связанными с несовершенством упругих деформаций в зоне контакта (гистерезисными потерями);

адгезионным (молекулярным) взаимодействием материалов пар трения;

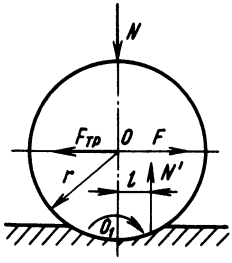


Рис. 101. Схема сил в зоне трения

24. Коэффициент трения качения

Пара трения	Коэффициент трения качения, см
Закаленная сталь—закаленная сталь	0,001—0,002
Мягкая сталь—мягкая сталь	0,005
Чугун—чугун	0,005
Сталь—дерево	0,03—0,04
Дерево—дерево	0,05—0,08

проскальзыванием в зоне контакта в связи с имеющимся различием в кривизне контактирующих поверхностей.

Указанные причины сопротивления качению существенно зависят от свойств материалов пар трения.

Наименьшим сопротивлением качению обладают тела правильной геометрической формы с минимальной шероховатостью поверхности из твердых и жестких материалов.

ФЭ широко используется в машиностроении (подшипники, колеса, зубчатые ременные передачи и т. п.).

Ограничения на проявление ФЭ: переход к скольжению происходит при условии $f_к r > k_{тр}$.

При больших скоростях качения, соизмеримых со скоростью распространения упругой деформации в материале, сопротивление качению резко увеличивается и качение становится менее выгодным, чем скольжение.

ФЭ проявляется на телах различной геометрической формы.

Кривизна поверхностей может быть как положительной (выпуклость), так и отрицательной (вогнутость) при условии, что радиус выпуклого тела в зоне контакта по абсолютному значению меньше радиуса вогнутого тела.

Наиболее часто используются следующие формы пар качения: плоскость — тело вращения; тело вращения — тело вращения, тело эвольвентного профиля — тело эвольвентного профиля.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [135, 249], а о применении в технике — в работах [136, 150].

ТРЕНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ

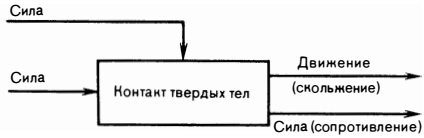


Рис. 102. Структурная схема ФЭ трения скольжения

Эффект трения скольжения заключается в сопротивлении тносительному перемещению контактирующих тел относительно друг друга. Сила сопротивления этому перемещению — сила трения — возникает лишь с началом относительного движения и направлена в сторону, противоположную усилию, вызвавшему перемещение.

Сила трения зависит от силы контакта, определяющей взаимодействи пар трения.

В расчетной практике используется коэффициент трения скольжения

$$f = \frac{F_{тр}}{N},$$

где $F_{тр}$ — сила трения; N — нормальная нагрузка, обеспечивающая контакт тел трения.

Условия взаимодействия тел в зоне контакта при трении зависят от многих факторов и соответственно влияют на значение f.

Трение обусловлено следующими основными видами взаимодействия:

адгезионное (молекулярное), вызванное образованием молекулярной связи материалов поверхностных слоев тел в зоне контакта;

механическое, связанное с деформацией микронеровностей и поверхностного слоя под действием механических напряжений контакта.

Трение объясняется последовательным разрывом фрикционных связей, возникающих в зоне контакта между материалом поверхностных слоев тел.

Эффект зависимости сил трения от скорости проявляется всюду, где есть движение. На диапазон изменения скорости и силы нет ограничений.

На практике скорость изменяется от 0 до 10^2 м/с, сила — до 10^4 Н, КПД — от 0,1 до 0,5.

Наиболее распространенными парами тел, между которыми проявл-

25. Основные виды разрушения фрикционных связей

Вид разрушения	Условия разрушения при трении		Вид разрушения	Условия разрушения при трении
	для черного металла	для цветного металла		
Упругое оттеснение материала	$\frac{h}{R} < 0{,}01$	$h/R < 0.0001$	Микрорезание	$\frac{h}{R} \geqslant \frac{1}{2} \times \times \left(1 - \frac{2\tau_{ср}}{\sigma_т}\right)$
Пластическое оттеснение материала	$\frac{h}{R} > 0{,}01$	$\frac{h}{R} > 0.0001$	Адгезионное нарушение	$\frac{d\tau_{ср}}{dh} > 0$
			Когезионный отрыв	$\frac{d\tau_{ср}}{dh} < 0$

Обозначения: h — глубина внедрения единичной микронеровности; R — радиус единичной микронеровности; $\tau_{ср}$ — тангенциальная прочность молекулярной связи (на срез); $\sigma_т$ — предел текучести материала основы.

26. Классификация материалов по их адгезионной способности

Связь	Пары материалов
Полная	Pb—Cu, Zn—Cu, Zn—Zr, Cd—Cu, Al—Ag, Al—Cu, Cu—Fe, Mg—Cd, Mg—Al, Mg—Cu, Mg—Ti, Cd—Al, Cd—Ti
Частичная	Cu—Ag, Bi—Cu, Zn—Fe, Pb—Ti, Zn—Ti, Zn—Ag, Cd—Fe, Al—Fe, Al—Ti, Ag—Cu, Fe—Ti, Fe—Zr, Bi—Fe, Ag—Ti, Pb—Al, Zn—Al, Mn—Al, Al—Zr, Al—Ni, Bi—Ti
Ограниченная	Ag—Zr, Ag—Fe, Mg—Fe, Cd—Zr, Pb—Fe

27. Коэффициенты трения скольжения

Пара трения	Трение покоя	Трение скольжения		
		сухое	со смазочным материалом	с водяным смазочным материалом
Сталь—сталь	0,15	0,1	0,01	—
Металл—дерево	0,5—0,6	0,4—0,5	0,03—0,08	0,25
Дерево—дерево	0,65	0,3	0,1	0,15
Кожа—серый чугун	0,56	0,28	0,12	0,23
Кожа—дерево	0,47	0,27	—	—
Сталь—лед	—	—	—	0,014

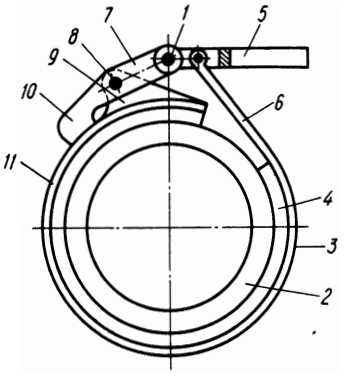


Рис. 103. Ленточный тормоз

ляется эффект трения скольжения, являются: плоскость — плоскость, цилиндр (отверстие) — цилиндр (ось), плоскость — тело вращения.

Сила (основная) приложена по касательной к соприкасающимся поверхностям тел; сила (дополнительная) приложена перпендикулярно к силе основного воздействия.

Сила трения направлена по касательной к поверхности трущегося тела и всегда действует против направления движения. Проявляется в пространстве соприкосновения тел (точки, линии, поверхности).

Характеристики некоторых материалов, которые используются при конструировании трущихся деталей, приведены в табл. 27.

В технике ФЭ проявляется везде, где происходит взаимное перемещение двух тел или более. На использовании этого эффекта основана работа всех механических систем. Эффект трения скольжения является основным в таких устройствах, как муфты сцепления, тормоза, вариаторы, фрикционные передачи, механизмы транспортирования, ременные передачи и т. д.

Ленточный тормоз (рис. 103) основан на использовании эффекта трения скольжения. Он имеет неподвижную опору *1*, тормозной барабан *2*, охватывающую его гибкую ленту *3* с тормозной колодкой *4*, рычаг *5*, связанный со сбегающим концом *6* ленты *3*, стяжки *7*, шарнирно установленные на неподвижной опоре *1* и связанные пальцами *8* с набегающим концом *9* ленты *3*, который выполнен в виде жесткой колодки. Концы *10* стяжек *7* продолжены за пределы колодки *4* и взаимодействуют с наружной поверхностью *11* ленты *3*.

Для включения тормоза вследствие приложения внешнего усилия рычаг *5* перемещают вверх, смещая конец *6* ленты *3*, что устраняет зазор между барабаном *2* и накладкой *4*, и обеспечивает его охват и торможение. Поскольку палец *8* расположен над касательной к средней линии ленты *3*, возникает сила, обеспечивающая прижим колодки *4* к барабану *2* и создающая дополнительный тормозной момент.

Данная сила действует как на колодку *4*, так и через палец *8* на стяжки *7*, в результате чего их концы *10* прижимаются к наружной поверхности *11* ленты *3*. Это увеличивает поверхность приложения силы, прижимающей колодку *4* к барабану *2*, и снижает давление на колодку *4*, уменьшая ее износ.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [133, 146, 228], а о применении эффекта — в работах [112, 133].

УПРУГАЯ ДЕФОРМАЦИЯ. ИЗГИБ

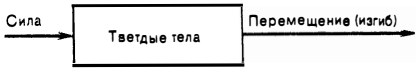


Рис. 104. Структурная схема ФЭ упругой деформации изгибом

Изгибом называется деформация, характеризующаяся искривлением (изменением кривизны) деформируемого объекта.

Схема упругого изгиба однородного бруса под действием изгибающего момента внешних сил (чистый изгиб) показана на рис. 105. Ввиду малости произвольно выделенного элемента бруса (рис. 106) можно считать, что в результате изгиба прямые AA', BB' и все прямые, параллельные им, примут форму дуг окружностей с центрами, лежащими на оси O. Эта ось называется осью изгиба. Наружные волокна, лежащие выше линии NN', при изгибе удлиняются; волокна, лежащие ниже линии NN', укорачиваются. Длина линии NN' (обозначим ее L) остается неизменной. Эта линия называется нейтральной ли-

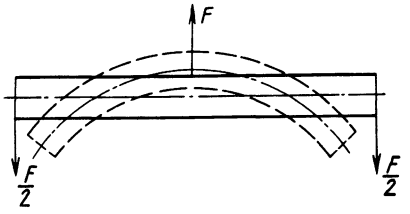


Рис. 105. Упругий изгиб однородного бруса.

нией, а проходящие через нее сечения — нейтральными сечениями. Пусть R — радиус кривизны нейтральной линии NN'. Тогда $L = R\alpha$, где α — центральный угол, опирающийся на дугу NN'. Расстояние ξ от нейтрального сечения положительно, если волокна находятся выше нейтрального сечения, и отрицательно, если они находятся ниже. Если брус слишком толст, то длина рассматриваемого волокна $L' = (R + \xi)\alpha$, а удлинение $\Delta L = L' - L = \xi\alpha$. Следовательно, напряжение, действующее в рассматриваемом волокне,

$$\sigma = E\frac{\Delta L}{L} = E\frac{\xi}{R}.$$

Напряжение, таким образом, меняется линейно с расстоянием ξ. Ниже нейтральной линии оно отрицательно, т. е. является сжатием. Для чистого изгиба, когда отсутствуют дополнительные поперечные силы, сумма всех сил натяжения, действующих в каждом нормальном сечении бруса, равна нулю, т. е. $\int \sigma dS = 0$, где dS — элемент площади рассматриваемого поперечного сечения.

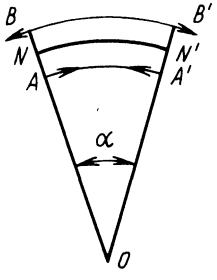


Рис. 106. **Сечение бруса**

28. Допускаемые напряжения при изгибе для некоторых материалов

Материал	$\sigma_{из}$, ГПа
Сталь:	
20Х	0,13—0,35
40Х	0,15—0,41
40ХЛ	0,10—0,21
30Г	0,12—0,27
Чугун:	
СЧ15	0,05—0,07
СЧ20	0,060—0,088
СЧ40	0,09—0,13
КЧ30-6	0,080—0,105
КЧ37-12	0,095—0,125

Момент сил M, действующих на это сечение,

$$M = \int \xi\sigma\, dS = \frac{E}{R}\int \xi^2\, dS$$

или

$$M = \frac{E}{R}J,$$

где $J = \int \xi^2 dS$ — момент инерции поперечного сечения бруса.

Ограничения на проявления ФЭ: упругий изгиб, как и другие виды упругой деформации, возможен при напряжениях, не превышающих определенного предела $[\sigma_{из}]$, который для разных материалов различен (табл. 28).

Геометрические формы элементов, на которых проявляется ФЭ, могут быть различными. Но при этом длина элемента должна, как правило, в несколько раз превышать размер его поперечного сечения.

На эффекте упругого изгиба основано действие элементов, применяемых в машиностроении, приборостроении, судостроении, строительстве и

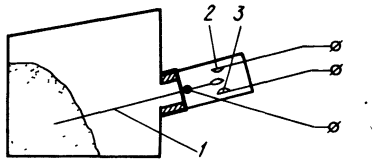


Рис. 107. Принципиальная схема реле уровня сыпучих материалов

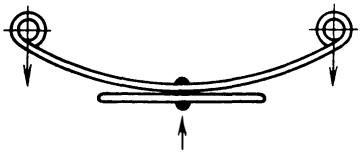


Рис. 108. Однолистовая рессора

т. д. Они обеспечивают своей упругостью необходимое натяжение, аккумулируют энергию или действуют как амортизаторы.

Действие реле уровня сыпучих материалов (рис. 107) основано на измерении давления, оказываемого материалом на гибкий щуп, введенный в емкость и соединенный с контактным устройством. При заполнении емкости гибкий щуп *1*, прогибаясь, замыкает контакты *2* или *3*. Реле предназначено для сигнализации об уровне сыпучих материалов (цемента, песка и щебня).

Рессора с плавно подключающимся подрессорником(рис.108) используется в конструкции легкового автомобиля. Для увеличения жесткости при повышении нагрузки параболическая рессора опирается на лист подрессорника.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [80, 230], а о применении эффекта — в работах [2, 202, 209].

УПРУГАЯ ДЕФОРМАЦИЯ. КРУЧЕНИЕ



Рис. 109. Структурная схема ФЭ упругой деформации кручением

Кручением называется деформация образца с одним закрепленным концом под действием пары сил, плоскость действия которых перпендикулярна к оси образца. Момент M этой пары называется крутящим моментом. Кручение состоит в относительном повороте параллельных друг другу сечений, расположенных перпендикулярно к оси образца. В случае кручения круглого стержня сечения, перпендикулярные к его оси, вращаются вокруг этой оси, сохраняя свою форму и оставаясь параллельными друг другу. Таким образом, деформацию кручения можно рассматривать как неоднородный сдвиг.

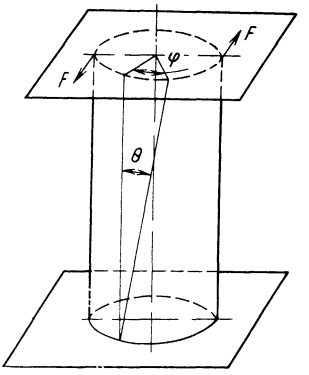


Рис. 110. Закручивание цилиндрического стержня

При закручивании стержня различные его сечения будут поворачиваться на различные углы относительно закрепленного основания. Если верхнее сечение стержня повернулось на угол φ (рис. 110), то каждая из образующих цилиндрической поверхности повернется на угол θ, называемый углом сдвига, или углом кручения. При малых сдвигах относительный сдвиг равен

$$\operatorname{tg}\theta \approx \theta = \frac{R\varphi}{l},$$

где R — радиус стержня; l — его длина.

При кручении элементы стержня испытывают тем бо́льшие сдвиги, чем дальше от оси они находятся.

Закон Гука для деформации кручения записывается в виде

$$M = D\varphi,$$

где $M = FR$ — крутящий момент; D — модуль кручения, или коэффициент жесткости стержня при кручении.

В отличие от всех остальных модулей упругости модуль кручения зависит не только от свойств материала, но и от геометрических размеров стержня. Его можно выразить через модуль сдвига G и абсолютные размеры стержня (R и l):

$$D = \frac{\pi}{2l} GR^4.$$

29. Допускаемые напряжения при кручении $\tau_{кр}$ для некоторых материалов

Материал	$\tau_{кр}$, ГПа
Сталь:	
20Х	0,075—0,22
40Х	0,09—0,33
40ХЛ	0,08—0,125
30Г	0,075—0,17
Чугун:	
СЧ15	0,033—0,053
СЧ20	0,04—0,062
СЧ40	0,063—0,1
КЧ30-6	0,045—0,065
КЧ37-12	0,055—0,08

Модуль кручения зависит от диаметра стержня ($D \approx R^4$).

Эффект возможен при напряжениях, не превышающих предела упругости материала (допускаемое напряжение при кручении $[\tau_{кр}]$; табл. 29).

ФЭ проявляется на телах различной геометрической формы.

Пара противоположно направленных сил действует на образец с одним закрепленным концом. Плоскость пары сил перпендикулярна к оси образца. Перемещение микрочастиц образца происходит в его объеме так, что поперечные сечения его повертываются вокруг оси образца на разные углы, а следовательно, повертываются относительно друг друга при вращении вокруг этой оси. Максимальная деформация проявляется в плоскости, в которой расположена пара сил, приложенных к образцу.

ФЭ применяется в машиностроении, приборостроении (оси, валы, торсионы, пружины винтовые и т. д.).

Фотоэлектрический датчик момента вращения (рис. 111) применяется для восприятия момента вращения. Используется закручивание упругого участка вала. Угол закручивания вала пропорционален моменту его кручения.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [80, 225], а о применении эффекта — в работах [2, 209, 290].

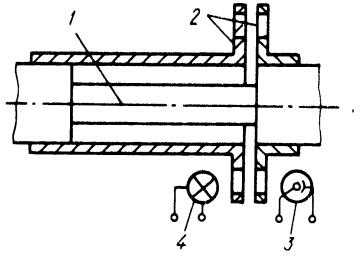


Рис. 111. Фотоэлектрический датчик: *1* **— упругий участок вала;** *2* **— диски;** *3* **— фотоэлемент;** *4* **— источник света**

УПРУГАЯ ДЕФОРМАЦИЯ. РАСТЯЖЕНИЕ. СЖАТИЕ

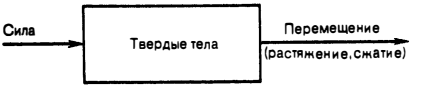


Рис. 112. Структурная схема ФЭ упругой деформации растяжением (сжатием)

Упругая деформация — изменение размеров и (или) конфигурации твердого тела под влиянием приложенных сил, восстанавливающееся после прекращения их действия.

При деформации происходят смещения частиц, находящихся в узлах кристаллической решетки тела, из первоначальных положений разновесия в новые. Этому препятствуют силы взаимодействия между частицами, вследствие чего в деформированном теле возникают внутренние упругие силы, которые уравновешивают внешние силы, приложенные к телу. Если деформация исчезает сразу после прекращения действия вызывающей ее силы, то она называется упругой. Упругие деформации любого вида обычно подчиняются закону Гука, который выражает связь между напряженным состоянием и деформацией упругого тела и имеет вид:

$$\sigma = k\frac{\Delta X}{X},$$

где $\sigma = \frac{F}{S}$ — напряжение, численно равное силе, приходящейся на единицу площади сечения тела; $\frac{\Delta X}{X}$ — относительная деформация, равная отношению абсолютной деформации ΔX к первоначальному значению вели-

чины X, характеризующей размеры и (или) форму тела; k — модуль упругости.

Растяжение (сжатие) является одним из наиболее простых видов упругих деформаций.

Одностороннее растяжение (сжатие) состоит в увеличении (уменьшении) длины тела под действием растягивающих (сжимающих) сил. Если приложить такие силы к концам стержня длиной l, то под действием этих сил его длина получит положительное (при растяжении) либо отрицательное (при сжатии) приращение Δl. Мерой деформации является относительное удлинение (сжатие) $\varepsilon = \Delta l/l$. По закону Гука напряжение $\sigma = F/S$ пропорционально относительному удлинению: $\sigma = E\Delta l/l$. В этом случае $k = E$ является модулем продольной упругости и называется модулем Юнга.

Деформация продольного растяжения сопровождается уменьшением поперечного размера образца, а деформация сжатия — увеличением поперечного размера. Изменение поперечных размеров тела при его растяжении или сжатии характеризуется относительным поперечным сжатием (растяжением) $\Delta d/d$, где d — поперечный размер тела до деформации.

Отношение относительного поперечного сжатия к соответствующему относительному продольному удлинению называется коэффициентом Пуассона или модулем поперечного сжатия:

$$\mu = \Delta d/d : \Delta l/l.$$

Модуль Юнга и коэффициент Пуассона являются механическими характеристиками материала.

Деформация (перемещение) проявляется в том, что все точки нагруженного участка тела перемещаются параллельно друг другу вдоль и поперек оси приложения сил. Поперечные сечения деформируемого участка при перемещении остаются параллельными.

Характеристики некоторых материалов, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 30.

Упругая деформация возможна при напряжениях, не превышающих определенного предела: $0 \leqslant \sigma \leqslant \sigma_{упр}$. Величина $\sigma_{упр}$ называется пределом упругости. Если в процессе нагружения тела уровень нагрузок такой, что $\sigma > \sigma_{упр}$, то деформированное тело после снятия нагрузок уже не полностью восстанавливает свою форму.

30. Модули упругости Юнга и коэффициенты Пуассона для некоторых материалов

Материал	Модуль упругости, E, ГПа	Коэффициент Пуассона μ
Углеродистые стали	200—210	0,24—0,28
Легированные стали	210—220	0,25—0,30
Алюминий (прокат)	69	0,32—0,36
Дюралюминий	71	—
Стекло	56	0,25
Гранит	49	—
Мрамор	56	—
Дерево (сосна, ель):		
вдоль волокон	10—12	—
поперек волокон	0,5—1	—

Тела, на которых проявляется ФЭ, могут иметь различную геометрическую форму.

Деформация растяжения и сжатия проявляется на многих деталях машин и механизмов (тяги, стержни, опоры, оболочки, цепи и т. д.), строительных конструкций (колонны зданий, сооружений, составные части мостовых конструкций, каркасов, канаты и т. д.) и других объектах.

Во многих случаях эффект упругой деформации оказывает «вредное» воздействие на функционирование объекта техники. В этом случае принимаются конструктивные меры для уменьшения его проявления.

Прорезная пружина (рис. 113), относящаяся к классу жестких пружин, из-

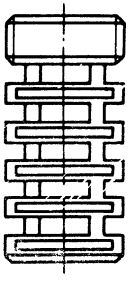


Рис. 113. Прорезная пружина

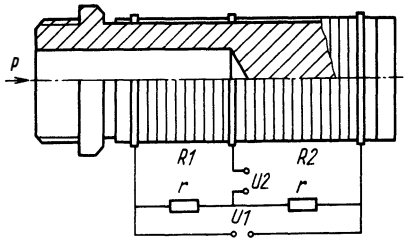


Рис. 114. Проволочный датчик

готовляется из цилиндрической стальной трубы фрезерованием сквозных прорезей. Она как бы состоит из плоских колец, соединенных симметрично смещенными перемычками. На торцах пружина имеет винтовую резьбу, с помощью которой она закрепляется. Такие пружины могут служить как пружинами сжатия, так и пружинами растяжения и находят применение, в частности, в точных приборах различного вида, поскольку при осевом нагружении их торцы в отличие от торцов винтовых пружин растяжения-сжатия перемещаются строго поступательно, что для точных приборов весьма существенно.

Проволочный датчик (рис. 114), воспринимающий незначительные деформации, выполнен в виде стержня из упругого материала, засверленного с торца. Стержень сверху изолирован тонким слоем бумаги или лака и обмотан тензочувствительной проволокой. Обмотка со средней точкой образует плечи мостовой схемы, питаемой напряжением U_1. Под действием давления p стенки трубки и нанесенная на ней часть обмотки R_1 растягиваются. Вторая половина обмотки R_2 служит для температурной компенсации.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [80, 225, 244], а о применении эффекта — в работах [2, 80, 202, 244].

УПРУГАЯ ДЕФОРМАЦИЯ. СДВИГ

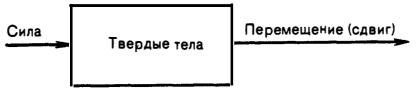


Рис. 115. Структурная схема ФЭ упругой деформации сдвигом

Сдвигом называется деформация, при которой все плоские слои твердого тела, параллельные некоторой плоскости (плоскости сдвига) смещаются параллельно друг другу, не искривляясь и не изменяясь в размерах. Деформацию сдвига можно получить в параллелепипеде, если одну его грань закрепить, а к противоположной приложить силу F, лежащую в плоскости этой грани (рис. 116). Сдвиг пропорционален расстоянию сдвигаемого слоя от основания AD. Мерой деформации $\Delta x/x$ является угол сдвига θ (относительный сдвиг), выраженный в радианах. Для малых деформаций $\theta \approx \operatorname{tg}\theta = \dfrac{\Delta x}{x}$, где $\Delta x = BB'$ — абсолютный сдвиг.

По закону Гука относительный сдвиг пропорционален касательному («скалывающему») напряжению

$$\tau = \frac{F}{S} = G\theta,$$

где G — модуль сдвига.

Он связан с модулем Юнга E и коэффициентом Пуассона μ соотношением:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}.$$

Ограничения на проявления ФЭ: упругий сдвиг, так же как и любой вид упругой деформации, возможен лишь при нагрузках, не превышающих допустимых для данного материала.

ФЭ чаще всего проявляется в элементах конструкций цилиндрической или плоской формы.

Внешняя нагрузка представляет собой пару сил, приложенных в параллельных плоскостях и направленных в противоположные стороны.

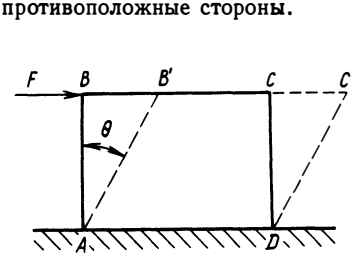


Рис. 116. Деформация сдвига в параллелепипеде

31. Модуль сдвига

Материал	G, ГПа
Углеродистые стали	80—81
Легированные стали	80—81
Алюминий (прокат)	26—27
Дюралюминий	37
Стекло	22
Дерево (сосна, ель) вдоль волокон	5,5

Напряжения сдвига и деформация сдвига проявляются в плоскостях, параллельных направлениям приложения сил.

Значения модуля сдвига для некоторых материалов приведены в табл. 31.

ФЭ проявляется в болтовых, шлицевых, шпоночных, заклепочных, клеевых соединениях деталей машин и механизмов. Используется в технологических процессах при вырубке и штамповке деталей, в конструкциях предохранительных устройств (чеки, штифты, мембраны) и т. п.

Штанга, нагруженная растягивающей силой F (рис. 117) представляет собой стержень с проушиной, закрепленный болтом между двумя накладками. В двух поперечных сечениях болта возникают деформации сдвига.

В клепаной балке (рис. 118) горизонтальные заклепки, соединяющие поясные уголки с вертикальным листом, работают на срез под действием продольной сдвигающей силы, которую они должны передавать от уголков на лист.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [235, 244], а о применении эффекта — в работах [80, 174, 228].

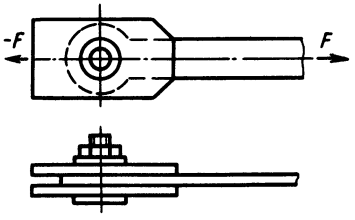


Рис. 117. Штанга

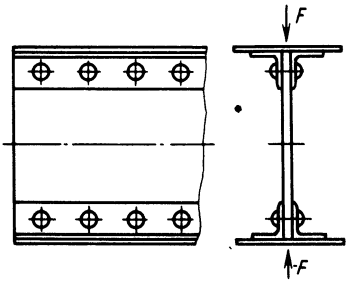


Рис. 118. Клепаная балка

УПРУГОЕ ПОСЛЕДЕЙСТВИЕ

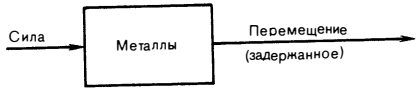


Рис. 119. Структурная схема ФЭ упругого последействия

Эффект упругого последействия заключается в том, что деформация происходит не сразу после приложения силы к образцу, а постепенно, в течение некоторого промежутка времени (задержанная упругая деформация). Деформация отстает от нагрузки так, что при быстром нагружении образец имеет сначала уменьшенную деформацию, а затем уже при постоянной нагрузке деформация постепенно увеличивается. При быстром разгружении (не обязательно до нуля), наоборот, образец сначала не имеет пропорционального уменьшения деформации, а затем уже при отсутствии или уменьшении внешней нагрузки происходит постепенное уменьшение деформации.

Постепенное увеличение деформации после быстрого приложения нагрузки называется прямым упругим последействием, а постепенное уменьшение деформации после быстрого снятия нагрузки — обратным упругим последействием.

Таким образом, состояние материала в этих случаях является промежуточным между чисто упругим и чисто пластическим. С одной стороны, в начальный момент времени деформация имеет характер пластической, так как остается и после быстрого снятия нагрузки; с другой стороны, впоследствии деформация приобретает признаки

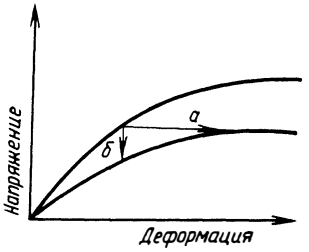


Рис. 120. Схематическое изображение ползучести (*а*) и релаксации (*б*)

упругой, так как она исчезает спустя известное время.

Характер нагружения в значительной мере влияет на последействие, как и на другие процессы, связанные с пластической деформацией.

Чем больше касательные напряжения, тем сильнее последействие. Так, при изгибе последействие значительно меньше, чем при кручении, а при всестороннем сжатии при отсутствии касательных напряжений последействие совсем не наблюдается.

Если пластически деформированный поликристаллический металл, содержащий остаточные напряжения вследствие неоднородности пластической деформации отдельных составляющих или различно ориентированных зерен, нагреть, то изменяются как значения пределов и модулей упругости, так и их соотношения.

Зависимость деформации от напряжения показана на рис. 120. Переход от более крутой кривой течения (большая скорость деформации) к менее крутой (меньшая скорость) может быть осуществлен при постоянном напряжении и при постоянной деформации путем релаксации.

32. Скорость упругого последействия при увеличении температуры на 288 К

Материал	Увеличение скорости, %
Цинк	50
Латунь	2,9
Медь	3,4
Серебро	3,6

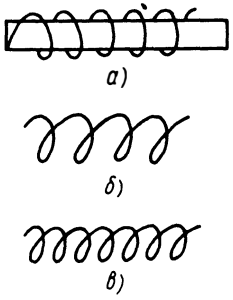


Рис. 121. Схемы термической обработки пружины после навивки:
***а* — навивка, *б* — нагрев; *в* — скручивание**

Упругое последействие возрастает с увеличением пластической деформации и зависит от неоднородности процесса деформации.

Явление релаксации сильнее проявляется при высоких температурах (табл. 32).

Прямое упругое последействие играет важную роль в пружинах, мембранах и других упругих элементах, подвергаемых длительным нагрузкам. Весьма большое практическое значение имеет течение металла при длительной постоянной нагрузке при повышенных температурах.

Эффект используется в процессе изготовления пружин, некоторые операции которого показаны на рис. 121. После навивки при нагреве пружина сначала несколько раскручивается, а затем, при повышении температуры, начинает закручиваться с увеличением числа витков.

Сведения о физической сущности эффекта и его применении приведены в работе [274].

УСКОРЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ (ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА))



Рис. 122. Структурная схема ФЭ ускоренного движения

Второй закон Ньютона устанавливает связь между возникновением ускоренного движения тела и действием

на него силы. Его физический смысл состоит в установлении тождественности «инертной» и «тяготеющей» масс тела.

Введенный Ньютоном статический способ определения массы тела с помощью рычажных весов основан на свойстве тела, связанном с его притяжением к другим телам, в частности, к Земле. Поэтому найденную таким методом массу тела можно назвать «тяготеющей», или «гравитационной».

Чем больше масса тела, тем меньшее ускорение оно приобретает при одной и той же воздействующей силе. От массы тела зависит «неподатливость» его в отношении получения ускорения, т. е. инертность тела. Масса является мерой инерции. Следовательно, массу тела во втором законе Ньютона можно назвать инертной массой.

Математически второй закон Ньютона можно выразить формулой

$$a = k\frac{F}{m}.$$

Коэффициент пропорциональности k зависит только от выбора единиц измерения для a, F и m. Если единицы измерения указать в одной системе, то $k = 1$ и

$$a = \frac{F}{m}.$$

Второй закон Ньютона имеет определенные пределы применимости. Таким пределом является скорость света в вакууме.

ФЭ проявляется на телах любой геометрической формы.

Масса тела связана с количеством вещества, содержащегося в нем. Каждое вещество имеет определенную массу, отнесенную к занимаемому объему, — плотность.

33. Плотность материалов

Материал	ρ, кг/дм³
Вольфрам	18
Свинец	11,3
Тантал	16,6
Алюминий	2,7
Титан	4,5

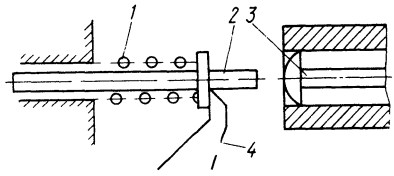


Рис. 123. Замок авиационного оборудования

Плотности некоторых материалов приведены в табл. 33.

Эффект ускоренного движения используется во многих областях техники (в машиностроении, космонавтике, на транспорте, в приборостроении и т. д.).

В конструкции замка (рис. 123) роль источника энергии выполняет сжатая пружина *1*. Потенциальная энергия пружины в результате срабатывания устройства спуска *4* преобразуется в кинетическую энергию штока *2*, действующего на спусковой элемент замка *3*.

Сведения о физической сущности и применении эффекта приведены в работах [32, 85, 101].

ЦЕНТРОБЕЖНАЯ СИЛА

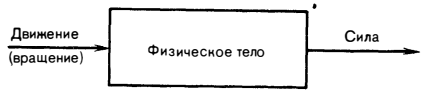


Рис. 124. Структурная схема ФЭ центробежной силы

Центробежная сила — это сила, с которой движущаяся материальная точка действует на тело (связь), стесняющее свободу движения точки и вынуждающее ее двигаться криволинейно.

Диск со спицей (рис. 125) способен вращаться вокруг перпендикулярной к нему вертикальной оси Z'. На спицу насажен шарик, соединенный с центром диска пружиной. Шарик может перемещаться по спице без трения. При неподвижном диске шарик покоится, а пружина находится в нерастянутом состоянии. Если диск приведен в равномерное вращение с угловой скоростью ω, то вместе с ним будет вращаться и шарик, причем пружина растянется, а шарик займет на спице такое положение, при котором сила натяжения пружины $F_{упр}$

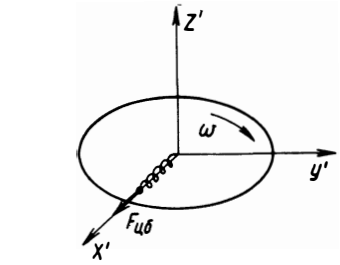


Рис. 125. Иллюстрация к описанию эффекта центробежной силы

будет равна произведению массы шарика m на его ускорение. Относительно системы отсчета, связанной с диском, шарик покоится. Это можно объяснить тем, что кроме $F_{упр}$ на шарик действует сила инерции $\vec{F}_{ин} = -\vec{F}_{упр}$, направленная вдоль радиуса от центра диска. Эта сила обусловлена ускоренным движением самой системы отсчета.

Силу инерции, возникающую во вращающейся системе, приравнивают к центробежной силе. Она пропорциональна массе тела m, квадрату угловой скорости вращения системы отсчета ω и расстоянию тела от оси вращения R:

$$F_{цб} = m\omega^2\vec{R}.$$

Центробежная сила действует на тело во вращающейся системе отсчета, независимо от того, покоится это тело в этой системе или движется относительно нее.

Эффект проявляется на телах любых геометрических форм, вращающихся вокруг оси. При этом сила, действующая на тело, направлена по касательной к траектории его вращения. В результате воздействия возникает центробежная сила, направленная от центра вращения.

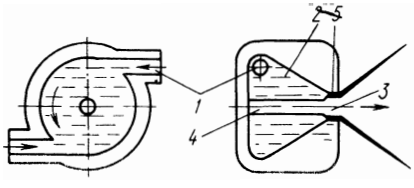


Рис. 126. Центробежная форсунка

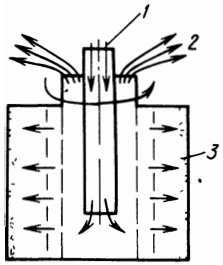


Рис. 127. Центрифуга

Эффект центробежной силы используется в машиностроении, приборостроении, химической, пищевой, микробиологической промышленности и других областях техники.

Центробежная форсунка (рис. 126) состоит из трех основных элементов: входных тангенциальных каналов *1*, камеры закручивания *2* и выходного отверстия *3*, называемого соплом истечения. Принцип действия ее заключается в том, что поток жидкости сначала подвергается закрутке, а затем — сужению. В процессе сужения потока значительно возрастает окружная составляющая скорости, возникают значительные центробежные силы, образующие в выходном отверстии тонкую пленку кольцевого сечения, которая по выходе из форсунки распадается на мельчайшие капли. Вдоль оси форсунки при этом образуется воздушный (газовый) вихрь *4*, аналогичный вихревой воронке, которая образуется при истечении жидкости из сосуда через данное отверстие. Вихревое отверстие, таким образом, заполнено кольцевым потоком *5* или пленкой только по периферии. Центральная часть от выходного отверстия до задней стенки камеры занята воздушным вихрем.

В центральную часть *1* ротора осветляющей центрифуги (рис. 127) во время его вращения подается неоднородная смесь. Твердые частицы *3* смеси оседают на внутренней поверхности ротора, а осветленная жидкость *2* отводится из верхней его части.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работе [66], а о применении эффекта — в работе [14].

ЭФФЕКТ ЭЖЕКЦИИ



Рис. 128. Структурная схема ФЭ эжекции

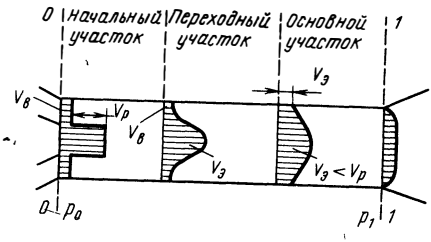


Рис. 129. Смешение потоков в камере эжектора

Эффект эжекции заключается в том, что поток с более высоким давлением, движущийся с большой скоростью, увлекает за собой среду низкого давления. Увлеченный поток называется эжектируемым. В процессе смешения двух сред происходит выравнивание скоростей, сопровождающееся, как правило, повышением давления.

Основная особенность физического процесса заключается в том, что смешение потоков происходит при больших скоростях эжектирующего (активного) потока.

Так как коаксиальные струи распространяются не в атмосфере с постоянным давлением, а ограничены стенками канала или камеры смешения, среднее осевое количество движения, осредненное по массовому расходу, не сохраняется постоянным, и статическое давление может изменяться вдоль оси x. Пока скорость эжектирующего потока больше скорости эжектируемого потока в камере смешения постоянного радиуса, будет иметь место увеличение давления в направлении x, где ядра поглощаются благодаря быстрому смешению сдвиговых слоев (ядро — та часть прямого потока, которая входит в канал).

Процесс смешения потоков в камере эжектора схематически представлен на рис. 129.

В сечении 0—0, совпадающем с началом камеры смешения, средние скорости рабочего (эжектирующего) потока $V_р$ и всасываемого (эжектируемого) потока $V_в$ являются исходными. За этим сечением расположен начальный участок смешения потоков, где по центру сохраняется ядро скорости рабочего потока, не охваченное процессом смешения. В пределах ядра скорости потока постоянны и равны средней скорости истечения из сопла $V_р$.

Аналогичное ядро постоянных скоростей можно наблюдать в пределах кольцевой области, охватываемой всасываемым потоком. Между этими областями постоянных скоростей расположена зона турбулентного обмена, где скорости потоков постоянно меняются от $V_р$ в ядре рабочего потока до $V_в$ в зоне всасываемого потока. Начальный участок заканчивается в створе, где выклинивается ядро рабочего потока.

Когда точки выклинивания ядра скорости рабочего потока и ядра скорости всасываемого потока не совпадают, между начальным и основным участком появляется переходный участок, в пределах которого имеется только одна из зон постоянных скоростей.

Смешение потоков в камере эжектора сопровождается изменениями осредненного давления вдоль проточной части. По мере выравнивания эпюры скоростей потоков и уменьшения от сечения к сечению средней скорости суммарного потока происходит повышение давления.

Повышение давления в зоне смешения канала постоянного радиуса без учета поверхностного трения о стенку может быть определено по формуле Борда—Карно

$$\frac{p_1 - p_0}{\frac{1}{2}\rho V_р^2} = \frac{2}{A_р}\left(1 - \frac{1}{A_р}\right) \times$$

$$\times \left(\frac{V_в}{V_р} - 1\right)^2,$$

где p_0 — давление в сечении 0—0; p_1 — давление в сечении 1—1; ρ —

34. Плотность веществ

Вещество	T, К	ρ, кг/дм³
Воздух	273	$1{,}2928 \cdot 10^{-3}$
Вода	277	1
Морская вода	293	1,01—1,05
Нефть	293	0,81—0,85
Жидкая ртуть	293	13,546

плотность вещества; $V_р$ — скорость рабочего потока; $V_в$ — скорость всасываемого потока; $A_р$ — отношение площадей сопла и камеры (относительное расширение).

Эффект проявляется в цилиндрической трубе при наличии не менее двух струйных течений с различными скоростями.

Рабочее тело принимает форму канала или камеры, в которой происходит смешение потоков.

Силовое поле (давление) приложено к рабочему телу в начале камеры смешения.

Результатом воздействия является повышение давления и уменьшение скорости потока на выходе из камеры смешения.

Плотность некоторых веществ приведена в табл. 34.

Повышение давления эжектируемого потока без непосредственной механической энергии применяется в струйных аппаратах, которые используются в различных отраслях техники: на электростанциях — в устройствах топливосжигания (газовые инжекционные горелки); в системе питания паровых котлов (противокавитационные водоструйные насосы); для повышения давления из отборов турбин (пароструйные компрессоры); для отсоса воздуха из конденсаторов (пароструйные и водоструйные эжекторы), в системах воздушного охлаждения генераторов; в теплофикационных установках; в качестве смесителей на отопительных водах; в промышленной теплотехнике — в системах топливоподачи, горения и воздухоснабжения печей, стендовых установках для испытания двигателей; в вентиляционных установках — для создания непрерывного тока воздуха через каналы и помещения; в водопроводных установках — для подъема воды из глубоких скважин; для транспорта твердых сыпучих материалов и жидкостей.

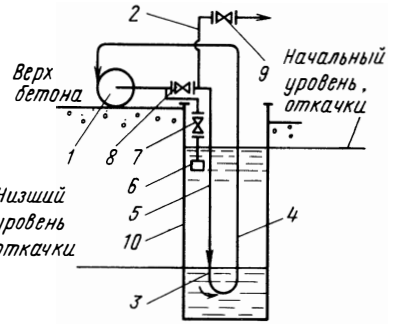


Рис. 130. Схема установки для откачки воды:

1 — центральный насос; *2* — напорный трубопровод; *3* — эжектор; *4* — напорный трубопровод насоса (трубопровод рабочего потока эжектора); *5* — напорный трубопровод эжектора; *6* — всасывающий трубопровод насоса; *7—9* — вентили; *10* — скважина или шахта

Установка для откачки воды межзатворного пространства галерей наполнения Чебоксарского шлюза (рис. 130) работает следующим образом. Открывается вентиль *7*, включается насос *1* и осуществляется зарядка системы. При этом вентили *8* и *9*

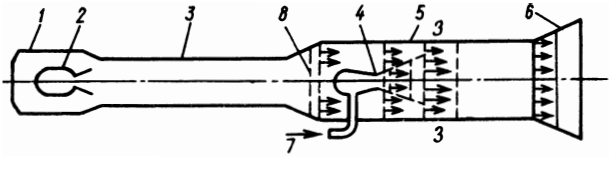


Рис. 131. Схема газового тракта высотного стенда с эжектором:

1 — барокамера; *2* — ракетный двигатель; *3* — диффузор; *4* — сопло эжектора; *5* — камера смешения эжектора; *6* — дозвуковой диффузор; *7* — парогаз; *8* — впрыск воды; *3—3* — сечение запирания

закрыты. После зарядки открывается вентиль *9*. Установка может работать как по разомкнутой схеме, когда вентиль *8* закрыт, а вентили *7* и *9* открыты, так и по кольцевой схеме, когда вентиль *7* закрыт, а вентили *8* и *9* открыты.

Газовый тракт высотного стенда с эжектором (рис. 131) предназначен для высотных испытаний реактивных двигателей. Эжектор служит для дополнительного повышения степени сжатия потока продуктов сгорания, истекающих из ракетного двигателя. На участке между начальным сечением и сечением запирания при работе эжектора на критическом режиме газы движутся без перемешивания. Поток откачиваемых газов ускоряется и приобретает скорость звука в сечении запирания, за которым происходят перемешивание и торможение потоков до дозвуковой скорости.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [73, 237, 250], а о применении эффекта — в работах [180, 258, 289].

ГЛАВА 4

Описания физических эффектов, преобразующих механические воздействия в немеханические результаты воздействий

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ НАГРЕВ

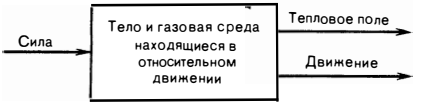


Рис. 1. Структурная схема ФЭ аэродинамического нагрева

Аэродинамический нагрев — результат того, что налетающие на тело молекулы воздуха (газа) тормозятся вблизи тела. Если полет совершается со сверхзвуковой скоростью, торможение происходит прежде всего в ударной волне, возникающей перед телом. При дальнейшем торможении молекул воздуха их энергия хаотического движения возрастает, т. е. температура газа вблизи поверхности движущегося тела повышается, происходит его аэродинамический нагрев. Например, при полете сверхзвукового самолета со скоростью 1 км/с температура торможения составляет около 700 К, а при входе космического аппарата в атмосферу Земли с первой космической скоростью (около 8 км/с) температура торможения достигает 8000 К. Если в первом случае температура обшивки самолета может быть близка к температуре торможения, то во втором случае поверхность космического аппарата неминуемо начнет разрушаться из-за неспособности материалов выдерживать столь высокие температуры.

Максимальная температура, до которой может нагреваться газ в окрестности движущегося тела, близка к так называемой температуре торможения T_0:

$$T_0 = T_н + V^2/(2C_p),$$

где $T_н$ — температура набегающего воздуха; V — скорость полета тела; C_p — удельная теплоемкость газа при постоянном давлении.

С увеличением скорости движения тела температура воздуха за ударной волной и в пограничном слое возрастает.

ФЭ проявляется на телах различной геометрической формы.

Для снижения аэродинамического нагрева используют поверхности некоторых тел вращения (рис. 2).

Аэродинамический нагрев обычно играет роль отрицательного фактора. Для борьбы с аэродинамическим нагревом летательные аппараты оснащают специальными системами теплозащиты. Существуют активные и пассивные методы теплозащиты. При активных методах газообразный или жидкий охладитель подается принудительно к защищаемой поверхности. Газообразный охладитель как бы загораживает поверхность от воздействия высокотемпературной внешней среды, а жидкий охладитель, образующий на поверхности защитную пленку, поглощает подходящую к поверхности теплоту в результате нагрева и испарения пленки, а также последующего нагрева паров. При пассивных методах теплозащиты воздействие теплового потока принимает на себя специальным образом сконструированная внешняя оболочка или специальное покрытие, наносимое на основную конструкцию. Наибольшее распространение получила теплозащита с помощью разрушающихся поверхностей, в которой тепловой поток расходуется на процессы плавления, испарения, сублимации и химических реакций. Материалы таких покрытий — стеклопластики и

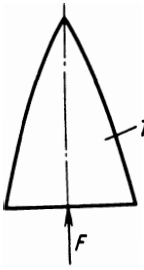


Рис. 2. Носовая часть самолета

другие пластмассы на органических и кремнийорганических связующих. Перспективны также углерод и углеродные композиции.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работе [185], а о применении эффекта — в работе [165].

ЭФФЕКТ БАРНЕТТА



Рис. 3. Структурная схема ФЭ эффекта Барнетта

Эффект Барнетта заключается в намагничивании тел путем их вращения при отсутствии внешнего магнитного поля. Эффект реализуется в ферромагнетиках.

Во вращающемся с постоянной угловой скоростью вокруг неизменной оси z образце (рис. 4) элементарные магнитики его материала представляют собой своеобразные гироскопы, обладающие механическим моментом количества движения и магнитным моментом. Вращение гироскопов с постоянной угловой скоростью Ω_z вокруг неизменной оси z эквивалентно прецессии гироскопов вокруг этой оси под действием некоторой «опрокидывающей» пары сил, стремящейся поставить ось каждого гироскопа параллельно оси z.

Таким образом, вращение образца (совокупности гироскопов) вокруг оси z должно привести к установлению осей гироскопов параллельно этой оси.

В то же время вращение всех гироскопов с постоянной угловой скоростью вокруг неизменной оси z эквивалентно воздействию на эти магнитики поля $H_{эф}$, направленного вдоль оси z, так как подобное поле вызовет, согласно теореме Лармора, прецессию гироскопических магнитиков с угловой скоростью $\Omega_z = \gamma H_{эф}$. Наличие же эффективного поля $H_{эф}$ должно проявиться не только в прецессии магнитиков, но и в возникновении намагниченности образца вдоль оси z.

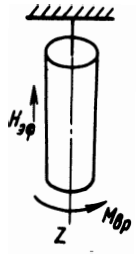


Рис. 4. Цилиндрический стержень

Из опытов по исследованию эффекта определено магнитно-механическое отношение

$$\gamma = M/q = ge/(2mc),$$

где M — магнитный момент частицы вещества; q — момент количества движения частицы; e и m — заряд и масса электрона; c — скорость света; g — магнитно-механический фактор.

Эффект возможен при температуре ниже точки Кюри.

ФЭ проявляется на телах удлиненной геометрической формы.

Результат воздействия проявляется в объеме ферромагнитного тела. Результирующая магнитного поля направлена вдоль оси вращения.

Характеристики некоторых материалов, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 1.

ФЭ применяется для исследования природы и строения ферромагнитных веществ. Он позволил установить, что в некоторых ферромагнитных металлах (Fe, Co, Ni, Cd) элементарными магнитиками являются спиновые магнитные моменты электронов, тогда как в других ферромагнитных телах и парамагнетиках — спиновые и орбитальные магнитные моменты электронов.

1. Марки материалов и их характеристики

Материал	Состав	Начальная магнитная восприимчивость χ_a	Магнитная восприимчивость насыщения χ_{max}	Коэрцитивная сила H_c, А/м	Истинная намагниченность J_s, Тл
Железо (Чиоффи)	Fe	~1100	~22 000	~2	0,170
Никель	Ni	12	80	12	0,051
Кобальт	Co	—	—	39,8	0,143
Пермаллой	78,5% Ni, 21,5% Fe	~800	~8 000	2,4	0,090
Трансформаторная сталь	4% Si, 96% Fe	~40	475	4	0,1 55
Армко-железо	Fe	318	~14 300	2	0,170
Вольфрамовая сталь	<2% W, <1% C	~2—8	~100	6766	0,130—0,1

Для решения вопроса о природе и строении элементарного магнитика необходимо определить связь между магнитным моментом M и моментом количества движения q элементарного магнитика. Это осуществляется с помощью установки, схема которой представлена на рис. 5. Вращающийся цилиндр длиной 30 см, диаметром 2,25—3,34 см расположен перпендикулярно к магнитному меридиану и приводится во вращение вокруг собственной оси. Земное магнитное поле компенсируется особыми катушками.

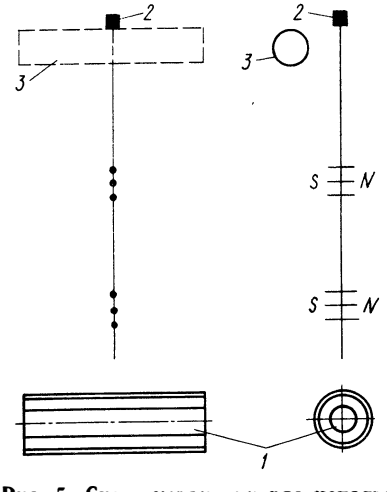


Рис. 5. Схема установки для использования эффекта Барнетта

Для измерения намагниченности ротора (цилиндра) *1* служит статический магнитометр *2*. Параллельно ротору располагается совершенно подобный ему неподвижный стержень *3*, служащий для компенсации флюктуаций земного магнитного поля

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [51, 79], а о применении эффекта — в работе [79].

ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ

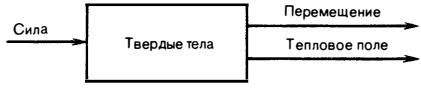


Рис. 6 Структурная схема ФЭ внутреннего трения

Внутреннее трение в твердых телах — свойство твердых тел превращать в теплоту механическую энергию, сообщенную телу в процессе его деформирования, сопровождающегося нарушением в нем термодинамического равновесия. К внутреннему трению относятся две различные группы явлений: 1) неупругость — отклонение от законов теории упругости в отсутствие остаточных деформаций; 2) вязкое сопротивление течению — по аналогии с вязкостью жидкости или пластично-вязкого тела. При деформации с конечной скоростью в теле возникает отклонение от термодинами-

ческого равновесия, вызывающее соответствующий релаксационный процесс (возвращение к равновесному состоянию), сопровождаемый диссипацией (рассеянием) упругой энергии, т. е. необратимым ее переходом в теплоту. Например, при изгибе равномерно нагретой тонкой пластинки, материал которой расширяется при нагреве, растянутые волокна охладятся, сжатые — нагреются, вследствие чего возникнет поперечный градиент температуры, т. е. упругое деформирование вызовет нарушение теплового равновесия. Если силы, действующие на твердое тело, превосходят предел упругости и возникает пластическое течение в результате сдвигов по плоскостям скольжения, то можно говорить о квазивязком сопротивлении течению (по аналогии с вязкой жидкостью). Закономерности внутреннего трения при пластическом течении твердого тела наиболее отчетливо проявляются на металлах и особенно на металлических монокристаллах, являющихся наиболее пластичными телами из всех известных кристаллов.

Внутреннее трение в твердых телах можно характеризовать вязкостью, проявляющейся при свободных упругих колебаниях твердого тела через декремент затухания этих колебаний, и вязкостью, определяемой из опытов на ползучесть твердого тела.

Явление внутреннего трения описывается следующим образом. Между двумя плоскостями (рис. 7) находится жидкость. Верхняя плоскость движется относительно нижней со скоростью V. Слои жидкости, касающиеся твердых тел, прилипают к ним. Промежуточные слои имеют распределение скоростей, которое характеризуется градиентом скорости $\frac{\Delta V}{\Delta n}$, показывающим, как быстро меняется абсолютное значение скорости при перемещении на единицу длины Δn в направлении, перпендикулярном к вектору скорости. Между соприкасающимися слоями жидкости при наличии градиента скорости возникают силы, направленные вдоль плоскости соприкосновения и препятствующие их относительному перемещению, — силы внутреннего трения.

Если в опыте используются собственные затухающие колебания системы, то обычно за меру внутреннего трения принимают логарифмический декремент затухания θ или величину Q^{-1}, которая обратна добротности Q; $Q^{-1} = \theta/\pi$.

Если используются вынужденные колебания, то чаще всего за меру внутреннего трения принимают величину $B = \Delta\omega/\omega_0$, где $\Delta\omega$ — полуширина резонансного пика; ω_0 — резонансная частота.

Иногда за меру внутреннего трения принимается затухание звуковой волны, проходящей через материал:

$$\delta = \alpha\lambda,$$

где α — коэффициент затухания; λ — длина волны.

При прекращении деформирования в твердых телах внутреннее трение Q^{-1} резко падает. Для внутреннего трения характерно отсутствие скачка скорости при переходе от одного тела к другому. В отличие от внешнего трения здесь отсутствует трение покоя.

Внутреннее трение зависит от многих факторов, влияние которых определяется их воздействием на тот или иной механизм рассеяния энергии. Каждый механизм рассеяния при неизменных внешних условиях (температура, давление и др.) проявляется в определенной области частот. Повышение температуры, как правило, монотонно увеличивает фон внутреннего трения. В ряде случаев на внутреннее трение оказывает влияние амплитуда деформации.

Различают три вида внутреннего трения: релаксационное, резонансное и гистерезисное. Для релаксационного

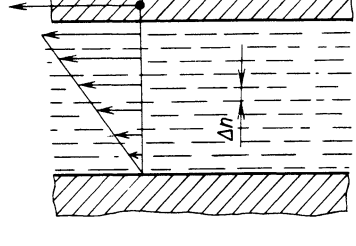


Рис. 7. Иллюстрация к эффекту внутреннего трения

2. Характеристики материалов

Материал	Диаметр, мкм	Q^{-1}
Железный ус	6	$2{,}1\cdot10^{-3}$
	8	$6{,}7\cdot10^{-4}$
	16	$7{,}6\cdot10^{-4}$
	20	$9{,}4\cdot10^{-4}$
	40	$4{,}0\cdot10^{-4}$
Медный ус	30	$1{,}5\cdot10^{-3}$
Вольфрамовая нить	20	$1{,}4\cdot10^{-3}$
Кварцевая нить	10	$1{,}5\cdot10^{-3}$

внутреннего трения характерны зависимость от частоты и температуры и независимость от амплитуды колебаний. Резонансное внутреннее трение зависит от частоты и почти не зависит от амплитуды деформации и температуры опыта. Гистерезисное внутреннее трение обусловлено необратимым изменением состояния образца при циклическом деформировании.

ФЭ проявляется на телах различной геометрической формы, подвергающихся деформации.

Тепловое поле выделяется всем деформируемым объемом твердого тела. Перемещение проявляется на концах образца или в поперечных сечениях в зависимости от вида деформации.

Характеристики некоторых материалов, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 2.

Внутреннее трение имеет большое значение при конструировании машин, в отдельных узлах которых возникают вибрации. Используется в измерительной технике.

Измерение внутреннего трения методом крутильного маятника показано на рис. 8. Прибор имеет обращенный маятник, трубчатую электропечь, терморегулятор, оптическую систему, блок возбуждения вынужденных колебаний образца и определения резонансной частоты. В блок возбуждения вынужденных колебаний и определения резонансной частоты входят звуковой генератор с дополнительным приспособлением *13* для плавного регулирования частоты и микроамперметр переменного тока *14* с высокоомным реостатом *15*. При подаче на рамку *2* гармонического напряжения от звукового генератора *16* в образце возбуждаются вынужденные крутильные колебания, амплитуду которых отсчитывают по шкале *12*.

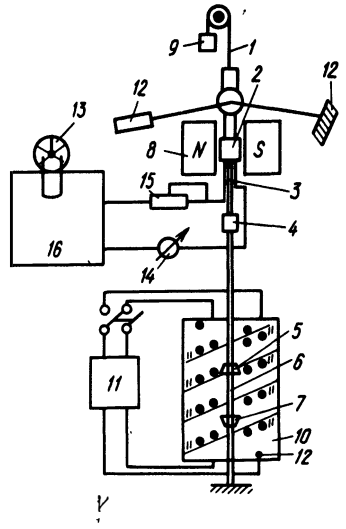


Рис. 8. Схема прибора для измерения внутреннего трения и модуля сдвига при свободных и вынужденных колебаниях:

1 — капроновая нить; *2* — рамка; *3* — стержень; *4* — переходная муфта; *5*, *7* — цанговые зажимы; *6* — образец; *8* — магнит; *9* — груз; *10* — печь; *11* — терморегулятор; *12* — оптическая шкала; *13* — приспособление для плавной регулировки частоты; *14* — микроамперметр; *15* — реостат; *16* — генератор

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [48, 49, 159, 203, 236], а о применении эффекта — в работах [49, 203].

ЭФФЕКТ ДЖОУЛЯ — ТОМСОНА

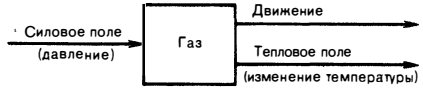


Рис. 9. Структурная схема ФЭ Джоуля—Томсона

Эффект Джоуля—Томсона заключается в изменении температуры газа в результате протекания его под действием постоянного перепада давления сквозь дроссель — местное препятствие потоку газа (капилляр, вентиль

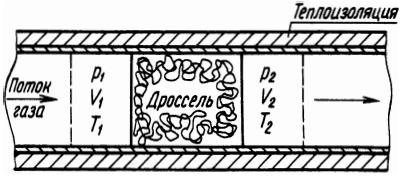


Рис. 10. Схема опыта Джоуля—Томсона

или пористую перегородку, расположенную в трубе на пути потока). Течение газа сквозь дроссель должно происходить без теплообмена с окружающей средой (адиабатически). В теплоизолированной трубке создается стационарный поток газа (рис. 10). Прохождение газа через дроссель (мелкопористая пробка, например, из ваты) делает скорость газового потока малой. Давление газа p, объем V и температура T изменяются.

Эффект Джоуля—Томсона принято называть положительным, если газ в процессе дросселирования охлаждается ($\Delta T < 0$), и отрицательным, если газ нагревается ($\Delta T > 0$). Согласно молекулярно-кинетической теории строения вещества эффект Джоуля—Томсона свидетельствует о наличии в газе сил межмолекулярного взаимодействия. При взаимном притяжении молекул внутренняя энергия U газа включает как кинетическую, так и потенциальную энергию их взаимодействия. Расширение газа в условиях энергетической изоляции не меняет его внутренней энергии, но приводит к росту потенциальной энергии взаимодействия молекул (поскольку расстояния между ними увеличиваются) за счет кинетической. В результате тепловое движение молекул замедляется, температура расширяющегося газа будет понижаться.

В зависимости от условий дросселирования один и тот же газ может

3. Параметры эффекта Джоуля—Томсона

Газ	Перепад давления, МПа	ΔT, К
Воздух	$p = 0{,}01$	$-0{,}25$
CO_2		$-1{,}25$
H_2		$+0{,}02$

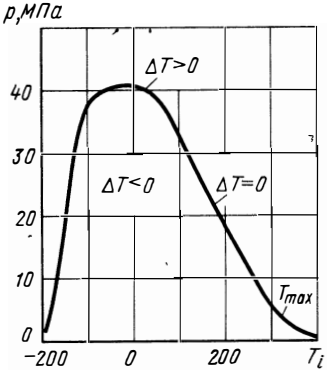


Рис. 11. Зависимость инверсии от давления

как нагреваться, так и охлаждаться. Температуру, при которой разность температур (ΔT), проходя через нулевое значение, меняет свой знак, называют температурой инверсии эффекта Джоуля—Томсона. Кривая инверсии (рис. 11) отделяет совокупность состояний газа, между которыми он охлаждается, от состояний, между которыми он нагревается. Значения верхних температур инверсии ($T_{i\,max}$) для некоторых газов приведены в табл. 4.

Зависимость изменения температуры газа при конечных изменениях давления:

$$T_2 - T_1 = \int_{p_1}^{p_2} \alpha_i \, dp,$$

где величина α_i характеризует скорость изменения температуры газа, которую находят экспериментальным путем.

ФЭ проявляется при прохождении газа без теплоотвода в месте перепада давления. Газ принимает форму занимаемого объема.

4. Максимальная температура инверсии газов

Газ	CO_2	Ar	N_2	H_2	He	Воз
$T_{i\,max}$, К	1900	723	621	202	50	603

5. Коэффициент Джоуля—Томсона

Вещество	T, К	p, МПа	μ, К/МПа
Гелий	83	20	—0,38
	173		—0,58
	273		—0,62
	373		—0,64
Азот	123	2	11,28
		10	0,20
		20	—0,27
	273	2	2,50
		10	1,69
		20	0,87
	423	2	0,79
		10	0,49
		20	0,22
Кислород	123	2	11,28
		10	0,20
		20	—0,03
	273	2	2,5
		10	1,69
		20	0,87
	423	2	0,79
		10	0,49
		20	0,22

Избыток давления газа — перед дросселем; максимальная скорость его движения наблюдается в дросселе, а изменение температуры газа — после дросселя.

Коэффициенты Джоуля—Томсона μ для некоторых материалов приведены в табл. 5.

Эффект Джоуля—Томсона нашел применение в криогенной технике.

При больших перепадах давления на дросселе температура газа может изменяться значительно. Например, при дросселировании от 20 до 0,1 МПа и начальной температуре 290 К воздух охлаждается на 35 К. Этот метод положен в основу большинства технических процессов сжижения газов.

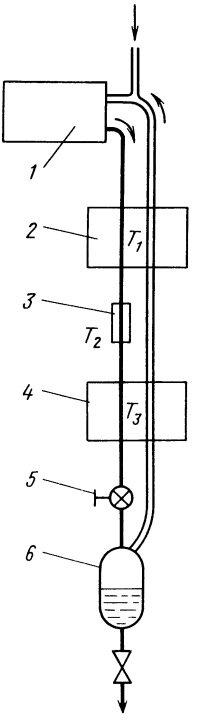


Рис. 12. Дроссельный цикл сжижения газа:

1 — компрессор; *2* — сжатый газ; *3* — расширенный газ; *4* — теплообменник; *5* — вентиль; *6* — сборник

Промышленное сжатие газов с критической температурой выше температуры окружающей среды (например, аммиак, хлор) осуществляется с последующей конденсацией газа в теплообменниках, охлаждаемых водой.

При дроссельном цикле сжижения газа (рис. 12) после сжатия в компрессоре газ последовательно охлаждается в теплообменниках и затем расширяется (дросселируется) в вентиле. При этом часть газа сжижается и скапливается в сборнике, а несжижающийся газ направляется в теплообменники и охлаждает свежие порции сжатого газа.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [176, 300], а о применении эффекта — в работах [43, 269].

ЭФФЕКТ ДОРНА



Рис. 13. Структурная схема ФЭ Дорна

Эффект Дорна — возникновение разности потенциалов между погруженными в жидкость электродами, один из которых помещен у дна сосуда, а другой — в верхней его части. При этом частицы, взвешенные в этой жидкости, перемещаются в одном направлении под действием либо силы тяжести, либо ультразвукового или центробежного поля.

При совпадении направления движения отдельных частиц с направлением их электрических полей возникает макроскопическое электрическое поле E, направление которого параллельно направлению движения частиц. Между двумя электродами, находящимися в жидкости, можно измерить разность потенциалов.

Этот потенциал называют седиментационным потенциалом, или потенциалом оседания. Суммирование электрических полей частиц нетрудно осуществить, если среднее расстояние между ними $l_{ср}$ намного больше размера частицы ($l \gg R$).

Зависимость результата от воздействия имеет следующий вид:

$$E_c = \frac{\varepsilon\zeta R^3}{3\eta k}(Q - Q_0)\,c,$$

где E_c — потенциал седиментации; R — радиус сферических частиц; c — концентрация частиц; Q и Q_0 — плотность дисперсной фазы и среды; η — вязкость среды; k — электропроводность дисперсной фазы; ε — диэлектрическая постоянная; ζ — дзета-потенциал.

6. Характеристики веществ

Вещество	Вязкость при T = 293 К, мПа·с	Плотность кг/дм³
Вода	1,0	1
Глицерин	1450	1,26
Эфир	0,243	0,736

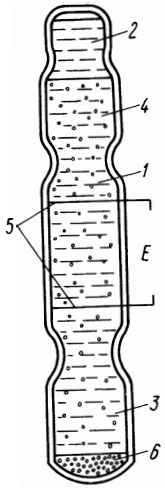


Рис. 14. Электрокинетический седиментационный прибор

Условием возникновения эффекта Дорна является «размыв» двойного электрического слоя, существующего на границе между жидкостью и дисперсной фазой. Заряд осаждающихся частиц зависит от природы жидкой фазы, материала частиц и их скорости оседания.

Силовое поле приложено к центру дисперсных частиц, что создает их движение в жидкости.

Электрическое поле возникает по высоте сосуда и направлено по направлению движения частиц.

Характеристики некоторых веществ, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 6.

ФЭ применяется для измерения и регистрации вибрации и ускорения, главным образом, в летательных аппаратах.

Электрокинетический седиментационный прибор (рис. 14) состоит из измерительного отсека *1* и двух вспомогательных отсеков *2* и *3*, соединенных капиллярами. Отсек *2*, где находится дисперсная фаза *4*, используется для заливки и герметизации прибора. В отсеке *1* имеются два сетчатых электрода *5*, с которых снимается разность потенциалов. На дне отсека *3* скапливается «отработавшая» фаза *6*.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [82, 264], а о применении эффекта — в работе [239].

ИНИЦИИРОВАНИЕ УДАРОМ

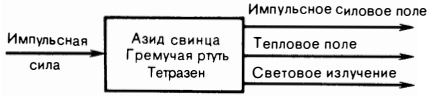


Рис. 15. Структурная схема ФЭ инициирования ударом

Инициирование ударом — возбуждение цепной химической реакции в результате внешнего воздействия — удара, накола.

Инициирующие взрывчатые вещества (ВВ) первичные в огневой цепи ВВ, очень чувствительны к удару, трению, наколу, способны вызывать детонацию во вторичных (бризантных) ВВ. Горение инициирующих ВВ легко переходит в детонацию даже при атмосферном давлении и в малых по массе зарядах.

Основные характеристики ВВ: чувствительность, стойкость, теплота взрыва, фугасность, бризантность.

Причиной взрыва при ударе является локальный разогрев ВВ.

Параметры взрыва: время химического превращения $\tau \approx 10^{-5}$ с, удельная теплота взрыва ВВ $Q \approx 4$ МДж/кг, температура взрыва $T \approx 2 \div 4$ К, давление взрыва $p \approx 10$ ГПа.

Зависимость результата от воздействия имеет следующий вид:

$$\dot{Q}_+ \approx \dot{V} q Z \exp\left[-E/(RT)\right].$$

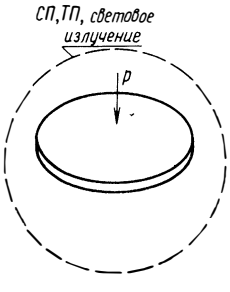


Рис. 16. Таблетка

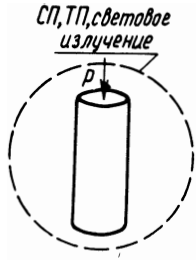


Рис. 17. Цилиндрический столбик

Скорость тепловыделения $\dot{Q}_+$ в объеме вещества V возрастает с увеличением температуры T ВВ по закону Аррениуса, где $R = 8{,}314$ Дж/(моль·К) — универсальная газовая постоянная; Z — предэкспоненциальный множитель, значение которого зависит от механизма элементарного акта реакции; q — тепловой эффект реакции; E — энергия активации.

Условие возникновения теплового взрыва формируется в виде неравенства $\delta > \delta^*$, где безразмерный параметр δ зависит от параметров, характеризующих химическую реакцию, условия теплоотвода и размеров тела:

$$\delta = \frac{E}{RT_0^2} \frac{q}{\lambda} r^2 Z \exp\left[-E/(RT_0)\right],$$

а δ^* — число, определяемое только формой тела (например, для шара $\delta^* = 3{,}32$, причем в этом случае r — радиус шара); λ — теплопроводность.

Локальный разогрев (тепловой взрыв) выражен тем ярче, чем лучше выполняются неравенства $RT_0/E \ll 1$ и $cRT_0^2/(Eq) \ll 1$, где c — теплоемкость ВВ. Если эти неравенства выполняются плохо, тепловой взрыв вырождается, так как одновременно с ростом T происходит быстрое выгорание исходного вещества, которое смазывает картину взрыва.

Наибольшее влияние на чувствительность ВВ оказывают плотность заряда и примеси. С увеличением плотности заряда чувствительность уменьшается. Примеси (мелкое стекло, пе-

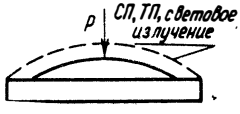


Рис. 18. ВВ на подложке

7. Характеристики ВВ

ВВ	Стойкость к удару	Инициирующая способность	Температура вспышки, К	Плотность, кг/дм³
Азид свинца	2—3	5—10	623	4,53
Гремучая ртуть, фульминат ртути $Hg(ONC)_2$	1	1	413—443	4,42
Тетразен	—	0,5—1	413	4,2
ТНРС, тринитрорезорцинат свинца, тринитрорезорцината моногидрид	—	0,5	548	4,5

сок, металлический порошок), повышающие чувствительность, называются сенсибилизаторами. Примеси (парафин, воск, вазелин), понижающие чувствительность, называются флегматизаторами.

Геометрические формы инициирующих ВВ приведены на рис. 16—18. Наиболее эффективно приложение воздействия в точке.

Результаты воздействия — ударная волна (высокотемпературные продукты взрыва большой плотности и давления), световое излучение и тепловое поле — распространяются в объеме вокруг ВВ.

Характеристики некоторых материалов, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 7.

8. Применение ВВ

ВВ	Применение
Азид свинца $Pb(N_3)_2$	КД
Гремучая ртуть	КД
Фульминат ртути $Hg(ONC)_2$	КД, КВ
Тетразен	КВ
ТНРС	КД, КВ

Обозначения: КД — капсюль-детонатор; КВ — капсюль-воспламенитель.

ФЭ применяется в боеприпасах, в технологии упрочнения взрывом и др.

Инициирование ударом используется в начальной части огневой цепи — в капсюлях-воспламенителях и капсюлях-детонаторах. Применение инициирующих ВВ приведено в табл. 8.

Примером применения ФЭ является взрыватель, конструктивная схема которого приведена на рис. 19, где *1* и *2* — инерционные ударники; *3* — жало; *4* — капсюль с инициирующим ВВ.

Сведения о физической сущности

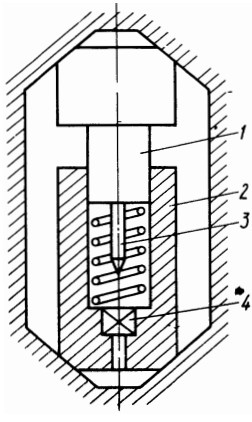


Рис. 19. Конструктивная схема всюдубойного механизма взрывателя

эффекта приведены в работе [4], а о применении эффекта — в работе [32].

МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

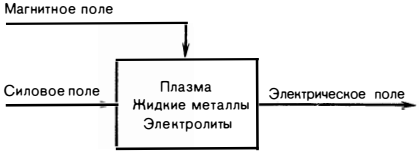


Рис. 20. Структурная схема магнитогидродинамического эффекта

Магнитогидродинамический эффект — индуцирование электрического поля и возникновение электрического тока в замкнутой цепи при движении электропроводной жидкости или ионизированного газа в магнитном поле.

Эффект основан на явлении электромагнитной индукции, т. е. на возникновении тока в проводнике, пересекающем силовые линии магнитного поля. В данном случае проводниками являются электролиты, жидкие металлы или ионизированные газы (плазма). При движении поперек магнитного поля в них возникают противоположно направленные потоки носителей зарядов противоположных знаков.

Если проводником является жидкость, то генерирование электроэнергии идет только вследствие преобразования части кинетической или потенциальной энергии потока электропроводной жидкости практически при постоянной температуре.

Так как разность электрических потенциалов создается движением проводящей среды поперек магнитного поля, то электрическое поле

$$E = -(V/C)\,B,$$

где B — магнитная индукция; V — скорость плазмы; C — скорость света.

Пространство проявления ФЭ ограничено объемом рабочего тела, обладающего электропроводностью (рис. 21).

В данном ФЭ магнитное поле приложено к пространству вокруг проводника и направлено перпендикулярно к направлению движения плазмы; силовое поле направлено вдоль направления движения плазмы в сторону ее движения.

9. Температуры испарения материалов

Материал	Температура испарения, К
Керосин	503—573
Аргон + натрий	2273
Натрий	1156
Калий	1033
Алюминий	2773
Глицерин	569
Свинец	1738

Пространство проявления результата воздействия: точки, линии, поверхности; они расположены на поверхности тела, ограничивающего пространство, в котором находится носитель зарядов.

Характеристики некоторых материалов, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 9.

Этот эффект используется в электрореактивных ракетных двигателях, в магнитогидродинамических генераторах электроэнергии, в которых осуществляется прямой переход тепловой энергии в электрическую. Основное преимущество МГД-генераторов перед тепловыми (например, газовыми турбинами) состоит в том, что плазма имеет высокую температуру, а это приводит к повышению КПД:

$$\eta_{max} = 1 - \frac{T_0}{T},$$

где T_0 — температура окружающей среды; T — температура рабочего тела.

МГД-генератор (рис. 22) имеет нагреватель, в котором рабочее тело

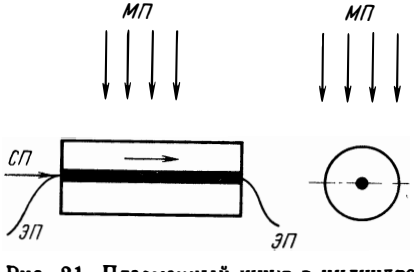


Рис. 21. Плазменный шнур в цилиндре

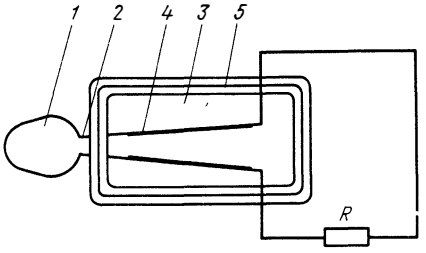


Рис. 22. Магнитогидродинамический генератор:

1 — генератор плазмы; *2* — сопло; *3* — МГД-канал; *4* — электроды с последовательно включенной нагрузкой; *5* — магнитная система, создающая тормозящее магнитное поле

нагревается до необходимой температуры (твердое топливо переходит в газ и ионизируется). Через сопло *2* рабочее тело разгоняется до требуемых скоростей.

Рабочее тело (плазма или рабочая жидкость) движется в МГД-канале. Происходит отвод генерируемой электроэнергии контактным (с помощью электродов *4*) или индукционным (вторичные обмотки) способом. В магнитном поле магнитной системы происходит пондемоторное торможение рабочего тела.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [26, 143, 199], а о применении эффекта — в работах [110, 163].

МАГНИТОУПРУГИЙ ЭФФЕКТ

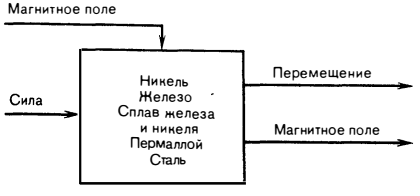


Рис. 23. Структурная схема магнитоупругого эффекта

Магнитоупругий эффект — это изменение намагниченности ферромагнитного тела при деформации. Он является термодинамически обратным магнитострикции и поэтому его иногда называют обратным магнитострикционным эффектом.

В случае, когда кристаллы ферромагнетика оказываются подверженными воздействию механических усилий, на кристаллографическую анизотропию накладывается магнитоупругая анизотропия, вызванная дополнительным магнитным взаимодействием атомов вследствие искажения атомной решетки кристалла.

Энергия магнитоупругой анизотропии, как и энергия естественной магнитной анизотропии, зависит от направления вектора I_s намагниченности насыщения в кристалле и создает дополнительные выгодные энергетические направления I_s областей в решетке. Таким образом, изменения намагниченности ферромагнетика под воздействием упругих деформаций в области намагничивания объясняются тем, что, действуя на ферромагнетик, упругие напряжения приводят к изменению ориентации I_s областей в решетке (без изменения абсолютного значения I_s).

Магнитоупругая энергия ферромагнетика самым непосредственным образом связана с магнитострикцией. Так, если к ферромагнитной проволоке подвесить груз и затем намагнитить ее, то груз будет подниматься или опускаться в результате магнитострикционного сокращения или удлинения проволоки. Расходуемая при этом магнитоупругая энергия, отнесенная к единице объема ферромагнитного материала,

$$U_d = -\sigma\lambda,$$

где λ — магнитострикция, равная относительному изменению длины проволоки; σ — сила, действующая на 1 см^2 сечения проволоки.

Устойчивые направления I_s областей в ферромагнетике определяются минимальным значением магнитной энергии кристалла, включающей в себя три составляющие: 1) энергию магнитной анизотропии U_k; 2) магнитоупругую энергию U_d; 3) энергию внешнего магнитного поля U_H.

Для того чтобы найти устойчивые направления I_s, необходимо продифференцировать сумму указанных трех энергий по α-углу между I_s и H и приравнять результат нулю:

$$\frac{d(U_k + U_d + U_H)}{d\alpha} = 0.$$

10. Характеристики магнитоупругих материалов

Название	Состав	Константа анизотропии K_1, Дж/дм³	Магнитострикция $\lambda_s \cdot 10^6$	Намагниченность насыщения, Тл	Образец		
					Форма	Длина, мм	Площадь сечения, мм²
Электротехническое железо	99% Fe	500	—7	0,172	Проволока	119	0,19
Никель	—	—4,0	—32	0,050	Трубка	150	0,27
65%-ный пермаллой	64,6% Ni	1,4	14	0,135	Проволока	148	0,19
Сталь:							
динамная	1,0% Si	450	—	0,168	Полоска	153	0,68
трансформаторная	3,7% Si	350	8	0,163	—	153	0,58

Это соотношение позволяет найти минимум потенциальной энергии I_s областей в ферромагнетике, а следовательно, определить ход кривой намагниченности. В случае, когда энергия анизотропии мала или упругие напряжения настолько велики, что членом U_k по сравнению с U_d можно пренебречь, ход кривой намагниченности в основном будет определяться упругими напряжениями.

Для случая сильных упругих растяжений, действующих в направлении H, намагниченность

$$I = I_s \cos\alpha = -\frac{I_s^2}{3\lambda_s\sigma} H,$$

откуда магнитная восприимчивость

$$\chi = \frac{a}{\sigma},$$

где a — численный коэффициент, равный $-\frac{I_s^2}{3\lambda_s}$.

В зависимости от вида упругой деформации намагниченность в различных ферромагнетиках претерпевает разнообразные изменения. Их характер зависит от величины и знака магнитострикции материалов.

Магнитоупругий эффект зависит от материала, величины и знака его магнитострикций, а также от температуры окружающей среды, упругой деформации и напряженности магнитного поля.

ФЭ наиболее заметно проявляется на телах удлиненной формы (проволока, стержни, пластины, трубки и т. д.).

Сила (растягивающая или сжимающая) приложена к противоположным концам образца.

Магнитное поле существует в пространстве вокруг образца и направлено параллельно растягивающей (сжимающей) силе.

Пространство проявления результата воздействия — объем ферромагнитного образца.

В случае, если материал обладает положительной магнитострикцией, направление результирующей намагниченности совпадает с направлением действия силы и магнитного поля.

11. Магнитоупругие свойства магнитомягких материалов

Материал	S_σ	Материал	S_σ
Пермаллой (45% Ni + 55% Fe)	9,4 (при 0,2 А/см)	Мягкая сталь	8,1 (при 1,5 А/см)
Трансформаторная сталь	8,4 (при 2 А/см)	0,7%, 0,15% Si, остальное Fe	6 (при 16 А/см)

В случае отрицательной магнитострикции — направление намагниченности перпендикулярно к их действию.

Характеристики некоторых материалов, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 10.

Магнитоупругие свойства материала характеризуются относительной чувствительностью

$$S_\sigma = \frac{\Delta\mu/\mu}{\sigma} = \frac{S}{E},$$

где E — модуль упругости; μ — магнитная проницаемость; σ — внутреннее напряжение в материале.

Магнитоупругие свойства магнитомягких материалов приведены в табл. 11.

Магнитоупругий эффект используется в магнитоупругих датчиках. Такие датчики широко применяют в различных устройствах контроля и автоматического управления и в системах автоматического измерения массы в разных производственных процессах. Они нашли применение в горной промышленности, в металлургии, химическом производстве, в строительстве и т. д.

Магнитоупругие датчики имеют разнообразные конструкции. Датчик представляет собой магнитопровод из магнитострикционного материала, который закрепляется или соприкасается с поверхностью испытуемой детали. Магнитопровод датчика трансформаторного типа (рис. 24) имеет в качестве одного из участков элемент, нагружаемый усилием. Конструкция представляет собой три П-образных магнитопровода, расположенных параллельно друг к другу. Намагничивающие обмотки расположены на полюсах крайних магнитопроводов, а измерительная — на среднем. Датчик используется для контроля натяжения

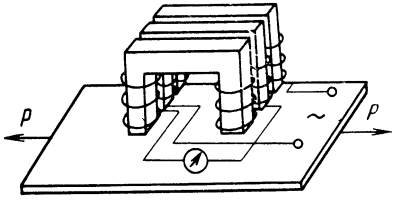


Рис. 24. Магнитопровод датчика трансформаторного типа

стальной ленты, напряжений в стальном листе, анизотропии стального листа и т. п. Под воздействием усилий изменяется магнитная проницаемость стальной ленты, в результате чего изменяется общее магнитное сопротивление сердечника трансформатора.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [2, 18, 19, 21], а о применении эффекта — в работах [2, 21, 69, 294].

МЕХАНОКАЛОРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ



Рис. 25. Структурная схема механокалорического эффекта

При вытекании HeII из сосуда через узкий капилляр в сосуде повышается температура, и, наоборот, в месте втекания HeII из капилляра в другой сосуд происходит охлаждение.

Объяснить механокалорический эффект можно с помощью двухжидкостной модели HeII. В этой теории основным является предположение о том, что HeII состоит из двух компонент: нормальной и сверхтекучей. Каждая компонента характеризуется своей плотностью [так что полная плотность $\rho = \rho_n + \rho_s$ есть сумма плотностей компонент (индексы n и s здесь и дальше относятся к характеристикам соответственно нормальной и сверхтекучей компонент)] и скоростью движения. Таким образом, в каждой точке пространства можно указать две скорости движения: скорость сверхтекучего движения V_s и скорость нормального движения V_n. В покоящемся HeII различие между сверхтекучей и нормальной компонентами не обнаружено; оно проявляется лишь при течении HeII. Поэтому точнее было бы говорить не о существовании двух компонент в HeII, а об одновременном сосуществовании двух движений — нормального и сверхтекучего.

В двухжидкостной модели предполагается, что нормальное движение обладает всеми обычными свойствами движения вязкой жидкости, в то время как сверхтекучее движение как раз и ответственно за явление сверхтекучести и связанные с ним эффекты.

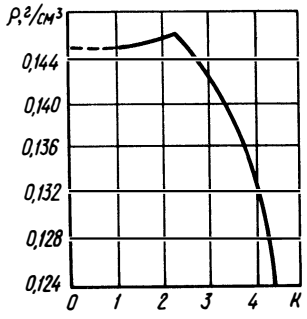


Рис. 26. Характеристика He II

В двухжидкостной модели предполагается также, что сверхтекучее движение в HeII не только не обладает вязкостью, но и не участвует в переносе теплоты.

В случае механокалорического эффекта, если HeII вытекает из сосуда по узкому капилляру, то капилляр действует как фильтр и пропускает только сверхтекучую компоненту, которая не несет теплоты. Поэтому в сосуде, из которого вытекает HeII, нет потери теплоты, а полная масса уменьшается и, следовательно, энергия в расчете на единицу массы возрастает, т. е. остающийся в сосуде HeII нагревается. Наоборот, если HeII втекает в сосуд по узкому капилляру, то энергия на единицу массы в сосуде уменьшается и происходит охлаждение HeII в сосуде.

Зависимость результата от воздействия имеет следующий вид:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon + pV,$$

где V — скорость жидкого гелия, протекающего в капилляре; ε — энергия квазичастицы в системе координат, связанной с движущимся гелием; $\varepsilon + pV$ — энергия жидкости изменилась при рождении в ней элементарного возбуждения; p — импульс квазичастицы.

Для того чтобы такое изменение было энергетически выгодным, необходимо, чтобы оно было отрицательной величиной, т. е. должно выполняться неравенство

$$\varepsilon + pV < 0.$$

Если векторы p и V антипараллельны, что соответствует минимуму выражения, стоящего в левой части этого неравенства, то и при этом должно выполняться условие:

$$\varepsilon - pV < 0.$$

Оно не имеет места при скоростях

$$V < \frac{\varepsilon}{p}.$$

Явление сверхтекучести возможно лишь при малых скоростях течения HeII. С увеличением скорости наступает область так называемых критических явлений, связанных с исчезновением эффекта сверхтекучести. Эффект наблюдают при протекании жидкого гелия по достаточно узким капиллярам. Предполагается, что оба компонента могут свободно перемещаться относительно друг друга, не испытывая никакого взаимного трения. Сверхтекучая составляющая обладает нулевой энтропией и при своем движении вообще не переносит теплоты. Именно она не испытывает трения о стенки цилиндра.

Жидкий гелий принимает форму емкостей, в которых он находится. Силовое поле приложено к объему движущегося жидкого гелия (в трубопроводе, емкости).

Результат воздействия (тепловое поле) проявляется в пространстве перед капилляром (дросселем) и в пространстве после него. Результат воздействия — движение — проявляется в пространстве капилляра, через который протекает гелий.

Характеристика HeII приведена на рис. 26.

ФЭ применяется в криогенной технике. Криогенная установка (рис 27) содержит горловину 1 с капилляр-

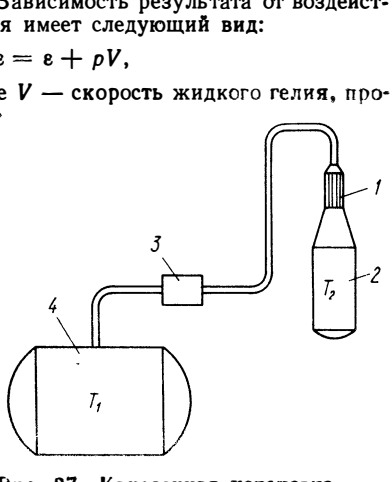


Рис. 27. Криогенная установка

ными каналами, емкость *2* для стекающего (охлажденного) гелия, насос *3* и резервуар *4* с жидким гелием.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [104, 145, 165, 257, 260], а о применении эффекта — в работе [135].

НАГРЕВ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ

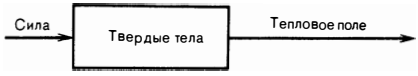


Рис. 28. Структурная схема ФЭ нагрева при деформации

Нагрев при деформации — переход части работы, затрачиваемой на изменение размеров или объема тела, в тепловую энергию.

Большое количество работы преобразуется в теплоту при деформации тела, типичным видом которой является скольжение по кристаллографическим плоскостям. Граница распространения скольжения называется дислокационной линией, или дислокацией. Поэтому развитие скольжения можно рассматривать как образование и перемещение дислокаций. Скорость деформации пропорциональна плотности (суммарной длине дислокаций в единице объема) и скорости перемещения дислокаций.

В реальных кристаллах имеются различные дефекты (точечные, примесные атомы, дислокации, частицы других фаз); сопротивление скольжению зависит от взаимодействия движущихся дислокаций с этими дефектами. Переход атомов из одних положений равновесия в другие вблизи дислокаций требует затрат кинетической энергии, часть которой переходит в тепловую.

При постоянстве скорости деформации происходит увеличение плотности дислокаций в кристалле, которая достигает 10^{11}—10^{12} см$^{-2}$. При этом растет их взаимное сопротивление скольжению, происходит упрочнение материала, требующее увеличения подводимой энергии, что, в свою очередь, приводит к еще большему разогреву деформируемого тела.

Элементарное количество теплоты dQ можно определить как произведение теплоемкости вещества на элементарную разность температур dT:

$$dQ = mcdT,$$

где m — масса тела; c — теплоемкость.

В процессе обмена энергией количество теплоты Q будет соответствовать вполне определенному количеству работы. Следовательно, зная работу деформации, можно определить изменение температуры. Величину $J = A/Q$ называют механическим эквивалентом теплоты, где A — механическая энергия.

12. Характеристики некоторых сталей, применяемых для ковки и штамповки

Марка стали	Временное сопротивление разрыву, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Твердость НВ в отожженном состоянии
15ХА	600	400	15	50	179
30ХА	900	700	12	45	187
45ХА	1050	850	9	45	229
40Г2	670	390	12	40	217
20ХГР	1000	800	9	50	197
38ХС	950	750	12	50	255
35СГ	900	700	15	40	229
3ХМА	950	750	12	50	229
20ХФ	800	600	12	50	197
50ХН	1100	900	9	40	207
38ХЮ	900	750	10	45	229
38ХМЮА	1000	850	14	50	229

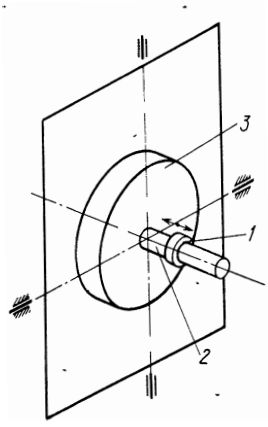


Рис. 29. Виброударный успокоитель

Зависимость результата от воздействия имеет следующий вид:

$$\frac{dA}{J} = mc\,dT.$$

Ограничения на проявление ФЭ: низкая пластичность материалов и высокое сопротивление деформации. ФЭ проявляется на телах различной геометрической формы.

Пространство приложения силы: точки, линии, поверхности деформируемого тела. Пространство проявления теплового поля: области тела, имеющие максимальную пластическую деформацию, пространство вокруг деформируемого тела.

Физический эффект используется в кузнечно-штамповочном производстве, устройствах для гашения механических колебаний, поглотителях энергии удара, измерительной технике.

При ковке для поддержания необходимой температуры поковку нагревают ударами молота.

Виброударный успокоитель (рис. 29) имеет кольцо *1*, надетое с зазором на стержень *2*, жестко связанный с кожухом гироскопа *3*. При вынужденных колебаниях гироскопа эффект демпфирования достигается вследствие динамического взаимодействия гироскопа и виброгасящего элемента при их соударении. Происходит преобразование механической энергии в тепловую с последующим ее рассеянием.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работе [270], а о применении эффекта — в работах [123, 124, 182].

ПОТЕНЦИАЛ ТЕЧЕНИЯ

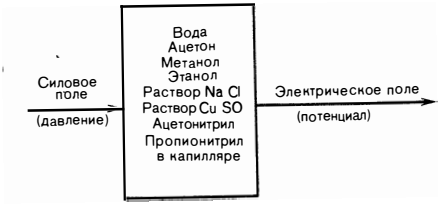


Рис. 30. Структурная схема ФЭ потенциала течения

Потенциал течения — разность электрических потенциалов, возникающая при движении жидкости через пористую перегородку под действием внешнего давления.

Если к концам капилляра, наполненного раствором электролита, приложить некоторую разность давлений, то в нем создается поток раствора, который будет проходить ламинарно, параллельно стенкам капилляра. Скорость течения раствора максимальна в центре капилляра вдоль оси и уменьшается к периферии по параболическому закону. Граница перемещения жидкости находится за пределами первого слоя противоионов в диффузной части двойного слоя и совпадает с той границей, которая образуется при смещении жидкости вследствие наложения электрического поля при электроосмосе. Поэтому при течении жидкости через капилляр распределение зарядов-ионов в наружной части двойного слоя будет нарушаться и будет происходить вынос зарядов — избытка ионов одного знака — в зависимости от заряда стенки капилляра на одну его сторону, по направлению потока жидкости. Движение зарядов вдоль стенки представляет собой поверхностный, конвективный ток, в результате чего и появляется разность потенциалов на концах капилляра. Эта разность потенциалов, в свою очередь, дает начало вторичному объемному току проводимости в обратном направлении. Разность потенциалов будет возрастать до тех пор, пока поверхностный ток не станет равным объемному току. Полученная разность

13. Свойства электролитов

Электролит	T, К	Вязкость $\eta \cdot 10^3$, Па·с	Диэлектрическая постоянная ε	Удельное электросопротивление ρ, Ом·м
Этанол (этиловый спирт C_2H_2O)	253	2,78	—	—
	273	1,773	—	$1{,}5 \cdot 10^9$
	293	1,200	26,4 (283 К)	$6{,}4 \cdot 10^{10}$ (291 К)
Метанол (метиловый спирт CH_4O)	253	1,16	—	—
	273	0,812	37,92	—
	293	0,578	—	$5{,}8 \cdot 10^8$
2%-ный водный раствор $CuSO_4$	273	1,971	—	—
	293	1,092	—	—
	323	0,596	—	—
2%-ный водный раствор NaCl	273	1,841	—	—
	293	1,030	5,9	—
	323	0,570	—	—
	573	—	—	10^{11}
Ацетон	258	—	—	$1{,}1 \cdot 10^{11}$
	293	—	20,74	—
Вода	293	1,002	78,3 (298 К)	$4{,}44 \cdot 10^{10}$
1%-ный водный раствор $AlCl_3$	296	—	75,3	—

потенциалов есть потенциал течения, и в стационарном состоянии потенциал течения приобретает постоянное значение. Чем больше количество избыточных ионов одного знака будет находиться в диффузной части двойного электрического слоя и чем выше эффективный заряд и электрокинетический потенциал ξ, тем больше потенциал течения.

Потенциал течения прямо пропорционален диэлектрической постоянной жидкости, ее удельному сопротивлению и дзета-потенциалу:

$$E = \frac{\xi \varepsilon \Delta p}{4\pi\eta\chi},$$

где ξ — электрокинетический потенциал; ε — диэлектрическая постоянная; η — вязкость жидкости; Δp — разность давлений в левой и правой частях капилляра; χ — удельная электропроводность раствора.

Условием возникновения потенциала течения является наличие двойного электрического слоя на границе раздела двух фаз.

Эффект снижается при возрастании концентрации электролита. Это связано со сжатием диффузного слоя электролита.

С увеличением температуры уменьшается вязкость жидкости, а потенциал течения возрастает.

ФЭ проявляется на поверхностях пористой перегородки, помещенной в сосуд с электролитом (рис. 31).

Характеристики некоторых материалов, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 13.

На основе эффекта потенциала течения созданы электрокинетические преобразователи, которые использу-

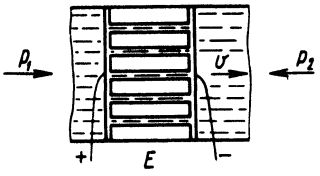


Рис. 31. Пористая перегородка

ются в микрофонах, гидрофонах, сейсмических, вибрационных, фонографических приемниках и т. д.

В электрокинетическом виброметре (рис. 32) происходит преобразование периодического перемещения в электрический потенциал в широком частотном диапазоне. При приложении давления к одной из мембран *1* или *2* виброметра некоторое количество электрокинетической жидкости будет проталкиваться через пористую перегородку *3*, создавая на сетчатых электродах *4* и *5* разность потенциалов, пропорциональную приложенному давлению. Эта разность потенциалов фиксируется измерительным устройством *6*. При уменьшении давления мембрана возвращается в начальное положение, жидкость перетекает обратно и на электродах создается потенциал противоположной полярности. Таким образом, прибор реагирует на изменение давления и не дает показаний при устойчивом давлении. Какая-либо из мембран соединяется с источником измеряемого перемещения упругим соединением *7* — металлической листовой пружиной S-образной формы. Один конец пружины приварен к жесткой металлической детали, соединенной с центром мембраны. Второй конец находится в контакте с источником вибрации. Такой прибор можно использовать в устройствах, измеряющих вибрацию в детекторах внутреннего смещения или регистрирующих сдвиг эксцентриситетов, в фонографах и т. д.

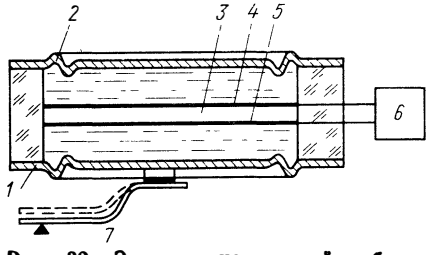


Рис. 32. Электрокинетический виброметр

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [65, 227, 242], а о применении эффекта — в работах [66, 238].

ПЬЕЗОМАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ



Рис. 33. Структурная схема пьезомагнитного эффекта

Пьезомагнитный эффект — возникновение в веществе намагниченности под действием внешнего давления.

Пьезомагнитный эффект сравнительно мал и практически может быть обнаружен в антиферромагнетиках, которые не обладают в нормальных условиях спонтанным магнитным моментом. Магнитные свойства антиферромагнетиков чувствительны к их магнитной симметрии. Если при наложении упругих напряжений кристалл деформируется таким образом, что его магнитная симметрия изменяется, то в нем может возникнуть спонтанный ферромагнитный момент, т. е. будет наблюдаться пьезомагнитный эффект.

Пьезомагнитный эффект принципиально отличается от квадратичной магнитострикции ферромагнетиков.

Пьезомагнитный момент m_i связан с тензором упругих напряжений σ_{jk} соотношением

$$m_i = \lambda_{ijk}\sigma_{jk}.$$

Для MnF_2 и CoF_2 в соответствии с требованиями симметрии отличны от нуля только три компоненты пьезомагнитного тензора: $\lambda_{xyz} = \lambda_{yxz}$ и λ_{zxy}.

Пьезомагнитный эффект возможен только в материалах, обладающих магнитной структурой (ферромагнетики, антиферромагнетики). Он пропорционален энергии анизотропии, обусловленной спинорбитальным взаимодействием. Это взаимодействие, например, для Mn^{++}, находящегося в *S*-состоянии, минимально. Поэтому для MnF_2 пьезомагнитный эффект примерно

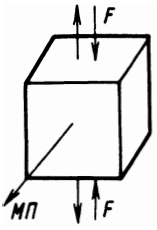


Рис. 34. Куб

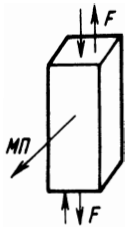


Рис. 35. Брус

в 100 раз меньше, чем для CoF_2 ($\lambda_{CoF_2} \approx 2 \cdot 10^{-12}$ Тл·м²/Н).

Эффект уменьшается с повышением температуры.

Тела, на которых проявляется ФЭ, могут иметь кубическую или призматическую (рис. 34, 35) форму.

Сдвиговое напряжение действует в плоскости, образованной двумя осями образца. Магнитное поле направлено перпендикулярно к оси действия сил.

Ввиду малости пьезомагнитный эффект пока не нашел практического применения, однако его изучение представляет интерес для выяснения особенностей магнитных структур. В частности, с его помощью можно исследовать доменную структуру антиферромагнетиков.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [24, 35, 241].

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРЯМОЙ ЭФФЕКТ

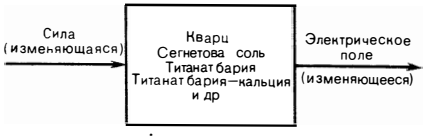


Рис 36. Структурная схема прямого пьезоэлектрического эффекта

Пьезоэлектрический прямой эффект — возникновение поляризации диэлектрика под действием механических напряжений. Пьезоэлектрические свойства кристаллов связаны с их структурой. Ими обладают все пироэлектрики (спонтанно поляризованные диэлектрики). При механической деформации пироэлектрика изменяется его спонтанная поляризация, что и наблюдается как пьезоэлектрический прямой эффект.

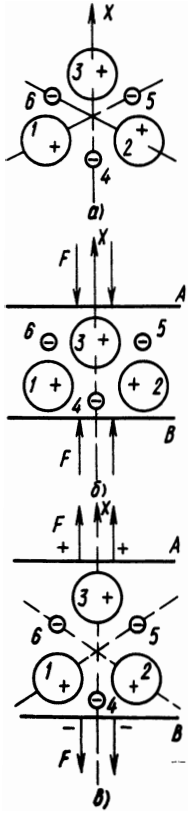


Рис. 37. Схема пьезоэлектрического прямого эффекта

Возникновение пьезоэлектрического эффекта рассмотрим с помощью рис. 37, *а*. На упрощенной модели ячейки кварца большими шариками *1—3* изображены ионы кремния, а маленькими шариками *4—6* — ионы кислорода. Для упрощения каждый ион кислорода несет удвоенный отрицательный заряд и заменяет пару соседних ионов кислорода.

Если подвергнуть такую ячейку сжатию вдоль полярной оси *X* (рис. 37, *б*), то ион кремния *3* и ион кислорода *4* вклинятся между окружающими их боковыми ионами. В результате на плоскости *A* пластинки появится отрицательный заряд, а на плоскости *B* — положительный. При растяжении на плоскостях *A* и *B* возникают заряды противоположного знака (рис. 37, *в*).

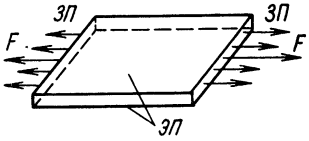


Рис. 38. Стержень

В линейном приближении зависимость поляризованности ρ от однородного механического напряжения $\sigma(k)$ может быть представлена в виде $\rho_i = d_{ik}\sigma(k)$, где d_{ik} — коэффициенты пропорциональности, называемые пьезоэлектрическими модулями (пьезоконстантами). Пьезоконстанты сильно различаются для кристаллов разных типов; K — коэффициент электромеханической связи; $K = d\sqrt{E/(\varepsilon\varepsilon_0)}$ (d — пьезомодуль; E — модуль упругости; ε — диэлектрическая проницаемость; ε_0 — электрическая постоянная).

Кристаллы, обладающие центром симметрии, не могут быть пьезоэлектриками. Это объясняется тем, что при деформации кристалла центр симметрии сохраняется, а при наличии центра симметрии не может быть поляризации. Наличие других центров симметрии (оси, плоскости) может «запрещать» появление поляризации в определенных направлениях или при определенных деформациях.

Тела, на которых проявляется ФЭ, могут иметь форму прямоугольной (рис. 38) или круглой (рис. 39) пластинки, а также цилиндра (рис. 40).

Силовое поле может быть приложено к точкам, линиям и поверхностям, расположенным на плоскости кристалла, перпендикулярной к одной из полярных осей. На этих же плоскостях возникает потенциал электрического поля.

Характеристики некоторых материалов, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 14.

На преобразовании механических воздействий в электрические сигналы

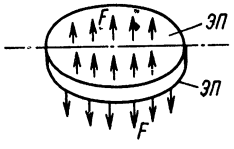


Рис. 39. Диск

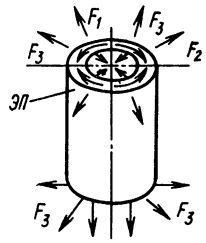


Рис. 40. Полый цилиндр

основана работа пьезоэлектрических преобразователей, резонаторов, генераторов, фильтров, линий задержки и т. д. Они используются для контроля напряженного состояния механических конструкций, в ультразвуковой технике и дефектоскопии, гидроакустике, радиовещании, виброметрии, радиоэлектронике, акустоэлектронике и т. д.

При работе пьезоэлектрических преобразователей в качестве излучателей их КПД составляет 40—70%. Мощность пьезоэлектрических преобразователей ограничивается допустимой напряженностью электрического поля, механической прочностью пьезоматериалов и их разогревом.

Пьезоэлектрический датчик (рис. 41) содержит пьезоэлектрический преобразователь *1*, на торцах которого расположены две системы электродов *2*, генератор *4*, установленный в пазах держателей *3* и измерительный прибор *5*.

При подключении системы электродов *2* к генератору электрических колебаний, настроенному на резонансную частоту радиальных колебаний

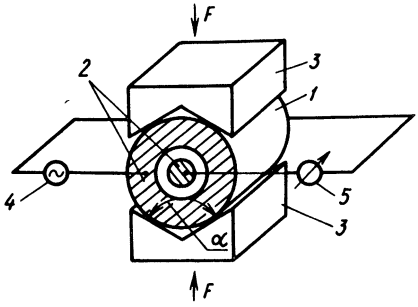


Рис. 41. Пьезоэлектрический датчик статических усилий

14. Пьезоэлектрические свойства некоторых материалов

Марка материала	ε	Пьезомодуль $d \cdot 10^{12}$, Кл/Н	$E \cdot 10^{-11}$, Па	K	$\sigma \cdot 10^{-6}$, Па
Кварц	$4{,}5^{(11)}$	$2{,}31^{(11)}$	$0{,}867^{(11)}$	0,095	—
Титанат бария ТБ-1	1500	$\frac{45^{(31)}}{100}$	1,0—1,1	$\frac{0{,}2^{(31)}}{0{,}5}$	3000—4500
Титанат бария-кальция ТБК-3	1180	$\frac{51^{(31)}}{113}$	1,08—1,16	$\frac{0{,}17^{(31)}}{0{,}37}$	3500
Группа титаната цирконата свинца	1100	$\frac{75^{(31)}}{150}$	0,62	$\frac{0{,}2^{(31)}}{0{,}41}$	—

Примечание. Цифры в скобках — индексы соответствующих тензорных характеристик; например, (11) обозначает d_{11}; для кварца приведены данные при срезе 0 °Х. В знаменателе даны значения для индексов (33).

пьезоэлектропреобразователя, а второй системы электродов — к измерительному прибору, преобразователь под действием возбуждающего напряжения совершает механические колебания. На системе электродов *2* появляется электрический заряд, изменяющийся в зависимости от частоты механических колебаний, величина которого определяется измерительным прибором *5*. Под действием измеряемого статического усилия F, приложенного к держателям *3* датчика, амплитуда механических колебаний пьезопреобразователя уменьшается и, следовательно, уменьшается переменное электрическое напряжение, снимаемое со второй системы электродов, что фиксируется измерительным прибором *5*.

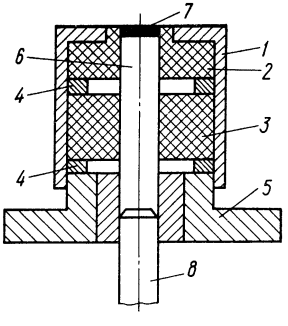


Рис. 42. Пьезоэлектрический датчик давления

Пьезоэлектрический датчик давления показан на рис. 42.

В корпусе *1* с помощью резиновых шайб *2* и *3*, металлических прокладок *4* и гайки *5* закреплен стальной стержень *6*, с передним торцом которого соединен чувствительный пьезоэлектрический элемент *7*. Элемент *7* установлен заподлицо с торцовой поверхностью корпуса *1*. К заднему торцу стержня *6* припаян пучок тонких стальных проволок, например гибкий трос *8*. Общее сечение проволок и сечение стержня *6* одинаковы. Стержень *6* и пучок проволок образуют вместе акустический волновод датчика давления.

При воздействии импульсного давления в датчике возникает волна сжатия, проходящая через пьезоэлектрический элемент *7* и стержень *6* в трос *8*. Длину троса *8*, обеспечивающую отсутствие помех со стороны отраженных волн, выбирают по условиям эксперимента.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [241, 270], а о применении эффекта — в работах [11, 12, 84, 148, 175].

РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

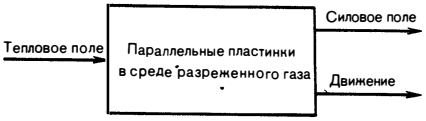


Рис. 43. Структурная схема радиометрического эффекта

Радиометрический эффект — проявление силы отталкивания между двумя поверхностями, имеющими разную температуру и помещенными в разреженный газ.

Радиометрический эффект вызывается тем, что молекулы, ударяющиеся о поверхность пластины с температурой T_1 (рис. 44), отталкиваются от нее, имея более высокую среднюю кинетическую энергию, чем молекулы, ударяющиеся о поверхность с температурой T_2. Холодная пластина со стороны, обращенной к горячей, бомбардируется молекулами, имеющими в среднем более высокую энергию, чем молекулы, бомбардирующие пластину с противоположной стороны (со стороны стенки сосуда с $T = T_2$).

Благодаря разнице в импульсах, передаваемых молекулами противоположных сторонам пластин, возникает сила отталкивания. При достаточно низких давлениях газа p,

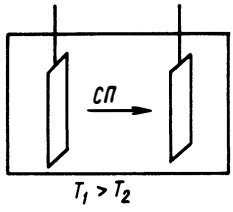


Рис. 44. Схема проявления радиометрического эффекта

когда средняя длина пробега молекул больше, чем расстояние между поверхностями пластин, сила отталкивания, приходящаяся на единицу площади,

$$F = \frac{1}{2} p \left(\sqrt{\frac{T_1}{T_2}} - 1 \right).$$

При более высоких p «горячие» молекулы теряют часть своей энергии при столкновениях с «холодными» молекулами. Поэтому F становится меньше, несмотря на то что в передаче энергии участвует большее число молекул. В общем случае $F = c/(p/a - b/p)$, где a, b, c — эмпирические коэффициенты. Таким образом, при низких давлениях F прямо пропорциональна p, а при высоких — обратно пропорциональна. При некотором промежуточном p сила F проходит через максимум.

15. Характеристики газов

Газ	Средняя длина L_T^p (в м) свободного пробега молекулы				Частота столкновений, $\omega \cdot 10^9$, приходящаяся на молекулу при $T = 298$ К, $p = 10^5$ Па, $с^{-1}$
	$L_{273}^{100} \cdot 10^5$	$L_{273}^{10^5} \cdot 10^8$	$L_{298}^{100} \cdot 10^5$	$L_{298}^{10^5} \cdot 10^8$	
Водород	8,39	11,04	9,31	12,26	14,45
Гелий	13,32	17,53	14,72	19,36	7,16
Неон	9,44	12,42	10,45	13,75	1,68
Аргон	4,71	6,20	5,31	6,67	5,70
Криптон	3,69	4,85	4,06	5,34	6,48
Ксенон	2,64	3,47	2,98	3,93	5,71
Воздух	4,54	5,98	5,09	6,69	6,98
Кислород	4,81	6,33	5,40	7,10	6,26
Углекислый	2,95	3,88	3,34	4,40	8,61

Примечание. В обозначении средней длины свободного пробега L_{273}^{100} значения $p = 100$ Па и $T = 273$ К.

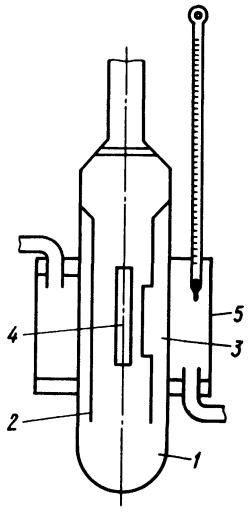


Рис. 45. Схема радиометрического манометра

Необходимым условием для возникновения эффекта является следующее: длина свободного пробега молекул газовой среды должна быть больше расстояния между параллельными поверхностями пластин, помещенными в эту среду. Длина свободного пробега молекул увеличивается с понижением давления и повышением температуры.

Тепловое поле нагревает пластины. Силовое поле направлено к поверхности менее нагретой пластины. Движение происходит по направлению действия силы.

Характеристики некоторых газов, которые могут быть использованы в качестве среды, приведены в табл. 15.

ФЭ применяется в вакуумной технике для обнаружения низких давлений, для измерения давления остаточных газов в лампах накаливания. На нем основано действие радиометра Крукса и радиометрических манометров (рис. 45). В стеклянную трубку *1* манометра диаметром 1,4 мм впаяна узкая трубка *2*, в которой вырезано прямоугольное отверстие шириной 4,1 мм и длиной 2,95 мм. Перед этим отверстием на нити подвешена слюдяная пластинка *4*. Внешняя водяная рубашка *5* служит для обогрева трубки *1*. При повышении температуры воды слюдяная пластинка *4* отталкивается «горячими» молекулами, проходящими через отверстие *3*. Отклонение пластины может быть определено с помощью микроскопа.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [240, 270], а о применении эффекта — в работе [238].

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ ТРЕНИИ

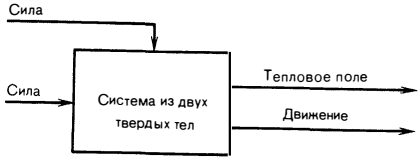


Рис. 46. Структурная схема температурного эффекта при трении

Эффект заключается в том, что при относительном движении твердых тел, имеющих контакт, происходит непрерывное превращение механической энергии поступательного движения в тепловую. Механическая энергия упругих деформаций вследствие внутреннего трения преобразуется в беспорядочное движение микроскопических частиц поверхностного слоя.

Теплота распространяется в поверхностном слое трущейся пары (от пятен контакта) в глубь контактирующих тел в виде температурных волн, амплитуда которых с увеличением глубины уменьшается. Чем выше скорость скольжения, тем на меньшую глубину распространяются температурные волны. Вместе с тем при возрастании шага неровностей на трущейся поверхности глубина распространения температурных волн в поверхностном слое увеличивается.

Сложность расчета температурного поля обусловливается теплоотдачей в окружающую среду с боковых стенок и трудностью определения граничных условий. В общем случае температурное поле может быть охарактеризовано графиком (рис. 47), где θ_f — температура трения (возникает в зоне трения); $\theta_{об}$ — объемная температура (возникает ниже зоны деформаций); $\theta_к$ — контактная температура (возникает в точках контакта); θ_s — поверхностная температура (возникает на

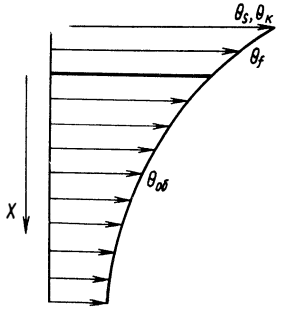


Рис. 47. График температурного поля

поверхности в точках, где нет контакта).

Поверхностная и контактная температуры объединены общим термином «граничная температура».

Среднюю температуру нагрева поверхностного слоя при трении можно оценить по уравнению

$$\theta_\alpha = \frac{\delta f K_\sigma V}{I\left(\lambda m + k_n \rho c \cdot 2{,}6 \frac{\sqrt{a}}{\lambda_д}\sqrt{V}\right)},$$

где δ — коэффициент распределения теплоты между трущимися телами;

16. Свойства фрикционных материалов

Материал	Твёрдость НВ	$\sigma_в$, МПа	f
6КФ-58	18	44,3	0,35—0,4
6КФ-59	17	52,1	0,35—0,4
6КХ-15	21	31,8	0,4
6КХ-4Б	22	14,8	0,35
Ребинакс А	48	25,1	0,3—0,35
ЭМ-2	3,5	11,9	0,4—0,45

f — коэффициент трения; K_σ — давление контакта; V — скорость скольжения; I — механический эквивалент теплоты; λ — теплопроводность; $m = \sqrt{\alpha U/(\lambda s_c)}$ (α — коэффициент теплоотдачи поверхности, U — периметр сечения трущегося тела, s_c — площадь сечения трущегося тела); k_n — коэффициент пропорциональности, определяемый опытным путем; ρ — плотность материала; c — удельная теплоемкость; a — коэффициент температуропроводности; $\lambda_д$ — длина волны неровностей на трущейся поверхности.

Средняя температура в поверхностном слое зависит от физических параметров материала трущихся тел,

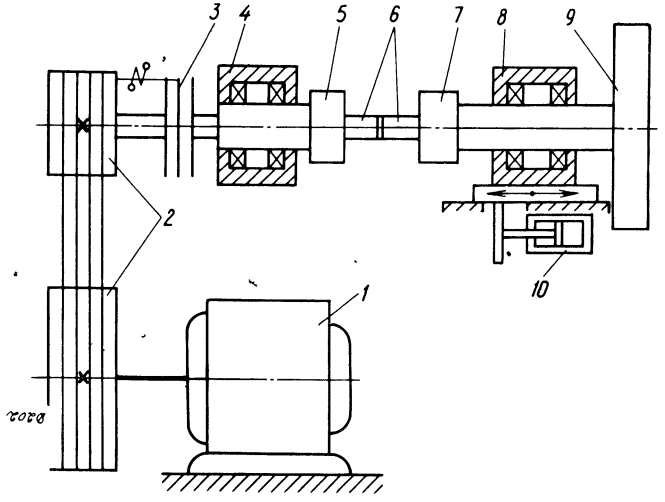


Рис. 48. Схема двушпиндельной машины:

1 — приводной двигатель; *2* — ременная передача; *3* — муфта сцепления; *4*, *8* — подшипниковые узлы; *5*, *7* — зажимные устройства; *6* — свариваемые детали; *9* — маховик; *10* — цилиндр силового прибора

а также от геометрических размеров трущейся поверхности и условий ее нагружения. С увеличением площади трения температура нагрева поверхностного слоя снижается.

При всех прочих равных внешних условиях температура поверхности при трении зависит от интенсивности теплоотвода λm из массы поверхностного слоя в глубь тела и интенсивности рассеяния тепловой энергии непосредственно через поверхность трения $k_n \rho c \cdot 2{,}6 \sqrt{\frac{a}{\lambda_д}}$. Чем больше эти слагаемые, тем ниже температура поверхности трения.

Температура поверхностного слоя прямо пропорциональна давлению $K\sigma$ и связана сложной зависимостью со скоростью скольжения V. С увеличением скорости V возрастает температура микрообъема поверхностного слоя, но вместе с этим интенсивность рассеяния тепловой энергии непосредственно через поверхность трения возрастает пропорционально $\sqrt{V}$, что нарушает линейную зависимость возрастания температуры поверхности трения от увеличения скорости скольжения.

Условием проявления эффекта является наличие контакта между двумя поверхностями и их взаимное перемещение.

Температурный градиент возникает на поверхностях контактирующих тел. Для повышения эффективности отвода теплоты во многие известные композиционные материалы, используемые для изготовления трущихся элементов, вводится металлическая стружка. Фрикционные материалы, наиболее широко используемые в тормозах, приведены в табл. 16.

Температурный эффект трения проявляется во фрикционных узлах (муфты сцепления автомобильных, железнодорожных и авиационных тормозов). Для сохранения стабильного коэффициента трения необходимо обеспечить интенсивный отвод теплоты от поверхности трения, т. е. необходимо применить материал с хорошей теплопроводностью.

Этот ФЭ в технике освоен хорошо, например при сварке, формовке, наплавке деталей трением. Он проявляется везде, где происходит взаимное перемещение двух тел или более.

Машина для сварки трением приведена на рис. 48. Подлежащие сварке заготовки *6* закреплены в зажимах *5* и *7*, которые могут свободно вращаться. Один из зажимов приводится во вращение с помощью двигателя *1*, а другой снабжен маховиком *9*. В начале процесса сварки вторая деталь остается неподвижной из-за инерционности маховика, в то время как первой сообщена уже полная угловая скорость приводного двигателя. Постепенно силами трения и вторая деталь увлекается во вращение. Процесс сварки продолжается до тех пор, пока относительная скорость обеих заготовок не станет равной нулю.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [134, 135], а о применении эффекта — в работах [133, 221, 249, 258].

ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫЙ ЭФФЕКТ

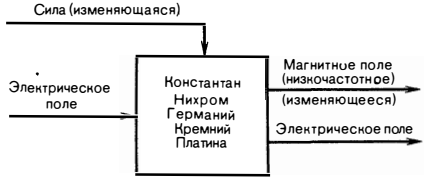


Рис. 49. Структурная схема тензорезистивного эффекта

Тензорезистивный эффект — изменение электрического сопротивления твердого проводника (металл, полупроводник) в результате действия нагрузки, создающей деформацию. Эффект объясняется изменением межатомных расстояний при деформации, что влечет за собой изменение структуры энергетических зон в кристалле. Последнее обусловливает изменение концентрации носителей тока, их эффективной массы, перераспределе-

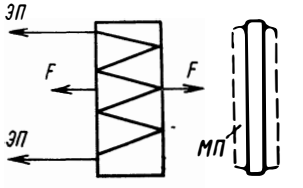


Рис. 50. Виток

17. Тензочувствительность некоторых материалов

Материал	Состав	Тензочувствительность	Удельное электросопротивление·10^6, Ом·м	Рабочая температура, К
Константан	60% Cu, 40% Ni	2	0,44—0,52	673
Нихром	80% Ni, 20% Cr	2,1—2,3	1,0—1,1	1273
Платина	100% Pt	4,1—6,1	0,09—0,11	1573
Германий	*n*-типа	—100	80	—
	p-типа	135	2	—
Кремний	*n*-типа	—133	35	

ние их между энергетическими максимумами в зоне проводимости и минимумами в валентной зоне. Кроме того, деформация влияет на процессы рассеяния носителей (появление новых дефектов, изменение их фононного спектра).

Величиной, численно характеризующей тензорезистивный эффект, является тензочувствительность, которая представляет собой отношение относительного изменения удельного сопротивления ρ_i к относительной деформации l в данном направлении:

$$m = (\Delta\rho_i/\rho_i) : (\Delta l/l).$$

Тензочувствительность полупроводников в десятки раз превосходит тензочувствительность металлов. В полупроводниках величина m зависит от кристаллографического направления, удельного сопротивления и типа электропроводности: в полупроводниках *n*-типа тензочувствительность отрицательная, а в полупроводниках *p*-типа — положительная.

Проявление тензорезистивного эффекта существенно зависит от вида деформации и температуры. При деформации всестороннего сжатия симметрия кристалла не меняется. Мало меняется также подвижность носителей заряда. Поэтому эффект проявляется слабо.

Температурная зависимость тензорезистивного эффекта объясняется влиянием температуры на сопротивление материала. Для уменьшения этого влияния приборы, работающие на тензорезистивном эффекте, обычно изготовляют из примесных полупроводников.

ФЭ проявляется на телах различной геометрической формы. В технике обычно используется тензочувствительный проводник, прикрепленный к механически нагружаемой детали (рис. 50, 51). Электрическое поле прикладывается к концам проводника, а нагрузка, деформирующая деталь, деформирует и проводник.

Изменение электрического сопротивления проводника обнаруживается по изменению магнитного поля, проявляющегося в пространстве вокруг него.

В табл. 17 приведена тензочувствительность некоторых материалов.

Тензорезистивный эффект используется для измерения деформаций, давления, силы, смещения, ускорения, в качестве микрофонов и т. д. На этом эффекте основана работа тензодатчиков.

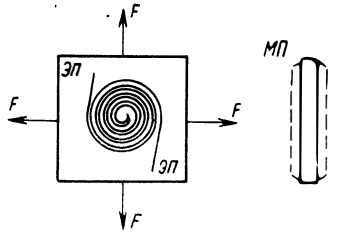


Рис. 51. Пленка из фольги

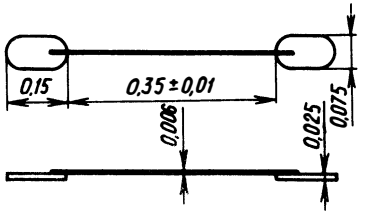


Рис. 52. Тензорезистор

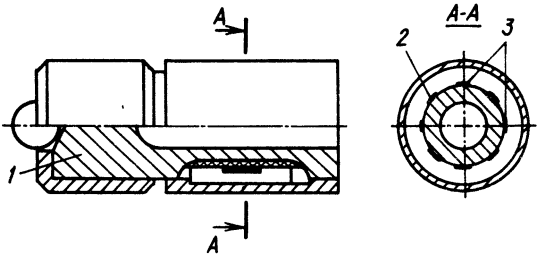


Рис. 53. Датчик силы стержневого типа

Тензорезистор из монокристалла полупроводника (рис. 52) представляет собой стержень с металлическими лепестками, присоединенными к его концам. Лепестки создают электрический контакт со стержнем и используются для присоединения тензорезистора к образцу.

Действие датчика силы стержневого типа (рис. 53) основано на изменении омического сопротивления наклеенных тензоэлементов при деформации упругого элемента под действием измеряемой силы. Сила воспринимается полым стальным стержнем *1* со сферической опорой, на которой наклеены восемь тензоэлементов. Тензоэлементы *2* являются рабочими, тензоэлементы *3*, наклеенные перпендикулярно к направлению действия силы, необходимы для температурной компенсации. Тензоэлементы включены в две независимые мостовые схемы.

Катетер для измерения давления крови (рис. 54) конструктивно выполнен таким, что может находиться внутри кровеносных сосудов или сердца. Давление в инструменте прикладывается через диафрагму *9* к консольно закрепленному полупроводниковому тензодатчику *3*, фиксирующему изменение удельного сопротивления.

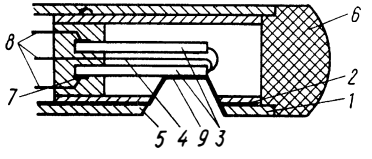


Рис. 54. Катетер для измерения давления крови:

1 — катетер; *2* — металлическая цилиндрическая ячейка; *3* — кремниевые тензодатчики; *4* — изолирующий клей; *5* — металлизированная прослойка; *6* — пробка из пластмассы; *7* — электроды; *8* — токоведущие проводники; *9* — диафрагма

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [28, 270], а о применении эффекта — в работах [44, 61, 201].

ФОТОУПРУГИЙ ЭФФЕКТ

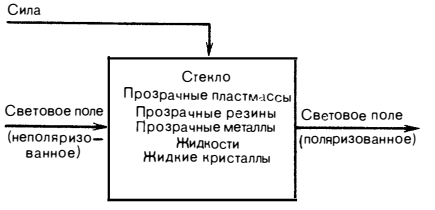


Рис. 55 Структурная схема фотоупругого эффекта

Фотоупругость — возникновение оптической анизотропии в первоначально изотропных средах под действием механических напряжений.

Фотоупругость является следствием зависимости диэлектрической проницаемости вещества от деформации и проявляется в виде двойного лучепреломления (раздвоение светового луча; рис. 56) и дихроизма (появление окраски анизотропного поля в белом свете), возникающих под действием механических нагрузок. Показатели преломления n_0 (обыкновенного) и n_e (необыкновенного луча) вдоль направления MN и перпендикулярно к нему максимально отличаются друг от друга. Разность $n_0 - n_e$, являющаяся мерой анизотропии, пропорциональна величине напряжения

$$\Delta n = kF,$$

где Δn — величина двойного лучепреломления; F — сила; k — упругооптическая постоянная, зависящая от свойств материала; для стекол $k = 10^{-11} \div 10^{-12}$ м²/Н.

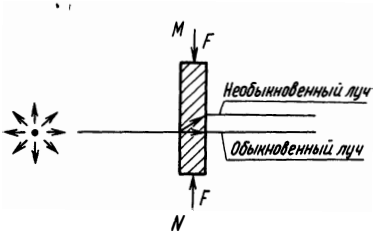


Рис. 56. Двойное лучепреломление светового луча под действием механической нагрузки

Фотоупругость обусловлена деформацией электронных оболочек атомов и молекул и ориентацией оптически анизотропных молекул либо их частей, а в полимерах — раскручиванием и ориентацией полимерных цепей.

Необходимыми условиями проявления фотоупругости в твердых телах является прозрачность тела, его освещенность и приложение к нему механических нагрузок.

Жидкости могут обнаруживать оптическую анизотропию, если в них присутствуют молекулы определенных видов, в частности длинные цепочечные молекулы. Эти молекулы стремятся расположиться так, чтобы их оси имели одинаковое направление. В неподвижных жидкостях этому препятствует беспорядочное тепловое движение молекул. Несмотря на это, в жидкостях могут образовываться некоторые области, обладающие кристаллическими свойствами. Такие области обычно неустойчивы, за исключением случаев, когда жидкость образует тонкий слой, толщина которого соизмерима с длиной цепочки. В таких тонких пленках могут возникать стабильные жидкие кристаллы.

Анизотропия обнаруживается также во всем объеме жидкости при ее ламинарном течении. Если соседние слои жидкости имеют разные скорости, то длинные цепочечные молекулы

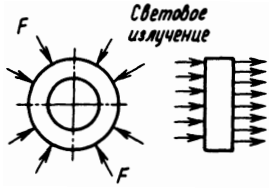


Рис. 58. Кольцо

стремятся ориентироваться перпендикулярно к градиенту скорости, что приводит к появлению анизотропии.

Эффект фотоупругости проявляется на телах любой формы (рис. 57—60). Геометрическая характеристика пространства приложения воздействия — поверхность тела, а результата воздействия — объем тела, поверхность тела. Оптико-механические характеристики некоторых материалов приведены в табл. 18.

Явление фотоупругости можно использовать для исследования потока жидкости при наличии на его пути препятствий. Измерения двойного лучепреломления позволяют определить направление и величину градиента скорости в любой точке. Области турбулентности характеризуются отсутствием двойного лучепреломления.

Регистрация искусственной анизотропии является чувствительным методом наблюдения напряжений, возникающих в прозрачных телах, например в стеклянных изделиях, охлаждение которых проводилось недостаточно медленно. При необходимости исследования непрозрачных тел применяют метод изучения напряжений на прозрачных моделях или метод фотоупругих покрытий на поверхности исследуемого элемента. Модель подвергают соответствующей нагрузке, и по картине между скрещенными поляризаторами изучают

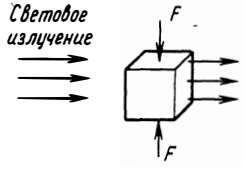


Рис. 57. Куб

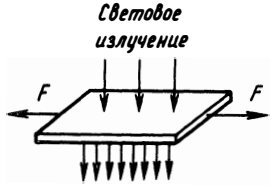


Рис. 59. Лента

18. Оптико-механические характеристики материалов

Материал	Стеклообразное состояние		Высокоэластичное состояние	
	$C_\sigma \cdot 10^{-12}$, м²/Н	$E \cdot 10^{-8}$, МПа	$C_\sigma \cdot 10^{-12}$ м²/Н	$E \cdot 10^{-6}$, Па
Стекло	2—3	600	—	—
Целлулоид	8—14	14—27	—	—
Плексиглас	5	32	—	—
Полихлорстилор	25	31	2000	10—160
Полиэфирные смолы:				
фостерит	—	—	700	80—200
МИХМ—ИМАШ	—	—	1500	50
Прозрачные резины	—	—	2350	40
Глифталевые смолы:				
ВТ61-893	45,5	40	1000	70—80
«Глифтамал»	36—42	45—46	975—1000	80
Прозрачные металлы (хлористое серебро)	—	—	2350	40

возникающие напряжения, их распределение и т. д.

При исследовании линейных упругих задач на прозрачных моделях необходимо использовать достаточно жесткие материалы, с тем чтобы исключить искажение формы модели под нагрузкой. При исследовании методом фотоупругих покрытий жесткость оптически чувствительных материалов должна быть достаточно малой, с тем чтобы покрытие не оказывало влияния на работу исследуемой конструкции. Для оценки жесткости и оптической чувствительности материала используется коэффициент качества K_ε, который характеризует оптическую чувствительность материалов по деформациям:

$$K_\varepsilon = EC_\sigma,$$

где E — модуль упругости; C_σ — оптический коэффициент напряжений, или фотоупругая постоянная.

Из фотоупругих материалов изготовляют датчики, используемые для измерения деформаций конструкций. Датчик может быть выполнен в виде полоски с постоянным или переменным сечением (рис. 61) или в виде круглой пластины с центральным отверстием. Наружный диаметр кольца в 4—5 раз превышает диаметр внутреннего отверстия. Такие датчики наклеивают на конструкцию только концами, а кольцевые — вдоль наружного контура. Оптическая разность хода в таком датчике зависит только от взаимного смещения его концов, поэтому он называется фотоупругим датчиком перемещений.

Датчики деформаций приклеивают к исследуемой конструкции всей нижней поверхностью. Датчики предназначены для измерения в зонах высоких градиентов деформаций. Выполняют их также в виде узких полосок, квадратных или круглых пластин. Оптическая разность хода в них измеряется либо при просвечивании с отражением от исследуемой поверхности, либо при просвечивании вдоль исследуемой поверхности (рис. 62).

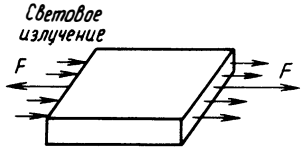


Рис. 60. Параллелепипед

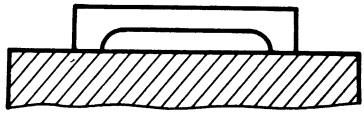


Рис. 61. Фотоупругий датчик перемещения

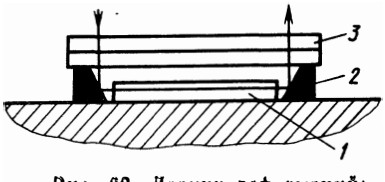


Рис. 62. Датчик деформаций:
1 — фотоупругий датчик; *2* — отражающее зеркало; *3* — полароидная пленка

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [76, 153], а о применении эффекта — в работе [4].

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ ДЛЯ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ



Рис. 63. Структурная схема ФЭ электромагнитной индукции

Электромагнитная индукция — возникновение электродвижущей силы (ЭДС индукции) в проводящем контуре, движущемся в постоянном магнитном поле.

Согласно закону Фарадея ЭДС индукции E_i в контуре прямо пропорциональна скорости изменения во времени τ магнитного потока Φ, проходящего через поверхность S, ограниченную контуром:

$$E_i = -k \frac{\Delta\Phi}{\Delta\tau}.$$

Коэффициент пропорциональности k в системе СИ равен 1. Знак минус определяет направление индуцированного тока. Индуцированный ток в контуре направлен так, что создаваемый им поток магнитной индукции через поверхность, ограниченную этим контуром, стремится препятствовать тому изменению потока Φ, которое вызывает появление индукционного тока (рис. 64).

Если проводник движется с постоянной скоростью V, то за время $\Delta\tau$

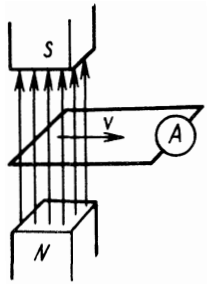


Рис. 64. Схема эффекта электромагнитной индукции для постоянного магнитного поля

магнитный поток изменится на $\Delta\Phi = Bl\,\Delta S$.

Тогда при $k = 1$ имеем:

$$E_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta\tau} = -\frac{Bl\,\Delta S}{\Delta\tau} = -BlV,$$

где B — магнитная индукция; l — длина проводника; V — скорость движения проводника.

В постоянном магнитном поле ЭДС индукции возникает лишь в том случае, когда магнитный поток через ограниченную контуром поверхность изменяется во времени, т. е. контур при движении должен пересекать линии магнитной индукции (при движении вдоль линий $\Delta\Phi = 0$ ЭДС не возникает). ФЭ проявляется в замкнутом проводнике любой геометрической формы. Направление линий магнитного поля перпендикулярно к плоскости, в которой расположен контур проводника.

Сила приложена к проводнику; направление силы перпендикулярно к линиям магнитного поля.

Потенциал электрического поля приложен к концам проводника.

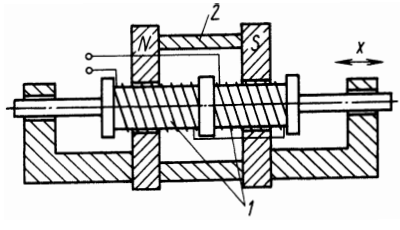


Рис. 65. Индукционный датчик линейной скорости

Электромагнитная индукция лежит в основе работы генераторов, в которых механическая энергия преобразуется в электрическую. Магнитная индукция используется в датчиках линейной скорости и угловых перемещений.

Действие индукционного датчика линейной скорости (рис. 65) основано на преобразовании скорости линейного перемещения в ЭДС, генерируемую в обмотке *1* при пересечении ею (в направлении *X*) поля постоянного магнита *2*.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [107, 270], а о применении эффекта — в работах [2, 206, 287].

ГЛАВА 5

Описания физических эффектов, преобразующих немеханические воздействия в механические результаты воздействий

АКУСТИЧЕСКАЯ КАВИТАЦИЯ

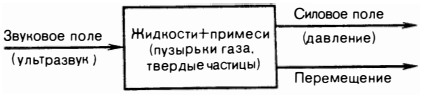


Рис. 1. Структурная схема ФЭ акустической кавитации

Акустическая кавитация — образование в жидкости пульсирующих пузырьков (полостей) при прохождении звуковой волны большой интенсивности.

Рост и сокращение пузырьков происходят с частотой, равной частоте изменения давления, т. е. с частотой распространяющейся звуковой волны. Пузырьки возникают и растут во время периодов разрежения. Давление в положительной фазе может привести к полному исчезновению пузырьков и пустот (захлопыванию), причем давление в пузырьках перед захлопыванием может быть очень большим. Этот процесс порождает в жидкостях сильные гидравлические возмущения, интенсивное излучение акустических волн и вызывает разрушение поверхностей твердых тел, граничащих с кавитирующей жидкостью.

Кавитационные пузырьки образуются в тех местах, где давление в жидкостях становится ниже некоторого критического, соответствующего порогу кавитации. Напряжение растяжения, необходимое для разрыва жидкости, зависит от количества растворенных в ней газов и увеличивается при обезгаживании. Низкая прочность реальных жидкостей связана с наличием в них зародышей кавитации — микроскопических газовых пузырьков, твердых частиц, газовых включений в трещинах твердых частиц и т. д.

Процесс расширения пузырьков-зародышей обусловлен: давлением газа и пара в пузырьках, превышающим давление в окружающей жидкости; диффузией газа в пузырьки из жидкости; испарением жидкости и увеличением массы пара в пузырьке, коагуляцией зародышей. Первый из перечисленных механизмов играет основную роль в образовании каверн. Микроскопический пузырек, попадая в область разрежения, сильно расширяется в результате того, что давление p содержащихся в нем пара и газа оказывается больше давления в жидкости. Скорость расширения пузырька определяется импульсом, который получают окружающие слои жидкости под действием давления p, и приближенно выражается формулой

$$u \approx \sqrt{p/\rho},$$

где ρ — плотность жидкости.

При захлопывании пузырьков в кавитационной области возникают мощные гидродинамические возмущения в виде сильных импульсов сжатия (микроударных волн) и микропотоков, порождаемых пульсирующими пузырьками. В табл. 1 приведены значения скорости сокращения пузырьков и возникающего давления в жидкости в зависимости от изменения размеров пузырька R_0/R, где R_0 — начальный радиус пузырька; R — радиус в рассматриваемый момент времени.

Захлопывание пузырьков сопровождается также локальным разогревом вещества и выделением газа.

Кавитация возникает в результате потери устойчивости зародышей, попадающих в область пониженного

давления в звуковой волне, и быстрого их роста. Условие равновесия газового пузырька определяется из соотношения

$$p = p_0 + \frac{2\alpha}{R},$$

где p — давление газа в пузырьке; p_0 — гидростатическое давление; R — радиус пузырька; α — коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Количественно момент возникновения кавитации и степень ее развития характеризуют числом кавитации

$$\varkappa = \frac{p_0 - p_н}{p_а},$$

где $p_н$ — давление насыщенного пара; $p_а$ — амплитуда звукового давления.

Момент возникновения кавитации характеризуется критическим числом кавитации $\varkappa_к$, которому соответствует критическое звуковое давление $p_к$.

Условием возникновения кавитации является облучение жидкости ультразвуком определенной интенсивности, а также наличием примесей (пузырьков газа, твердых частиц).

Жидкости и твердые тела, помещенные в жидкость, могут иметь любую геометрическую форму. Звуковое поле действует на поверхность жидкости. Силовое поле (давление) проявляется в объеме жидкости около кавитационных пузырьков. Звуковое давление, при котором возникает кавитация в жидкостях, приведено в табл. 2.

Вещество в кавитационной области подвергается интенсивным воздействиям, что проявляется в разрушении поверхности твердых тел, находящихся в области кавитации. Это используют для удаления загрязнений типа окалины. Воздействием на вещество в зоне кавитации пользуются для получения

1. Скорости сокращения пузырьков и возникающее давление в жидкости

R_0/R	3	5	10	20	30
V, м/с	40	90	270	700	1350
p, МПа	0,4	2,0	15,0	125,0	450,0

2. Звуковое давление, при котором возникает кавитация

Жидкость	Плотность ρ, кг/м³	Скорость звука c, км/с	Давление $p_к \cdot 10^{-5}$, Па
Касторовое масло	969	1,477	3,9
Оливковое масло	912	1,431	3,61
Льняное масло	921	1,468	2,36
Китовый жир	880	1,44	2,9
Диметилфталат	1176	1,463	3,2
Керосин	810	1,324	2,0
Четыреххлористый углерод	1595	0,926	1,75

мелкодисперсных эмульсий (эмульгирование) и смесей (диспергирование), для возбуждения и ускорения химических реакций, для уничтожения вредных микроорганизмов, экстрагирования из животных и растительных клеток ферментов и т. д.

В установке (рис. 2) с регулируемым распределением областей кавитации для очистки поверхности деталей воздух через систему трубок *1* подается в рабочую камеру *2*, в которой поме-

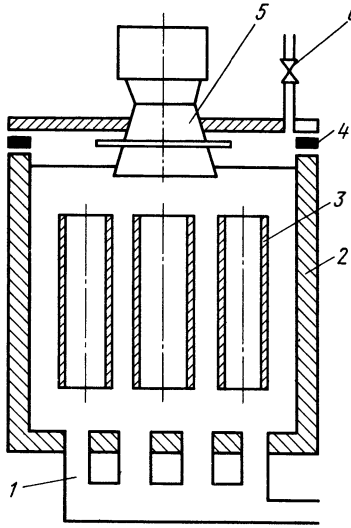


Рис. 2 Установка для очистки поверхности деталей

щены очищаемые изделия *3*. Камера герметично закрыта крышкой *4*, на которой укреплен преобразователь с излучателем *5*. На крышке имеется вентиль *6*, позволяющий регулировать расход воздуха и давление в камере. При подаче воздуха в камеру возникает развитая кавитационная область, которая постепенно перемещается вверх, осуществляя последовательную очистку поверхности деталей.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [223, 254, 270], а о применении эффекта — в работах [119, 254].

ЭФФЕКТ АМПЕРА

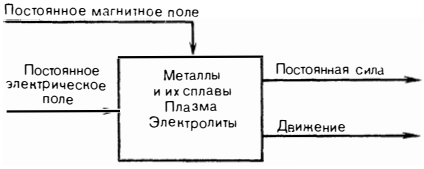


Рис. 3. Структурная схема ФЭ Ампера

Закон Ампера определяет механическую силу, F, с которой магнитное поле, характеризуемое вектором магнитной индукции B, действует на элементарный отрезок проводника dl, по которому течет ток I.

Механическая сила F, действующая на элемент контура с током во внешнем поле B, может быть измерена непосредственно.

В схеме (рис. 4) батарея ε_0 создает ток I в контуре, одна из сторон которого длиною l сделана подвижной. Если внести этот контур во внешнее магнитное поле B, то на подвижную сторону будет действовать механическая сила F, которая может быть выражена через вектор магнитной индукции $\overline{B}$.

Если проводником является плазма, рассматриваемая как сплошная среда, то ее ускорение будет обусловлено перепадом полного (ионного и электронного) давления $p = p_i + p_l$ и действием силы Ампера F_A, возникающей при взаимодействии токов, текущих в плазме, с магнитным полем: $F_A \approx \approx [jB]$, где j — плотность тока в плазме.

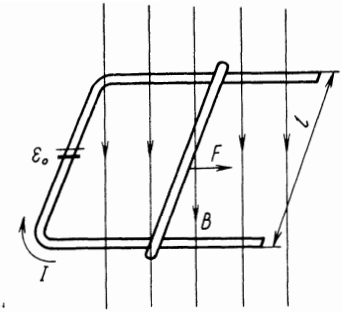


Рис. 4. Схема эффекта (закона) Ампера

Зависимость результата от воздействия имеет следующий вид:

$$F = kIdl\overline{B}\sin\varphi,$$

где k — коэффициент, зависящий от выбора системы единиц; φ — угол между направлениями dl и $\overline{B}$.

ФЭ проявляется на проводниках различной геометрической формы (рис. 5, 6).

Пространство приложения воздействия магнитного поля — это пространство вокруг проводника. Вектор направления магнитного поля перпендикулярен к оси проводника с током.

Результатом воздействия является сила, действующая на проводник с током и направленная перпендикулярно к току и линиям магнитной индукции.

В табл. 3 приведены значения удельного электросопротивления ρ некоторых проводников (при 293 К).

Эффект широко используется в электродвигателях, в электрореактивных ракетных двигателях (получаются стационарные потоки плазмы со скоростями $\sim 10^5$ м/с).

Высокочувствительный электрометр (рис. 7) содержит две системы электродов, расположенных в электролите.

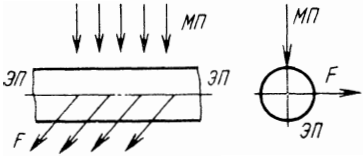


Рис. 5. Провод

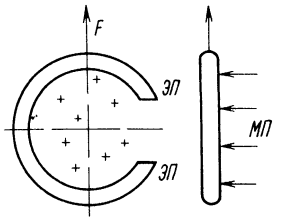


Рис. 6. Виток

3. Удельное электросопротивление некоторых проводников

Проводник	$\rho \cdot 10^8$, Ом·м
Алюминий	2,7
Вольфрам	5,5
Железо чистое	10
Константан	50
Манганин	43
Медь	1,72
Нейзильбер	33
Нихром	112
Платина	10,7
Серебро	1,6

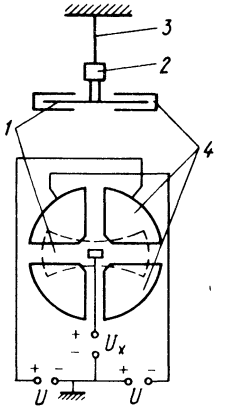


Рис. 7. Схема электрометра:
1 **— подвижный электрод;** *2* **— зеркало; — подвес;** *4* **— неподвижные электроды**

Подвижный электрод *1* находится внутри четырех неподвижных электродов (квадрантов) *4* Отклонение подвижной части пропорционально произведению измеряемого напряжения U_x и вспомогательного напряжения U.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [93, 193, 262], а о применении эффекта — в работах [63, 70, 198].

ЭФФЕКТ АРХИМЕДА

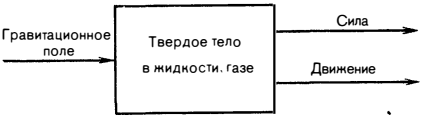


Рис. 8 Структурная схема ФЭ Архимеда

Закон Архимеда — закон статики жидкостей и газов, согласно которому на всякое тело, погруженное в жидкость (или газ), со стороны этой жидкости (или газа) действует выталкивающая сила, направленная по вертикали вверх и приложенная к центру тяжести вытесненного объема. Выталкивающую силу называют Архимедовой или гидростатической подъемной силой.

Давление, действующее на погруженное в жидкость тело, повышается в зависимости от увеличения глубины погружения. Поэтому давление жидкости на нижние элементы поверхности тела больше, чем на верхние. В результате сложения всех сил, действующих на каждый элемент поверхности, получается равнодействующая F_A, направленная по вертикали вверх (рис. 9). Если же тело плотно лежит на дне, то давление жидкости только сильнее прижимает его ко дну. Если сила тяжести тела меньше выталкивающей силы, то тело всплывает на поверхность жидкости до тех пор, пока сила тяжести вытесненной погруженной частью тела жидкости не станет равной силе тяжести тела. Если сила тяжести тела больше выталкивающей силы, то тело тонет; если же сила тяжести тела равна ей, тело плавает внутри жидкости.

Линия действия силы тяжести тела G проходит через центр тяжести K (центр водоизмещения) вытесненного объема

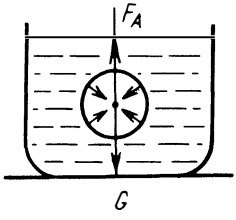


Рис. 9. Схема эффекта Архимеда

жидкости. В нормальном положении плавающего тела центр тяжести тела T и центр водоизмещения K размещены по одной вертикали, называемой осью плаванья (рис. 10).

Если внешние силы вызывают крен плавающего тела (рис. 11), то центр водоизмещения перемещается в точку K_1 и сила тяжести тела и Архимедова сила F_A образуют пару сил, которая стремится либо вернуть тело в исходное положение, либо увеличить крен. В первом случае плавающее тело обладает статической остойчивостью, во втором случае остойчивость отсутствует. Остойчивость тела зависит от взаимного расположения центра тяжести тела T и метацентра M (точки пересечения линии действия архимедовой силы при крене с осью плавания).

Зависимость результата от воздействия имеет следующий вид:

$$F_A = V\rho g \text{ или } F_A = V\gamma,$$

где F_A — подъемная (выталкивающая) сила; V — объем вытесненной телом жидкости; ρ — плотность жидкости; $g = 9{,}81$ м/с^2 — ускорение свободного падения, $\gamma = G/V$ — удельный вес.

Выталкивающая сила действует на тела любых геометрических форм. В технике наиболее распространены тела цилиндрической и сферической форм, тела с развитой поверхностью,

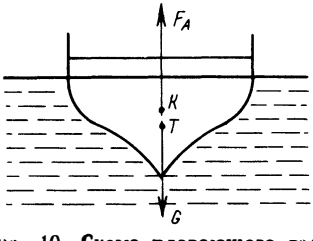


Рис. 10. Схема плавающего тела

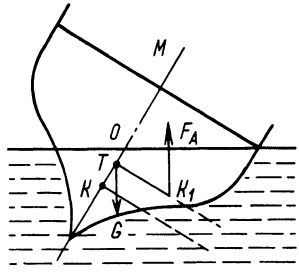


Рис. 11. Крен плавающего тела

полые тела в форме шара, прямоугольного параллелепипеда, цилиндра.

Гравитационная сила приложена к центру масс погруженного в жидкость тела и направлена перпендикулярно к поверхности жидкости.

Подъемная сила действует на тело со стороны жидкости, направлена по вертикали вверх, приложена к центру тяжести вытесненного объема жидкости. Тело движется в направлении, перпендикулярном к поверхности жидкости.

Плотность некоторых материалов приведена в табл. 4.

Закон Архимеда используется в воздухоплавании, судоходстве, приборостроении, технологических процессах и других отраслях.

На законе Архимеда основан принцип действия ареометров постоянной

4. Плотность материалов

Материал	ρ, кг/дм³
Дерево (дуб)	0,6—0,9
Пробка	0,22—0,26
Каучук:	
чистый	0,906
технический	0,911
мягкий вулканизированный с 20% серы	0,923
Вода	1,00
Алюминий:	
твердый	2,7
жидкий	2,382
Сталь:	
катаная	7,85—8,0
литая	7,5—7,92
Латунь	8,4—8,7

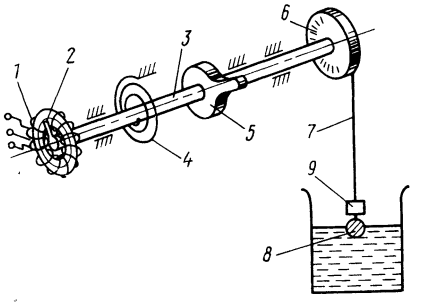


Рис. 12. Реостатный датчик

массы (дензиметров), шкалы которых проградуированы в единицах плотности.

Для измерения уровня жидкости применяют реостатный датчик (реостатный уровнемер). Действие такого датчика (рис. 12) основано на преобразовании линейного перемещения троса в изменение омического сопротивления реостата. Поплавок *8*, воспринимающий измеряемый уровень через трос *7*, передает шкиву *6* момент, вызывающий поворот вала *3*. Этот поворот передается движку *2*, который скользит по поверхности реостатного преобразователя *1*, в результате чего сопротивление реостата изменяется. Реостат включается в цепь измерительного прибора. Пружина *4* является возвратной; стопорный кулачок *5* предохраняет движок реостата от поворота. Груз *9* осуществляет натяг троса; его масса в несколько раз больше массы поплавка, и масса последнего формально отнесена к массе груза. Груз жестко связан с поплавком.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [146, 270], а о применении эффекта — в работах [2, 270].

ВСЕМИРНОЕ ТЯГОТЕНИЕ

Эффект (закон) всемирного тяготения проявляется во взаимном притяжении

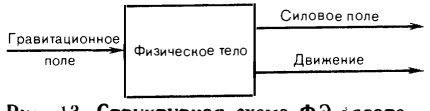


Рис 13. Структурная схема ФЭ тяготения

материальных тел друг к другу. Тяготение (гравитационное взаимодействие) пропорционально массе тел и становится ощутимым, когда массы достаточно велики.

Закон был установлен Ньютоном и формулируется следующим образом. Сила, с которой два тела притягиваются друг к другу, пропорциональна массам этих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Взаимное тяготение двух тел можно истолковать как совокупность двух эффектов. Первый эффект состоит в том, что тело M создает в окружающем пространстве поле тяготения, напряженность которого $G = \gamma M/R^2$ зависит только от массы тела M и расстояния R, т. е. в каждой точке пространства однозначно определяется только положением и свойством притягивающего тела. Второй эффект заключается в том, что на тело массой m действует сила тяготения $F = mG$. Так как сила F есть вектор, направленный к центру притягивающего тела, то и напряженность поля G, отличающаяся от F только скалярным множителем m, всегда направлена к центру того тела, которое рассматриваем как притягивающее.

Таким образом, первый из рассматриваемых эффектов однозначно определяется положением и свойствами притягивающего тела, а второй эффект (при заданном поле тяготения) — положением и свойствами притягиваемого тела.

Зависимость результата от воздействия имеет следующий вид:

$$F = \gamma \frac{Mm}{R^2},$$

где γ — коэффициент пропорциональности, называемый гравитационной постоянной; в системе СИ $\gamma = 6{,}7 \times \times 10^{-11}$ м^3/(кг·с^2).

Представленная формула позволяет получить значение равных по величине сил F_{12} и F_{21}.

Этот закон можно применять лишь для тел, размеры которых во много раз меньше, чем расстояния между ними. Закон можно также применять для однородных сферических тел, даже если их размеры не малы по сравнению с расстоянием между ними. В этом

5. Плотность материалов

Материал	$\rho \cdot 10^3$, кг/м³
Свинец	11,342
Тантал	16,6
Вольфрам	18

случае под R понимают расстояние между центрами двух сфер.

Силы гравитации оказывают воздействие на тела любой геометрической формы. Однако наиболее часто используют тела с сосредоточенной массой (шар, тор, диск, кольцо и др.).

Сила (силовое поле) направлена вдоль прямой, проходящей через центры взаимодействующих тел. При наличии степени свободы вектор скорости движения тела также направлен вдоль той же прямой.

Структурные элементы объектов техники, функционирование которых основано на использовании гравитационного поля, выполняются, как правило, из материалов с высокой плотностью (вольфрам, свинец, тантал и др., табл. 5).

Ускорение свободного падения на поверхности планет Солнечной системы приведено в табл. 6.

Свойство притяжения тел использовано при создании прибора для измерения силы тяжести, который назван маятниковым прибором. Основная часть — маятник, свободно колеблющийся в штативе. Определяя период T колебания маятника и измеряя его приведенную длину l, можно вычис-

6. Ускорение свободного падения

Планета	g, м/с²
Меркурий	3,60
Венера	8,50
Земля	9,80
Марс	3,76

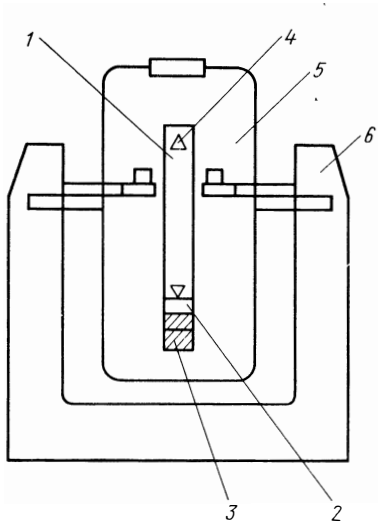


Рис. 14. Схема обратного маятника:

1 — кварцевый стержень маятника; *2* — опорные пластины; *3* — груз для уравновешивания периодов качания; *4* — стальная трехгранная опорная призма; *5* — вакуумная камера; *6* — бетонное основание

лить абсолютное значение ускорения g. Маятниковый прибор широко применяется при общей гравиметрической съемке. Массивный штатив имеет четыре горизонтальных агатовых площадки, на которые подвешивают четыре маятника (из латуни, инвара или кварца).

Маятники качаются, опираясь на ребро агатовых призм.

В магнитных приборах (рис. 14) для абсолютных определений применяют оборотные маятники, в которых взаимно параллельные оси качания, соответствующие одинаковым периодам колебаний, удалены друг от друга на расстояние приведенной длины маятника. Маятниковый прибор снабжен тремя оборотными маятниками равной массы, одинаковой конструкции. Колебания происходят в вакуумной камере. С помощью груза добиваются равенства периодов колебаний маятника на двух опорных пластинах.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работе [277], а о применении эффекта — в работе [269].

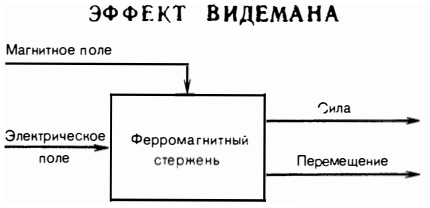


Рис. 15. **Структурная схема ФЭ Видемана**

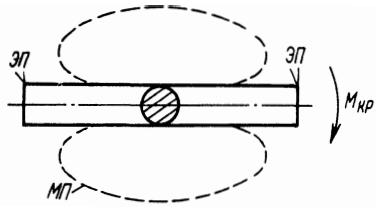


Рис. 16. Стержень

Эффект Видемана — закручивание ферромагнитного стержня, по которому течет электрический ток (создающий циркулярное магнитное поле), возникающее при намагничивании стержня вдоль его оси (рис. 16). Эффект обусловлен магнитострикцией. При скручивании ферромагнитного стержня в нем появляется винтовая составляющая повышенной магнитной проницаемости и, следовательно, в магнитном поле — винтовая составляющая потока, которую можно считать результатом суперпозиции продольного и кругового потоков. Стержень, помещенный в продольное магнитное поле, испытывает деформацию кручения.

Действующее значение ЭДС, возникающее под действием крутящего момента,

$$E = 4{,}4\chi B_м \frac{\lambda_s \mu}{B_s^2} \sigma \frac{l}{\pi R^2} M_{кр},$$

при условии $\dfrac{\pi B_s^2 R^2}{24\lambda_s \mu M_{кр}} \geqslant 1$;

здесь $B_м$ — индукция магнитного поля, создаваемая потоком, проходящим через стержень при отсутствии $M_{кр}$; χ — частота напряжения питания; μ — магнитная проницаемость; B_s — индукция насыщения; λ_s — максимальная магнитострикция материала стержня; l и R — соответственно длина и радиус стержня; $M_{кр}$ — крутящий момент; σ — предел прочности.

При частоте напряжения питания 10^3 Гц ЭДС может достигать нескольких десятков милливольт.

С ростом магнитного поля изменяется и магнитострикция. В слабых полях она незначительна. Поэтому

$$\lambda = al^2,$$

где λ — магнитострикция образца; a — постоянная; l — намагниченность.

Для проявления ФЭ магнитострикция не должна зависеть от изменения намагниченности на прямо противоположную, т. е. магнитострикция должна быть четной функцией намагниченности.

ФЭ проявляется на телах удлиненной формы (стержни, трубы и т. п.). Электрическое поле приложено к точкам поверхности ферромагнитного тела. Циркулярное магнитное поле проявляется в пространстве вокруг этого тела и намагничивает его вдоль оси. Пространство проявления результата воздействия — объем образца. Внешне проявляется в закручивании стержня.

Характеристики некоторых материалов, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 7.

ФЭ применяется в радиоэлектронной промышленности при изготовлении магнитоупругих датчиков для измерения больших усилий (нажатия прокатных валков) и деформаций в деталях конструкций. Основным их пре-

7. Характеристики магнитострикционных материалов

Материал	Магнитострикция при насыщении $\cdot 10^6$	Удельное электросопротивление $\cdot 10^6$, Ом·м	Плотность, кг/дм³	Прочность на разрыв, МПа
Никель	—35	0,07	8,9	790
Сплав К-65	+90	0,08	8,25	620
Сплав Ю-10 текстурованный	+70	1	—	120
Перминдюр К49Ф2	+70	0,26	8,08	450

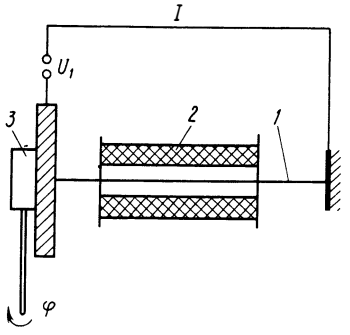


Рис. 17. Схема датчика момента, основанного на эффекте Видемана:

***1* — ферромагнитная проволока; *2* — вторичная обмотка; *3* — конструкция, к которой приложен момент**

имуществом является большая выходная мощность. Это объясняется тем, что в магнитоупругом датчике все тело упругого элемента, воспринимающего измеряемое усилие, является активным.

Основным элементом датчика момента (рис. 17) является цилиндрическое ферромагнитное тело *1*, выполненное в виде проволоки (или трубки), намагничиваемое протекающим через него в продольном направлении током. Если магнитное поле расположено в рабочем теле по кольцевым концентрическим линиям, то деформация не происходит. При нарушении симметрии магнитной проводимости вдоль оси тело скручивается, и в обмотке *2* наводится ЭДС.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [15, 34], а о применении эффекта — в работах [2, 116].

ВЫНУЖДЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ

Вынужденная конвекция — перенос теплоты в жидкостях, жидких металлах, газах или сыпучих средах потоками вещества среды, перемещаемыми внешними воздействиями.

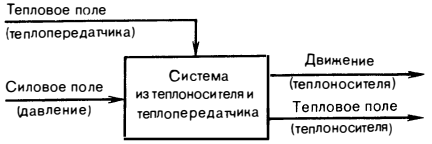


Рис. 18. Структурная схема ФЭ конвекции

Вынужденное движение теплоносителя происходит под действием внешних поверхностных сил. Разность давлений, под действием которой перемещается теплоноситель, создается с помощью насосов, эжекторов, мешалок. Однородное поле массовых сил тоже может служить источником вынужденного течения жидкости (например, вытеснение жидкости из вертикального канала).

Процесс переноса теплоты при вынужденной конвекции осуществляется одновременно действием теплопроводности и конвекции.

В общем случае наряду с вынужденным движением теплоносителя может развиваться и свободное. Относительное влияние свободной (естественной) конвекции тем больше, чем больше разность температур в отдельных точках жидкости и чем меньше скорость вынужденного движения.

Коэффициент теплоотдачи можно определить как количество теплоты, переданное в единицу времени через единицу поверхности при разности температур между поверхностью и жидкостью (теплоносителем) в 1 К:

$$\alpha = \frac{Q}{F\,(t_c - t_ж)}.$$

Процесс теплоотдачи является сложным процессом, а α является сложной функцией различных величин, характеризующих этот процесс. В общем случае коэффициент теплоотдачи является функцией формы Φ, размеров l, температуры поверхности нагрева t_c, скорости жидкости v, ее температуры, физических свойств жидкости, теплопроводности λ, теплоемкости C_p, плотности ρ, вязкости η, коэффициента температуропроводности a и других факторов:

$$\alpha = f\,(v,\ t_c,\ t_ж,\ \lambda,\ C_p,\ \eta,\ a,\ \Phi,\ l,\ldots).$$

Имеются два основных режима течения: ламинарный и турбулентный. При ламинарном режиме течение имеет спокойный, струйчатый характер; при турбулентном — движение неупорядоченное, вихревое.

В общем случае режим течения жидкости определяется не только

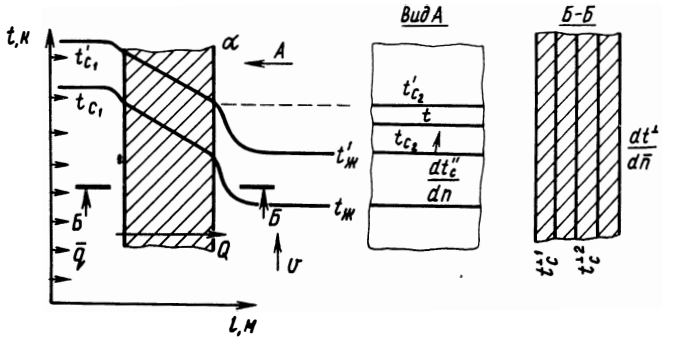


Рис. 19. Схема распределения температурных полей

одной скоростью, а особым безразмерным комплексом — числом Рейнольдса:

$$\mathrm{Re} = \frac{vl}{\nu},$$

где v — скорость жидкости; ν — коэффициент кинематической вязкости жидкости; l — характерный размер канала или обтекаемого тела.

Переход ламинарного режима в турбулентный происходит при критическом значении этого критерия $\mathrm{Re}_{кр}$. Например, при движении жидкости в трубах

$$\mathrm{Re}_{кр} = v_{кр} d/\nu \cong 2 \cdot 10^3.$$

На рис. 19 приведена схема распределения температурных полей при вынужденном обтекании плоской бесконечной стенки.

Зависимость результата от воздействия имеет вид:

$$Q = \alpha F (t_c - t_ж),$$

где α [Вт/(м² К)]—коэффициент теплоотдачи, характеризующий интенсивность конвективного теплообмена; Q — количество теплоты, переданной в единицу времени; F — поверхность теплообмена; $(t_c - t_ж)$ — разность температур стенки и жидкости.

Для вынужденной конвекции при одинаковых условиях теплоотдача увеличивается при росте вынужденной скорости v; возрастании теплопроводности λ теплоносителя; уменьшении вязкости ν; уменьшении плотности теплоносителя ρ; увеличении коэффициента объемного расширения β; увеличении качества завихрителей;

8. Характеристики некоторых теплоносителей

Вещество	T, К	ρ, кг/м³	λ, Вт/(м·К)	c_p, Дж/(кг·К)	$a \cdot 10^6$, м²/с	$\nu \cdot 10^6$, м²/с	Число Прандтля $\mathrm{Pr} \cdot 10^{-2}$
Ртуть	273	13 590	7,8	140	4,12	12,4	3,02
	373	13 350	9,08	137	4,97	9,4	1,89
Олово	513	6 985	30,50	255	17,1	27,3	1,6
	573	6 940	31,6	255	17,85	24,1	1,35
Масло минеральное	313	887,5	0,1437	1,804	—	897	2140
Дымовой газ	273	1,295	$2{,}28 \cdot 10^{-6}$	1042	16,9	1220	72
Воздух	273	1,293	$2{,}44 \cdot 10^{-2}$	1005	18,8	1328	70,7
Вода	273	999,9	0,56	4212	13,2	178,9	1350

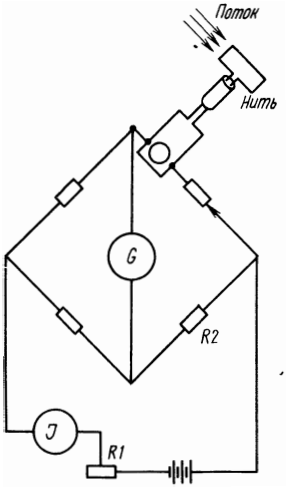


Рис. 20. Схема термоанеометра

уменьшении коэффициента поверхностного натяжения σ при кипении.

Движение теплоносителя в большинстве случаев осуществляется по трубе или около плоской стенки. Тепловое поле — температурный градиент стенки — направлено от ее наружной стороны к внутренней. Давление приложено к теплоносителю и к стенке; градиент давления p направлен вдоль стенки. Тепловое поле проявляется в направлении движения теплоносителя. Направление вынужденного перемещения теплоносителя — вдоль стенки в направлении уменьшения давления.

Характеристики некоторых материалов, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 8.

ФЭ используется для охлаждения двигателей внутреннего сгорания, ракетных двигателей, реакторов ядерных установок, радиоизотопных приборов.

Термоанеометр — прибор для измерения скорости потока жидкости или газа от 0,1 м/с и выше. Его принцип действия основан на зависимости между скоростью потока v и теплоотдачей проволоки α, помещенной в поток и нагретой электрическим током. Основная часть термоанеометра — измерительный мост (рис. 20), в одно плечо которого включен чувствительный элемент в виде нити из никеля, вольфрама или платины длиной 3—12 мм и диаметром 0,005—0,15 мм, укрепленный на тонких электропроводных стержнях. Количество теплоты, передаваемой нагретой проволокой потоку жидкости (газа), зависит от физических характеристик движущейся среды, размеров и ориентации проволоки. С увеличением температуры чувствительность термоанеометра возрастает.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работе [172], а о применении эффекта — в работе [36].

ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ

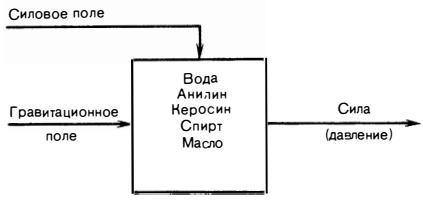


Рис. 21. Структурная схема ФЭ гидростатического давления

Гидростатическое давление — внутреннее напряжение равновесной жидкости, значение которого в одной и той же точке жидкости одинаково во всех направлениях, а разница значений в разных точках зависит только от разницы их расположения по глубине.

Следствием ФЭ является то, что давление жидкости на дно сосуда зависит только от массы вертикального столба жидкости, опирающегося на дно. При одном и том же объеме жидкости давление на дно сужающегося книзу сосуда меньше, чем на дно расширяющегося сосуда (рис. 22).

Зависимость результата от воздействия имеет следующий вид:

$$p_{ст} = p_0 + \rho h g,$$

где h — расстояние (по вертикали) от поверхности до точки внутри жидкости; p_0 — давление над поверхностью жидкости; ρ — плотность жидкости; g — ускорение свободного падения.

Гравитационное поле приложено ко всем частицам жидкости.

Гидростатическое давление также приложено ко всем частицам жидкости

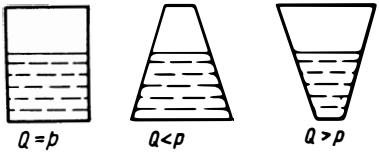


Рис. 22. Гидростатическое давление в сосудах разной формы

и действует по направлению гравитационного поля.

Характеристики некоторых жидкостей, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 9.

ФЭ используется в изделиях машиностроения (в гидросистемах и пневмогидросистемах), в измерительной технике (манометры, уровнемеры, расходомеры и др.), учитывается при расчете на прочность топливных баков летательных аппаратов и других конструкций.

В манометрическом топливомере (рис. 23) дифференциальный датчик давления I смонтирован под баком *2* в нижней его точке и непосредственно воспринимает давление топлива p_1, преобразуя его в электрический сигнал $U_{вых}$. Противодавлением служит давление над поверхностью топлива p_2. Измеряемое избыточное давление жидкости пропорционально высоте h ее уровня

$$p = hg\rho,$$

где ρ — плотность топлива.

Давление p_1 передается мембране *1*, а через нее — на механоэлектрический преобразователь *3*.

9. Характеристики некоторых жидкостей

Жидкость	Температура, К	Коэффициент сжимаемости $\beta \cdot 10^5$, $МПа^{-1}$	ρ, кг/дм³
Анилин	298	43,2	1,03
Керосин	289,5	69,6	0,82
Спирт этиловый	273	96	1,25
Вода	273	51	1,00
Масло	293	63	0,8

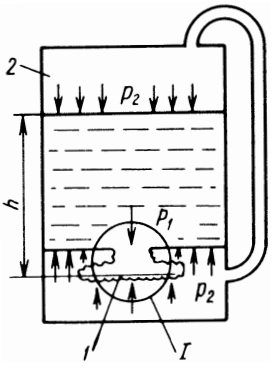


Рис. 23. Схема манометрического топливомера

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работе [295], а о применении эффекта — в работах [36, 129].

ГРАВИТАЦИОННЫЙ ЗАХВАТ

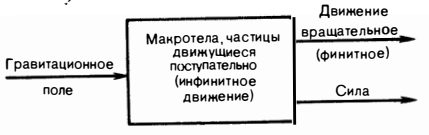


Рис. 24. Структурная схема ФЭ гравитационного захвата

Гравитационный захват частицы — изменение характера ее движения: от инфинитного к финитному по отношению к воздействующему гравитирующему объекту (одному или нескольким).

В классической механике Ньютона для задачи о взаимодействии двух тел феномен гравитационного захвата отсутствует. Исключение: падение частицы на гравитирующее тело в случае, когда $r_{min} < R_0$, где r_{min} —

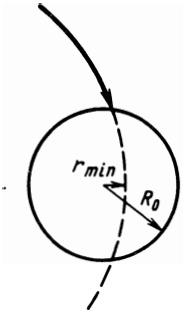


Рис. 25. Падение частицы на гравитирующее тело

наименьшее расстояние от возможной траектории движения до центра поля, R_0 — радиус гравитирующего тела (рис. 25).

Согласно общей теории относительности для сверхплотных тяготеющих объектов чистый гравитационный захват возможен. Пояснить этот факт можно, рассмотрев зависимость «эффективной» потенциальной энергии от расстояния для заданного момента количества движения частицы в нерелятивистской (рис. 26) и релятивистской (рис. 27) постановке:

$$U_{эф} = -\frac{\alpha}{r} + \frac{M^2}{2mr^2};$$

$$U_{эф.\,р} = \left(1 - \frac{r_g}{r}\right)\left(1 + \frac{M^2 r_g^2}{r}\right) - mc^2,$$

где $U_{эф}$ — «эффективная» потенциальная энергия в классической теории;

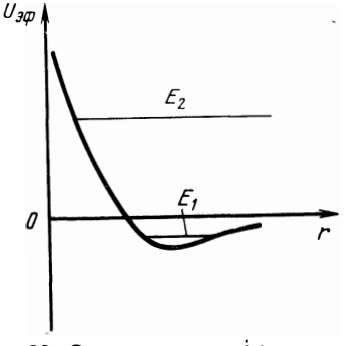


Рис. 26. Зависимость «эффективной» потенциальной энергии от расстояния в нерелятивистской теории

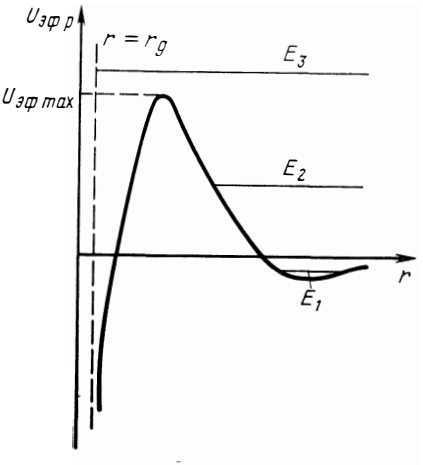


Рис. 27. Зависимость «эффективной» потенциальной энергии от расстояния в релятивистской теории

$-\frac{\alpha}{r}$ — потенциальная энергия частицы в Ньютоновом поле тяготения; M — момент количества движения частицы; m — масса частицы; r — расстояние от частицы до центра поля тяготения; $U_{эф.\,р}$ — «эффективная» потенциальная энергия в релятивистской теории; r_g — гравитационный радиус гравитирующего объекта; c — скорость света.

Согласно классической механике: если энергия частицы $E_1 < 0$, то движение всегда финитное (рис. 26 и 28); если энергия частицы $E_2 > 0$ — дви-

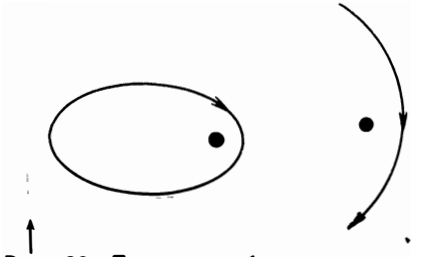


Рис. 28. Траектория финитного движения частицы в классической механике

Рис. 29. Траектория инфинитного движения частицы в классической механике



Рис. 30. Траектория финитного движения частицы в теории относительности

жение всегда инфинитное (рис. 26 и 29). В механике общей теории относительности: при $E_1 < 0$ — движение финитное (рис. 27 и 30), при $0 < E_2 < U_{\text{эф max}}$ — движение инфинитное (рис. 27 и 31); при $E_3 > U_{\text{эф max}}$ — гравитационный захват (рис. 27 и 32).

В решении задачи о взаимодействии по классической теории гравитационный захват также возможен. Например, разделение инфинитно движущейся частицы на несколько частей может привести к финитному движению некоторых из них. Другой пример. Попадание частицы в одну из либрационных точек (L_3, L_4) двух достаточно сильно гравитирующих объектов, вращающихся вокруг общего центра тяжести, может привести ее к гравитационному захвату (рис. 33).

Зависимость результата от воздействия имеет следующий вид:

в классической механике

$$\vec{F} = -G\frac{mM}{r^2}\frac{\vec{r}}{r},$$

в механике общей теории относительности для легкой частицы

$$\vec{F} = -GM\frac{E}{c^2} \times$$

$$\times [(1+\vec{\beta}^2)\vec{r} - (\vec{r}\vec{\beta})\vec{\beta}]\, r^{-3}$$



Рис. 31. Траектория инфинитного движения частицы в теории относительности

Рис. 32. Траектория движения частицы при релятивистском гравитационном захвате

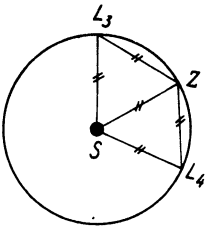


Рис. 33. Конфигурация частиц, приводящая к гравитационному захвату в задаче трех тел

Здесь G — гравитационная постоянная; m — масса частицы; M — масса гравитирующего объекта; r — расстояние от центра поля тяготения до частицы; E — энергия частицы; c — скорость света; $\vec{\beta} = \vec{V}/c$ — фактор скорости ($\vec{V}$ — скорость частицы); $\vec{F}$ — сила, действующая на частицу.

Уравнение движения частицы:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F},$$

где $\vec{P}$ — импульс частицы.

Ограничения на проявление ФЭ:

для релятивистской задачи двух тел

$$\psi < \psi_{\text{крит}},$$

где ψ — угол между направлением на компактный гравитирующий объект и вектором скорости частицы; $\psi_{\text{крит}}$ — критический угол;

для скорости, равной второй космической,

$$\operatorname{tg}\psi_{\text{крит, 2 косм}} =$$

$$= \frac{2\sqrt{(1-r_g/r)\,r_g/r}}{\sqrt{1-4r_g/[r\,(1-r_g/r)]}} \times$$

$$\times \left\{ \begin{matrix} +1 \\ -1 \end{matrix} \middle| \begin{matrix} r > 2r_g \\ r < 2r_g \end{matrix} \right\};$$

для ультрарелятивистской частицы

$$\operatorname{tg}\psi_{\text{крит, рел}} =$$

$$= \frac{\sqrt{1-r_g/r}}{\sqrt{r_g/r - 1 + \frac{4}{27}(r/r_g)^3}} \times$$

$$\times \left\{ \begin{matrix} +1 \\ -1 \end{matrix} \middle| \begin{matrix} r > 1{,}5r_g \\ r < 1{,}5r_g \end{matrix} \right\}.$$

Условие либрации (в точках L_3 и L_4): $|SL_3| = |SL_4| = |SZ| = |L_3Z| = |L_4Z|$.

Пространство проявления результата воздействия — области пространства, занимаемые тяготеющей материей.

Пример предельного использования эффекта гравитационного захвата — эстафетный полет станций к планетам-гигантам Солнечной системы в американских программах «Вояджер-1» и «Вояджер-2». Гравитационный захват использован в проекте размещения энергетических установок в либрационных точках системы Солнце—Земля.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [151, 152, 181, 183], а о применении эффекта — в работах [147, 192, 265].

ГРАВИТАЦИОННЫЙ КОЛЛАПС

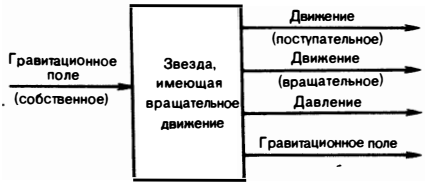


Рис. 34. Структурная схема ФЭ гравитационного коллапса

Гравитационный коллапс звезды — катастрофически быстрое ее сжатие под действием собственных сил тяготения. Гравитационный коллапс — следствие прекращения в центральной области звезды термоядерных реакций, т. е. следствие нарушения ее теплового, а затем и гидростатического (механического) равновесия.

Усредненное для звезды в целом уравнение гидростатического равновесия имеет вид:

$$\frac{p_c}{R} = \frac{Gm\rho_c}{R^2}, \quad p_c \approx \rho_c^{\gamma},$$

где m и R — масса и радиус звезды; ρ_c и p_c — плотность и давление в центре звезды; G — гравитационная постоянная; γ — показатель адиабаты вещества звезды.

Анализ этих соотношений позволяет определить условия возникновения, продолжения или остановки гравитационного коллапса.

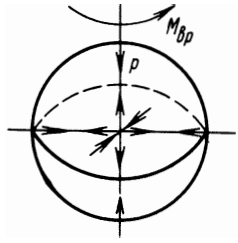


Рис. 35. Шар

Зависимость результата от воздействия имеет следующий вид:

$$V = \frac{(1 - r_g/r)\left[\left(\frac{E}{mc^2}\right)^2 - 1 + r_g/r\right]^{1/2}}{E/(mc^2)}\, c,$$

где V — скорость падения (радиальный нерелятивистский случай); r_g — гравитационный радиус объекта; r — расстояние до слоя (до частицы); E — полная энергия частицы; m — масса частицы; c — скорость света.

Для угловых скоростей справедливо соотношение:

$$\omega_1 = (R_0^2/R_1^2)\ \omega_0,$$

где ω_0 и R_0 — начальные угловая скорость и радиус объекта; ω_1 и R_1 — конечные (текущие) угловая скорость и радиус.

При $\gamma > \frac{4}{3}$, где γ — показатель адиабаты вещества звезды, гидростатическое равновесие устойчиво и коллапс не возникает. В этом случае речь идет о среднем значении показателя. В строгой теории гидростатической устойчивости звезд должна учитываться неодинаковость γ для различных слоев звезды.

Звезда может иметь сферическую и параболическую форму (рис. 35, 36). Собственное гравитационное поле действует на все пространство вокруг гравитирующего центра. Движение вещества направлено к гравитирующему центру. Гравитирующая область пространства определяется релеевской неустойчивостью или некоторой предельной концентрацией вещества. Гравитационное поле направлено к гравитирующему центру. Давление существует в гравитирующей области

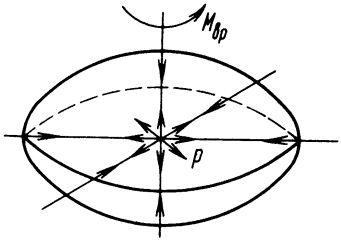


Рис. 36. Диск

пространства звезды и неодинаково для различных слоев вещества звезды.

Результат проявления этого эффекта может быть использован в хронометрии. Оптические эффекты, вызываемые сверхплотными объектами, могут использоваться в астрономии.

Пульсар—компактный вращающийся объект с очень сильным магнитным полем — результат гравитационного коллапса. При определенных условиях может обладать очень медленно изменяющимся периодом обращения. Такой пульсар с успехом может использоваться как эталон времени и частоты.

Теоретически возможный путь применения: разделение частицы в эргосфере вращающейся черной дыры (возможного результата гравитационного коллапса). Падение части частиц в черную дыру приводит к эффекту пращи — выбросу оставшейся части в окружающее пространство с очень высокой энергией. Так могут работать гравитационные ускорители будущего. Важнейшая их черта и преимущество — возможность ускорять любые частицы, независимо от их электрического, лептонного, барионного зарядов, спина, магнитного момента и т. п.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [92, 98, 152, 181, 235], а о применении эффекта — в работах [111, 286].

ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ



Рис. 37. Структурная схема ФЭ движения частиц в электрополе

Электрически заряженные частицы могут разгоняться в электрическом поле. Для разгона могут использоваться ионы атомов, молекул, а также заряженные частицы, капли или пылинки. Однако, как правило, на практике рабочим телом являются положительные ионы атомов металлов или газов.

В однородном электрическом поле, создаваемом в вакууме двумя бесконечными параллельными пластинами А и К (рис. 38, *а*) движутся положительно заряженные ионы. Пластина А является анодом с потенциалом U_A, а пластина К — катодом, потенциал которого принимаем равным нулю ($U_K = 0$). Расстояние между электродами равно L. Если в пространстве

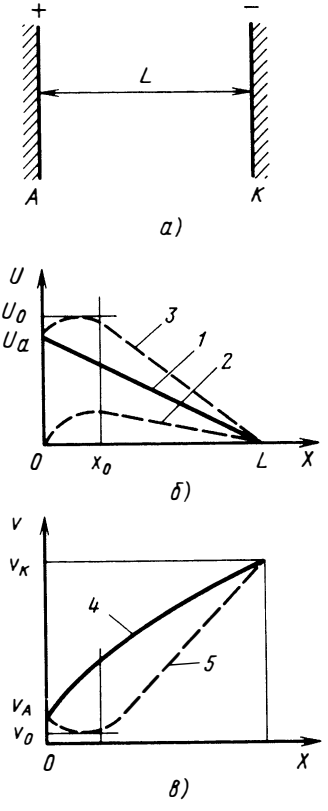


Рис. 38. Распределение скорости ионов и потенциала электрического поля между электродами

10. Характеристики некоторых материалов

Рабочее тело	Отношение ε/m заряда к массе частицы, Кл/кг	Относительная масса частиц	Геометрический параметр R	Первеанс $A \cdot B^{-3/2}$	Ускоряющее напряжение, B	Суммарный диаметр пучка (S = = 0,5 см), см
Цезий (атомарные ионы)	73 000	1	750	$2{,}1 \cdot 10^{-8}$	$1{,}7 \cdot 10^{3}$	375
Молекулярные ионы	365 000	2	375	$3{,}7 \cdot 10^{-5}$	$3{,}4 \cdot 10^{3}$	188
Заряженные тяжелые частицы	73 000	10	75	$6{,}6 \cdot 10^{-6}$	$1{,}7 \cdot 10^{4}$	38
	14 600	50	15	$1{,}2 \cdot 10^{-7}$	$8{,}5 \cdot 10^{4}$	7,5
	7 300	100	7,5	$2{,}1 \cdot 10^{-8}$	$1{,}7 \cdot 10^{5}$	3,8
	730	1 000	0,8	$6{,}6 \cdot 10^{-11}$	$1{,}7 \cdot 10^{6}$	0,4
	73	10 000	0,08	$2{,}1 \cdot 10^{-13}$	$1{,}7 \cdot 10^{7}$	0,04

Примечания: 1. Табличные значения даны для ионного двигателя ($F = 10$ Н, $V = 50$ км/с, $J_{уд} = 5000$ с, $W = 250$ кВт). Тяга ионного двигателя $F = I\left(2U\frac{m}{\varepsilon}\right)^{1/2}$, I — ток, U — напряжение, m — масса частицы; ε — величина заряда.

2. Геометрический параметр $R = \frac{2r}{S}$, где r — радиус ионного пучка; S — расстояние от ионного источника до последнего электрода.

3. Первеанс ионного пучка $P = \frac{I}{U^{3/2}}$.

между анодом и катодом находится небольшое число ионов, то потенциал от U_A до $U_K = 0$ меняется линейно (кривая *1* на рис. 38, *б*), а скорость иона от анода к катоду увеличивается от V_A до V_K по параболическому закону (кривая *4* на рис. 38, *в*). Такое изменение потенциала и скорости получается при плотности тока между электродами, близкой к нулю.

При плотности тока, отличной от нуля, присутствие значительного количества ионов между электродами создает положительный пространственный заряд, потенциал которого приближенно представлен кривой *2* (см. рис. 38, *б*). В этом случае потенциал между электродами будет характеризоваться кривой *3*, являющейся суммой приложенного потенциала и потенциала пространственного заряда. При большой величине пространственного заряда кривая *3* может иметь максимум. При таком распределении потенциала скорость ионов от V_A до V_K будет изменяться согласно кривой *5* (см. рис. 38, *в*). Там, где потенциал имеет максимальное значение, скорость будет минимальна.

При стационарном истечении одноименно заряженных частиц из изолированного источника, например космического корабля, электрический потенциал корабля будет непрерывно возрастать, что очень быстро приведет к торможению частиц в поле корабля и прекращению работы двигателя. Во избежание этого необходимо нейтрализовать выходящую струю положительно заряженных ионов электронами или отрицательными ионами так, чтобы суммарный заряд выходящих частиц был равен нулю.

Зависимость результата от воздействия имеет следующий вид:

$$v = \sqrt{2\frac{e}{m}(U_a - U) + v_A^2},$$

где v — скорость частицы в конце разгона; m — масса частицы; e — заряд частицы; $U_a - U$ — разность

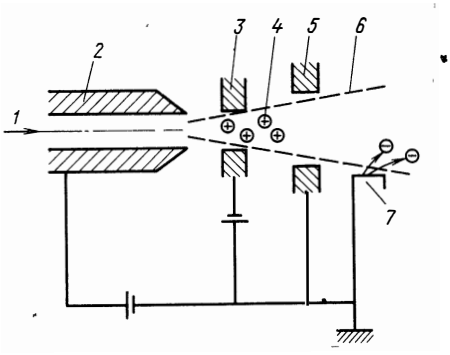


Рис. 39. Схема коллоидного двигателя:
***1* — подача рабочего тела; *2* — эмиттер; *3* — вытягивающий (распыляющий) электрод; *4* — капельки рабочего тела; *5* — замедляющий электрод; *6* — граница струи; *7* — нейтрализатор**

потенциалов между началом разгона и концом разгона; v_A — начальная скорость частицы.

Для длительного проявления ФЭ необходимо в выбрасываемую струю заряженных частиц добавлять противоположные по знаку частицы для получения нейтральной среды.

Характеристики некоторых материалов, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 10.

ФЭ применяется в ускорительной технике; для исследований в области химии, биофизики, геофизики; в дефектоскопии, стерилизации продуктов, лучевой терапии, электрических ракетных двигателях и т. д.

К ракетным двигателям, у которых атомы рабочего тела ионизируются электрическим полем, относится коллоидный двигатель (рис. 39). В этом двигателе рабочим телом обычно является 20%-ный раствор иодидов щелочных металлов (NaI, LiI и др.) в глицерине.

Глицерин поступает в узкую (~0,1 мм) щель заостренного электрода эмиттера. На острых кромках напряженность электрического поля до 10^8 В/м, в результате чего происходит распыление жидкости. Образующиеся различные заряженные коллоидные капельки имеют средний диаметр 0,1 мкм и среднее отношение заряда к массе порядка $5 \cdot 10^6$ Кл/кг. В ионно-оптической системе эти тяжелые (по сравнению с обычными ионами) заряженные частицы разгоняются до скоростей 5000—20000 м/с. При этом на эмиттер двигателя подается напряжение в десятки киловольт. Токи с каждого эмиттера в таких двигателях сравнительно невелики, что позволяет создавать двигатели с тягой 10^{-5}—10^{-3} Н. Обычно несколько эмиттеров объединяют в секции, обеспечивая при этом тягу до 0,1 Н.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работе [100], а о применении эффекта — в работах [220, 291].

ДЕТОНАЦИЯ

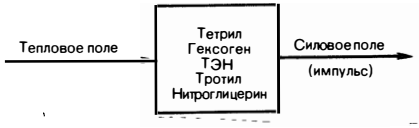


Рис. 40. Структурная схема ФЭ детонации

Детонация заключается в преобразовании теплового воздействия в силовое поле (ударная волна высокого давления).

Детонация заключается в химическом превращении взрывчатого вещества (ВВ), сопровождающемся выделением энергии, распространяющейся по веществу в виде волны от одного слоя к другому со сверхзвуковой скоростью. Давление во фронте ударной волны в случае газообразных взрывчатых смесей составляет несколько МПа, в случае жидких и твердых ВВ — десятки тысяч МПа. Химическое превращение протекает непосредственно за фронтом ударной волны с большой скоростью в очень тонком слое. Детонация — самоподдерживающийся процесс. Энергия, выделяемая в зоне химической реакции, непрерывно поддерживает высокое давление в ударной волне.

В однородном веществе детонация распространяется с постоянной скоростью. В некоторых пределах она изменяется в зависимости от плотности ВВ и размеров заряда. Если наименьший размер заряда (например, диаметр удлиненного цилиндра) меньше некоторого критического значения, то ВВ, сжатое во фронте ударной волны, разбрасывается раньше, чем завершается химическая реакция, и устой-

11. Характеристики взрывчатых веществ

Взрывчатое вещество	$\rho_0 \cdot 10^{-3}$, кг/м³	$v_д \cdot 10^{-3}$, м/с	$v_в \cdot 10^{-3}$, м/с	$p \cdot 10^{-9}$, Па
Гексоген	1,72	8,46	2,12	308,5
Смесь гексогена с тротилом	1,68	7,83	1,96	257,8
ТЭН	1,66	8,1	1,83	246,0
Тетрил	1,68	7,50	1,87	253,6

чивое распространение детонации становится невозможным. В газообразных взрывчатых смесях распространение детонации возможно лишь при условии, когда концентрация горючего газа или паров горючей жидкости находится в известных пределах, зависящих от химической природы компонентов смеси, давления и температуры.

Данный эффект может быть описан формулой

$$p = \rho_0 v_в v_д,$$

где p — давление в детонационной волне; ρ_0 — начальная плотность ВВ; $v_в$ — скорость продуктов сгорания вещества; $v_д$ — скорость детонации.

Эта формула выведена из законов сохранения потоков массы и импульса, примененных к детонационному фронту. Форма образцов взрывчатых зарядов может быть цилиндрической, конической, кубической.

Тепловое поле действует на поверхность ВВ, а силовое поле — в пространстве, его окружающем.

В табл. 11 приведены скорости детонации, скорости продуктов сгорания вещества и давление детонации для некоторых из применяющихся на практике взрывчатых веществ.

Физический эффект используется в устройствах разделения ракетных блоков, в конструкциях взрывателей боеприпасов различного назначения, в капсюлях-детонаторах, используемых при проведении сейсмической разведки и взрывных работ в строительстве, горнодобывающей промышленности, при сварке взрывом и т. д.

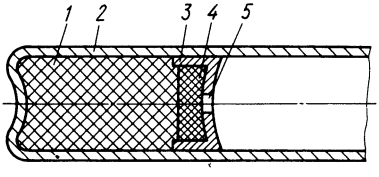


Рис. 41. Капсюль-детонатор

Эффект детонации может являться и нежелательным явлением, обусловливающим взрыв газовых смесей, например, при проведении горных работ, лабораторных исследований, при производстве взрывчатых веществ.

Примером практического использования эффекта может служить конструкция капсюля-детонатора (рис. 41), который используется при буровзрывных работах. Он представляет собой металлическую гильзу *2*, открытую с одного конца и заполненную зарядом инициирующего взрывчатого вещества. Заряд в нижней части состоит из вторичного инициатора *4*. Сверху находится первичный инициатор *1*. Наложенная чашечка *3* предохраняет первичный инициатор от высыпания из гильзы. Отверстие *5* в чашечке служит для воспламенения первичного инициатора. Свободная часть детонатора предназначена для помещения средства воспламенения.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [91, 281], а о применении эффекта — в работе [292].

ДИФФУЗИЯ



Рис. 42. Структурная схема ФЭ диффузии

Диффузия — взаимное проникновение соприкасающихся веществ вследствие теплового движения частиц

вещества. Диффузия имеет место в газах, жидкостях и твердых телах, причем диффундировать могут как находящиеся в них частицы посторонних веществ, так и собственные частицы (самодиффузия).

Наиболее быстро диффузия происходит в газах, медленнее — в жидкостях, еще медленнее — в твердых телах, что обусловлено характером теплового движения частиц в этих средах. Траектория движения каждой частицы газа представляет собой ломаную линию, так как при столкновении частиц они меняют направление и скорость движения. Смещение частицы L меняется со временем случайным образом, но средний квадрат его $\overline{L^2}$ за большое число столкновений растет пропорционально времени τ: $\overline{L^2} \sim \sim D\tau$, где D — коэффициент диффузии.

В жидкостях в соответствии с тепловым движением молекул диффузия осуществляется перескоками молекул из одного устойчивого положения в другое. Каждый скачок происходит при сообщении молекуле энергии, достаточной для разрыва ее связей с соседними молекулами и перехода в окружение других молекул в новое энергетически выгодное положение. Среднее перемещение при таком скачке не превышает межмолекулярного расстояния. Диффузное движение частиц в жидкости можно рассматривать как движение с трением: $D \approx uKT$, где u — подвижность диффундирующих частиц; T — температура; K — постоянная Больцмана. В жидкости увеличение коэффициента диффузии с ростом температуры обусловлено «разрыхлением» ее структуры при нагреве и соответствующим увеличением числа перескоков в единицу времени.

Коэффициент диффузии в твердых телах крайне чувствителен к дефектам кристаллической решетки, возникающим при нагреве, напряжениях, деформациях и других воздействиях. Увеличение числа дефектов облегчает перемещение атомов в твердом теле и приводит к росту диффузии.

Скорость диффузии в значительной мере зависит от степени выравнивания концентрации вещества в первоначально неоднородной среде, а также от физического состояния вещества (жидкость, газ, твердое тело).

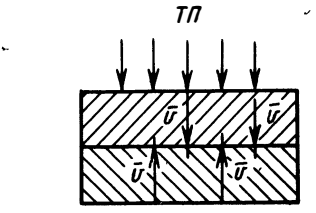


Рис. 43. Твердые пластины

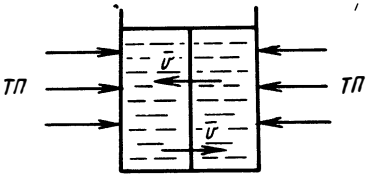


Рис. 44. Сосуд с жидкостью

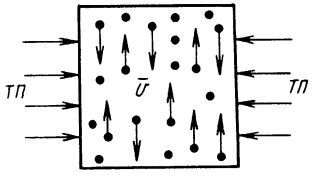


Рис. 45. Сосуд с газом

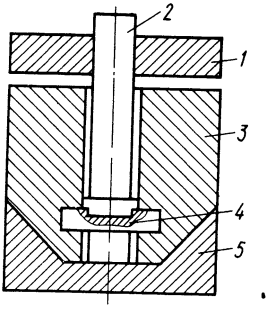


Рис. 46. Приспособление для совмещения операций прессования керамики и сварки ее с металлом:

1 — направляющая; *2* — шток; *3* — сухари; *4* — опоры; *5* — основание

ФЭ проявляется в твердых телах, плотно прилегающих друг к другу (рис. 43), а также в жидкостях и газах (рис. 44, 45). Диффузия происходит по всему объему вещества в направлении уменьшения концентрации вещества. Пространством проявления результата воздействия является весь

12. Значения коэффициента диффузии (при атмосферном давлении)

Диффундирующее вещество	Основной компонент	Температура, К	Коэффициент диффузии, м²/с
Водород (газ)	Кислород (газ)	273,16	$0{,}7 \cdot 10^{-4}$
Пары воды	Воздух	273,16	$0{,}23 \cdot 10^{-4}$
Пары этилового спирта	Воздух	273,16	$0{,}1 \cdot 10^{-4}$
Поваренная соль	Вода	293,16	$1{,}1 \cdot 10^{-9}$
Сахар	Вода	293,16	$0{,}3 \cdot 10^{-9}$
Золото	Свинец	293,16	$4 \cdot 10^{-14}$
Самодиффузия	Свинец	558,16	$7 \cdot 10^{-15}$

объем вещества, что ведет к равномерному распределению концентрации вещества по занимаемому объему.

Коэффициенты диффузии для некоторых материалов приведены в табл. 12.

Диффузия применяется в химической кинетике и технологии для регулирования химических реакций, в процессах испарения и конденсации, для разделения веществ.

Для улучшения и изменения физико-химических свойств керамики используют метод диффузионной сварки. Сварка металла с керамикой может быть использована для изготовления замедляющих систем мощных коротковолновых приборов. Для решения проблемы теплоотвода в приборах изготовляют замедляющую систему путем приварки тонкой медной фольги к пластине изолятора, обладающей высокой теплопроводностью. По технологической схеме диффузионной сварки и прессования керамики (рис. 46) процесс образования сварного соединения происходит вследствие растворения керамики с образованием твердых растворов ее элементов в свариваемом металле. Это дает необходимую постепенность изменения физико-химических свойств от керамики к металлу.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работе [272], а о применении эффекта — в работах [130, 144].

ЗВУКОВОЙ ВЕТЕР

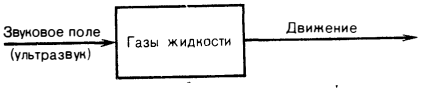


Рис. 47. Структурная схема ФЭ звукового ветра

Звуковой ветер — регулярные течения среды, возникающие в звуковом поле большой интенсивности. Звуковой ветер может возникать как в свободном неоднородном звуковом поле (рис. 48), так и вблизи различного рода препятствий. Возникновение звукового поля обусловлено законом сохранения количества движения: переносимое звуковой волной количество движения, связанное с колебаниями частиц среды, при поглощении волны передается среде в другой форме, вызывая регулярное движение. Поэтому скорость звукового ветра U пропорциональна коэффициенту поглощения звука и его интенсивности, но не превосходит колебательной скорости частиц в звуковой волне V.

После включения источника звука звуковой ветер устанавливается не сразу, а «разгоняется» постепенно до тех пор, пока торможение, обусловленное вязкостью среды, не скомпенсирует увеличение его скорости под действием звука. Звуковой ветер всегда имеет вихревой характер.

Скорость звукового ветра

$$U = \mathrm{Ma}\, kl,$$

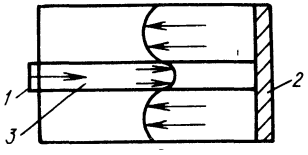


Рис. 48. Распространение звукового поля:

1 — излучатель звука; *2* — поглотитель звука; *3* — звуковой пучок

13. Характеристики звуковых сред

Звуковая среда	Температура, К	Частота, кГц	Скорость звука, м/с
Бензол	407	95	212,6
Гелий	302,99	83,78	1055,63
Этилен	293	59,5	329
Кислород	273	42,3	314
Неон	303,46	83,78	461,29
Ацетон	291	—	327
Этиловый спирт	370,1	95	284

где $Ma = V/a$ — акустическое число Маха; a — скорость звука; k — волновое число; l — характерный масштаб течения.

ФЭ проявляется только при облучении жидкости или газа звуковым полем определенной интенсивности I, большей некоторого порогового значения I_n: $I > I_n$.

Звукопроводящая среда (газ, жидкость) принимает форму емкости, в которой она заключена.

Геометрической характеристикой пространства приложения воздействия (звукового поля) является поверхность звукопроводящей среды.

Результат воздействия проявляется в виде вихревого движения среды, направленного вдоль оси распространения звукового поля (см. рис. 48).

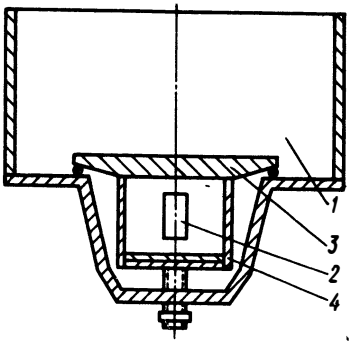


Рис. 49. Ультразвуковая установка для очистки поверхностей:

1 — ванна с моющим раствором; *2* — преобразователь; *3* — излучающая диафрагма; *4* — бачок для охлаждения преобразователя проточной водой

Характеристики некоторых звуковых сред, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 13.

Звуковой ветер является помехой при измерении звуковых полей, но он находит и полезное приложение. Например, по скорости установившегося звукового ветра можно определить отношение объемного коэффициента вязкости вещества к сдвиговому.

На эффекте звукового ветра основано действие насосов некоторых типов, удобных для работы в агрессивных средах. Возникновение звукового ветра у поверхности препятствий, помещенных в звуковое поле, может увеличить процессы массо- и теплопередачи через их поверхность. Звуковой ветер является одним из факторов, обусловливающих ультразвуковую очистку. С его помощью удаляются такие загрязнения, которые слабо связаны с очищаемой поверхностью, например жировые пленки, металлическая пыль после травления и т. д.

Основным элементом конструкции ультразвуковой установки для очистки поверхностей (рис. 49) является ванна.

Дном ванны служит излучающая диафрагма, колебания которой создаются преобразователем. В маломощных установках применяют пьезоэлектрические преобразователи, а в мощных — магнитострикционные.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [71, 217, 269, 270], а о применении эффекта — в работах [119, 254, 255].

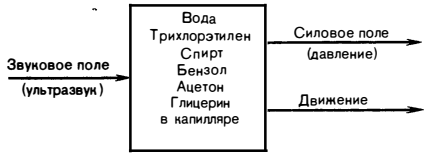


Рис. 50. Структурная схема звукокапиллярного эффекта

Звукокапиллярный эффект — аномально глубокое проникновение жидкости в капилляры и узкие щели под действием ультразвука. При этом высота подъема и глубина проникновения значительно превышают соответствующие величины, обусловленные силами поверхностного натяжения жидкости. Механизм звукокапиллярного эффекта заключается в том, что жидкость поднимается по капиллярам в результате импульсов давления, возникающих при захлопывании кавитационных полостей, локализованных в сечении капилляра. Продолжительность τ импульсов давления оценивается по времени максимального давления p_{max} при захлопывании полости. Рассчитано, что $\tau = 2{,}3 \cdot 10^{-8}$ с. За время τ жидкость в капилляре приобретает скорость v_i, а дальше продолжает двигаться по инерции до момента следующего захлопывания кавитационной полости. Высота, на которую поднимается жидкость за один период колебаний T, составляет $\Delta h_i = v_i(T - \tau)$. Величина v_i вычисляется с учетом сечения капилляра, массы столба жидкости и сил вязкого трения, препятствующих подъему жидкости. Общая высота подъема жидкости в капилляре

$$h \approx h_0 + \sum_{i=1}^{n} \Delta h_i,$$

где h_0 — высота подъема, определяемая силами поверхностного натяжения; n — число колебаний на момент отсчета.

Жидкость поднимается по капилляру под воздействием ультразвука только при условии, что кавитационная область, состоящая из пульсирующих и захлопывающихся пузырьков, находится непосредственно под капилляром. Нарушение локализации в окрестностях основания капилляра кавитационных пузырьков и уход их

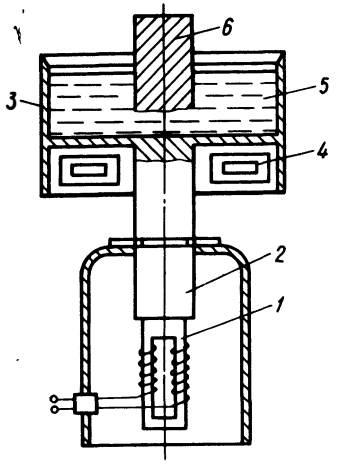


Рис. 51. Схема установки для ультразвуковой металлизации:

1 — магнитострикционный преобразователь; *2* — волновод; *3* — ванна; *4* — нагреватель; *5* — расплавленный металл; *6* — металлизируемая деталь

из сечения капилляра приводит к мгновенному опусканию жидкости до уровня, определяемого силами поверхностного натяжения, и прекращению звукокапиллярного эффекта.

Интенсивность ультразвука должна соответствовать развитой кавитации. Увеличение интенсивности ультразвука и развитие акустических потоков снижает звукокапиллярный эффект. Для каждой жидкости существует температурный интервал, в котором интенсивность эффекта максимальна. Для воды и водных растворов он составляет 308—330 К; для глицерина 350—360 К; для трихлорэтилена, бензина, спирта 290—295 К. Сила, возникающая вследствие захлопывания кавитационных пузырьков, действует на жидкость у входа в капилляр. Направление силы совпадает с направлением действия звуковой волны. Перемещение жидкости происходит внутри капилляра, вдоль его оси, направление перемещения совпадает с направлением действия силы. Характеристики некоторых жидких сред, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 14.

Звукокапиллярный эффект широко используется в экспериментальных исследованиях и в различных технологических процессах. Звукокапиллярг-

14. Характеристики жидких сред

Жидкая среда	T, К	$\sigma \cdot 10^3$, Дж/м²	T, К	$\eta \cdot 10^3$, Па·с
Вода	303 313 323	71,03 69,41 67,79	303 313 323	79,82 65,40 54,77
Глицерин	291	64,7	293 353 363	1480 35 21
Бензол	291	29,16	283 293	0,755 0,649
Этиловый спирт	293	22,03	293	1,200
Метиловый спирт	293	23,05	293	0,578

ный эффект в десятки и сотни раз ускоряет процессы пропитки пористокапиллярных материалов, поэтому он применяется при пропитке катушек трансформаторов клеями и лаками, при дублении кож и окрашивании толстых тканей. Эффект используется при металлизации сложных изделий, так как обеспечивает хорошее проникновение горячего припоя во все зазоры.

В установке для ультразвуковой металлизации (рис. 51), которая проводится в заполненной расплавом ультразвуковой ванне, кавитация создается колебаниями диафрагмы, служащей дном и связанной посредством волновода с магнитострикционным преобразователем.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [3, 205, 241, 296], а о применении эффекта — в работах [3, 205, 208, 223].

ИЗГИБНЫЕ ВОЛНЫ

Изгибные волны — возникновение деформации изгиба, распространяющейся в стержнях и пластинах, под действием ультразвука. Длина изгибной волны всегда намного больше толщины стержня или пластинки. Если длина волны становится сравнимой с их толщиной, то движение в ней сильно усложняется.



Рис. 52. Структурная схема ФЭ изгибных волн

Примером изгибных волн могут служить стоячие волны в камертоне, в диффузорах громкоговорителей, а также волны, возникающие при вибрации тонкостенных механических конструкций (например, корпусов самолета и автомобиля).

На схеме деформации стержня (рис. 53, *а*) и пластинки (рис. 53, *б*) в изгибной волне сплошной чертой показано положение оси стержня и срединной плоскости пластинки до смещения, а штриховой — положение оси стержня и срединной плоскости пластинки после смещения; U_0 — амплитуда смещения элементов стержня и пластинки в изгибной волне; ось Z — направление распространения волны.

Фазовые скорости $v_{ст}$ и $v_{пл}$ гармонической частоты в стержне и пластинке соответственно равны:

$$v_{ст} = \sqrt[4]{ER^2/\rho}\,\sqrt{\omega};\ v_{пл} = \sqrt[4]{Eh^2/[12\rho(1-\sigma^2)]}\,\sqrt{\omega}.$$

Изгибные волны малых амплитуд в стержне и пластинке описываются

соответственно следующими уравнениями:

$$\rho \frac{d^2U}{d\tau^2} + ER^2 \frac{d^4U}{dZ^4} = 0,$$

$$\rho \frac{d^2U}{d\tau^2} + \frac{Eh^2}{12(1-\sigma^2)} \Delta^2 U = 0,$$

где τ — время; Z — координата вдоль оси стержня; Δ — двумерный оператор Лапласа; U — смещение элементов стержня или пластинки; ρ — плотность материала; E — модуль Юнга; σ — коэффициент Пуассона; R — радиус поперечного сечения стержня относительно оси, перпендикулярной к плоскости изгиба и проходящей через нейтральную поверхность; h — толщина пластинки.

В стержне направлением распространения звуковой волны является его ось; в пластине звуковая волна распространяется по любому направлению, ориентированному в ее плоскости. Пространством проявления результата воздействия является каждый элемент стержня или пластины, смещающийся перпендикулярно к оси стержня или плоскости пластинки. Деформация изгибных волн направлена вдоль оси образца и совпадает с направлением воздействия.

Изгибные волны используются для определения вязкого трения и теплопроводности твердых образцов, для измерения уровня жидкости в закрытых сосудах (ультразвуковые уровнемеры), в дисперсионных ультразвуковых линиях задержки.

В ультразвуковом фазочувствительном уровнемере (рис. 54) волновод выполнен в виде замкнутой петли. Излучающим преобразователем осуществляется возбуждение такой изгибной волны, фазовая скорость которой меньше, чем скорость ультразвука в жидкости. При этом условии жидкость представляет собой не активную, а реактивную нагрузку, и фазовая скорость в контактирующем с жидкостью участке волновода заметно уменьшается из-за присоединенной массы жидкости. В конце волновода преобразователем осуществляется прием ультразвуковых волн, время распространения которых по волноводу в этих условиях оказывается зависящим от длины погруженного в жидкость участка волновода, т. е. от высоты уровня жидкости.

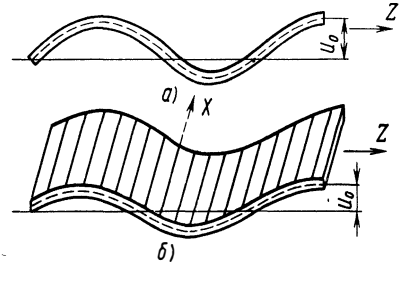


Рис. 53. Схема деформации стержня и пластинки в изгибной волне

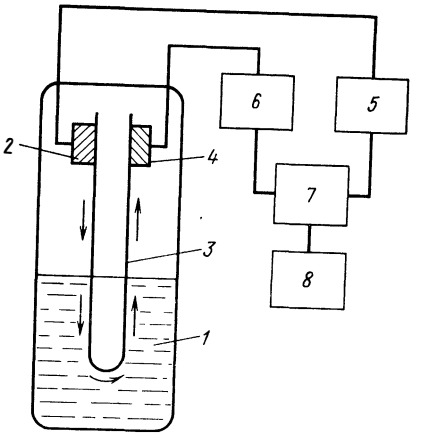


Рис. 54. Схема ультразвукового фазочувствительного уровнемера:

1 — контролируемая жидкость; *2* — излучающий преобразователь; *3* — волновод; *4* — приемный преобразователь; *5* — генератор непрерывных высокочастотных колебаний; *6* — усилитель; *7* — фазометр; *8* — индикаторное устройство

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [23, 267], а о применении эффекта — в работах [16, 45].

ЛАЗЕРНЫЙ ТЕЛЕКИНЕТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Телекинетический эффект — возникиовение импульсного силового поля

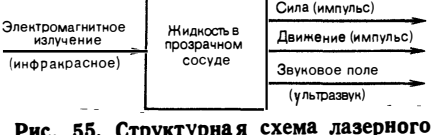


Рис. 55. Структурная схема лазерного телекинетического эффекта

В локальном объеме жидкости под действием термокавитации.

Если на жидкость, находящуюся в прозрачной емкости, направить луч лазера, то через некоторое время объем жидкости, прилегающий к границе стенка — жидкость, в месте облучения начнет закипать.

Зарождающийся в перегретой жидкости паровой пузырек расходует привнесенную светом тепловую энергию. Он растет, потому что давление пара в нем выше, чем давление в окружающей жидкости. Расширяясь и перемещая жидкость, он выполняет работу, преобразуя отданную лазером энергию. Объем жидкости, нагреваемой лазером, служит «нагревателем», остальная жидкость — «холодильником». По мере роста пузырька он становится больше размера «нагревателя». Это означает переход рабочего тела от «нагревателя» к «холодильнику».

В различные моменты времени τ в объеме жидкости происходят следующие термодинамические явления (рис. 56): τ_1 — образование и рост парового пузырька со скоростью $dR/d\tau > 0$ происходит вследствие того, что давление p в пузырьке больше внешнего давления p_0; τ_2 — движение по инерции; давление пара $p < p_0$; происходит накопление потенциальной энергии; τ_3 — нижняя критическая точка; скорость $dR/d\tau = 0$, т. е. кинетическая энергия равна нулю; τ_4 — схлопывание пузырька под действием внешнего давления p_0 ($p < p_0$) со скоростью $dR/d\tau < 0$; происходит преобразование потенциальной энергии в кинетическую; τ_5 — гидравлический удар.

Весь тепловой цикл длится около 100 мкс. Это в 100—150 раз меньше, чем промежуток времени между зарождением пузырьков. Такая разница во времени приводит к тому, что мощность гидравлического удара многократно превосходит подводимую мощность света.

Процесс образования пузырьков и их схлопывание могут быть описаны с помощью уравнения движения тела с переменной массой, в конечной стадии которого возникает ударная волна, свойственная сверхзвуковому движению.

На графиках зависимостей давления пара p (рис. 57, *а*) и кинетической энергии W (рис. 57, *б*) от объема пузырька V стрелкой обозначен последовательный переход через различные фазы теплового цикла (*1—2—3—4—5*). Полезная работа этого теплового цикла определяется заштрихованной площадью на $p—V$ диаграмме. Результатом самоорганизующегося теплового цикла является получение кинетической энергии, которая изменяется от нуля до W_0.

Эффект может быть продемонстрирован следующим образом. На поверхность стола ставят банку с жидкостью, направляют на нее луч лазера или сфокусированный солнечный свет. Через несколько секунд банка начинает дрожать, а затем медленно перемещаться по поверхности стола вдоль луча света в направлении от источника света. Если частота появления и схлопывания пузырьков составляет в секунду 30—200 циклов, то банка двигается по гладкой сухой поверхности со скоростью около 1 мм/с.

На циклограмме перемещения банки (рис. 58): *1* — начальное положение банки; в первый момент расширяющийся пузырек выталкивает часть жидкости вверх; двигаясь ускоренно, жидкость прижимает банку к опоре; центр масс перемещается вверх; *2* — «прыжок» с одновременным поворотом

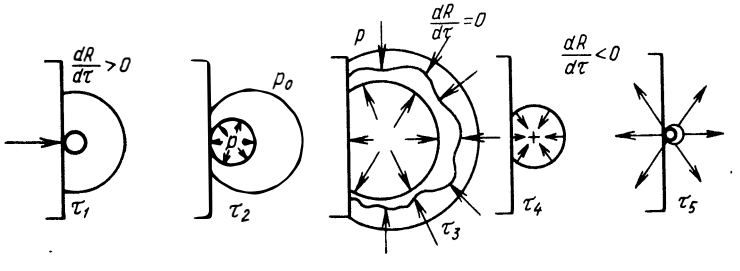


Рис. 56. Термодинамические явления в объеме жидкости

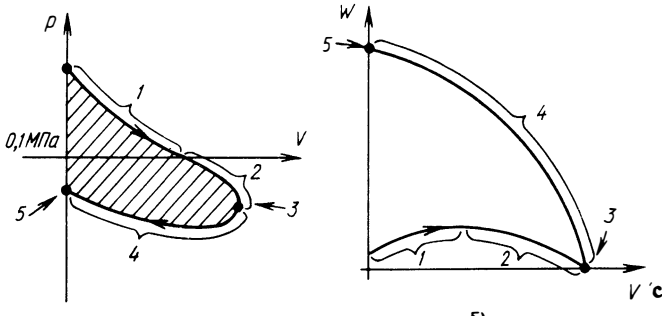


Рис. 57. Зависимость давления пара и кинетической энергии от объема пузырька

в сторону лазерного луча; пузырек схлопывается; банка и жидкость, разделенные исчезающим пузырьком, начинают двигаться навстречу друг другу; банка теряет связь с опорой; из-за смещения направления гидравлического удара относительно центра масс жидкость — банка возникает момент сил, поворачивающих систему на некоторый угол; *3* — «приземление» на заднюю грань (положение *А*), что обусловлено поворотом банки; *4* — «подскакивание» и «полет» с поворотом в сторону, противоположную лазерному лучу, что обусловлено реакцией опоры, которая смещена относительно центра масс системы; возникает момент сил; *5* — «приземление» на переднюю грань (положение *В*).

В опыте с кюветой размерами 10×10×30 мм и массой 25 г временные интервалы между очередными приземлениями *1—3* и *3—5* равны соответственно 4 и 10 мс. Длительность импульсов давления на опору в точках *1*, *3*, *5* достигала 0,1 мс. Это означает, что кювета практически все время «парит» над опорой.

Одним из ограничений на проявление ФЭ является то, что жидкость в сосуде должна иметь определенный состав. Жидкость принимает форму сосуда. Пространство приложения воздействия: граница жидкость — стенка, обращенная к источнику ЭМИ [инфракрасное (лазерное) излучение].

Сила направлена в сторону, противоположную источнику света. Расположена в одной плоскости с лучом света. Звуковое поле возникает в объеме жидкости.

Физический эффект может быть использован в машиностроении при обработке хрупких материалов (стекло, ситалл, керамика и т. д.), при пропитке пористых материалов, при разработке транспортных средств (движителей), к которым энергия может быть подведена только с помощью лазерного луча, при разработке нетоксичных движителей, прямоточных светореактивных двигателей, для перекачки жидкостей и т. д.

Установка для резки стекла (рис. 59) содержит ванну *1* с жидкостью *2*, в которую помещено стекло *3*. Лазерный луч *4*, двигаясь по заданной траектории, создает цепочку парогазовых пузырьков, схлопывание которых происходит на поверхности стекла. Импульсы силы, передаваемые поверхности стекла, обеспечивают его локальное разрушение (вдоль линии движения лазерного луча).

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [211,

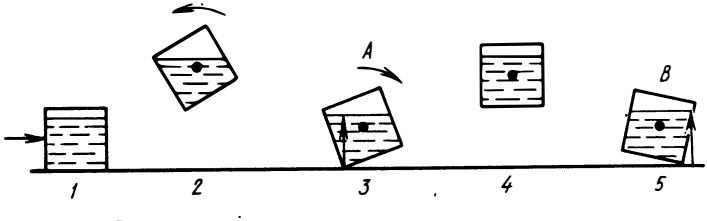


Рис. 58. Циклограмма перемещения банки

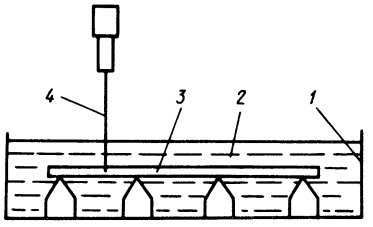


Рис. 59. Установка для резки стекла

212], а о применении эффекта — в работе [190].

МАГНИТОСТРИКЦИЯ

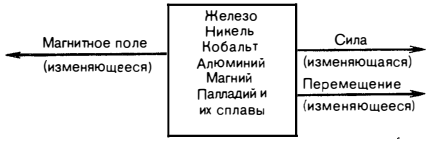


Рис. 60. Структурная схема ФЭ магнитострикции

Изменения размеров тела, вызванные изменением его намагниченности, называют магнитострикцией. Изменение объема тела называют объемной магнитострикцией, а изменение размеров тела при постоянном объеме — линейной магнитострикцией. При намагничивании ферри- и ферромагнетиков магнитные силы действуют в интервале от 0 до поля напряженностью H_s, в котором образец достигает технического магнитного насыщения I_s. Намагничивание в этом интервале полей обусловлено процессами смещения граничных моментов доменов. Оба эти процесса изменяют энергетическое состояние кристаллической решетки, что проявляется в изменении равновесных расстояний между ее узлами. В результате атомы смещаются, происходит магнитострикционная деформация решетки. Магнитострикция этого вида зависит от направления и величины намагниченности I и проявляется в основном в изменении формы кристалла почти без изменения его объема (линейная магнитострикция).

Относительное изменение длины $\lambda_{\alpha\beta} = (\Delta l/l)_{\alpha\beta}$ в направлениях β_1, β_2, β_3 при изотермическом намагничивании ферромагнитного кристалла до насыщения в направлениях α_1, α_2, α_3 называют магнитострикцией насыщения при условии, что в начальном состоянии намагниченность кристалла была ориентирована по направлению легкого намагничивания (идеально размагниченное состояние).

Продольная магнитострикция по главным кристаллографическим осям описывается выражениями:

$$\lambda_{100} = \frac{2}{3} h_1 + \frac{2}{3} h_4,$$

$$\lambda_{110} = \frac{1}{6} h_1 + \frac{1}{2} h_2 + \frac{1}{12} h_4,$$

$$\lambda_{111} = \frac{2}{3} h_2 + \frac{2}{9} h_5, \qquad (1)$$

где h_1, ..., h_5 — константы по кристаллографическим осям.

При $h_3 = h_4 = h_5 = 0$ получается упрощенное выражение

$$\lambda_{\alpha\beta} = \frac{3}{2} \lambda_{100} \left(\alpha_1^2\beta_1^2 + \alpha_2^2\beta_2^2 + \right.$$

$$\left. + \alpha_3^2\beta_3^2 - 1/3\right) + 3\lambda_{111} (\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2 +$$

$$+ \alpha_2\alpha_3\beta_2\beta_3 + \alpha_3\alpha_1\beta_3\beta_1) \qquad (2)$$

только с двумя константами λ_{100} и λ_{111}, которых часто достаточно для описания экспериментальных результатов.

Для поликристаллического материала с произвольным распределением ориентации кристаллографических осей из соотношений (1) и (2) можно получить линейную магнитострикцию в виде:

$$\lambda_\theta = \frac{3}{2} \lambda_s \left(\cos^2\theta - \frac{1}{3}\right),$$

$$\lambda_s = \frac{2\lambda_{100} + 3\lambda_{111}}{5},$$

где θ — угол между направлением измерения и направлением намагниченности.

Магнитострикционные деформации, вызываемые обменными и магнитными силами, проявляются не только при помещении ферромагнетика в магнитном поле, но и при нагревании его (самопроизвольная деформация решетки). Магнитострикция не зависит от знака магнитного поля (четный эффект); она зависит от материала. Каждый материал характеризуется величиной и характером магнитострикции.

15. Характеристики магнитострикционных материалов

Материал	Химический состав	Коэффициент электромеханической связи, %	$\lambda_s \cdot 10^6$
Никель НП2Т	Ni > 98%	26—30	—37
Сплав никель—кобальт	98,1% Ni, 0,5% Co, 1,1% Cr		—26
Сплав алфер 12Ю	12,5% Al, ост. Fe	49	—27
Сплав никель—магний	77,1% Ni, 22,7% Mg		+18
Кобальт	Co		—71,4
Железо	Fe		—4,5

Наиболее эффективно магнитострикционный эффект проявляется на ферромагнитных стержнях, в стальных и никелевых проволоках и пластинках. Магнитное поле создается в пространстве вокруг ферромагнитного тела. Силовое поле при наличии ограничений со стороны внешней среды распределено по объему ферромагнитного тела. При отсутствии ограничений на перемещение результат воздействия проявляется в изменении формы, размеров и объема тела.

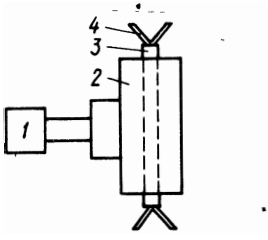


Рис. 61. Магнитострикционный преобразователь:

1 — генератор переменного тока высокой частоты; *2* — обмотка преобразователя, питаемая от генератора; *3* — ферромагнитный сердечник; *4* — ультразвуковое излучение от торцовых поверхностей колеблющегося сердечника

В табл. 15 приведены коэффициенты электромеханической связи и линейная магнитострикция для некоторых материалов.

На магнитострикции основано действие магнитострикционных преобразователей, которые применяют в качестве излучателей и приемников ультразвука, а также магнитострикционных датчиков механических напряжений и деформаций. Магнитострикция находит широкое применение в магнитострикционных реле и фильтрах. Магнитострикционные вибраторы применяются для сверления хрупких материалов, очистки поверхности, пайки алюминиевых деталей, получения эмульсий и т. д.

Основная часть магнитострикционного преобразователя — магнитострикционный вибратор (рис. 61), в котором энергия переменного магнитного поля (например, создаваемого переменным электрическим током) преобразуется в энергию механических колебаний магнитного сердечника-вибратора. Такое устройство называется магнитострикционным излучателем. Если на сердечник вибратора действуют переменные механические напряжения, например, от ультразвуковых колебаний окружающей вибратор среды (воды или воздуха), то из-за изменений на-

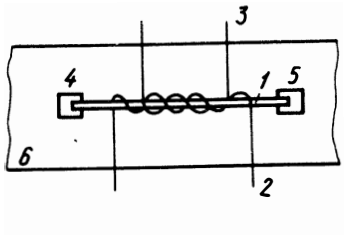


Рис. 62. Схема магнитострикционного датчика

магниченности сердечника, возникающих при этом в обмотке вибратора, индуцируется переменная ЭДС и мы имеем дело с магнитострикционным приемником.

В магнитострикционном датчике (рис. 62) сердечник *1* изготовлен из полоски мягкого ферромагнетика — железоникелевого сплава типа пермаллой. На сердечник намотаны две обмотки: намагничивающая *2* и измерительная *3*. Сердечник концами *4* и *5* прикреплен к исследуемой детали *6*. Если деталь будет деформироваться в процессе эксплуатации, то приклеенный к ней сердечник датчика тоже деформируется; в нем возникает изменение магнитного потока, что вызывает изменение ЭДС в измерительной обмотке, которое в виде электрического импульса поступит на измерительный прибор, предварительно проградуированный на соответствующие значения напряжений или деформаций.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [241, 270], а о применении эффекта — в работах [17, 51, 256].

МЕХАНОСТРИКЦИЯ (ДЛЯ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ)

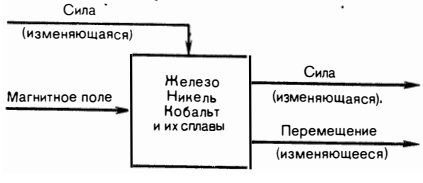


Рис. 63. Структурная схема ФЭ механострикции

Механострикция — эффект добавочной деформации в ферромагнетиках. Благодаря явлению магнитострикции наложение на ферромагнетик внешних упругих напряжений σ изменяет ориентацию осей легчайшего намагничивания. В области слабых полей для мягких материалов это приводит к смещению границ между доменами, а в сильных полях или в жестких материалах — к вращению векторов намагниченности в отдельных доменах. Смещение границ и вращение векторов I_s должны осуществляться в таком направлении, чтобы в результате было наибольшее совпадение между магнитострикционным эллипсоидом упругости и эллипсоидом внешней упругой силы. Из-за четности магнитострикционного эффекта перераспределение намагниченности, которое происходит под действием внешних напряжений, не приводит к появлению или изменению результирующей намагниченности деформируемого образца. Размеры образца при этом получат некоторое добавочное изменение, связанное с магнитострикционной деформацией, вызванной перераспределением векторов I_s в образце. Для материала с относительным изменением длины $\lambda_s > 0$ (рис. 64) внешние напряжения σ, наложенные на размагниченный образец (при условии, что они производят полную магнитную текстуру, т. е. $\sigma \gg \sigma_i$), помимо нормального растяжения ε_0, определяемого нормальным модулем Юнга E_0, производят еще добавочное магнитострикционное удлинение $\varepsilon_m = \lambda_s$. Если растягивать образец, намагниченный до насыщения вдоль $\bar{\sigma}$ (рис. 64, *в*), то добавочное удлинение $\varepsilon_m = 0$.

На рисунках сравниваются состояния без нагрузки ($\sigma = 0$) и с очень большими нагрузками, когда произошла полная магнитная текстура. В случае слабых нагрузок, когда происходит лишь частичная переориентация векторов I_s в различных магнитных фазах, на механострикцию влияют внутренние напряжения (рис. 65). При $\sigma = 0$ (рис. 65, *а*) легчайшее направление составляет с осью образца угол θ. Тогда, если $\lambda_s = 0$, растяжение σ будет стремиться ориентировать легчайшую ось вдоль своего направления. Если σ_i велики, а следовательно, велика созданная ими анизо-

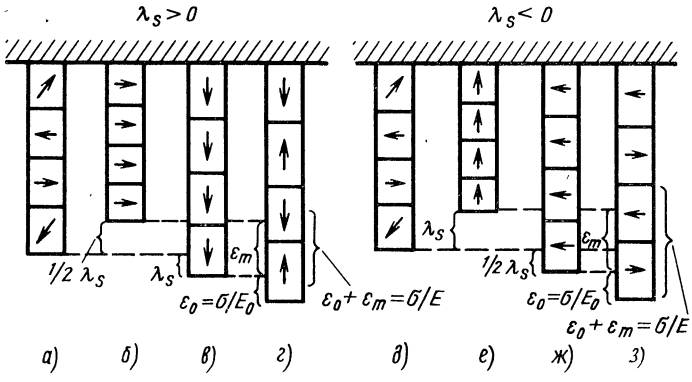


Рис. 64. Схема эффекта механострикции:

а) $H = 0$, $\sigma = 0$; *б)* $H = H_s$, $\sigma = 0$; *в)* $H_{\downarrow} = H_s$, $\sigma = 0$; *г)* $H = 0$, $\sigma \gg \sigma_i$; *д)* $H = 0$, $\sigma = 0$; *е)* $H_{\uparrow} = H_s$, $\sigma = 0$; *ж)* $H = H_s$, $\sigma = 0$; *з)* $H = 0$, $\sigma \gg \sigma_s$

тропия, то внешняя нагрузка ($\sigma < \sigma_i$) лишь незначительно изменит угол θ и добавочное растяжение ε_m будет мало (рис. 65, *б*). Если σ_i малы, то та же самая внешняя нагрузка сильно уменьшит угол θ и добавочное удлинение ε_m будет велико (рис. 65, *в*).

Знак механострикции для всех ферромагнитных материалов одинаков (при одном и том же виде упругой деформации), несмотря на то что знаки магнитострикции в наклепанных материалах могут быть различными.

При растяжении образца, предварительно намагниченного перпендикулярно к направлению σ (см. рис. 64, *б* и *г*), добавочное удлинение

$$\varepsilon_m = \frac{3}{2}\lambda_s.$$

В материале с отрицательной магнитострикцией наибольшее добавочное удлинение $\left(\varepsilon_m = -\frac{3}{2}\lambda_s\right)$ испытывает образец, намагниченный до насыщения вдоль направления растягивающей силы (рис. 64, *е* и *з*), а наименьшее удлинение ($\varepsilon_m = 0$) испытывает образец, предварительно намагниченный перпендикулярно к σ (рис. 64, *ж*). Размагниченный образец получает дополнительное удлинение

$$\varepsilon_m = -\frac{1}{2}\lambda_s.$$

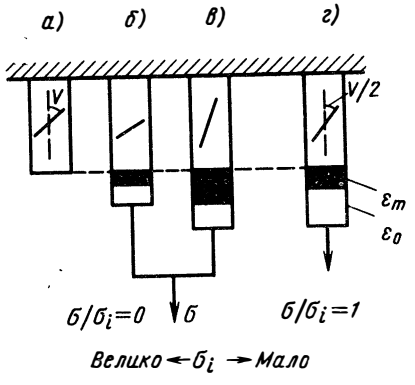


Рис. 65. Схема влияния внутреннего напряжения на ФЭ

Отклонение от закона Гука можно наблюдать лишь для весьма мягких в магнитном отношении материалов. Для ферромагнетиков, имеющих значительные внутренние напряжения, указанные отклонения почти не заметны.

Наиболее эффективно механострикция проявляется в проволоке из сплава типа инвар (15% Ni, 85% Fe), у которой самопроизвольная намагниченность сильно зависит от упругих напряжений. Механострикция вследствие механопарапроцесса может достигать заметной величины, например, в трубках из перминвара (30% Fe, 25% Co, 45% Ni).

Магнитное поле может быть направлено либо вдоль образца, параллельно

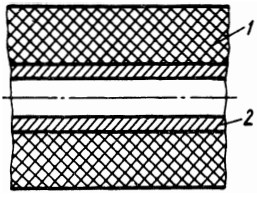


Рис. 66. Конструкция выводов магнетронов

линии действия силы, либо поперек образца, перпендикулярно к действию силы. Сила направлена вдоль образца.

Результатом воздействия является изменение объема, формы и (или) размеров, образца.

Материалы и сплавы, на которых проявляется эффект механострикции, находят применение в промышленности и измерительной технике. Решение многих технических проблем, особенно в точном приборостроении, метрологии, авиации, в производстве электро- и радиоламп, стало возможным в результате разработки специальных сплавов на железной основе, имеющих инварные свойства. Сплав, называемый элинваром (33% Ni, 7—9% Cr, 2—4% W, 2—3% Mn, остальное Fe), получил широкое применение в точном приборостроении. Вольфрам, хром, а также углерод, молибден и другие примеси вводят для упрочнения. Эти элементы вызывают дисперсионное отверждение или карбидообразование, поэтому прочность сплава повышается.

Конструкция выводов магнетрона (рис. 66) должна обеспечивать высокую прочность и герметичность при воздействии мощного магнитного поля.

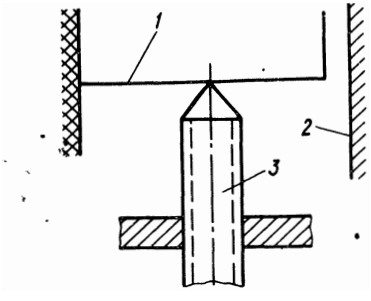


Рис. 67. Датчик магнитного поля

Магнетрон имеет изолятор *1*, сквозь который проходят выводы *2* от внутренних элементов конструкции.

Датчик магнитного поля (рис. 67) содержит чувствительный пружинный элемент *1*, один конец которого является обкладкой электрического конденсатора *2*. Микротермический винт *3* обеспечивает необходимые начальные напряжения в пружине *1*.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [17, 51], а о применении эффекта — в работе [2].

ПАМЯТЬ ФОРМЫ

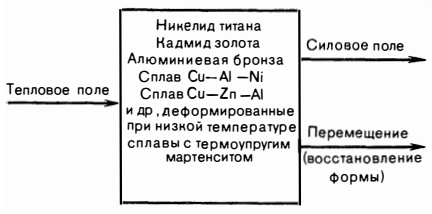


Рис. 68. Структурная схема ФЭ памяти формы

Память формы — это восстановление исходной формы после деформирования. Эффект наблюдается как в изотермических условиях, так и при изменении температуры (нагреве и охлаждении).

Под эффектом памяти формы в широком смысле понимают ряд эффектов, связанных с явлением обратимости больших неупругих деформаций. Это явление наблюдается у сплавов с необычными структурными перестройками материала — термоупругими мартенситными превращениями и упругим двойникованием.

Мартенситное превращение — бездиффузионное перемещение атомов исходной (высокотемпературной) фазы в положение, соответствующее кристаллической решетке другой (низкотемпературной) фазы, более устойчивой в новых термодинамических условиях. Перемещение носит сдвиговой характер с сохранением когерентности решеток на границе растущего мартенситного кристалла.

Рост кристалла новой фазы в некоторых сплавах продолжается до наступления термоупругого равновесия между мартенситной и исходной фазами. Такая структура материала,

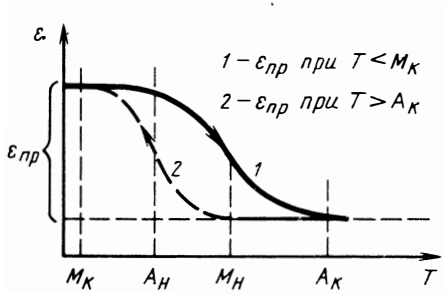


Рис. 69. Схемы деформации:
1 — ФЭ при нагреве; 2 — ФЭ при охлаждении

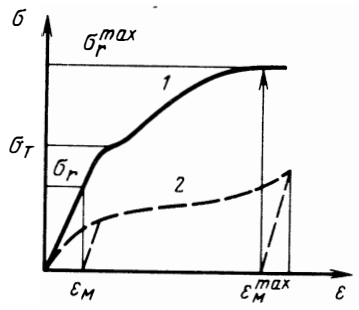


Рис. 71. Схема генерации напряжений:
1 — деформация аустенита; 2 — деформация мартенсита

содержащая одновременно исходную и мартенситную фазы, находящиеся в условиях термоупругого равновесия, называется структурой термоупругого мартенсита. Доля исходной и мартенситной фаз зависит от конкретных термомеханических условий и может меняться при изменении механической нагрузки и температуры. Деформация такой мартенситной структуры оказывается для некоторых сплавов практически полностью обратимой. При этом обратимая деформация в рекордных случаях достигает 30%, в то время как восстановление формы при упругой деформации традиционных материалов не превышает десятых долей процента.

Использование явления обратимости больших неупругих деформаций позволяет реализовать более 10 различных эффектов, наиболее известным из которых является собственно эффект памяти формы (рис. 69).

Эффект характеризуется коэффициентом возврата заданной формы

$$K_{\text{ф}} = \frac{\varepsilon_{\text{пф}}}{\varepsilon_{\text{пр}}},$$

где $\varepsilon_{\text{пф}}$ — восстанавливаемая деформация; $\varepsilon_{\text{пр}}$ — предварительная деформация.

Эффект реализуется в диапазоне температур фазового превращения:

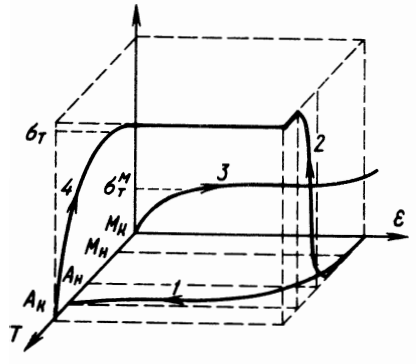


Рис. 70. Связь деформационных и силовых эффектов:
1 — эффект памяти формы; 2 — эффект генерации напряжений; 3 — деформирование мартенсита; 4 — деформирование аустенита

16. Характеристики материалов, обладающих памятью формы

Соединение или сплав	Температура преобразования структуры, К
TiNi	77—393
AuCd	333—353
Cu—Al—Ni	403
In—Tl+20% Tl	373
AgCd+45% Cd	203
NiAl (сплав с 36,8% Al)	553
Co—Ni (25% Ni, 19% Ni, 30% Ni)	563—573
Mn—Cu (90% Mn)	373—543
Fe—Ni (29% Ni)	773
Fe—Mn (24% Mn)	573
Cu—Al (25% Al)	623—723
Сталь 12Х18Н10Т	373

Примечание. Во всех случаях составы даны в ат. долях, %.

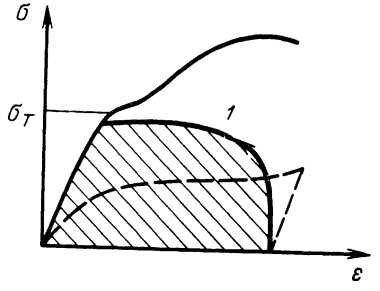


Рис. 72. Кривая максимальной работы сплава

$M_н$, $M_к$ — соответственно температура начала и конца прямого мартенситного превращения, $A_н$, $A_к$ — температура начала и конца обратного мартенситного превращения для данного материала.

Другие эффекты, входящие в широкое понятие памяти формы, удобно классифицировать по деформационным [$\varepsilon = f(\sigma, T)$], силовым [$\sigma = f(\varepsilon, T)$] и температурным [$T = f(\varepsilon, \sigma)$] группам.

Взаимосвязь эффектов памяти формы и генерации напряжений показана на рис. 70. Эффект генерации напряжений обычно сопутствует реализации эффекта памяти формы. Он заключается в создании механического давления на препятствие, затрудняющее восстановление формы деформированного материала. Возникающее реактивное напряжение σ_r может быть значительным. При $\sigma_r > \sigma_т$ происходит самодеформирование материала. Максимальное реактивное напряжение, развиваемое при жестком противодействии возврату формы (рис. 71),

$$\sigma_r^{max} = \sigma_т + \frac{d\sigma}{d\varepsilon}\varepsilon_м,$$

где σ_r — реактивное механическое напряжение; $\sigma'_т$ — предел текучести

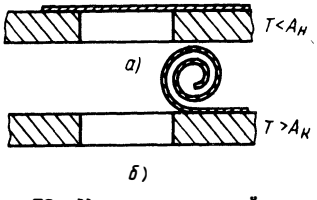


Рис. 73. Крышка пылевой защиты:
а — исходное положение; *б* — после срабатывания

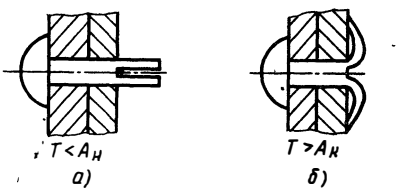


Рис. 74. Заклепка:
а — исходное положение; *б* — после нагрева

высокотемпературной фазы материала (обычный предел текучести); $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ — коэффициент деформационного упрочнения высокотемпературной фазы материала; $\varepsilon_м$ — термоупругая деформация мартенситной фазы.

Совместная реализация эффектов памяти формы и генерации напряжений позволяет осуществлять прямое преобразование теплоты в механическую работу.

Эффект реализуется при прохождении температуры материала через интервал температур мартенситного превращения для данного сплава. Реализация ФЭ при нагреве более эффективна, чем при охлаждении. В табл. 16 представлены характеристики материалов, обладающих памятью формы. Химический состав материала влияет на температуру превращений. Так, отклонение состава сплава TiNi от эквиатомного на 0,2% может сместить температуру превращения на 20—40 К.

Максимальные реактивные напряжения не должны превышать предел текучести, чтобы избежать потерь на самодеформирование сплава. Кривая возврата *1* (рис. 72) позволяет получить максимальную работоспособность сплава (заштрихованная площадь).

Рекомендуемые диапазоны работоспособности элементов, использующих эффект памяти формы: силовые элементы перемещения $M_к < T_{раб} < A_к$.

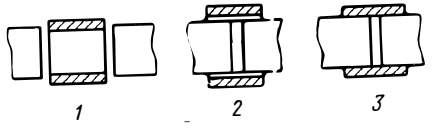


Рис. 75. Схема несварного соединения

силовые конструкционные элементы $A_к < T_{раб} < T_п$; условия хранения в деформированном состоянии в режиме готовности к работе $T_{хран} < A_н$, где $M_к$ — температура конца мартенситного превращения; $A_к$ — температура конца обратного мартенситного превращения; $T_{раб}$ — температура работы элемента; $T_{хран}$ — температура хранения; $T_п$ — температура начала ползучести. ФЭ применяется в двигателях для преобразования низкотемпературной теплоты в механическую работу, в самосрабатывающих при достижении определенной температуры приводах, захватах, в исполнительных механизмах, системах управления.

ФЭ использованы в пылезащитной крышке (рис. 73), крепеже (рис. 74).

В авиации, космонавтике, кораблестроении используется эффект памяти формы для создания термомеханических соединений (рис. 75). Втулка из низкотемпературного запоминающего сплава, внутренний диаметр которой примерно на 4% меньше наружного диаметра соединенных трубок (поз. *1*), помещается в жидкий азот (77 К) и деформируется дорнованием так, что ее внутренний диаметр становится примерно на 4% больше наружного диаметра трубок (поз. *2*). Концы соединяемых трубок вводятся внутрь охлажденной втулки, которая отогреваясь до комнатной температуры, восстанавливает исходную форму и сжимает концы трубок, обеспечивая прочное герметичное соединение (поз. *3*).

Сведения о физической сущности и о применении эффекта приведены в работах [132, 280, 297].

ПИНЧ-ЭФФЕКТ



Рис. 76. Структурная схема пинч-эффекта

Пинч-эффект — сжатие плазмы под действием протекающего по ней тока. Пинч-эффект проявляется при достаточно больших силах тока. В простейшей форме это явление наблюдается при исследовании электрических разрядов с большой силой тока в прямых разрядных трубках. Ток, текущий по такому газообразному проводнику (ионизированному газу), окружает себя кольцевыми силовыми линиями магнитного поля. Взаимодействие тока с его собственным магнитным полем создает силу, сжимающую разрядный столб. В результате такого сжатия разряд сжимается в узкий шнур (рис. 77) В стационарных условиях должно существовать равновесие между газокинетическим давлением, стремящимся расширить плазменный шнур, и электродинамическими силами, которые сжимают его. Условие равновесия в общем случае имеет вид:

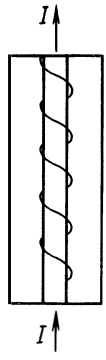


Рис. 77. Сужение плазмы в плазменный шнур

$$-\frac{dp}{dr} = \frac{1}{c} jH,$$

где j — плотность тока; H — напряженность магнитного поля на расстоянии r от оси плазменного шнура; p — давление; c — скорость света.

Соотношение, связывающее силу тока со средним давлением в плазменном шнуре:

$$I_A^2 = 200\pi R^2 p,$$

где I_A — сила тока; p — среднее давление по сечению плазменного шнура; R — радиус плазменного шнура.

ФЭ проявляется в токовом канале, например в цилиндре, заполненном проводящей средой. Электрическое поле приложено к противоположным концам цилиндра и действует по его оси. Силовые линии магнитного поля

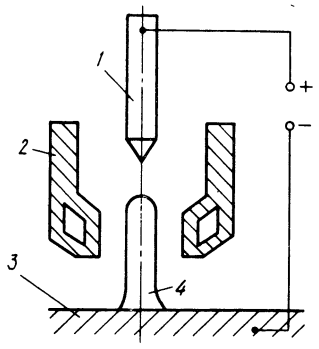


Рис. 78. Дуговой плазмотрон:
1 — катод; 2 — сопло; 3 — обрабатываемое изделие; 4 — дуга

имеют вид концентрических окружностей, плоскости которых перпендикулярны к оси цилиндра. Сила направлена к оси цилиндра и стремится сжать проводящую среду.

Пинч-эффект имеет место в твердотельной плазме (при равной концентрации носителей заряда противоположных знаков) и в низкотемпературной плазме.

Плазмотроны, создающие струи плотной низкотемпературной плазмы, широко применяются в различных областях техники; в частности, с их помощью режут и сваривают металлы, наносят покрытия.

Одним из примеров применения эффекта в низкотемпературной плазме является ртутный выпрямитель, а также генераторы низкотемпературной плазмы.

Если электрическую дугу (рис. 78) пропускать через охлаждаемое сопло и одновременно обдувать газом, то дуга сжимается, причем на границе электрического разряда наблюдаются интенсивный теплообмен и деионизация. Происходит сжатие столба дуги, и усиливается сжимающее действие собственного магнитного поля дуги. В результате увеличивается напряженность электрического поля разряда, электрическая мощность, выделяющаяся в единице объема столба дуги. Температура по оси дуги повышается и может достигать величин, характерных для низкотемпературной плазмы, т. е. 20—50 тыс. К.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работе [9], а о применении эффекта — в работах [78, 105].

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОБРАТНЫЙ ЭФФЕКТ



Рис. 79. Структурная схема обратного пьезоэлектрического эффекта

Обратный пьезоэлектрический эффект — способность пьезоэлектрических кристаллов изменять свою форму или размеры под действием внешнего электрического поля.

Существование обратного пьезоэффекта является термодинамическим следствием прямого пьезоэффекта. Оба эти эффекта тесно связаны между собой, являются проявлением одного и того же свойства и относятся к обратимым физическим явлениям.

При сжатии пьезоэлектрической пластины (рис. 80) силами F на пластинке появляются заряды и возникает электрическое поле (прямой пьезоэлектрический эффект), которое заключает в себе дополнительную энергию. По закону сохранения энергии при сжатии пьезоэлектрической пластинки совершается большая работа, а значит, в ней возникают дополнительные силы F_1, противодействующие сжатию. Это и есть силы обратного пьезоэффекта.

При обоих эффектах знаки зарядов на гранях одинаковы, но знаки деформаций различны. Если при сжатии пластинки на гранях появляются заряды, указанные на рис. 80, то при создании такой же поляризации внешним полем пластинка будет растягиваться.

Обратный пьезоэлектрический эффект имеет внешнее сходство с электрострикцией. Однако эти явления различны. Пьезоэффект линейно зависит от электрического поля и при изменении направления последнего меняет знак.

Зависимость результата от воздействия имеет следующий вид:

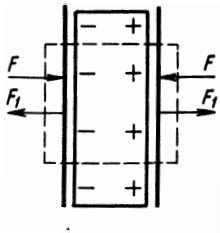


Рис. 80. Схема сжатия пьезоэлектрической пластины

$$\delta_{ij} = d_{kij} E_э,$$

где δ_{ij} — деформация кристалла; d_{kij} — пьезоэлектрический модуль; $E_э$ — напряженность электрического поля.

Линейная зависимость деформации от электрического поля и изменение знака деформации при перемене направления поля на обратное возможна только для веществ, обладающих известной внутренней «односторонностью» или полярностью. Это свойство только анизотропных кристаллов, обладающих необходимой степенью асимметрии. Кристаллы, обладающие центром симметрии, не могут быть пьезоэлектриками.

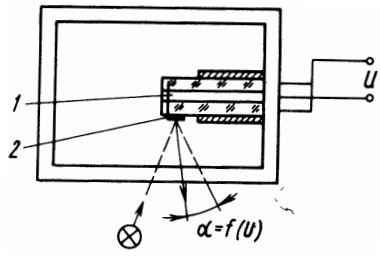


Рис. 81. Преобразователь напряжения в перемещение

ФЭ проявляется на кристаллических телах любой геометрической формы. Электрическое поле может быть приложено к точкам, линиям и поверхностям, расположенным на противоположных гранях кристалла. Силовое поле проявляется в изменении размеров и формы кристалла по оси, перпендикулярной к граням, к которым приложено напряжение.

При обратном пьезоэлектрическом эффекте деформацию и электрическое поле связывают те же самые коэффициенты, которые связывают при прямом поляризации и напряжение

17. Характеристики пьезоэлектрических материалов

Материал	Диэлектрическая проницаемость ε	Пьезомодуль $d \cdot 10^{12}$, Кл/Н	Модуль упругости E, ГПа	Коэффициент электромеханической связи k
Кварц	4,5(11)	2,31(11)	86,7(11)	0,095
Титанат бария ТБ-1	1500	45(11) / 100(33)	100—110	0,2(11) / 0,5(33)
Титанат бария-кальция ТБК-3	1180	51(11) / 113(33)	108—116	0,17(11) / 0,37(33)
Группа титаната-циркоината свинца	1100	75(11) / 150(33)	62	0,2(11) / 0,41(33)
Сульфат лития	10,3	16(22)	62(22)	0,38

Примечание. Цифры в скобках обозначают индексы соответствующих тензорных характеристик, например (11) обозначает d_{11}.

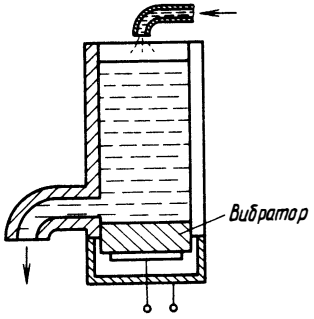


Рис. 82. Схема ультразвуковой обработки протекающей жидкости с плоским вибратором

Характеристики некоторых материалов, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл 17.

ФЭ используется в пьезоэлектрических преобразователях, которые применяются в качестве излучателей ультразвуковых колебаний, преобразователей электрического напряжения в деформацию (например, в пьезоэлектрических реле, пьезовибраторах осциллографов), обратных преобразователей в приборах уравновешивания и т. д.

В преобразователях напряжения в перемещение обычно используются изгибные пьезоэлементы. Схематическая конструкция такого преобразователя приведена на рис. 81. При действии напряжения U одна из пластин уменьшается по длине, другая расширяется и в результате биморфная пластина *1* изгибается. Напряжение источника с помощью пьезоэлементов преобразуется в угол отклонения светового луча. Отражателем является зеркало *2*. Стеклянные сосуды (рис. 82) применяют для ультразвуковой обработки ограниченных количеств жидкости. Чтобы непрерывно воздействовать на большие массы жидкости, следует проводить обработку протекающей жидкости.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работе [107], а о применении эффекта — в работах [256, 294].

РАДИАЦИОННОЕ ДАВЛЕНИЕ (ДАВЛЕНИЕ ЗВУКОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ)

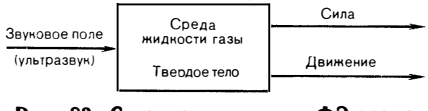


Рис. 83. Структурная схема ФЭ радиационного давления

Давление звукового излучения (радиационное давление) — среднее по времени избыточное давление на препятствие, помещенное в звуковом поле. Радиационное давление определяется импульсом, передаваемым в единицу времени единице площади препятствия. Давление звукового излучения на полностью отражающую звук плоскую поверхность при нормальном падении на нее плоской волны определяется формулой

$$p = \frac{\nu + 1}{8} \rho v^2 = (\nu + 1) E_к,$$

где ρ — плотность невозмущенной среды; v — амплитуда колебательной скорости частиц в пучности скорости стоячей волны; $E_к$ — средняя по времени и пространству плотность кинетической энергии звуковой волны; ν — показатель адиабаты, равный в случае газов отношению C_p/C_V; C_p и C_V — теплоемкости при постоянном давлении и объеме.

Этой формулой определяется давление звукового излучения (так называемое давление Рэлея), которое наблюдается, например, в жесткой трубе, где волну можно считать плоской.

Радиационное давление, создаваемое звуковым пучком или лучом, т. е. ограниченное по фронту плоской волной, распространяющееся в безграничной невозмущенной среде, при нормальном падении на полностью отражающую плоскую поверхность (так называемое давление Ланжевена) определяется формулой

$$p = \rho v^2/4 = 2E_к.$$

Радиационное давление на частично отражающее твердое препятствие

$$p = (1 + R^2) E_п,$$

где R — коэффициент отражения по давлению; $E_п$ — среднее по времени значение плотности полной энергии в падающей волне.

При нормальном падении звукового пучка на поверхность раздела двух сред эта поверхность испытывает радиационное давление

18. Характеристики веществ

Вещество	T, К	Плотность при давлении 0,1 МПа. кг/м³	T, К	Теплоемкость при давлении $\cdot 10^5$ Па, кДж/(кг·К)
Вода	277	$1{,}00 \cdot 10^3$	298	4,2
Глицерин	293	$1{,}26 \cdot 10^3$	288—323	2,4
Масло техническое	293	$0{,}9 \cdot 10^3$	293	2,0
Воздух	273	1,2928	298	1,0
Водород	273	0,08987	300	14,3
Азот	273	1,2505	300	1,0
Кислород	273	1,42904	300	1,0

$$p = 2E_{к1}(1 + R^2) - 2E_{к2},$$

где $E_{к1}$ и $E_{к2}$ — средние по времени значения плотности кинетической энергии падающей волны в первой среде и прошедшей волны во второй среде.

Давление звукового излучения зависит от ориентации препятствия относительно направления распространения звуковой волны, а также от плотности и теплоемкости среды, в которой распространяется звуковая волна. Препятствие может иметь форму диска, конуса, сферы. Звуковое поле действует на поверхность тела, помещенного в звуковое поле, перпендикулярную к направлению распространения звуковой волны. Сила приложена к центру площади давления соосно направлению на источник звука.

Характеристики некоторых материалов, которые могут быть использованы в качестве звукопроводящей среды, приведены в табл. 18.

Коэффициенты отражения звуковых волн на границе различных сред приведены в табл. 19.

Давление звукового излучения, действующее на границе раздела двух жидких или жидкой и газообразной сред, приводит к вспучиванию поверхности раздела, которое при достаточной интенсивности переходит в фонтанирование. Это явление используется при ультразвуковом распылении жидкостей. Эффект играет важную роль в процессе ультразвуковой коагуляции аэрозолей. Используется при определении абсолютного значения интенсивности звука с помощью радиометра или по вспучиванию границы раздела сред. В условиях невесомости может применяться в экспериментах по стабилизации предметов в пространстве, перекачке жидкости и т. п.

Радиометр, применяемый для измерения параметров звуковой волны в газах при низких ультразвуковых часто-

19. Коэффициенты (в %) отражения звуковых волн

Материал	Алюминий	Сталь	Никель	Медь	Стекло	Кварц	Вода	Трансформаторное масло
Алюминий	0	21	24	18	2	0,3	72	74
Сталь	—	0	0,2	0,3	31	27	88	89
Никель	—	—	0	0,8	34	29	89	90
Медь	—	—	—	0	19	22	87	88
Стекло	—	—	—	—	0	0,98	65	67
Кварц	—	—	—	—	—	0	68	81
Вода	—	—	—	—	—	—	0	0,6
Трансформаторное масло	—	—	—	—	—	—	—	0

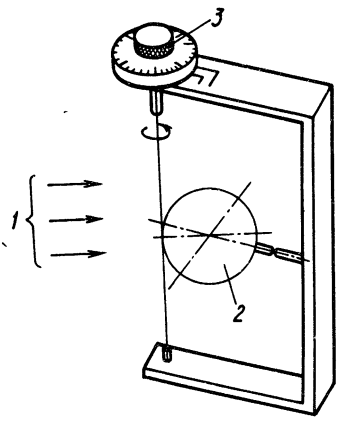


Рис. 84. Радиометр:
1 — звуковое поле; *2* — отражатель; *3* — измерительная головка

тах (рис. 84), состоит из подвешенного на закрученной проволоке сильно отражающего легкого диска, размеры которого велики по сравнению с длиной волны. Диск помещают в звуковое поле так, чтобы нормаль к нему составляла с направлением распространения звука некоторый угол α, так как при параллельном расположении диска и излучателя звука могут возникнуть стоячие волны, искажающие результаты измерений. При измерениях рефлектор, отклоненный из положения равновесия благодаря действию силы, вызванной радиационным давлением, приводится снова в положение равновесия с помощью закручивания проволоки. Зная угол поворота и силу, закручивающую проволоку, можно определить силу, действующую со стороны излучателя звука, и этим самым мощность звукового излучения.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [23, 89, 178, 241], а о применении эффекта — в работах [23, 88, 126, 167].

ЭФФЕКТ САДОВСКОГО

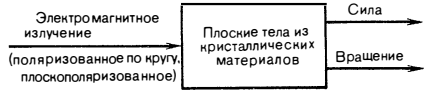


Рис. 85. Структурная схема ФЭ Садовского

Эффект Садовского — появление механического вращающего момента, действующего на тело, облучаемое поляризованным эллиптически или по кругу светом. Эффект Садовского обусловлен наличием у эллиптически поляризованной волны отличного от нуля момента импульса (момента количества движения), который волна передает телу, поглощающему ее или изменяющему состояние ее поляризации. Например, когда на кристаллическую пластинку в 1/4 длины волны падает световая волна, поляризованная по кругу, появляется вращательный момент, стремящийся повернуть пластинку в сторону вращения электромагнитных векторов электромагнитной волны; при падении плоскополяризованного света на такую же пластинку появляется момент вращения, действующий в обратную сторону.

Вращательный момент, возникающий под действием поляризованного света, прямо пропорционален длине волны излучения и плотности электромагнитной энергии в падающем пучке.

Эллиптически поляризованная световая волна обладает моментом импульса, плотность потока которого в вакууме

$$M = |[E_э A]| = I_c g_э / \omega,$$

где I_c — яркость светового пучка (модуль вектора Пойнтинга); $g_э$ — степень эллиптичности; ω — угловая частота световой волны; $E_э$ — напряженность электрического поля; A — вектор-потенциал электромагнитного поля волны.

Вращение кристаллической пластинки происходит вокруг оси, лежа-

20. Характеристика световых волн

Характеристика волны	ω, $с^{-1}$	I_c, Вт/см²	M, мН/м
Видимый свет	$4 \cdot 10^{15}$	—	$3 \cdot 10^{-10}$
Сантиметровые волны	10^{10}	1	10^{-3}

21. Показатели преломления материалов, используемых для отражающих покрытий

Материал	Показатель преломления	Области длин волн, в которых используется материал, нм
Al_2O_3	1,69	200—7 000
Ge	4,0	1 300—35 000
GeO_2	2,3	400—5 000
MgF_2	1,38	200—5 000
$NaAlF_2$	1,35	200—10 000

щей в плоскости, перпендикулярной к направлению света.

Характеристики волн и материалов, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 20 и 21.

ФЭ используется в ряде областей техники. В приборостроении на его основе осуществлена разработка лазерного гироскопа. Лазерный гироскоп имеет форму кольца (обычно треугольного), вдоль которого могут распространяться навстречу друг другу лазерные пучки. Длина волны такого кольцевого лазера устанавливается таким образом, чтобы периметр кольца был равен целому числу волн. Изменение периметра кольца приводит к изменению длины волны лазера. При вращении кольца вокруг оси, перпендикулярной к его плоскости, возникает разность длин оптических путей пучков, распространяющихся в противоположных направлениях. Пучок, движущийся в направлении вращения кольца, должен будет проходить несколько большее расстояние при каждом обходе кольца. В схеме системы с треугольным кольцом (рис. 86), активная среда лазера *1* находится в двух сторонах треугольника. Направления распространения пучков задаются зеркалами *2*, расположенными в вершинах треугольника.

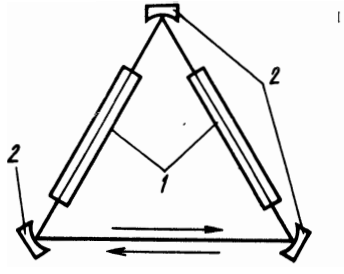


Рис. 86. Схема лазерного гироскопа с треугольным расположением элементов

Время, в течение которого свет один раз обходит указанный кольцевой путь,

$$T = 3L/c,$$

где L — длина стороны треугольника; c — скорость света.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работе [215], а о применении эффекта — в работах [90, 213].

СВЕТОВОЕ ДАВЛЕНИЕ

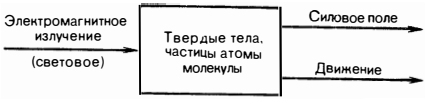


Рис. 87. Структурная схема ФЭ светового давления

Давление света — это механическое давление, производимое светом на отражающие и поглощающие тела. Давление света даже для самых сильных источников света мало (например, общее давление солнечного излучения на Землю в 10^{13} раз меньше силы притяжения Солнца). Поэтому световое давление трудно измерить, мешают помехи: конвекционные потоки газов и радиометрические силы, которые могут быть в сотни раз больше, чем световое давление.

Согласно электромагнитной теории света, давление, которое оказывает на поверхность тела плоская электромагнитная волна, падающая перпендикулярно к поверхности, равно плотности U электромагнитной энергии (энергии, заключенной в единице объема) около поверхности. Если мощность электромагнитной волны, падающей на 1 см^2 поверхности тела, равна S, коэффициент отражения электромагнитной энергии от поверхности тела равен $R_{от}$, то вблизи поверхности плотность энергии

$$U = S\frac{1 + R_{от}}{c},$$

где c — скорость света.

22. Отражение света (в %) от поверхностей материалов

Длина волны, нм	Медь	Платина	Хром
1000	90,1	72,9	57,0
2000	95,6	80,6	63,0
3000	97,1	88,8	70,0
4000	97,3	91,5	76,0
5000	97.9	—	81,0

Этой величине и равно давление света на поверхность тела:

$$p = S\,(1 + R_{от})/c.$$

Квантовая теория света объясняет световое давление, как результат передачи фотонами своего импульса атомам или молекулам на поверхности тела. Световой поток с частотой ν, передающий 1 см^2 поверхности тела за 1 с энергию $E_к$, состоит из N частиц: $N = E_к/(h\nu)$, так как каждый фотон обладает импульсом $h\nu/c$. При поглощении фотон отдает импульс $h\nu/c$, при отражении — импульс $2h\nu/c$, так как его импульс при этом меняется от $+h\nu/c$ до $-h\nu/c$.

Общий переданный фотонами импульс определяется как

$$(1 + R_{от})\,N\,\frac{h\nu}{c} = \frac{p}{c}\,(1 + R_{от}),$$

где h — постоянная Планка.

Ограничения на проявления ФЭ: оптическая прозрачность окружающей тело среды, резонанс частоты электромагнитного излучения и частоты колебаний атомов, например, газов. Проявляется на телах любой геометрической формы. В технических системах используются тела плоской, сферической и параболической формы.

Электромагнитное излучение (световое) приложено к поверхности тела, обращенной к источнику излучения. Силовое поле, обусловливающее движение тела, приложено к поверхности тела.

Характеристики некоторых материалов, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 22.

Световое давление используется для разделения частиц одного и того

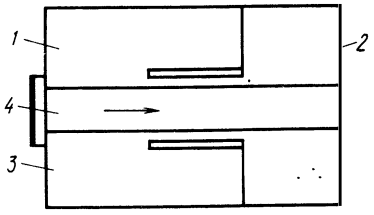


Рис. 88. Двухкамерный сосуд для разделения газов:

1 — ближняя камера; 2 — дальняя камера; 3 — смесь двух газов; 4 — лазерное излучение

же вещества по размеру; разделения частиц с различными относительно среды показателями преломления; создания «оптической ловушки». Возможным использованием светового давления в высоком вакууме является ускорение микрочастиц вещества до больших скоростей.

Одним из возможных применений резонансного светового давления является разделение газов: при облучении двухкамерного сосуда (рис. 88), наполненного смесью двух газов, один из которых в резонансе с излучением, резонансные атомы под действием светового давления перейдут в дальнюю камеру.

С помощью резонансного светового давления можно получить разделение изотопов путем сдвига их резонансной частоты.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [71, 153], а о применении эффекта — в работе [71].

СВОБОДНАЯ КОНВЕКЦИЯ

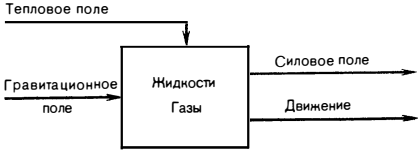


Рис. 89. Структурная схема ФЭ свободной конвекции

Конвекция — перенос теплоты в жидкостях или газах потоками вещества. Теплообмен посредством конвекции

совершается путем перемещения материальных частиц. Свободная конвекция возникает в поле силы тяжести при неравномерном нагреве (нагреве снизу) текучих веществ.

Свободноконвективные течения возникают вследствие изменений плотности, обусловленных процессами тепло- или массообмена в поле гравитационных сил. Разность плотностей создает выталкивающую силу, под действием которой возникает течение. При охлаждении нагретого тела окружающим воздухом такое течение наблюдается в области, окружающей тело. К естественной конвекции относят также обусловленные выталкивающей силой течения при отводе теплоты в атмосферу или другую окружающую среду, циркуляцию в нагретых помещениях, в атмосфере или водоемах, течения, связанные с выталкивающей силой.

Нагретое вещество под действием Архимедовой силы перемещается относительно менее нагретого вещества в направлении, противоположном направлению силы тяжести.

Конвекция приводит к выравниванию температуры вещества. Интенсивность конвекции зависит от разности температур между слоями, теплопроводности и вязкости среды.

Полный тепловой поток в результате теплоотдачи определяется формулой Ньютона, которая связывает тепловой

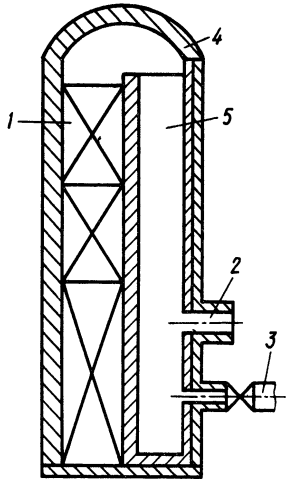


Рис. 90. Воздухонагреватель

поток q и разность температур $\Delta\theta$ поверхности тела и окружающей среды:

$$q = \xi S \Delta\theta,$$

где ξ — коэффициент теплоотдачи, зависящий от вида течения, свойств жидкости, размеров нагретого тела; S — поверхность тела.

ФЭ проявляется только в поле массовых сил (например, гравитационном). Так как конвекция связана

23. Характеристики некоторых веществ

Вещество	Температура, К	Плотность ρ, кг/м³	Удельная теплоемкость C_p, кДж/(кг·К)	Динамическая вязкость μ, мкПа·с	Теплопроводность $\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К)
Гелий	70	0,6864	5,2	7,7	0,579
	100	0,4807	5,2	9,77	7,720
Аргон	100	4,916	0,550	8,30	0,66
	150	3,224	0,528	12,31	0,96
Водород	50	0,5096	10,50	2,516	3,62
	100	0,2457	11,23	4,212	6,65
Кислород	100	3,944	0,962	7,64	0,925
	150	2,584	0,921	11,48	1,38
Водяной пар	400	0,5542	2,014	13,44	2,61
Вода	293	998,2	4,183	1004	59,9
Аммиак	253	666,69	4,509	254,0	54,7
	293	611,75	4,798	219,6	52,1
Бензин	303	870	1,73	542	14,4

с массопереносом, то эффективность ее проявления в газах определяется давлением. При низком давлении газов эффект не проявляется.

Характеристики некоторых веществ, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 23.

Конвекция широко распространена в природе: в нижнем слое земной атмосферы, а океане, в недрах Земли, в звездах.

Изучение процессов естественной конвекции имеет большое значение в связи с проблемой сброса или отвода теплоты во многих приборах, процессах и системах. Естественная конвекция существенно влияет на предельные значения тепловых потоков, от нее зависит безопасность эксплуатации в условиях, когда обычные способы отвода теплоты непригодны и удаление выделяемой системой теплоты проводится путем естественной конвекции, что имеет большое значение во многих электронных приборах и энергетических установках.

Воздухонагреватель (рис. 90) предназначен для подогрева воздуха и для дутья при работе доменной печи. Он представляет собой цилиндрический корпус, перекрытый куполом *4*, футерованный огнеупором и снабженный термоизоляцией. Внутренний его объем разделен на две части: одна — шахта *5* для горения с горелкой для доменного газа *3*, другую занимает набивка.

Набивка состоит из металлических гофрированных и рифленых лент, намотанных на деревянный сердечник так, чтобы желобки рифления, накладываясь друг на друга под углом, образовывали узкие проходы треугольного сечения.

В режиме нагрева набивки продукты сгорания от горелки поднимаются вверх, под куполом переходят через ограждающую камеру и поступают в набивку, омывая ее сверху вниз в вертикальном направлении.

В режиме дутья холодный газ, заполняя это же пространство, забирает тепловую энергию, накопленную набивкой в режиме нагрева. Нагретый газ поступает в воздухопровод горячего дутья *2*.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [74, 145], а о применении эффекта — в работах [157, 299].

СИЛЫ ЛОРЕНЦА

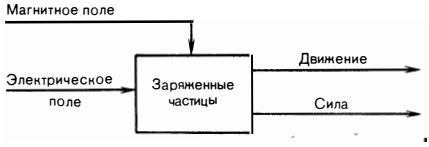


Рис. 91. Структурная схема ФЭ силы Лоренца

Сила Лоренца — сила, действующая на заряженную частицу, движущуюся в электромагнитном поле.

$$\overline{F} = e\overline{E}_э + \frac{e}{c}[\overline{vB}],$$

где e — заряд частицы; c — скорость света; $E_э$ — напряженность электрического поля; B — магнитная индукция; v — скорость частицы относительно системы координат, в которой вычисляются величины F, $E_э$ и B. Эта формула справедлива при любых значениях скорости заряженной частицы. Она является важнейшим соотношением электродинамики, так как позволяет связать уравнения электромагнитного поля с уравнениями движения заряженных частиц.

Первый член в правой части уравнения — сила, действующая на заряженную частицу в электрическом поле, второй — в магнитном поле. Так как магнитная часть Лоренцевой силы $\sim[\overline{vB}]$, то сила, действующая со стороны магнитного поля на частицу, перпендикулярна к $\overline{B}$ и $\overline{v}$ и, следовательно, не совершает работу, а лишь искривляет траекторию движения частицы, не меняя ее энергии. Модуль этой силы в системе СИ равен $vB\sin\alpha$, где α — угол между векторами $\overline{v}$ и $\overline{B}$.

В вакууме в постоянном однородном магнитном поле ($\overline{B} = \overline{H}$, где $\overline{H}$ — напряженность магнитного поля) заряженная частица под действием магнитной составляющей Лоренцевой силы движется по винтовой линии с постоянной скоростью v. При этом ее движение складывается из равномерного прямолинейного движения вдоль направления $\overline{H}$ (со скоростью $v_\parallel$ — составляющей скорости частицы $\overline{v}$ в напряжении $\overline{H}$) и равномерного вращательного движения в плоскости, перпендикулярной к $\overline{H}$ (со скоростью

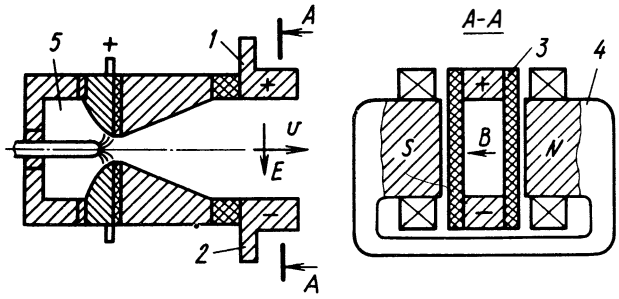


Рис. 92. Электромагнитный плазменный $E_э \times H$-ускоритель

$v_\perp$ — составляющей скорости $\bar{v}$ в направлении, перпендикулярном к $\bar{H}$). Проекция траектории движения частицы на плоскость, перпендикулярную к v, есть окружность радиуса $R = cmv_\perp/(eH)$, а частота вращения $\omega = eH/(mc)$ (так называемая циклотронная частота; m — масса частицы). Ось винтовой линии совпадает с $\bar{H}$, а центр окружности перемещается вдоль силовой линии поля со скоростью $v_\parallel$.

Если $\bar{E}_э \neq 0$, то движение в магнитном поле носит более сложный характер — происходит перемещение центра вращения частицы перпендикулярно к полю $\bar{H}$, называемое дрейфом частицы. Направление дрейфа определяется вектором $[\bar{E}_э H]$ и не зависит от знака заряда. Скорость дрейфа u для простейшего случая скрещенных полей ($\bar{E}_э \perp \bar{H}$) равна $u = cE_э/H$.

Если заряд движется вдоль силовых линий поля, т. е. если векторы скорости и индукции параллельны или антипараллельны, то магнитное поле на заряд не действует.

Сила Лоренца максимальна при $\alpha = 90°$ и равна нулю при $\alpha = 0$.

Сила Лоренца используется в технологии для очистки поверхностей (метод катодного распыления), в исследованиях по ионосферной аэродинамике, в термоядерных исследованиях (в качестве инжекторов плазмы), в плазмохимии, для обработки электропроводных материалов (сварка, резка, плавка), в электрореактивных двигателях.

Ракетный ускоритель с взаимно перпендикулярными электрическими и магнитными полями ($\bar{E}_э \times \bar{H}$ — ускоритель) (рис. 92) состоит из двух электродов — анода *1* и катода *2*, которые вместе с боковыми электроизолирующими стенками *3* образуют канал для прохода плазмы. Перпендикулярно электрическому полю с напряженностью $E_э$ канал пронизывается магнитным потоком с индукцией B, создаваемым электромагнитом *4*. Электропроводящее рабочее тело в виде плазмы подается на вход в двигатель от генератора плазмы *5*. В ускорителе через плазму проходит электрический ток от анода к катоду, и плазма как проводник с током в магнитном поле испытывает воздействие силы F_a — сумму Лоренцевых сил, действующих на отдельные заряды. Сила F_a ускоряет плазму в направлении выхода из ускорителя.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работе [263], а о применении эффекта — в работе [259].

СОЛНЕЧНЫЙ ПАРУС

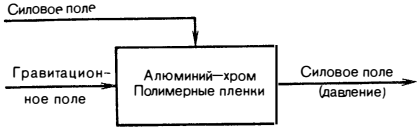


Рис. 93. Структурная схема ФЭ солнечного паруса

Эффект солнечного паруса основан на использовании солнечной энергии в условиях космоса. Принцип дей-

ствия таких систем сходен с принципом действия паруса. В этом случае космический аппарат имеет чрезвычайно развитую поверхность, образуемую тонкой зеркальной пленкой. Солнечное излучение, падая перпендикулярно к поверхности пленки и зеркально от нее отражаясь, создает тягу также перпендикулярно к поверхности пленки. При частичном поглощении излучения направление тяги будет составлять некоторый угол с этой поверхностью; ориентируя парус, можно получить тягу в нужном направлении.

На диаграмме сил, действующих на парус (рис. 94), парус площадью A ориентирован так, что падающий на него луч составляет угол φ с нормалью к парусу. Проекция площади паруса, нормальная к падающему лучу, равна $A\cos\varphi$.

Если S — солнечная постоянная у Земли и $S\cos\varphi$ — давление луча, нормальное к парусу, то составляющая сила в радиальном направлении должна равняться $SA\cos^3\varphi$. Следовательно,

$$SA\cos^3\varphi = \frac{F}{2r^2}\,\frac{p_F^2 m}{p_F^2+1};$$

$$\frac{1}{p_F} = \frac{F_\theta}{F_r} = \operatorname{tg}\varphi,$$

где F — сила, действующая со стороны Солнца на тело массой 1 кг, находя-

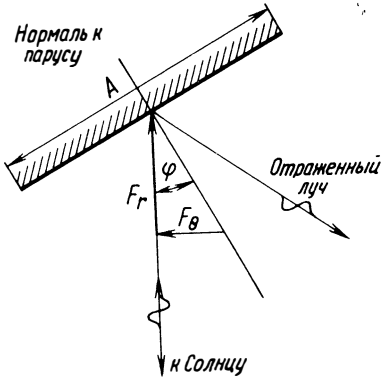


Рис. 94. Схема сил, действующих на солнечный парус:

A — площадь паруса; φ — угол между нормалью и радиус-вектором к Солнцу (угол падения солнечных лучей на парус); F_r — сила на единицу массы вдоль радиус-вектора; F_θ — сила на единицу массы, перпендикулярная к радиус-вектору

24. Необходимая площадь солнечного паруса на единицу массы корабля или земного веса

Длительность полета, сут.	$1/p_F$	Площадь паруса на единицу массы или земного веса, м²/кг	Путевой угол, рад
80	0,427	760	0,9
100	0,342	965	1,2
150	0,228	1 440	1,8
200	0,171	19 000	2,4

щееся на расстоянии одной астрономической единицы; F_r — радиальная составляющая силы; F_θ — тангенциальная составляющая силы; r — расстояние до корабля в астрономических единицах; m — полная масса корабля; p_F — радиальный коэффициент силы; $1/p_F$ — тангенс угла падения солнечных лучей.

Необходимая площадь паруса на единицу массы корабля или земного веса дана в табл. 24 для различной длительности полета.

Достоинства таких тяговых систем очевидны: они не требуют расхода ни энергии, ни рабочего тела. Однако для получения достаточных ускорений необходимо использовать очень тонкую пленку, чтобы отношение площади паруса к массе корабля вместе с пару-

25. Характеристики некоторых материалов

Материал	Коэффициент отражения	Коэффициент излучения	Применение
Al	0,85	—	Как отражающая поверхность
Cr	—	0,4	Как поглощающая поверхность
Полимерные пленки	0,91	—	Как отражающая поверхность

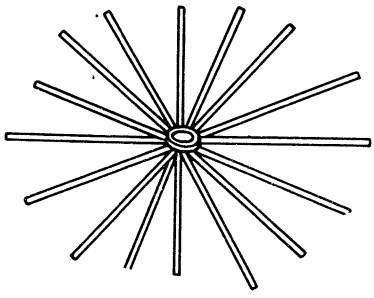


Рис. 95. Солнечный гироскоп

сом было бы достаточно большим. Площадь паруса тоже достаточно велика.

ФЭ проявляется в условиях космоса. Поверхность солнечного паруса должна быть покрыта материалом с большим коэффициентом отражения. Должно обеспечиваться минимальное отношение массы паруса к массе космического летательного аппарата.

Силовое поле (сила) приложено к поверхности пленки.

Характеристики некоторых материалов, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 25.

Принцип действия таких систем сходен с принципом действия паруса. Хотя данный парус должен быть больших размеров, задача создания таких конструкций с приемлемыми массовыми характеристиками вполне реальна для современной науки и техники. В частности, в США рассматривались различные типы солнечного паруса в связи с разработками космического аппарата, предназначенного для полета к комете Галлея. Одна из наиболее перспективных конструкций паруса — «Солнечный гироскоп» (рис. 95). Этот «гироскоп» состоит из 12 лопастей длиной 7,4 км и шириной 8 м, масса каждой лопасти 200 кг; для придания некоторой жесткости на лопастях через каждые 150 м предусмотрены «рейки». С помощью такого паруса космическому аппарату нужно было сообщить скорость 55 км/с. Для реализации проекта толщина пленки должна быть около 0,0025 мм, а удельная масса ≈ 3 г/м^2.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [133, 156], а о применении эффекта — в работах [67, 77, 104].

ЭФФЕКТ СУПЕРПОЗИЦИИ

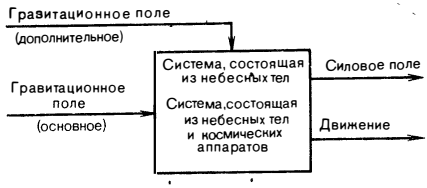


Рис. 96. Структурная схема ФЭ суперпозиции

По теории относительности Эйнштейна все тела испытывают универсальное взаимодействие — тяготение. Если это взаимодействие относительно слабое и тела движутся медленно по сравнению со скоростью света, то справедлив закон всемирного тяготения Ньютона, который гласит, что две любые материальные частицы с массами m_A и m_B притягиваются друг к другу с силой F, пропорциональной произведению этих масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния r между ними:

$$F = G\frac{m_A m_B}{r^2},$$

где G — гравитационная постоянная.

В обычных условиях на Земле проявление взаимодействия между телами пренебрежимо мало, но в астрономии закон тяготения Ньютона является фундаментальным; на его основе вычисляются траектории движения естественных и искусственных тел в Солнечной системе, движение в других системах небесных тел, определяются массы тел.

Сила, с которой космический летательный аппарат (КЛА) массой m притягивается к центру небесного тела массой M, определяется по формуле

$$F = G\frac{Mm}{r^2} = \frac{Km}{r^2},$$

где $G = 6{,}668 \cdot 10^{-11}$ м^3/(кг·с^2); r — расстояние между центрами небесного тела и КЛА; $K = GM$ — гравитационный параметр небесного тела — величина, характеризующая поле тяготения небесного тела.

На КЛА в полете действуют поля тяготения многих небесных тел. Величина тяготения зависит от расстояния до небесного тела.

При попадании в сферу действия небесного тела КЛА испытывает вли-

26. Значения гравитационных параметров

Планета	Гравитационный параметр, $м^3/с^2$
Меркурий	$2{,}165 \cdot 10^{13}$
Венера	$3{,}242 \cdot 10^{14}$
Земля	$3{,}986 \cdot 10^{14}$
Марс	$4{,}291 \cdot 10^{13}$
Юпитер	$1{,}265 \cdot 10^{17}$
Сатурн	$3{,}788 \cdot 10^{16}$
Уран	$5{,}794 \cdot 10^{15}$
Нептун	$6{,}860 \cdot 10^{15}$
Плутон	$3{,}312 \cdot 10^{14}$
Луна	$4{,}890 \cdot 10^{12}$
Солнце	$1{,}325 \cdot 10^{10}$

яние со стороны этого тела и начинает движение вокруг него. Целенаправленное изменение траектории полета за счет гравитационного притяжения космического аппарата небесным телом при близком пролете около него называется пертурбационным маневром. Изменение параметров движения КЛА с помощью пертурбационного маневра происходит без затрат топлива или других видов внутренней энергии КЛА. Существенным моментом пертурбационного маневра является то, что скорость КЛА может уменьшаться или увеличиваться в зависимости от взаимного положения КЛА и небесного тела; тем самым можно «управлять» последующей траекторией.

Используя гравитационное возмущение Венеры, можно осуществить полет Земля — Венера — Меркурий с энергетическими затратами, близкими по значению к тем, которые необходимы только для полета к Венере. В то же время для непосредственного перелета Земля — Меркурий затраты энергии примерно в 3 раза больше, чем для полета к Венере.

Особенно эффективны схемы полета, в которых используется возмущающее воздействие Юпитера. Пертурбационный маневр в сфере действия Юпитера позволяет вывести КЛА на траектории полета к Солнцу или за пределы Солнечной системы с энергозатратами, близкими к энергозатратам только для полета к Юпитеру.

Ограничением на проявление ФЭ является удаленность КЛА от небесного тела, что связано с уменьшением тяготения в зависимости от расстояния. Основное воздействие (гравитационное поле) приложено к центрам масс системы объектов (небесные тела, КЛА). Дополнительное воздействие (гравитационное поле) приложено к центру масс КЛА или другого тела, движущегося вблизи объектов системы. Результат воздействия проявляется в возникновении силы, приложенной к центру масс тела.

В табл. 26 приведены значения гравитационных параметров, определяющих поля тяготения планет Солнечной системы.

Пертурбационные маневры были применены при движении КЛА «Луна-3», «Пионер-11», «Вояджер-1, -2» (в поле тяготения Юпитера) и «Маринер-10» (в поле тяготения Венеры).

Наиболее эффективен полет КЛА к дальним планетам с последовательными пролетами около нескольких внешних планет Солнечной системы. В проекте «Большой тур», разработан-

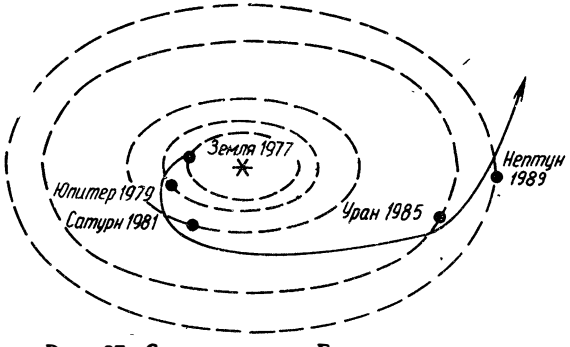


Рис. 97. Схема полета «Большого тура»

ном в США, для формирования последующих участков траектории используются возмущения, связанные с близким пролетом планеты, что позволяет увеличить скорость полета КЛА и существенно сократить время достижения планет.

Схема одного из вариантов полета «Большого тура» Земля — Юпитер — Сатурн — Уран — Нептун и ориентировочные даты старта и сближения с планетами приведены на рис. 97.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [133, 156, 231], а о применении эффекта — в работах [133, 156].

ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

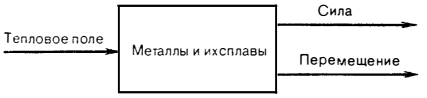


Рис. 98. Структурная схема ФЭ теплового расширения

Тепловое расширение — изменение размеров или формы тела в процессе его изобарического нагревания. От нагревания расширяются почти все твердые тела.

Тепловое расширение обусловливается асимметрией кривой потенциальной энергии межатомного взаимодействия относительно равновесного положения, вследствие чего при изменении температуры происходит изменение среднего межатомного расстояния. Оно определяется химическим составом, структурой тела, а также давлением, температурой и другими термодинамическими параметрами.

В качестве количественной характеристики теплового расширения обычно используют:

$\alpha = \frac{1}{L}\left(\frac{dL}{dT}\right)_p$ — истинный температурный коэффициент линейного расширения;

$\bar{\alpha} = \frac{1}{L}\frac{\Delta L}{\Delta T}$ — средний температурный коэффициент линейного расширения;

$\beta = \frac{1}{V}\left(\frac{dV}{dT}\right)_p$ — истинный температурный коэффициент объемного расширения;

$\bar{\beta} = \frac{1}{V}\frac{\Delta V}{\Delta T}$ — средний температурный коэффициент объемного расширения,

где L — длина; V — объем; T — температура тела.

Для анизотропных твердых тел температурный коэффициент линейного расширения в произвольном направлении

$$\alpha = \alpha_x \cos\gamma_x + \alpha_y \cos\gamma_y + \alpha_z \cos\gamma_z;$$

температурный коэффициент объемного расширения

$$\beta = \alpha_x + \alpha_y + \alpha_z.$$

Для изотропных твердых тел температурный коэффициент линейного расширения

$\alpha = k\frac{\gamma c_V}{V}$ — формула Грюнайзена,

где c_V — теплоемкость при постоянном объеме; $\gamma = \frac{1}{V}\left(\frac{dV}{dp}\right)_T$ — коэффициент изотермического сжатия; k — постоянная Грюнайзена.

Если известны параметры потенциала межатомного взаимодействия m и n, то $k = (m + n + 3)/6$.

Зная температурные коэффициенты расширения, можно определить размеры и объем тела:

$$L = L_0 (1 + \alpha\,\Delta t);$$

$$V = V_0 (1 + \beta\,\Delta t).$$

При $T \to 0$ коэффициент $\alpha \to 0$.

Ограничения на проявление ФЭ: малые коэффициенты линейного (объемного) расширения; низкие абсолютные температуры; силовые воздействия на расширяющееся тело.

ФЭ проявляется на телах любой геометрической формы.

Воздействие передается от внешней среды к поверхности тела или от внутренних источников к его объему.

Результат воздействия. Силовое поле (сила, давление) и перемещение проявляется по концам тел удлиненной формы (в одном измерении), на поверхности, в объеме тела. Направление результирующей силы определяется через главные коэффициенты расшире-

27. Средние температурные коэффициенты расширения

Материал	$\alpha \cdot 10^6$, K^{-1}	Примечание
Стеклотекстолит Эбонит Гетинакс Текстолит	0,8 84,2 20 33—40	Изоляционные каркасы
Платина Медь Никель	10,35 16,6 14,0	Терморезисторы
Инвар ЭН36 (33—37% Ni, Fe — остальное)	0,01—2.0	Термобиметалл
БрБНТ1,9, БрОФ6,5—0,4 НМц65—20	17,1 18,4	Мембраны
Полутомпак (14—21% Zn, Cu — остальное) 12Х18Н10Т	18 17	Сильфоны
Л62 Л68 БрОФ4—2,5 Мельхиор	20 19 17,6 16	Пружины

ния. Перемещение точек, поверхностей тела, деформация поверхностей тела зависят от геометрической формы тела.

Средние температурные коэффициенты линейного расширения некоторых твердых материалов приведены в табл. 27.

Тепловое расширение твердых тел учитывается при конструировании всех установок, приборов и машин, работающих в переменных температурных условиях. На летательных аппаратах применяются датчики температуры,

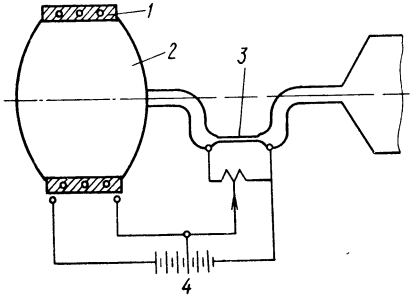


Рис. 99. Схема регулировки количества подаваемого рабочего тела в электрическом ракетном двигателе:

1 — нагреватель; *2* — емкость с рабочим телом; *3* — капилляр-нагреватель; *4* — источник электроэнергии

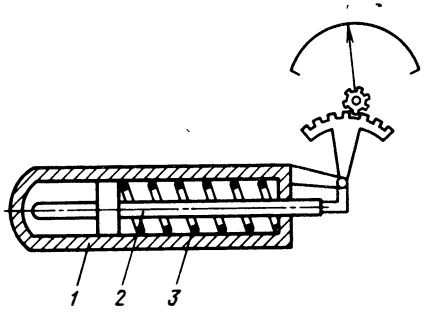


Рис. 100. Дилатометрический термометр:

1 — патрон; *2* — шток; *3* — пружина

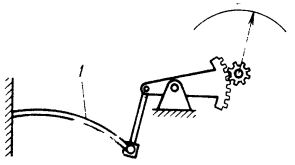


Рис. 101. Биметаллический термометр

основанные на температурном расширении (изменении объема) различных твердых тел: дилатометрические, биметаллические термометры. В электрических ракетных двигателях в камере ионизации, в ионно-оптическом узле высокие рабочие температуры изменяют размеры конструктивных элементов, фокусировку узла. В этом случае влияние теплового расширения устраняется с помощью температурных компенсаторов-сильфонов.

Тонкая регулировка количества подаваемого рабочего тела в электрических ракетных двигателях может осуществляться изменением проходного сечения капилляра при его нагреве (рис. 99).

Дилатометрический термометр (рис. 100) состоит из патрона *1* и штока *2*, изготовленных из материалов с различными коэффициентами линейного расширения α_1 и α_2.

Для повышения чувствительности необходимо применять материалы, у которых α_1 и α_2 возможно больше отличаются друг от друга; в то же время коэффициент линейного расширения материала штока следует выбирать близким к нулю для уменьшения теплового запаздывания, обусловленного тем, что шток прогревается медленнее, чем патрон. Патрон непосредственно соприкасается со средой, температура которой измеряется, а шток отделен от нее воздушной прослойкой. Исходя из этого, шток целесообразно изготовлять из сплава типа инвар ($\alpha = 1 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$), а патрон — из материала с бо́льшим α, например из дуралюмина ($\alpha = 23 \times 10^{-6}$ К$^{-1}$).

Ввиду малости перемещения штока (десятые доли мм) дилатометрический термометр содержит передаточно-множительный механизм, увеличивающий перемещение штока до величины, удобной для отсчета.

Биметаллические термометры (рис. 101), так же как и дилатометрические, основаны на тепловом расширении твердых тел и отличаются лишь способом соединения элементов. Теплочувствительный элемент представляет собой биметаллическую пластину *1*, состоящую из двух сваренных или сплавленных (реже спаянных) по всей длине пластин с различными коэффициентами линейного расширения α_1 и α_2. При нагреве пластина изгибается таким образом, что ее выпуклость образуется со стороны материала с бо́льшим α.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [176, 238], а о применении эффекта — в работе [36].

ТЕРМОУПРУГИЙ ЭФФЕКТ

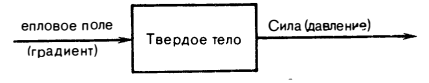


Рис. 102. Структурная схема термоупругого эффекта

Термоупругий эффект — появление температурных напряжений при изменении температуры тела. Необходимым условием возникновения температурных напряжений в теле является неравномерное распределение температуры в различных частях тела и ограничение возможного теплового расширения (или сжатия) со стороны окружающих частей тела или со стороны окружающих тел.

В пределах сохранения упругости материала компоненты тензора напряжений, тензора деформаций и температура связаны линейными соотношениями:

$$\sigma_{11} = \lambda\theta + 2\mu\varepsilon_{11} - (3\lambda + 2\mu)\,\alpha T;$$

$$\sigma_{12} = 2\mu\varepsilon_{12};$$

$$\sigma_{22} = \lambda\theta + 2\mu\varepsilon_{22} - (3\lambda + 2\mu)\,\alpha T;$$

$$\sigma_{23} = 2\mu\varepsilon_{23};$$

$$\sigma_{33} = \lambda\theta + 2\mu\varepsilon_{33} - (3\lambda + 2\mu)\,\alpha T;$$

$$\sigma_{31} = 2\mu\varepsilon_{31},$$

где λ и μ — постоянные Ламе; α — коэффициент линейного расширения; T — разность между текущим значением температуры и температурой на-

пряженного состояния; $\theta = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$ — относительные изменения объема.

Температурный эффект проявляется на твердых телах любой формы. Тепловое поле действует на поверхность тела, а результат воздействия (сила) действует в его объеме.

Температурные напряжения могут привести к потере устойчивости конструкции; при циклическом нагреве и охлаждении — к разрушению от усталости, при мгновенном изменении температуры — к разрушению от термического удара. Определяющим показателем термического удара является возникновение за короткое время температурного градиента и обусловленных им деформаций и напряжений, приводящих к формоизменению, нарушениям сплошности (трещинообразованию) или разрушению.

При термическом ударе в условиях быстрого нагрева тела его внешние слои расширяются, а более глубокие, остающиеся ненагретыми, препятствуют расширению. В более разогретых слоях возникают напряжения сжатия, в менее нагретых — напряжение растяжения. Когда напряжения достигают пределов прочности на сжатие или растяжение, материал разрушается. У большинства материалов сопротивление сжатию выше сопротивления растяжению, поэтому разрушение происходит к зоне действия напряжений растяжения. Так разрушаются малотеплопроводные материалы (стекла, керамика). Действие термического удара на металлы в большинстве случаев ограничивается изменением формы. Вследствие высокой теплопроводности температурные градиенты при быстром нагреве в металлах не достигают величины, необходимой для того, чтобы вызвать напряжения, превышающие прочность материала. Кроме того, в металлах благодаря их пластичности температурные напряжения в большинстве случаев не выходят за предел текучести. Термический удар опасен для материалов, имеющих высокий коэффициент теплового расширения, низкую теплопроводность, высокий модуль упругости, низкую пластичность.

Характеристики некоторых материалов, на которых проявляется ФЭ, приведены в табл. 28.

28. Характеристики материалов

Материал	Теплопроводность Вт/(м·К)	Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, $К^{-1}$	Предел текучести, МПа	Температура, К
Стекло	1,13	6	—	298
Кварц	1,46	2,11	—	373
Бронза	34	17,6	204	300
Латунь	84	20	255	300

Действие термического удара усиливается при наличии резких изменений сечения (отверстия, выточки), концентрирующих тепловые напряжения и затрудняющих пластическую деформацию.

В машиностроении ФЭ проявляется в основном как нежелательный.

Температурный эффект может применяться для разрушения материалов. Термическое разрушение горных пород основано на получении тепловой энергии от внешнего источника теплоты. Теплота может передаваться в результате конвективного теплообмена между источником и объектом (способ «пожога» и облучения лампами) или направленным тепловым потоком, входящим в контакт с локальной зоной разрушаемой поверхности. Метод применяется для дробления камня, мерзлых грунтов, асфальтобетона.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [122, 246, 270], а о применении эффекта — в работе [33].

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ДИСПЕРГИРОВАНИЕ



Рис. 103. Структурная схема ультразвукового диспергирования

Ультразвуковое диспергирование — тонкое размельчение твердых веществ или жидкостей под действием ультразвуковых колебаний. Диспергирование жидкостей в газах называется распылением, а жидкостей в жидкостях — эмульгированием. Ультразвуковое диспергирование позволяет получать высокодисперсные смеси с размером частиц менее 1 мкм, в то время как механическое — с размером частиц до 1—10 мкм.

Для протекания ультразвукового диспергирования необходима кавитация. Измельчение веществ происходит под действием ударных волн и кумулятивных струй, возникающих при захлопывании кавитационных полостей.

Кавитационный пузырек концентрируется на «слабых местах» частицы — на микротрещинах и неровностях поверхности. Под действием интенсивных микропотоков, образующихся при пульсациях кавитационных пузырьков, поры, углубления и микротрещины на поверхностях частицы заполняются жидкостью. Раскалывание частиц происходит под действием ударных волн, возникающих в жидкостях при захлопывании кавитационных пузырьков. Диспергирование начинается при интенсивности ультразвука $I_п$, превышающей некоторое пороговое значение $I_{п_п}$. Величина $I_{п_п}$ составляет несколько Вт/см^2 и зависит от кавитационной прочности жидкости, состояния поверхности твердой фазы, от характера

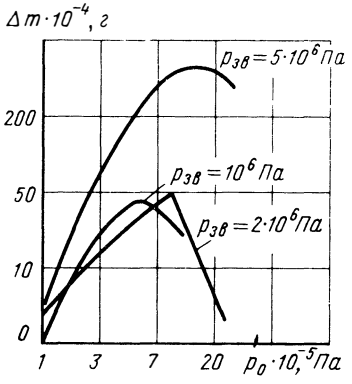


Рис. 104. График интенсивного диспергирования

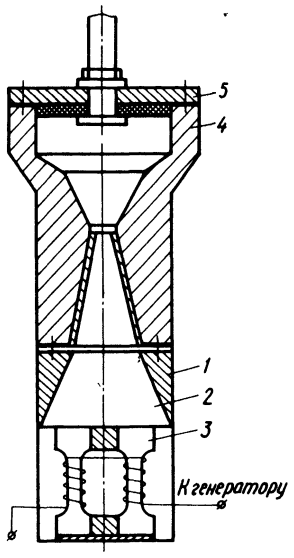


Рис. 105. Схема малогабаритного диспергатора

и величины сил взаимодействия между отдельными частицами. С увеличением $I_п$ скорость диспергирования, т. е. количество измельченного в единицу времени вещества $\Delta m/\Delta\tau$, возрастает.

Диспергирование значительно интенсифицируется, если наряду со знакопеременным звуковым давлением с амплитудой $p_{зв}$ на жидкость наложить постоянное давление p_0. В этих условиях существенно возрастают пиковые значения давления в ударной волне и кавитационное разрушение ускоряется в сотни раз. Существует оптимальное соотношение между p_0 и $p_{зв}$ (рис. 104), при котором происходит наиболее интенсивное диспергирование твердой фазы.

Условием возникновения диспергирования является облучение жидкости с имеющимися в ее объеме твердыми частицами звуковым полем определенной частоты и интенсивности.

Форма сосудов с диспергирующей жидкостью может быть различной. Звуковое и силовое поля приложены к поверхности жидкости; результатом их воздействия является силовое поле, возникающее в жидкости, и движение частиц твердого вещества, находящегося в жидкости.

Ультразвуковое диспергирование широко применяется в химической, пищевой, фармацевтической, текстильной, лакокрасочной промышленности. Оно позволяет получать материалы для порошковой металлургии. Так, измельчение порошков улучшает эксплуатационные свойства ферритовых сердечников. Применение ультразвукового диспергирования для изготовления люминофоров повышает качество изображения и светоотдачу экранов, а в полупроводниковых материалах — их термоэлектрическую эффективность.

В малогабаритном диспергаторе (рис. 105) в качестве источника акустической энергии использован магнитострикционный ферритовый преобразователь. Ферритовый сердечник *3* помещен в замкнутый стакан *1*, крепящийся в узле смещения концентратора *2*. Рабочий объем камеры около 6 см^3 образован торцом концентратора и внутренней стенкой корпуса *4*. Камера закрывается крышкой *5*. Избыточное статическое давление в жидкости создается сжатым воздухом, поступающим от насоса.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [254, 268], а о применении эффекта — в работах [223, 255].

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ РАСПЫЛЕНИЕ

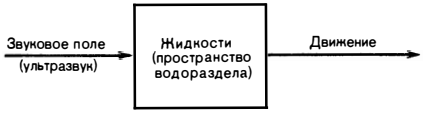


Рис. 106. Структурная схема ультразвукового распыления

Ультразвуковое (акустическое) распыление — получение аэрозоля из жидкости с помощью акустических колебаний.

В зависимости от того, как подводится акустическая энергия к зоне распыления — через жидкость или через газ, различают два способа распыления. По первому способу распыление может проводиться в слое или в фонтане. В этих случаях образование капель аэрозоля происходит в результате их отрыва от гребней стоячих волн на поверхности жидкости.

При распылении в слое стоячие капиллярные волны образуются на поверхности слоя жидкости, покрывающей колеблющуюся пластинку. С увеличением амплитуды колебаний пластинки увеличивается амплитуда волн, достигая предельной величины. При этом гребни стоячих волн вытягиваются в узкие язычки. С дальнейшим увеличением амплитуды происходит отделение капель жидкости от гребней таких волн. При распылении в слое используются колебания с частотой десятки кГц; диаметр капель составляет десятки мкм. Толщина слоя жидкости должна быть порядка долей мм, но не менее половины длины капиллярной волны $\lambda_к/2$. Производительность такого распыления достигает нескольких литров в час, увеличиваясь с ростом амплитуды колебаний поверхности и уменьшаясь при переходе к более вязким жидкостям.

При распылении в фонтане стоячие капиллярные волны возбуждаются на поверхности струи, возникающей в месте выхода пучка ультразвуковых волн, направленного из глубины. Капиллярные волны возникают при наличии кавитации в струе, так как причиной их возбуждения являются периодические гидравлические удары при захлопывании кавитационных пузырьков. Для создания ультразвукового фонтана используются частоты мегагерцевого диапазона. Распыление происходит в верхней части фонтана с образованием тонкого стойкого монодисперсного аэрозоля, размер капель которого составляет 2—4 мкм. Производительность распыления для невязких жидкостей типа воды достигает нескольких сотен миллилитров в час.

Второй способ акустического распыления связан с подведением ультразвуковых колебаний через газ. Помимо акустических колебаний жидкость подвергается воздействию газовых потоков. Размер капель аэрозоля составляет десятки и сотни мкм. Производительность — десятки и сотни литров в час. Диаметр капель уменьшается при увеличении давления газа.

Диаметр капель аэрозоля

$$d \approx 0{,}3\lambda_к,$$

где $\lambda_к = \sqrt[3]{8\pi\sigma_п/(\rho f^2)}$ — длина капиллярной волны; $\sigma_п$ — коэффициент поверхностного натяжения; ρ —

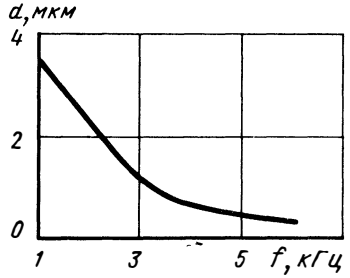


Рис. 107. Зависимость размера капелек тумана от частоты

плотность жидкости; f — частота звука.

На рис. 107 приведена зависимость размеров капелек тумана от частоты звука.

При подведении ультразвуковых колебаний через газ распыление резко снижается при некотором критическом давлении в газе.

Пространство воздействия звукового поля — поверхность жидкой фазы. Результат воздействия (перемещение микрочастиц жидкости) проявляется на поверхности раздела и в газообразной фазе.

Ультразвуковое распыление нашло широкое применение в промышленности и медицине. Распыление в слое используют для приготовления порошков и для распыления жидкого топлива в ультразвуковых форсунках. В качестве распылительных устройств применяют пьезоэлектрические или магнитострикционные преобразователи стержневого типа с концентраторами, имеющими осевой канал (рис. 108). Жидкость вводится в канал *5* и растекается по поверхности фланца *4*, который играет роль колеблющейся пластины. Амплитуда колебаний составляет 10—30 мкм.

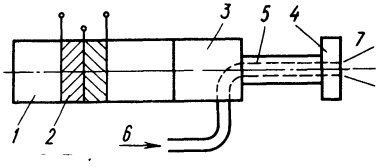


Рис. 108. Магнитострикционный преобразователь стержневого типа:

1 — пьезокерамический преобразователь; *2* — пьезокерамические пластины; *3* — концентратор; *4* — колеблющаяся поверхность фланца, на которой происходит распыление; *5* — канал внутри концентратора; *6* — жидкость; *7* — аэрозоль

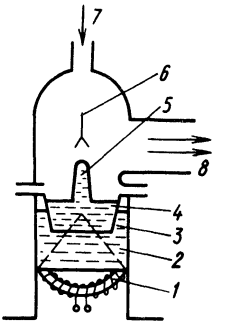


Рис. 109. Распылительное устройство фонтанного типа:

1 — фокусирующий пьезокерамический излучатель; *2* — промежуточная жидкая среда; *3* — кювета со звукопрозрачным дном; *4* — распыляемая жидкость; *5* — ультразвуковой фонтан; *6* — отражатель для ограничения высоты фонтана; *7* — газ; *8* — аэрозоль

При распылении в фонтане (рис. 109) используют фокусирующие излучатели с резонансной частотой 1—3 МГц в виде вогнутых пьезокерамических пластин. Распылительное устройство такого типа имеет небольшие размеры и энергетические затраты. Преобразователи применяют в ингаляторах для создания высококачественных аэрозолей при спектральном анализе.

При распылении с подведением акустических колебаний через газ используются газоструйные излуча-

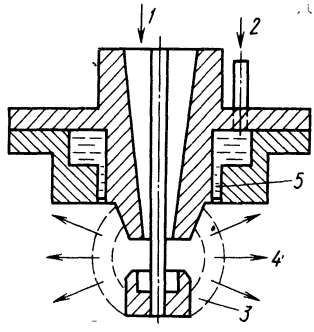


Рис. 110. Схема гидроструйного излучателя:

1 — газ; *2* — жидкость; *3* — ударные волны; *4* — аэрозоль; *5* — каналы, через которые жидкость поступает в область распыления

тели, в активную зону которых подается жидкость (рис. 110). Такие устройства применяют в форсунках для мощных водогрейных котлов, для карбюрации в двигателях внутреннего сгорания, в распылительных сушилках.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работе [254], а о применении эффекта — в работах [223, 255].



Рис. 111. Структурная схема ультразвуковой коагуляции

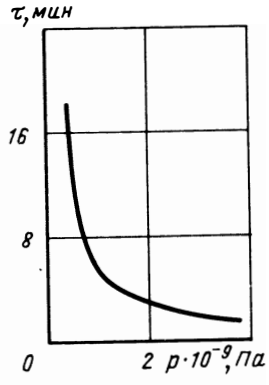


Рис. 112. Зависимость степени осаждения от времени облучения ультразвуком и его интенсивности для тумана хлористого аммония при различных интенсивностях ультразвука:

1 — 1,0 Вт/м²; *2* — 2,0 Вт/м²; *3* — 3,0 Вт/м²; *4* — 4,0 Вт/м²

Ультразвуковая коагуляция — процесс сближения и укрупнения взвешенных в газе или жидкости мелких твердых частиц, жидких капелек и газовых пузырьков под действием акустических колебаний. При коагуляции уменьшается дисперсность, оцениваемая по общей поверхности частиц в единице объема, и число частиц дисперсной системы. В результате коагуляции происходит осаждение взвешенных в газе или жидкости твердых частиц и капелек.

В аэрозолях мелкие частицы подвергаются воздействию гравитационного поля, участвуют в броуновском движении, увлекаются конвективными и гидродинамическими течениями. При наложении звукового поля возникают дополнительные силы, способствующие коагуляции: взвешенная в газе частица вовлекается в колебательное движение, на нее действует давление звукового излучения, вызывая ее дрейф, она увлекается акустическими течениями и т. д.

Кинетика процесса коагуляции аэрозолей характеризуется формулой

$$n = n_0 e^{k\tau},$$

где n — концентрация частиц; n_0 — концентрация частиц в начальный момент облучения ($\tau = 0$); τ — время облучения ультразвуком; k — коэффициент коагуляции, зависящий от свойств аэрозоля и параметров акустического поля.

Степень и скорость коагуляции определяются несколькими факторами. Основной из них — интенсивность звука I_n. На графике зависимости степени осаждения от времени облучения ультразвуком и его интенсивности для тумана хлористого аммония (рис. 112) показано, что при больших

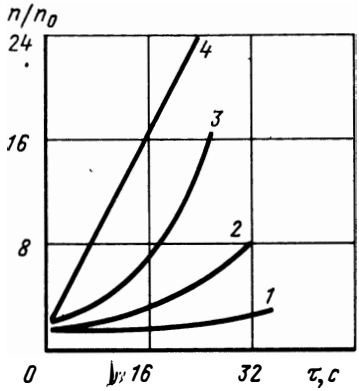


Рис. 113. Зависимость времени осаждения аэрозоли окиси цинка от звукового давления

интенсивностях ультразвука степень коагуляции за короткое время достигает большого значения.

Осаждение частиц разных размеров происходит при разной частоте колебаний: чем меньше частицы, тем выше частота. На практике обычно применяются частоты 0,5—20 кГц; при этом осаждаются частицы размером 0,5—5 мкм.

На процесс коагуляции оказывают влияние также время экспозиции, которое зависит от I_n (при $I_n = 1{,}0$ Вт/м^2 весь процесс протекает в течение нескольких секунд), и исходная концентрация аэрозоля (с увеличением концентрации эффективность коагуляции возрастает). Этот метод рационально применять при концентрации $\geqslant 1$—2 г/м^3.

Увеличение звукового давления приводит к быстрому увеличению скорости осаждения (рис. 113).

Коагуляция гидрозолей протекает в условиях жидкой дисперсионной среды. Скорость коагуляции гидрозолей в основном также определяется интенсивностью ультразвука. Коагуляция частиц неустойчивых суспензий наблюдается при облучении ультразвуком даже небольшой интенсивности, у стойких суспензий — при длительном воздействии ультразвука повышенной интенсивности.

ФЭ проявляется в баках различной геометрической формы, в трубопроводах.

Ультразвуковое поле воздействует на весь объем газа, жидкости, твердых частиц, находящихся в контакте друг с другом.

Пространство проявления результата воздействия: на частицах (твердых, жидких, газообразных), находящихся в жидкостях, газах.

Ультразвуковая коагуляция применяется для осаждения промышленных пылей, дымов и туманов. Звуковое поле при этом создается обычно сиренами или свистками. Мелкие частицы, укрупненные при коагуляции, осаждаются под действием гравитационного поля, улавливаются далее фильтрами или механическими улавливателями, например циклонами. Коагуляция гидрозолей применяется для очистки жидкостей в химической и пищевой промышленности.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работе [254], а о применении эффекта — в работах [56, 223].

ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

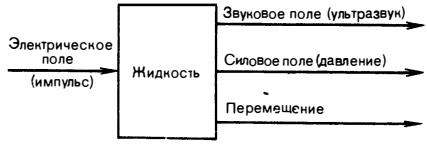


Рис. 114. Структурная схема электрогидравлического эффекта

Электрогидравлический эффект — преобразование электрической энергии в механическую, совершающееся без посредства промежуточных механических звеньев. Сущность этого эффекта состоит в том, что вокруг зоны специально сформированного импульсного электрического разряда внутри объема жидкости, находящейся в открытом или закрытом сосуде, возникают сверхвысокие гидравлические давления, способные совершать механическую работу.

При проявлении электрогидравлического эффекта происходит мгновенное (10—100 мкс) выделение энергии, накопленной в конденсаторной батарее посредством импульсного разряда в жидкости. Схема установки приведена на рис. 115. При разряде образуется плазменный канал с температурой 15—30 тыс. К. В канале, имеющем небольшое поперечное сечение, происходит интенсивный локальный разогрев жидкости. При этом в нем концентрируется энергия перегретого ионизированного газа и пара. Быстрое расширение канала разряда в виде парогазовой полости (пузыря) под действием внутреннего давления создает в окружающей несжимаемой среде, какой можно считать жидкость, волны сжатия и импульсы давления. При интенсивном выделении энергии в канале скорость его расширения может превзойти скорость звука в жидкости, тогда волна сжатия превращается в ударную волну. Расширение полости продолжается до тех пор, пока давление в ней из-за инерции расходящегося потока жидкости не станет меньше давления внешней среды. С этого момента происходит обратное движение жидкости (полость захлопывается), давление газа в ней

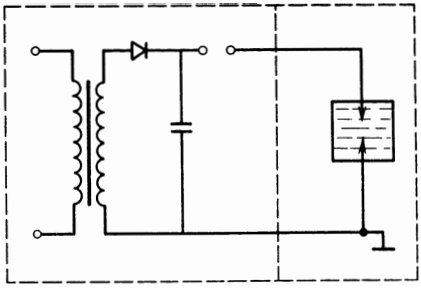


Рис. 115. Схема разогрева жидкости

резко возрастает, и процесс повторяется в виде нескольких, постепенно затухающих пульсаций.

Таким образом, высоковольтный импульсный разряд в жидкости может рассматриваться в следующей последовательности: электрический пробой и образование канала разряда, выделение энергии в канале, усиление ударных, ультразвуковых и звуковых волн, расширение полости, сопровождающееся излучением импульса давления и образованием расходящегося потока жидкости, пульсация полости.

Электрогидравлический эффект может быть получен и в результате «теплового взрыва», при котором искровой разряд между электродами, помещенными в жидкость, заменяется электрическим тепловым взрывом проводящего ток элемента, замыкающего электроды.

Использование этого метода позволяет распространить область электрогидравлической обработки на высокотемпературные среды, в том числе на плазму и расплавы солей и металлов.

Ударное давление

$$\Delta p_{уд} = \rho V_0 V_{уд},$$

где $V_{уд}$ — скорость распространения ударной волны $(V_{уд} = 1/\sqrt{\rho/E_0 + \cdots + \rho d/(E\delta)})$; ρ—плотность жидкости; E_0 — модуль объемного сжатия жидкости; E — модуль упругости материала; d — внутренний диаметр рабочего объема; δ — толщина стенки рабочего объема; V_0 — скорость звука в жидкости.

Проявление ФЭ осуществляется только в проводящей жидкости практически на всех геометрических формах, которые принимает жидкость.

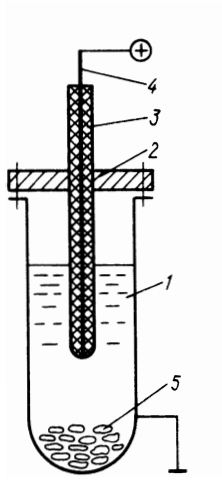


Рис. 116 Схема порционной электрогидравлической дробилки

Скорость звука для воды при $p = 10^8$ Па равна 1555 м/с при $T = 298$ К; 1620 м/с при $T = 323$ К; 1700 м/с при $T = 369{,}5$ К.

Уникальные возможности электрогидравлического эффекта обусловили широкое применение его во многих областях народного хозяйства: в технологии машиностроения и металлообработке, в сварке и транспортных устройствах, в горном деле и промышленности строительных материалов, в химической промышленности, в электротехнике и в силовых установках.

Повышение качества изделий в ряде случаев связано с обеспечением гарантированного химического состава его материала. Последнее удается достигнуть методами порошковой металлургии при использовании порошков определенной формы и размеров. Использование механических дробилок всегда связано с изнашиванием инструмента и попаданием его частиц в приготовляемый порошок. Роль же инструмента при электрогидравлическом дроблении выполняет вода. Порционная электрогидравлическая дробилка (рис. 116) представляет собой резервуар *1* цилиндрической формы со сферическим днищем, закрываемый сверху крышкой *2*. Сквозь крышку по оси дробилки в изолирующей трубке из вакуумной резины *3* пропущен

положительный (соединенный с генератором импульсов тока) электрод *4*. Резервуар заземлен. Между нижним концом электрода и днищем дробилки устанавливают рабочий промежуток. Высоковольтный разряд осуществляется при заполнении дробилки водой с обрабатываемым материалом *5*. Обеспечивается получение порошка с высокой степенью точности частиц как по размерам, так и по форме.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [81, 298], а о применении эффекта — в работе [169].

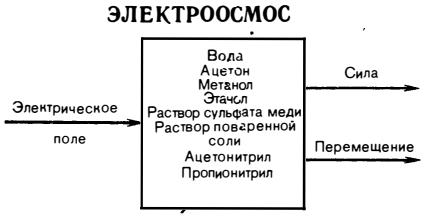


Рис. 117. Структурная схема эффекта электроосмоса

Электроосмос — перемещение жидкости вдоль стенок капилляра под действием приложенной ЭДС.

Движение жидкости происходит вследствие того, что вблизи поверхности в наружной части диффузного слоя имеется избыток ионов одного знака. Приложение электрического поля к капилляру, наполненному жидкостью, заставляет избыточные ионы сдвигаться к противоположно заряженному полюсу. Ионы внутренней обкладки двойного слоя, находящиеся непосредственно на стенке, не перемещаются, так как для преодоления электростатических сил, действующих в молекулярном конденсаторе, нужно приложить огромные напряжения. По мере удаления от поверхности твердого тела связь с ней ионов становится все слабее. В средней части капилляра, вдали от стенки ионы обоих знаков находятся в одинаковых количествах в объеме. И поэтому при наложении электрического поля движение их происходит равномерно в обе стороны со скоростями, соответствующими их подвижностям и градиенту приложенного напряжения электрического поля. Таким образом, около стенки создается определенный поток избыточных ионов одного знака, и для отдельного капилляра круглого сечения имеется цилиндрическая оболочка ионов, движущихся к противоположно заряженному полюсу. Эта цилиндрическая оболочка ионов одного знака, имеющая направленное движение, в силу трения и молекулярного сцепления увлекает за собой остальную массу жидкости. Потенциал диффузной части двойного слоя, обеспечивающей явление электроосмоса, называется дзета-потенциалом. Чем больше дзета-потенциал (т. е. чем больше количество ионов одного знака заряда находится в диффузной части двойного слоя), тем большая сила будет приложена к жидкости в капилляре и с тем большей скоростью будет происходить перемещение жидкости в капилляре при наложении внешнего поля.

Скорость движения жидкости в капилляре

$$v = S\frac{\zeta\varepsilon E_э}{4\pi\eta l},$$

где ε — диэлектрическая проницаемость жидкости; $E_э$ — потенциал внешнего поля; ζ — дзета-потенциал; S — сечение капилляра; l — расстояние между электродами; η — вязкость жидкости.

Величина и знак электрокинетического дзета-потенциала зависит от строения двойного слоя, т. е. от состава раствора. Вообще величина ζ не велика и обычно не превышает 0,1 В. Поэтому заметная скорость движения v возникает лишь при большой напряженности электрического поля.

Условием возникновения электроосмоса является существование на границе раздела двух фаз двойного электрического слоя, образованного вследствие адсорбции молекул или ионов. В изоэлектрической точке, отвечающей тому состоянию, когда число ионов разных знаков в пограничном слое одинаково и двойной слой исчезает, отсутствует и механизм для осуществления направленного потока жидкости.

Эффект также зависит от концентрации электролита. При возрастании концентрации электролита в растворе диффузный слой ионов сжимается, что приводит к исчезновению механизма для передвижения жидкости и электроосмос прекращается.

С повышением температуры уменьшается вязкость жидкости и скорость перемещения жидкости увеличивается.

ФЭ проявляется в электролитических жидкостях, находящихся в емкостях с пористой перегородкой. Электрическое поле действует вдоль капилляров пористого тела. Движение жидкости происходит вдоль капилляров в сторону электрода, имеющего противоположный заряд. Сила, обеспечивающая движение частиц жидкости, также направлена вдоль капилляров.

ФЭ применяется в радиотехнике, измерительной технике, в различных устройствах автоматики. На нем основана работа химотронных усилителей и умножителей электрических сигналов, химотронных датчиков неэлектрических сигналов, электрокинетических преобразователей, химотронных насосов и других электрохимических приборов.

Примером применения ФЭ является электроосмотическое реле (рис. 118). Пластмассовый корпус *1* заполнен дистиллированной водой или другой полярной жидкостью. Он разделен на две камеры пористой перегородкой *2*. В камерах, закрытых эластичными мембранами *4*, установлены сетчатые серебряные электроды *3*, плотно прилегающие к пористой перегородке *2*. Контактное устройство реле смонтировано в небольшой дополнительной камере *5*, заполненной ртутью *6*. Два металлических контакта *7* установлены в ее верхней части.

При воздействии электрического сигнала, поданного на электроды *3*, произойдет перемещение воды из одной половины электроосмотической ячейки в другую. Вследствие этого увеличится объем жидкости в правой (на рисунке) камере прибора и появится гидростатическое давление на мембрану *4*. Деформация мембраны вызовет повышение уровня ртути в камере *5* и последующее замыкание цепи контактами *7*.

Достоинства электроосмотических реле: простота конструкции, небольшие габариты и масса, бесшумность работы, высокое входное сопротивление [(2÷5) 10^7 Ом и выше в зависимости от расстояния между электродами и рабочей жидкости], чувствительность к слабым сигналам постоянного тока.

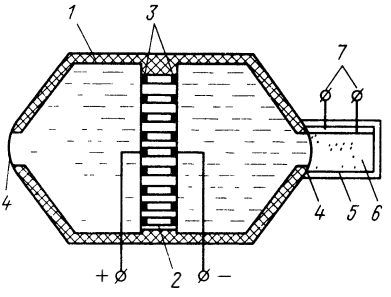


Рис. 118. Электроосмотическое реле

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [65, 227, 239, 241], а о применении эффекта — в работах [160, 161, 239].

ЭЛЕКТРОСТРИКЦИЯ (КВАДРАТИЧНЫЙ ПЬЕЗОЭФФЕКТ)

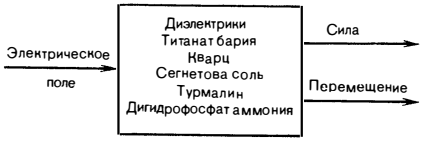


Рис. 119. Структурная схема эффекта электрострикции

Эффект электрострикции — деформация диэлектриков в электрическом поле $E_э$, пропорциональная квадрату напряженности электрического поля $E_э^2$ и поэтому не зависящая от направления электрического поля. Электрострикция обусловлена поляризацией диэлектриков в электрическом поле и имеет место у всех диэлектриков. Эффект может быть сравнимым с пьезоэффектом только в полях более сильных, чем 20 000 В/см.

Электрострикционные деформации в чистом виде могут наблюдаться только в пьезоэлектрических кристаллах. В кристаллах пьезоэлектриков деформация при наложении электрического поля определяется и обратным пьезоэффектом и электрострикцией. В сегнетоэлектриках из-за переориентации доменов при наложении электрических полей электрострикционные деформации достигают больших значений.

Под действием переменного электрического поля частоты f диэлектрик в результате электрострикции колеб-

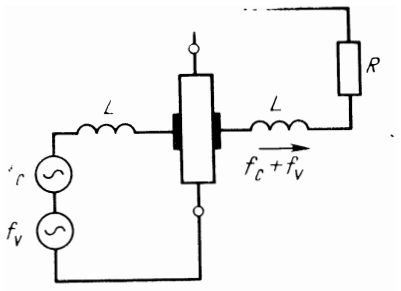


Рис. 120. Схема электрострикционного модулятора

лется с частотой $2f$, что характерно для квадратичных эффектов. Поэтому электрострикция может использоваться для преобразования электрических сигналов в звуковые.

В анизотропных кристаллах электрострикцию можно описать зависимостью между двумя тензорами второго ранга — тензором квадрата напряженности электрического поля и тензором деформации:

$$r_{ij} = \sum_m \sum_n R_{ijmn} E_m E_n,$$

где r_{ij} — компонента тензора деформации; $E_m E_n$ — составляющие электрического поля; R_{ij} — коэффициент электрострикции.

Число независимых коэффициентов электрострикции зависит от симметрии кристаллов. Например, для триклинных кристаллов тензоры электрострикции имеют 36 независимых коэффициентов, для изотропных диэлектриков — 2. Величина $R_{ij} \approx 10^{-14} \div 10^{-10}$. В поле $E_э \approx 300$ В/см $r_{ij} \approx 10^6$.

Электрострикция зависит от материала, приложенного электрического поля и температуры. В сегнетоэлектриках электрострикция имеет место при температурах ниже температуры Кюри.

ФЭ проявляется на телах различной геометрической формы. Силовое поле проявляется в изменении размеров и формы образца по оси, перпендикулярной к граням образца, к которым приложено электрическое поле.

Так как электрострикция являет собой электромеханическое преобразование, то материалы, на которых она проявляется, можно характеризовать электрическими и механическими свойствами.

Эффект электрострикции используется в преобразователях, например, фокусирующих излучателях, концентрирующих ультразвуковую энергию в определенной области. В форме цилиндрического излучателя преобразователь из титаната бария может развить высокую интенсивность ультразвука вдоль оси цилиндра. Такой преобразователь может быть использован для получения длительных воздействий ультразвука на жидкости или твердые тела, что применяется для изменения их свойств. Колебание диэлектрика в сильных полях с удвоенной частотой по сравнению с частотой приложенного поля позволяет использовать его в качестве модулятора.

В электрострикционном модуляторе (рис. 120) на кристаллический элемент α-среза сегнетовой соли, колеблющийся по толщине, действуют несущая f_c и звуковая f_v частоты. Снимаемые колебания будут иметь две боковые полосы частот, и, следовательно, такое устройство можно использовать для модуляции.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работах [86, 87], а о применении эффекта — в работах [167, 177, 256].

ЭЛЕКТРОФОРЕЗ

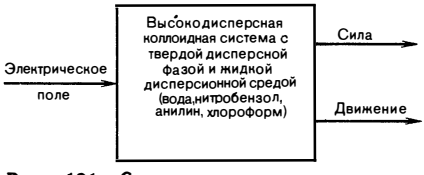


Рис. 121. Структурная схема электрофореза

Электрофорез — перенос частиц в электрическом поле вследствие наличия разноименных зарядов у твердой и жидкой фаз. В результате возникновения электрического поля между электродами благодаря малому размеру частиц происходит перенос отрицательно заряженной дисперсной фазы к положительному электроду.

Заряд на коллоидных частицах лиозолей, проявляющийся при электрофорезе, обусловлен наличием на их поверхности двойного электрического слоя из ионов, возникающего либо

в результате избирательной адсорбции одного из ионов электролита, находящегося в растворе, либо за счет ионизации поверхностных молекул веществ. Двойной электрический слой состоит из ионов одного знака, относительно прочно связанных с дисперсной твердой фазой, и эквивалентного количества противоположно заряженных ионов, находящихся в жидкой дисперсной среде вблизи лингфазной поверхности (противоионы).

Заряд на поверхности твердой фазы рассматривается как поверхностный заряд, равномерно распределенный по всей поверхности. Электрофорез не является простым переносом заряженных частиц и противоионов к соответствующим электродам. Он сопровождается постоянным взаимным обменом между противоионами соседних коллоидных частиц.

Скорость движущихся частиц связана с напряженностью электрического поля $E_э$ зависимостью

$$V = \frac{\varepsilon E_э \xi}{4\pi\eta},$$

где η — вязкость среды; ε — диэлектрическая проницаемость; ξ — электрокинетический потенциал.

С возникновением и ростом поверхностной проводимости электрофорез убывает.

ФЭ проявляется в объеме с высокодисперсной коллоидной системой, в которой граничат твердая и жидкая дисперсные фазы. Электрическое поле направлено вдоль границ фаз и вызывает смещение одного ионного слоя по отношению к другому. Силы приложены к заряженным частицам. Частицы движутся в жидкой фазе по направлению к соответствующим электродам.

ФЭ применяется в электрохимии (для изучения двойного электрического слоя), в медицине, в промышленности (для получения каучука из латекса), в биохимии (для анализов биологических жидкостей).

Электрофорез является одним из наиболее прогрессивных технологических методов получения покрытий на металлических изделиях. Основное преимущество электрофореза в этом плане — высокая покрывающая способность. По мере блокировки непроводящим покрытием наружных областей электрода увеличивается напряженность поля в полостях и изгибах изделия, что обеспечивает равномерное покрытие деталей произвольной формы. Наряду с этим нанесение покрытий методом электрофореза позволяет автоматизировать процесс, контролируя его основные параметры — ток, напряжение, расход суспензии в ванне. В отличие от других методов, например метода воздушной электростатической окраски, потерь сырья в электрофоретической ванне практически нет; суспензия легко регенерируется. Это свидетельствует о высокой экономичности процесса.

Сведения о физической сущности эффекта приведены в работе [82], а о применении эффекта — в работах [82, 253].

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. Список физических эффектов по наименованиям воздействий

Воздействие	Результат воздействия	Наименование ФЭ	Стр.
Гравитационное поле	Гравитационное поле; движение	Гравитационный коллапс	132
Гравитационное поле	Сила; движение	Гравитационный захват	129
Гравитационное поле	Сила; движение	Архимеда эффект (закон)	121
Гравитационное поле	Силовое поле; движение	Всемирное тяготение	123
Гравитационное поле	Электрическое поле	Дорна эффект	93
Гравитационное поле + гравитационное поле	Силовое поле; движение	Суперпозиция	164
Гравитационное поле + звуковое поле, ультразвук	Силовое поле; перемещение	Ультразвуковая коагуляция	173
Гравитационное поле + световое поле	Силовое поле; движение	Солнечный парус	162
Гравитационное поле + сила	Сила	Гидростатическое давление	128
Гравитационное поле + тепловое поле	Силовое поле; движение	Свободная конвекция	159
Движение	Сила; движение	Центробежная сила	81
Звуковое поле, ультразвук	Движение	Ультразвуковое распыление	171
Звуковое поле, ультразвук	Перемещение	Изгибных волн эффект	141
Звуковое поле, ультразвук	Сила; движение	Радиационное давление (давление звукового излучения)	155
Звуковое поле, ультразвук	Силовое поле	Акустическая кавитация	118
Звуковое поле, ультразвук	Силовое поле; движение	Звукокапиллярный эффект	140
Звуковое поле, ультразвук	Силовое поле; движение	Звуковой ветер	138
Звуковое поле, ультразвук + силовое поле	Силовое поле; движение	Ультразвуковое диспергирование	169
Магнитное поле	Сила; перемещение	Магнитострикция	145
Магнитное поле + + сила	То же	Механострикция (для постоянного магнитного поля)	147
Магнитное поле + + сила	Электрическое поле	Электромагнитная индукция для постоянного магнитного поля	116

Продолжение табл. 1

Воздействие	Результат воздействия	Наименование ФЭ	Стр.
Магнитное поле + + электрическое поле	Сила; кручение	Видемана эффект	125
Сила	Вращение; магнитное поле	Барнетта эффект	87
Сила	Движение	Избирательный перенос при трении	43
Сила	Движение	Броуновское движение	26
Сила	Движение	Вибрационное перемещение	28
Сила	Движение	Ускоренное движение (второй закон Ньютона)	80
Сила	Силовое поле	Давление при контакте	36
Сила	Сила	Паскаля эффект	56
Сила	Сила	Клин	47
Сила	Сила	Рычаг	60
Сила	Сила; движение	Отдачи эффект	55
Сила	Сила; движение	Гидродинамическое сопротивление	33
Сила	Сила; движение	Гидравлический удар	31
Сила	Сила; движение	Абсолютно упругий удар	20
Сила	Сила; движение	Кумуляция	51
Сила	Сила; движение	Инерция (первый закон Ньютона)	46
Сила	Сила; движение	Сила Кориолиса	66
Сила	Сила; перемещение	Упругая деформация. Растяжение. Сжатие	76
Сила	Сила; перемещение	Упругая деформация. Изгиб	73
Сила	Сила; перемещение	Упругая деформация. Кручение	75
Сила	Сила; перемещение	Упругая деформация. Сдвиг	78
Сила	Сила; перемещение	Аккумуляция механической энергии при растяжении (сжатии)	23
Сила	Сила; перемещение	Аккумуляция механической энергии при изгибе	21
Сила	Сила; перемещение	Аккумуляция механической энергии при кручении	22
Сила	Сила; перемещение	Баушингера эффект	25
Сила	Сила; перемещение	Упругое последействие	79
Сила	Сила; перемещение; звуковое поле	Колебания при ударе	48
Сила	Перемещение; тепловое поле	Внутреннее трение	88
Сила	Тепловое поле	Аэродинамический нагрев	86
Сила	Тепловое поле	Джоуля—Томсона эффект	90

Воздействие	Результат воздействия	Наименование ФЭ	Стр.
Сила	Тепловое поле; перемещение	Нагревание при деформации	101
Сила	Тепловое поле; световое излучение; силовое поле	Инициирование ударом	94
Сила + гравитационное поле	Сила; движение	Трение качения	70
Сила + звуковое поле	Сила; перемещение	Снижение статической нагрузки (эффект Блага—Лангенеккера)	69
Сила + звуковое поле, ультразвук	Движение	Влияние ультразвуковых колебаний на трение	29
Сила + магнитное поле	Магнитное поле; сила; перемещение	Магнитоупругий эффект	97
Сила + магнитное поле	Сила; перемещение	Дельта E-эффект	37
Сила + сила	Тепловое поле, движение	Температурный эффект при трении	109
Сила + сила	Сила; движение	Гироскопический эффект	34
Сила + сила	Сила; движение	Трение скольжения	71
Сила + тепловое поле	Перемещение	Сжимаемость	63
Силовое поле + тепловое поле	Перемещение	Скачкообразная деформация (эффект Портевена—Ле Шателье)	67
Сила + тепловое поле	Перемещение	Пластическая деформация скольжением	57
Сила + тепловое поле	Перемещение	Сверхпластичность	61
Силовое поле + тепловое поле	Сила; движение	Возникновение силы (реактивной) при истечении газа	59
Сила + ЭМИ, радиоволны	Движение; ЭМИ радиоволны	Доплера эффект	39
Силовое поле	Намагничивание	Пьезомагнитный эффект	104
Силовое поле	Силовое поле	Силовое противодействие (третий закон Ньютона)	65
Силовое поле	Силовое поле; движение	Дросселирование	41
Силовое поле	Сила; движение	Аэродинамической подъемной силы эффект	24
Силовое поле	Силовое поле; движение	Эжектора эффект	83
Силовое поле	Тепловое поле; движение	Механокалорический эффект	99
Силовое поле	Электрическое поле	Пьезоэлектрический прямой эффект	105
Силовое поле	Электрическое поле	Потенциал течения	102
Силовое поле — магнитное поле	Электрическое поле	Магнитогидродинамический эффект	96

Продолжение табл

Воздействие	Результат воздействия	Наименование ФЭ	Стр.
Силовое поле + сила	Сила; движение	Магнуса эффект	52
Тепловое поле	Движение	Диффузия	130
Тепловое поле	Силовое поле	Детонация	135
Тепловое поле	Силовое поле; движение	Радиометрический эффект	108
Тепловое поле	Сила	Термоупругий эффект	168
Тепловое поле	Сила; перемещение	Тепловое расширение твердых тел	166
Тепловое поле	Силовое поле; перемещение	Памяти формы эффект	149
Тепловое поле + + сила	Движение; тепловое поле	Вынужденная конвекция	126
Электрическое поле	Движение	Движение заряженных частиц в электрическом поле	133
Электрическое поле	Сила; движение	Электрофорез	178
Электрическое поле	Сила; перемещение	Электроосмос	176
Электрическое поле	Силовое поле + звуковое поле	Пьезоэлектрический обратный эффект	153
Электрическое поле	Силовое поле; перемещение	Электрострикция кристаллов	177
Электрическое поле	Силовое поле; перемещение	Электрогидравлический эффект	174
Электрическое поле + магнитное поле	Сила	Ампера эффект (закон)	120
Электрическое поле + магнитное поле	Сила; движение	Пинч-эффект	152
Электрическое поле + магнитное поле	Сила; движение	Сила Лоренца	161
Электрическое поле + сила	Магнитное поле	Тензорезистивный эффект	111
ЭМИ: инфракрасное и видимое	Сила; движение; звуковое поле, ультразвук	Лазерный телекинетический эффект	142
ЭМИ: световое излучение	Сила; вращение	Садовского эффект	157
ЭМИ: световое излучение + сила	ЭМИ: световое излучение	Фотоупругий эффект	113
ЭМИ: световое излучение	Силовое поле; движение	Световое давление	158

2. Список физических эффектов по наименованиям результатов воздействий

Результат воздействия	Воздействие	Наименование ФЭ	Стр.
Вращение; магнитное поле	Сила	Барнетта эффект	87
Гравитационное поле; движение	Гравитационное поле	Гравитационный коллапс	132

Результат воздействия	Воздействие	Наименование ФЭ	Стр.
Движение	Звуковое поле; ультразвук	Ультразвуковое распыление	171
Движение	Сила	Ускоренное движение (второй закон Ньютона)	80
Движение	Сила	Избирательный перенос при трении	43
Движение	Сила	Вибрационное перемещение	28
Движение	Сила	Броуновское движение	26
Движение	Электрическое поле	Движение заряженных частиц в электрическом поле	133
Движение	Тепловое поле	Диффузия	136
Движение	Сила + звуковое поле; ультразвук	Влияние ультразвуковых колебаний на трение	29
Движение; тепловое поле	Тепловое поле + + сила	Вынужденная конвекция	126
Движение; ЭМИ, радиоволны	Сила + ЭМИ; радиоволны	Доплера эффект	39
Магнитное поле	Электрическое поле + сила	Тензорезистивный эффект	111
Магнитное поле; сила; перемещение	Сила + магнитное поле	Магнитоупругий эффект	97
Намагничивание	Силовое поле	Пьезомагнитный эффект	104
Перемещение	Звуковое поле; ультразвук	Изгибные волны	141
Перемещение	Сила + тепловое поле	Сжимаемость	63
Перемещение	Силовое поле + тепловое поле	Скачкообразная деформация (эффект Портевена—Ле Шателье)	67
Перемещение	Сила + тепловое поле	Пластическая деформация скольжением	57
Перемещение	Сила + тепловое поле	Сверхпластичность	61
Перемещение; тепловое поле	Сила	Внутреннее трение	88
Сила	Сила	Клин	47
Сила	Сила	Рычаг	60
Сила	Сила; движение	Сила Кориолиса	66
Сила	Сила	Паскаля эффект	56
Сила	Тепловое поле	Термоупругий эффект	168
Сила	Гравитационное поле + сила	Гидростатическое давление	128
Сила	Электрическое поле + магнитное поле	Ампера эффект (закон)	120
Сила; вращение	ЭМИ, световое излучение	Садовского эффект	157
Сила; движение	Сила	Отдачи эффект	55
Сила; движение	Движение	Центробежная сила	81
Сила; движение	Сила	Инерция	46

Продолжение табл. 2

Результат воздействия	Воздействие	Наименование ФЭ	Стр.
Сила; движение	Сила	Гидродинамическое сопротивление	33
Сила; движение	Сила	Гидравлический удар	31
Сила; движение	Сила	Кумуляция	51
Сила; движение	Сила	Абсолютно упругий удар	20
Сила; движение	Гравитационное поле	Гравитационный захват	129
Сила; движение	Гравитационное поле	Архимеда эффект (закон)	121
Сила; движение	Звуковое поле; ультразвук	Радиационное давление (давление звукового излучения)	155
Сила; движение	Сила + гравитационное поле	Трение качения	70
Сила; движение	Сила + сила	Гироскопический эффект	34
Сила; движение	Сила + сила	Трение скольжения	71
Сила; движение	Силовое поле	Аэродинамическая подъемная сила	24
Сила; движение	Силовое поле + сила	Магнуса эффект	53
Сила; движение	Силовое поле + тепловое поле	Возникновение силы (реактивной) при истечении газа	59
Сила; движение	Электрическое поле	Электрофорез	178
Сила; движение	Электрическое поле + магнитное поле	Пинч-эффект	152
Сила; движение	Электрическое поле + магнитное поле	Сила Лоренца	161
Сила; движение звуковое поле; ультразвук	ЭМИ; инфракрасное и видимое	Лазерный телекинетический эффект	142
Сила; кручение	Магнитное поле + + электрическое поле	Видемана эффект	125
Сила, перемещение	Магнитное поле	Магнитострикция	145
Сила; перемещение	Магнитное поле + + сила	Механострикция (для постоянного магнитного поля)	147
Сила; перемещение	Тепловое поле	Тепловое расширение твердых тел	166
Сила; перемещение	Сила	Упругая деформация. Растяжение. Сжатие	76
Сила; перемещение	Сила	Упругая деформация. Изгиб	72
Сила; перемещение	Сила	Упругая деформация. Кручение	74
Сила; перемещение	Сила	Упругая деформация. Сдвиг	77
Сила; перемещение	Сила	Аккумуляция механической энергии при растяжении (сжатии)	22

Продолжение табл. 2

Результат воздействия	Воздействие	Наименование ФЭ	Стр.
Сила; перемещение	Сила	Аккумуляция механической энергии при изгибе	21
Сила; перемещение	Сила	Аккумуляция механической энергии при кручении	22
Сила; перемещение	Сила	Баушингера эффект	25
Сила; перемещение	Сила	Упругое последействие	79
Сила; перемещение	Сила + звуковое поле	Снижение статической нагрузки (эффект Блага—Лангенеккера)	69
Сила; перемещение	Сила + магнитное поле	Дельта E-эффект	37
Сила; перемещение	Электрическое поле	Электроосмос	176
Сила; перемещение	Электрическое поле	Электрострикция (квадратичный пьезоэффект)	177
Сила; перемещение; звуковое поле	Сила	Колебания при ударе	48
Силовое поле	Сила	Давление при контакте	36
Силовое поле	Звуковое поле; ультразвук	Акустическая кавитация	118
Силовое поле	Электрическое поле	Электрогидравлический эффект	174
Силовое поле	Звуковое поле; ультразвук	Звукокапиллярный эффект	139
Силовое поле; движение	Электромагнитное излучение	Световое давление	158
Силовое поле	Тепловое поле	Памяти формы эффект	149
Силовое поле	Силовое поле	Силовое противодействие (третий закон Ньютона)	65
Силовое поле; движение	Звуковое поле; ультразвук	Звуковой ветер	138
Силовое поле; движение	Силовое поле	Эжектора эффект	83
Силовое поле; движение	Силовое поле	Дросселирование	41
Силовое поле; движение	Звуковое поле; ультразвук + силовое поле	Ультразвуковое диспергирование	169
Силовое поле; движение	Гравитационное поле	Всемирное тяготение	123
Силовое поле; движение	Гравитационное поле + гравитационное поле	Суперпозиция	164
Силовое поле; движение	Гравитационное поле + тепловое поле	Свободная конвекция	159
Силовое поле; движение	Гравитационное поле + световое поле	Солнечный парус	162
Силовое поле; движение	Тепловое поле	Радиометрический эффект	108
Силовое поле + звуковое поле	Электрическое поле	Пьезоэлектрический обратный эффект	153

Продолжение табл. 2

Результат воздействия	Воздействие	Наименование ФЭ	Стр.
Силовое поле; перемещение	Гравитационное поле + звуковое поле; ультразвук	Ультразвуковая коагуляция	173
Силовое поле	Тепловое поле	Детонация	135
Тепловое поле	Сила	Джоуля — Томсона эффект	90
Тепловое поле	Сила	Аэродинамический нагрев	86
Тепловое поле; движение	Сила + сила	Температурный эффект при трении	109
Тепловое поле; движение	Силовое поле	Механокалорический эффект	99
Тепловое поле; перемещение	Сила	Нагревание при деформации	101
Тепловое поле; ЭМИ; световое излучение; силовое поле	Сила	Инициирование ударом	94
Электрическое поле	Гравитационное поле	Дорна эффект	93
Электрическое поле	Магнитное поле + + сила	Электромагнитная индукция для постоянного магнитного поля	116
Электрическое поле	Силовое поле	Пьезоэлектрический прямой эффект	105
Электрическое поле	Силовое поле	Потенциал течения (явление, обратное электроосмосу)	102
Электрическое поле	Силовое поле + магнитное поле	Магнитогидродинамический эффект	96
ЭМИ; световое излучение	ЭМИ; световое излучение	Фотоупругий эффект	113

3. Единицы физических величин

Основные единицы Международной системы (СИ)

Величина	Размерность	Единица			
		Наименование	Обозначение		Определение
			русское	международное	
Длина	L	метр	м	m	Метр равен 1650763,73 длин волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома криптона-86
Масса	M	килограмм	кг	kg	Килограмм равен массе международного прототипа килограмма
Сила электрического тока	I	ампер	А	A	Ампер равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н
Термодинамическая температура	θ	кельвин	К	K	Кельвин равен 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды
Количество вещества	N	моль	моль	mol	Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде — 12 массой 0,012 кг
Сила света	J	кандела	кд	cd	Кандела равна силе света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср
Время	T	секунда	с	s	Секунда равна 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния цезия — 133
Дополнительные единицы СИ					
Плоский угол	—	радиан	рад	rad	Радиан равен углу между двумя радиусами окруж-

Телесный угол	—	стерадиан	ср	sr	ности, длина дуги между которыми равна радиусу Стерадиан равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы

Производные единицы СИ, используемые в машиностроении

Величина		Единица	
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение
	I. Пространство и время		
Площадь	L^2	квадратный метр	$м^2$
Объем, вместимость	L^3	кубический метр	$м^3$
Скорость (линейная)	LT^{-1}	метр в секунду	м/с
Ускорение	LT^{-2}	метр на секунду в квадрате	$м/с^2$
Угловая скорость	T^{-1}	радиан в секунду	рад/с
Угловое ускорение	T^{-2}	радиан на секунду в квадрате	$рад/с^2$
	II. Периодические и связанные с ними явления		
Период	T	секунда	с
Частота периодического процесса	T^{-1}	герц	Гц
Частота вращения	T^{-1}	секунда в минус первой степени	$с^{-1}$
Волновое число	L^{-1}	метр в минус первой степени	$м^{-1}$
Коэффициент затухания	T^{-1}	секунда в минус первой степени	$с^{-1}$
Коэффициент ослабления	L^{-1}		
	III. Механика		
Плотность	$L^{-3}M$	килограмм на кубический метр	$кг/м^3$
Удельный объем	L^3M^{-1}	кубический метр на килограмм	$м^3/кг$
Количество движения	LMT^{-1}	килограмм—метр в секунду	кг·м/с
Момент количества движения	L^2MT^{-1}	килограмм—метр в квадрате на секунду	$кг·м^2/с$

Продолжение табл. 3

Величина		Единица	
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение
Момент инерции (динамический момент инерции)	L^2M	килограмм—метр в квадрате	кг·м²
Сила, вес	LMT^{-2}	ньютон	Н
Момент силы, момент пары сил	L^2MT^{-2}	ньютон метр	Н·м
Импульс силы	LMT^{-1}	ньютон—секунда	Н·с
Давление, напряжение (механическое), модуль упругости, модуль сдвига, модуль объемного сжатия	$L^{-1}MT^{-2}$	паскаль	Па
Момент инерции (второй момент) площади плоской фигуры, осевой	L^4	метр в четвертой степени	м⁴
Момент сопротивления плоской фигуры	L^3	метр в третьей степени	м³
Динамическая вязкость	$L^{-1}MT^{-1}$	паскаль—секунда	Па·с
Кинематическая вязкость	L^2T^{-1}	квадратный метр в секунду	м²/с
Поверхностное натяжение	MT^{-2}	ньютон на метр	Н/м
Работа, энергия	L^2MT^{-2}	джоуль	Дж
Мощность	L^2MT^{-3}	ватт	Вт

IV. Теплота

Температура Цельсия	θ	градус Цельсия	°C
Температурный коэффициент	θ^{-1}	кельвин в минус первой степени	K^{-1}
Температурный градиент	$L^{-1}\theta$	кельвин на метр	К/м
Теплота, количество теплоты	L^2MT^{-2}	джоуль	Дж
Тепловой поток	L^2MT^{-3}	ватт	Вт
Поверхностная плотность теплового потока	MT^{-3}	ватт на квадратный метр	Вт/м²
Теплопроводность	$LMT^{-3}\theta^{-1}$	ватт на метр—кельвин	Вт/(м·К)
Коэффициент теплообмена, коэффициент теплопередачи	$MT^{-3}\theta^{-1}$	ватт на квадратный метр—кельвин	Вт/(м² К)
Температуропроводность	L^2T^{-1}	квадратный метр на секунду	м²/с
Теплоемкость	$L^2MT^{-2}\theta^{-1}$	джоуль на кельвин	Дж/К

Удельная теплоемкость, удельная газовая постоянная	$L^2T^{-2}\theta^{-1}$	джоуль на килограмм—кельвин	Дж/(кг К)
Энтропия	$L^2MT^{-2}\theta^{-1}$	джоуль на кельвин	Дж/К
Удельная энтропия	$L^2T^{-2}\theta^{-1}$	джоуль на килограмм—кельвин	Дж/(кг К)
Термодинамический потенциал (внутренняя энергия, энтальпия, изохорно-изотермический потенциал, изобарно-изотермический потенциал), теплота фазового превращения, теплота химической реакции	L^2MT^{-2}	джоуль	Дж
Удельное количество теплоты, удельный термодинамический потенциал, удельная теплота фазового превращения, удельная теплота химической реакции	L^2T^{-2}	джоуль на килограмм	Дж/кг

V. Электричество и магнетизм

Количество электричества (электрический заряд)	TI	кулон	Кл
Пространственная плотность электрического заряда	$L^{-3}TI$	кулон на кубический метр	Кл/м^3
Поверхностная плотность электрического заряда, поляризованность	$L^{-2}TI$	кулон на квадратный метр	Кл/м^2
Напряженность электрического поля	$LMT^{-3}I^{-1}$	вольт на метр	В/м
Электрическое напряжение, электрический потенциал, разность электрических потенциалов, электродвижущая сила	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	вольт	В
Поток электрического смещения	TI	кулон	Кл
Электрическое смещение	$L^{-2}TI$	кулон на квадратный метр	Кл/м^2
Электрическая емкость	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$	фарад	Ф
Абсолютная диэлектрическая проницаемость, электрическая постоянная	$L^{-3}M^{-1}T^4I^2$	фарад на метр	Ф/м
Электрический момент диполя	LTI	кулон—метр	Кл·м
Плотность электрического тока	$L^{-2}I$	ампер на квадратный метр	А/м^2
Линейная плотность электрического тока	$L^{-1}I$	ампер на метр	А/м
Напряженность магнитного поля	$L^{-1}I$	ампер на метр	А/м
Магнитодвижущая сила, разность магнитных потенциалов	I	ампер	А
Магнитная индукция	$MT^{-2}I^{-1}$	тесла	Тл

Продолжение табл. 3

Величина		Единица	
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение
Магнитный поток	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	вебер	Вб
Индуктивность	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	генри	Гн
Абсолютная магнитная проницаемость, магнитная постоянная	$LMT^{-2}I^2$	генри на метр	Гн/м
Магнитный момент	L^2I	ампер—квадратный метр	$А \cdot м^2$
Намагниченность (интенсивность намагничивания)	$L^{-1}I$	ампер на метр	А/м
Электрическое сопротивление, электрическое сопротивление реактивное	$L^2MT^{-3}I^{-2}$	ом	Ом
Электрическая проводимость, активная реактивная	$L^{-2}M^{-1}T^3I^2$	сименс	См
Удельное электрическое сопротивление	$L^3MT^{-3}I^{-2}$	ом—метр	$Ом \cdot м$
Удельная электрическая проводимость	$L^{-3}M^{-1}T^3I^2$	сименс на метр	См/м
Магнитное сопротивление	$L^{-2}M^{-1}T^2I^2$	генри в минус первой степени	$Гн^{-1}$
Магнитная проводимость	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	генри	Гн
Активная мощность	L^2MT^{-3}	ватт	Вт
Электромагнитная энергия	L^2MT^{-2}	джоуль	Дж
VI. Свет и связанные с ним электромагнитные излучения			
Энергия излучения	L^2MT^{-2}	джоуль	Дж
Энергетическая экспозиция (лучистая экспозиция)	MT^{-2}	джоуль на квадратный метр	$Дж/м^2$
Поток излучения, мощность излучения	L^2MT^{-3}	ватт	Вт
Поверхностная плотность потока излучения, энергетическая светимость (излучательность), энергетическая освещенность (облученность)	MT^{-3}	ватт на квадратный метр	$Вт/м^2$
Энергетическая сила света (сила излучения)	L^2MT^{-3}	ватт на стерадиан	Вт/ср
Энергетическая яркость (лучистость)	MT^{-3}	ватт на стерадиан—квадратный метр	$Вт/(ср \cdot м^2)$
Световой поток	J	люмен	лм
Световая энергия	TJ	люмен—секунда	лм·с
Яркость	$L^{-2}J$	кандела на квадратный метр	$кд/м^2$

Светимость	$L^{-2}J$	люмен на квадратный метр	лм/м²
Освещенность	$L^{2}J$	люкс	лк
Световая экспозиция	$L^{-2}TJ$	люкс—секунда	лк·с

VII. Акустика

Период звуковых колебаний	T	секунда	с
Частота звуковых колебаний	T^{-1}	герц	Гц
Звуковое давление	$L^{-1}MT^{-2}$	паскаль	Па
Длина волны	L	метр	м
Скорость колебания частицы	LT^{-1}	метр в секунду	м/с
Объемная скорость	$L^{3}T^{-1}$	кубический метр в секунду	м³/с
Скорость звука	LT^{-1}	метр в секунду	м/с
Звуковая энергия	$L^{2}MT^{-2}$	джоуль	Дж
Плотность звуковой энергии	$L^{-1}MT^{-2}$	джоуль на кубический метр	Дж/м³
Поток звуковой энергии, звуковая мощность	$L^{2}MT^{-3}$	ватт	Вт
Интенсивность звука	MT^{-3}	ватт на квадратный метр	Вт/м²
Акустическое сопротивление	$L^{-4}MT^{-1}$	паскаль—секунда на кубический метр	Па·с/м³
Удельное акустическое сопротивление	$L^{-2}MT^{-1}$	паскаль—секунда на метр	Па·с/м
Механическое сопротивление	MT^{-1}	ньютон—секунда на метр	Н·с/м
Эквивалентная площадь поглощения поверхностью или предметом	L^{2}	квадратный метр	м²
Время реверберации	T	секунда	с

VIII. Физическая химия и молекулярная физика

Молярная масса	MN^{-1}	кубический метр на моль	м³/моль
Тепловой эффект химической реакции образования, растворения, горения, фазовых превращений и т. д.	$L^{2}MT^{-2}$	джоуль	Дж
Молярная внутренняя энергия, молярная энтальпия, химический потенциал, энергия активации	$L^{2}MT^{-2}N^{-1}$	джоуль на моль	Дж/моль
Молярная теплоемкость, молярная энтропия	$L^{2}MT^{-2}\theta^{-1}N^{-1}$	джоуль на моль—кельвин	Дж/(моль·К)
Концентрация молекул	L^{-3}	метр в минус третьей степени	м⁻³
Массовая концентрация	ML^{-3}	килограмм на кубический метр	кг/м³
Летучесть, осмотическое давление	$L^{-1}MT^{-2}$	паскаль	Па
Коэффициент диффузии	$L^{2}T^{-1}$	квадратный метр на секунду	м²/с
Скорость химической реакции	$L^{-3}T^{-1}N$	моль на кубический метр в секунду	моль/м³с

Продолжение табл. 3

Величина		Единица	
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение
Активность катализатора	$M^{-1}T^{-1}N$	моль на килограмм—секунду	моль/кг·с
Удельная активность катализатора	$L^{-2}T^{-1}N$	моль на квадратный метр—секунду	моль/м²·с
Адсорбционный потенциал	$L^2MT^{-2}N^{-1}$	джоуль на моль	Дж/моль
Степень дисперсности	L^{-1}	метр в минус первой степени	$м^{-1}$
Удельная площадь поверхности	L^2M^{-1}	квадратный метр на килограмм	м²/кг
Поверхностная плотность	$L^{-2}N$	моль на квадратный метр	моль/м²
Электрический дипольный момент	LTI	кулон—метр	Кл·м
Поляризуемость	$M^{-1}T^4I^2$	кулон—квадратный метр на вольт	Кл·м²/В
Ионная сила раствора	$M^{-1}N$	моль на килограмм	моль/кг
Проводимость электролита	$L^{-3}M^{-1}T^3I^2$	сименс на метр	См/м
Электродный потенциал, перенапряжение, окислительно-восстановительный потенциал	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	вольт	В
Подвижность ионов	$M^{-1}T^2I$	квадратный метр на вольт—секунду	м²/В·с
IX. Ионизирующие излучения			
Энергия ионизирующего излучения	L^2MT^{-2}	джоуль	Дж
Поток энергии ионизирующего излучения	L^2MT^{-3}	ватт	Вт
Поглощенная доза излучения	L^2T^{-2}	грей	Гр
Мощность дозы излучения	L^2T^{-3}	ватт на килограмм	Вт/кг
Интенсивность излучения	MT^{-3}	ватт на квадратный метр	Вт/м²
Поток ионизирующих частиц	T^{-1}	секунда в минус первой степени	$с^{-1}$
Плотность потока ионизирующих частиц	$L^{-2}T^{-1}$	секунда в минус первой степени—метр в минус второй степени	$с^{-1}м^{-2}$
Активность изотопа, активность нуклида в радиоактивном источнике	T^{-1}	беккерель	Бк
Керма, поглощенная доза излучения	L^2T^{-2}	джоуль на килограмм	Дж/кг
Мощность кермы	L^2T^{-3}	ватт на килограмм	Вт/кг
Перенос энергии	MT^{-2}	джоуль на квадратный метр	Дж/м²
Экспозиционная доза фотонного излучения (экспозиционная доза рентгеновского и гамма-излучения)	$M^{-1}TJ$	кулон на килограмм	Кл/кг

Мощность экспозиционной дозы фотонного излучения	$M^{-1}J$	ампер на килограмм	А/кг
Постоянная радиоактивного распада	T^{-1}	секунда в минус первой степени	$с^{-1}$
Период полураспада, средняя продолжительность жизни	L^2M^{-1}	секунда	с
Массовый коэффициент ослабления, массовый коэффициент преобразования энергии, массовый коэффициент поглощения	L^2M^{-1}	квадратный метр на килограмм	$м^2/кг$
Длина среднего пробега	L	метр	м

4. Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц

Множитель	Приставка	Обозначение		Множитель	Приставка	Обозначение		Множитель	Приставка	Обозначение	
		русское	международное			русское	международное			русское	международное
10^{18}	экса	Э	E	10^{3}	кило	к	k	10^{-3}	милли	м	m
10^{15}	пета	П	P	10^{2}	гекто	г	h	10^{-6}	микро	мк	μ
10^{12}	тера	Т	T	10^{1}	дека	да	da	10^{-9}	нано	н	n
10^{9}	гига	Г	G	10^{-1}	деци	д	d	10^{-12}	пико	п	p
10^{6}	мега	М	M	10^{-2}	санти	с	c	10^{-15}	фемто	ф	f
								10^{-18}	атто	а	a

5. Относительные и логарифмические величины и их единицы

Величина	Наименование	Обозначение	Определитель	Примечание
Относительная величина (безразмерное отношение физической величины, принимаемой за исходную), КПД, относительная плотность, относительные диэлектрическая и магнитная проницаемость, массовая доля, молярная доля и т. п.	единица	—	1	
	процент	%	10^{-2}	
	промилле	‰	10^{-3}	
	миллионная доля	млн$^{-1}$	10^{-6}	

Продолжение табл. 5

Величина	Наименование	Обозначение	Определитель	Примечание
Логарифмическая величина (логарифм безразмерного отношения физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную): уровень звукового давления, усиление, ослабление и т. п.	бел	Б	$1Б = \lg \frac{P_2}{P_1}$ при $P_2 = 10P_1$	P_1, P_2 — одноименные энергетические величины (мощности, энергии, плотности энергии)
			$1Б = 2 \lg \frac{F_2}{F_1}$ при $F_2 = \sqrt{10}F_1$	F_1, F_2 — одноименные силовые величины (напряжения, силы тока, давления и т. п.)
То же, частотный интервал	децибел	дБ	0,1 Б	
	октава		1 октава равна $\log_2 \frac{f_2}{f_1}$ при $f_2/f_1 = 2$	f_1, f_2 — частоты
	декада	—	1 декада равна $\lg \frac{f_2}{f_1}$ при $\frac{f_2}{f_1} = 10$	
То же, уровень громкости	фон	фон	1 фон равен уровню громкости звука, для которого уровень звукового давления равногромкого с ним звука частотой 1000 Гц равен 1 дБ	
Количество информации	бит	бит	1 бит — количество информации, получаемое при осуществлении одного из двух равновероятных событий	

6. Некоторые фундаментальные физические постоянные

Величина	Численное значение в единицах СИ
Авогадро постоянная	$6{,}022045 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$
Атомная единица массы	$1{,}6605655 \cdot 10^{-27}$ кг
Гравитационная постоянная	$6{,}6720 \cdot 10^{-11}$ Н·м^2·кг$^{-2}$
Заряд электрона	$1{,}6021892 \cdot 10^{-19}$ Кл
Классический радиус электрона	$2{,}8179380 \cdot 10^{-15}$ м
Магнитная постоянная	$2{,}56637061 \cdot 10^{-7}$ Гн·м$^{-1}$
Масса покоя электрона	$9{,}109534 \cdot 10^{-31}$ кг
Масса покоя протона	$1{,}6726485 \cdot 10^{-27}$ кг
Масса покоя нейтрона	$1{,}6749543 \cdot 10^{-27}$ кг
Нормальное атмосферное давление	101 325 Па
Нормальное ускорение свободного падения	9,80665 м·с$^{-2}$
Объем моля идеального газа при нормальных условиях	$22{,}41383 \cdot 10^{-3}$·м^3·моль$^{-1}$
Плотность воды максимальная (при 3,98 °С и 101 325 Па)	999,973 кг·м$^{-3}$
Плотность сухого воздуха в нормальных условиях	1,293 кг/м^3
Порог слышимости (нулевой уровень давления)	0,00002 Па
Постоянная Больцмана	$1{,}380662 \cdot 10^{-23}$ Дж·К$^{-1}$
Постоянная Планка	$6{,}626176 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Стефана—Больцмана	$5{,}67032 \cdot 10^{-8}$ Вт·м$^{-2}$·К$^{-4}$
Постоянная Фарадея	$9{,}648456 \cdot 10^{4}$ Кл·моль$^{-1}$
Радиус Бора	$5{,}2917706 \cdot 10^{-11}$ м
Скорость звука в воздухе в нормальных условиях	331,46 м·с$^{-1}$
Скорость света в вакууме	$2{,}99792458 \cdot 10^{8}$ м·с$^{-1}$
Универсальная газовая постоянная	8,31441 Дж·моль$^{-1}$·К$^{-1}$
Электрическая постоянная	$8{,}85418782 \cdot 10^{-12}$ Ф·м$^{-1}$

7. Значения модулей продольной упругости и сдвига и коэффициента Пуассона некоторых поликристаллических материалов при нормальных условиях

Материал	E, ГПа	G, ГПа	ν
Алюминиевая бронза	103	41	0,25
Алюминий отожженный	68,5	25—26	0,359—0,369
Бор	14,6—23,2	—	—
Висмут	32	12	0,33
Вольфрам	342—400	88—215	—
Дюралюминий	70	26	0,31
Железо литое	100—130	3,5—5,3	0,23—0,31
Золото отожженное	79	29	0,42
Инвар	110	55	0,2
Кадмий литой	49,9	19	0,3
Кобальт	196—208	—	—
Константан	160	61	0,33

Продолжение табл. 7

Материал	E, ГПа	G, ГПа	ν
Латунь катаная	98	36	0,36
Латунь холоднотянутая	89—97	34—36	0,32—0,42
Медь литая	82	—	—
Медь холоднотянутая	127	48	0,33
Молибден	458	—	0,324
Никель	205	77	0,30
Платина отожженная	147	61	0,39
Ртуть при температуре —40 °С	16—17	—	—
Свинец литой	16,2	5,6	0,45
Серебро отожженное	80,5	26	0,38—0,41
Сталь легированная	206	80	0,25—0,30
Сталь углеродистая	195—205	8	0,24—0,26
Титан	116	44	0,32
Чугун белый	113—116	44	0,23—0,27
Чугун ковкий	150	—	—

То же, для некристаллических материалов

Бетон	15—40	7—17	0,32—0,36
Гранит, мрамор	35—50	14—24	0,1—0,15
Известняк плотный	35	15	0,2
Каучук	0,008	0,003	0,46
Кварцевая нить плавления	73	31	0,17
Плексиглас	5,25	1,48	0,35
Резина вулканизированная	0,0015—0,005	0,0005—0,0015	0,46—0,49
Стекло	49—78	17,5—29	0,2—0,3
Целлулоид	1,7—1,9	0,65	0,39

Значения модулей продольной упругости и сдвига минералов при нормальных условиях

Минерал	E, ГПа	G, ГПа
Галий	37,0	14,8
Гипс	41,0	15,8
Галенит	71,7	24,6
Мусковит	78,9	31,6
Кальцит	81,0	30,7
Кварц	96,4	44,6
Апатит	114,2	46,4
Корунд	460,9	203,0

8. Предел прочности при растяжении некоторых материалов при 20 °С

Материал	$\sigma_в$, ГПа	Материал	$\sigma_в$, ГПа
Алюминий	0,05—0,115	Платина	0,15—0,17
Бакелит	0,02—0,03	Полистирол	0,035—0,060
Бетон прочный	0,048	Полиэтилен	0,012—0,040
Бор	1,62—2,46	Серебро	0,14
Бронза	0,20—0,60	Сталь 3	0,38—0,47
Винипласт	0,04—0,06	Сталь легированная хромистая	0,80
Вольфрам	1,05—4,21		
Гетинакс	0,15—0,17	Сталь рельсовая	0,7—0,8
Гранит	0,12—0,26	Сталь хромоникель-молибденовая	1,0
Дюралюминий	0,18—0,50		
Железо	0,17—0,21	Стекло	0,06—0,12
Золото	0,14	Струна рояльная	1,86—2,33
Инвар	0,78	Тантал	0,35—1,5
Капрон	0,055—0,08	Текстолит	0,085—0,100
Кирпич	0,007—0,03	Титан	0,56—0,88
Константан	0,45—0,55	Фторопласт-4	0,020—0,025
Лавсан	0,012—0,020	Хлопок	0,38
Латунь	0,30—0,60	Хлопчатобумажное волокно	0,45
Лед	0,001		
Лен	0,35	Цинк	0,13—0,20
Манганин	0,50—0,55	Цирконий	0,30—0,50
Мрамор	0,10—0,18	Чугун серый	0,65—1,30
Нихром	0,65—0,70	Шелковая нить	0,26
Органическое стекло	0,045—0,055	Шерсть	0,11
Паутина	0,18	Эбонит	0,03—0,05

Предел прочности древесины при нормальных условиях

Порода дерева	$\sigma_в$, ГПа	
	Растяжение	Сжатие
Береза	161,0	46,5
Дуб	113,5	51,0
Ель	100,5	39,0
Лиственница	122,5	55,0
Ольха	96,5	36,5
Осина	120,0	37,5
Сосна	101,0	11,5

9. Плотность некоторых чистых элементов при нормальном давлении

Элемент	Температура, °С	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м³	Элемент	Температура, °С	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м³
Алюминий твердый	20	2,70	Алюминий жидкий	659	2,382
			Барий	20	3,78

Продолжение табл. 9

Элемент	Температура, °С	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м³	Элемент	Температура, °С	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м³
Бериллий	20	1,84	Медь	20	8,93
Бор кристалл	20	3,33	Молибден	20	9,01
Бор аморфный	20	2,34	Никель	20	8,6—8,9
Ванадий	20	5,96	Ниобий	15	8,4
Висмут	20	9,747	Олово белое	20	7,29
Вольфрам	20	18,6—19,1	Олово жидкое	226	6,99
			Палладий	20	12,16
Германий	20	5,46	Платина	20	21,37
Железо	20	7,87	Рений	20	20,53
Золото	20	19,3	Ртуть	20	13,546
Иридий	17	22,42	Ртуть твердая	—38,8	14,19
Кадмий	20	8,65	Свинец	20	11,34
Калий	20	0,87	Свинец жидкий	325	10,645
Калий жидкий	62	0,83	Селен кристалл	20	4,5
Кобальт	21	8,71	Сера кристалл	20	1,96
Кремний кристалл	20	2,42	Серебро литое	20	10,42—10,59
Кремний аморфный	15	2,35			
			Титан	18	4,5
Литий	20	0,534	Углерод алмаз	20	3,52
Магний	5	1,741	Углерод графит	20	2,25
Марганец	20	7,42	Уран	13	18,7
			Хром	20	7,1

10. Примеры известных проявлений различных видов энергии

Вид энергии	Форма движения материи	Вид проявления
Механическая энергия	Движение твердых тел	Перемещение Вращение Колебание
	Направленное движение тел и частиц	Движение жидкости Движение газа Движение молекул Движение атомов Движение элементарных частиц
	Турбулентное движение частиц	Движение в жидкостях Движение в газах Движение в плазме
	Волновые возмущения	Акустические волны Поверхностные волны
	Упругая деформация тел	Изгиб твердых тел Растяжение твердых тел Кручение твердых тел Сжатие твердых тел Сжатие жидкостей Сжатие газов Сжатие плазмы

Продолжение табл. 10

Вид энергии	Форма движения материи	Вид проявления
Механическая энергия	Межмолекулярное и межатомное взаимодействие	Межмолекулярные силы поверхностного натяжения на границе раздела сред Межатомные силы поверхностного натяжения на границе раздела сред Межмолекулярные силы капиллярности Межатомные силы капиллярности Молекулярные силы сорбции
Тепловая энергия	Хаотическое тепловое движение молекул и атомов	Перемещение молекул Перемещение атомов Вращение молекул Вращение атомов Колебание молекул Колебание атомов
	Тепловое движение частиц при смещении тел	Смещение твердых тел Смещение жидкостей Смещение газов Смещение твердых тел и жидкостей Смещение жидкостей и газов Смещение твердых тел и газов Смещение твердых тел, жидкостей и газов
	Тепловое движение электронов	Возбуждение электронных орбит в твердых телах Возбуждение электронных орбит в жидкостях Возбуждение электронных орбит в газах
	Тепловое движение зарядов	Смещение зарядов равновесной плазмы Смещение зарядов неравновесной плазмы Смещение зарядов электронно-позитронного газа Смещение зарядов мезанного и электронно-мезанного газа
Энергия фазовых переходов	Фазовые переходы первого рода	Изменение агрегатного состояния Изменение кристаллической структуры Растворение кристаллов Выпаривание кристаллов
	Фазовые переходы второго рода	Переход в сверхпроводящее состояние и обратно Переход ферромагнетиков в парамагнетики и обратно Переход гелия-I в гелии-II и обратно Поляризация и деполяризация диэлектриков

Продолжение табл. 10

Вид энергии	Форма движения материи	Вид проявления
Химическая энергия	Химические реакции соединения	Окисление Рекомбинация Нейтрализация Полимеризация Гидратация Образование гиперфрагментов (позитрония, мюония и т. п.) Ионизация с присоединением электрона или иона
	Химические реакции разложения	Разложение молекул Разложение полимеров Диссоциация Ионизация в процессе разложения Дегидратация
	Химические реакции замещения	Замещение в электролитах Замещение в кристаллах Замещение на границе раздела сред
	Химические реакции перехода веществ из возбужденного состояния в основное	Переход твердых тел Переход жидкостей Переход газов
Ядерная энергия	Синтез ядер	Спонтанный синтез ядер Управляемый синтез ядер Импульсный синтез ядер Комбинированный синтез ядер
	Деление ядер	Спонтанное деление ядер Управляемое деление ядер Импульсное деление ядер Комбинированное деление ядер
	Радиоактивные превращения	Превращения при захвате ядром электрона с К-оболочкой Превращения при изомерных переходах Превращение при испускании γ-квантов Радиоактивный распад
	Аннигиляция	Аннигиляция лептонов Аннигиляция бозонов Аннигиляция гиперфрагментов Аннигиляция атомов Аннигиляция молекул Аннигиляция макросистем

Продолжение табл. 10

Вид энергии	Форма движения материи	Вид проявления
Полевая энергия	Гравитационное взаимодействие тел	Гравитация тяжелых масс Гравитационные волны Гравитоны Трансмутации (переходы) Коллапс
	Электрическое поле	Статическое поле зарядов Электрическая поляризация диэлектриков Диэлектрическая поляризация проводников
	Магнитное поле	Намагничивание Диамагнетизм Взаимодействие токовых систем
	Электромагнитное поле	Электрический ток Электромагнитные волны Электромагнитные кванты Электромагнетизм геонов МГД-волны
	Поле внутриядерных сил	Обменные мезонные силы Силы спиновой ориентации Сохранение странности внутриядерных сил Сохранение четности внутриядерных сил Сохранение барионного заряда

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абианц В. Х.** Ракетные двигатели и большие скорости. М.: Знание, 1960. 39 с.

2. **Агейкин Д. И., Костина Е. М., Кузнецова Н. Н.** Датчики контроля и регулирования. М.: Машиностроение, 1965. 928 с.

3. **Агранат Б. А., Гудович А. П., Нежевенко Л. Б.** Ультразвук в порошковой металлургии. М.: Металлургия. 1986. 168 с.

4. **Андреев К. К., Беляев А. Ф.** Теория взрывчатых веществ. М.: Воениздат, 1960. 119 с.

5. **Александров А. Я., Ахмедзянов М. Х.** Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. М.: Наука, 1973. 576 с.

6. **Александров Н. В., Михин А. Я.** Курс общей физики: Механика. М.: Просвещение, 1978. 329 с.

7. **Альтшуль А. Д., Киселев П. Г.** Гидравлика и аэродинамика. 2-е изд. М.: Стройиздат, 1975. 274 с.

8. **Андрианова Т. Н.** Дросселирование газов и паров. М.: МФТИ, 1962. 14 с.

9. **Арцимович Л. А.** Самостягивающийся разряд//ФЭС. М., 1965. Т. 4. С. 464—466.

10. **А. с.** 179409 СССР. кл. 23С1/02. Металлоплакирующая смазка. Опубл. 8.02.1966 г. Бюл. № 5. С. 50.

11. **А. с.** 501306 СССР, кл. Y01L1/16. Пьезоэлектрический датчик. Опубл. 30.01.1976. Бюл. № 4. С. 117.

12. **А. с.** 537273 СССР, кл. J01h9/08. Пьезоэлектрический датчик давления. Опубл. 30.11.1976. Бюл. № 44. С. 118.

13. **А. с.** 115744 СССР, кл. 48d8. Способ придания поверхности металлов трущихся пар противозадирочных свойств. Опубл. 29.11.1958. Бюл. № 10. С. 106.

14. **А. с.** 514616 СССР, кл. B01D57/00. Способ разделения неоднородных жидких сред. Опубл. 25.05.1976. Бюл. № 19. С. 11.

15. **Ашкрофт Н., Мермин Н.** Физика твердого тела. Т. 1. М.: Мир, 1979. 399 с.

16. **Бабиков О. И.** Контроль уровня с помощью ультразвука. Л.: Энергия, 1971. 79 с.

17. **Белов К. П., Бочкарев Н. Г.** Магнетизм на Земле и в космосе. М.: Наука, 1983. 191 с.

18. **Белов К. П.** Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнетиках. М.: Техника, 1957. 279 с.

19. **Белов К. П.** Магнитные превращения. М.: Физматгиз, 1959. 259 с.

20. **Белов К. П.** Магнитомеханические явления//ФЭС. М., 1963. Т. 3. С. 102—103.

21. **Белов К. П.** Магнитострикционные явления и их технические приложения. М.: Наука, 1987. 159 с.

22. **Белов К. П.** Редкоземельные магнетики и их применение. М.: Наука, 1980. 239 с.

23. **Бергман Л.** Ультразвук и его применение в науке и технике: Пер. с нем. М.: Изд-во иностр. лит., 1957. 726 с.

24. **Берлинкур Д., Керран Д., Жаффе Г.** Пьезоэлектрические и пьезомагнитные материалы и их применение в преобразователях//Физическая акустика: Пер. с англ./Под ред. У. Мэзона. М.: 1966. Т. 1, Ч. А.; Гл. 3. С. 204—324.

25. **Биргер Г. И., Бражников Н. И.** Ультразвуковые расходомеры. М.: Металлургия, 1964. 382 с.

26. **Бирзвалк Ю. А.** Магнитная гидродинамика. М.: Знание, 1979. 63 с.

27 **Бишоп Р. Л.** Колебания: Пер. с англ./Под ред. Я. Г. Пановко. М.: Наука, 1986. 189 с.

28. **Блатт Ф. Дж.** Физика электронной проводимости в твердых телах: Пер. с англ. М.: Мир, 1971. 306 с.

29. **Блехман И. И., Джанелидзе Г. Ю.** Вибрационное перемещение. Наука. 1964.

30. **Блехман И. И.** Что может вибрация? О «вибрационной механике» и «вибрационной технике». М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 208 с.

31. **Бобылев А. В.** Механические и технологические свойства металлов: Справочник. М.: Металлургия, 1980. 296 с.

32. **Боевая** авиационная техника. Авиационное вооружение/Под ред. Д. И. Гладкова. М.: Воениздат, 1987. 279 с.

33. **Боженов Е. П.** Термогазодинамическая обработка строительных материалов. М.: Стройиздат, 1958. 208 с.

34. **Бозорт Д.** Ферромагнетизм: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1956. 784 с.

35. **Боровик-Романов А. С.** Антиферромагнетизм//Антиферромагнетизм и ферриты/Под ред. Я. Г. Дорфмага. М.. АН СССР, 1962. С. 7—109.

36. **Браславский Д. А.** Приборы и датчики летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1970. 392 с.

37. **Брюханов А. Н.** Ковка и объемная штамповка. М.: Машиностроение, 1975. 408 с.

38. **Бутиков Е. И.** Оптика. М.: Высшая школа. 1986. 512 с.

39. **Бухгольц Н. Н.** Основной курс теоретической механики. 9-е изд.: В 2-х ч. Ч. 2. М.: Наука, 1969. 332 с.

40. **Бычков В. Н.** Космические жидкостные ракетные двигатели. М.: Знание, 1976. 64 с.

41. **Бычков С. И., Лукьянов Д. П., Бакалер А. И.** Лазерный гироскоп. М.: Сов. радио, 1975. 424 с.

42. **Валиев С. А.** Комбинированная глубокая вытяжка листовых материалов. М.: Машиностроение, 1973. 176 с.

43. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.

44. **Викулин И. М.** Физика полупроводниковых приборов. М.: Сов. радио, 1980. 294 с.

45. **Викторов И. А.** Изгибные волны//Ультразвук: Маленькая энциклопедия/Гл. ред. И. П. Голямина. М.: Сов. энциклопедия, 1979. С. 142—143.

46. **Вилль В. И.** Сварка металлов трением. Л.: Машиностроение, 1970. 175 с.

47. **Винницкий А. М.** Ракетные двигатели на твердом топливе. М.: Машиностроение, 1973. 347 с.

48. **Внутреннее** трение в металлах и неорганических материалах. АН СССР, Отд-ние физикохимии и технологии неорганич. материалов. М.: Наука, 1982. 229 с.

49. **Внутреннее** трение в металлах и сплавах/Отв. ред. Ф. Н. Тавардзе. М.: Наука, 1986. 243 с.

50. **Володич В. А., Ткаченко Ю. Н.** Конструкция и проектирование ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1984. 272 с.

51. **Вонсовский С. В.** Магнетизм. М.: Наука, 1984. 207 с.

52. **Вонсовский С. В.** Магнетизм//Магнитные свойства диа-, пара- и ферромагнетиков. М.: Наука, 1971. 1032 с.

53. **Гаркунов Д. Н., Крагельский И. В., Поляков А. А.** Избирательный перенос в узлах трения. М.: Транспорт, 1969. 103 с.

54. **Гаркунов Д. Н., Поляков А. А.** Повышение износостойкости деталей конструкций самолетов. М.: Машиностроение, 1974. 200 с.

55. **Гаркунов Д. Н.** Триботехника. М.: Машиностроение, 1985. 424 с.

56. **Гершгал Д. А., Фридман В. М.** Ультразвуковая технологическая аппаратура. М.: Энергия, 1976. 320 с.

57. **Гидравлические** прессы/Под ред. Б. П. Васильева. М.: Машиностроение, 1959. 433 с.

58. **Гидравлический** таран//БСЭ. 3-е изд. М., 1971. Т. 6. С. 467—468.

59. **Гильзин К. А.** Двигатели невиданных скоростей. М.: Машиностроение, 1965. 331 с.

60. **Гинзбург В. Л.** Теоретическая физика и астрофизика: Доп. главы. 2-е изд., перераб. М.: Наука, 1981. 503 с.

61. **Глаговский Б. А., Пивен И. Д.** Электротензометры сопротивления. Л.: Энергия, Ленингр. отд-е, 1972. 86 с.

62. **Гладких А. Н.** Холодная высадка и выдавливание изделий. М.: ЦИНТИАМ. 1964. 279 с.

63. **Головков Л. Г.** Гибридные ракетные двигатели. М.: Воениздат, 1976. 196 с.

64. **Горбацкий В. Г.** Космическая газодинамика. М.: Наука, 1977. 420 с.

65. **Григоров О. Н.** Электрокинетические явления. Л.: ЛГУ, 1973. 199 с.

66. **Григорьев В. И., Мякишев Г. Я.** Силы в природе. М.: Наука, 1978. 416 с.

67. **Гроздовский Г. Л., Иванов Ю. Н., Токарев В. В.** Механика космического полета с малой тягой. М.: Наука, 1966. 136 с.

68. **Гулиа Н. В.** Инерция. М.: Наука, 1982. 150 с.

69. **Гуманюк М. Н.** Магнитоупругие датчики в автоматике. Киев: Техника, 1972. 262 с.

70. **Гуров А. Ф., Северук Д. Д., Сурнов Д. Н.** Конструкция и проектирование двигательных установок. М.: Машиностроение, 1980. 320 с.

71. **Давление** света//БСЭ. М., 1972. Т. 7. С. 487—488.

72. **Дейнега Ю. Ф., Ульберг З. Р., Эстрела-Льопис В. Р.** Электрофоретическое осаждение металлополимеров. Киев: Наука, 1976. 231 с.

73. **Дейч М. Е.** Техническая гидродинамика. М.: Госэнергоиздат, 1961. 671 с.

74. **Джалурия И.** Естественная конвекция/Под ред. В. И. Полежаева. М.: Мир, 1983. 400 с.

75. **Диденко Д. А.** Влияние размеров образцов на низкотемпературную деформацию монокристаллов алюминия// Физика металлов и металловедение. 1972. 33. № 2. С. 389—391.

76. **Дитчберн Р.** Физическая оптика. М.: Наука, 1965. 631 с.

77. **Дмитриев А. С., Кошелев В. А.** Космические двигатели будущего. М.: Знание, 1982. 63 с.

78. **Долгополов Н., Н., Фридман В. И.** Плазменная техника. М.: Знание, 1975. 64 с.

79. **Дорфман Я. Г.** Магнитные свойства и строение вещества. М.: Гостехиздат, 1955. 376 с.

80. **Дрейер Г.** Учение о прочности и упругости: Пер. с нем. М.: Машиностроение, 1964. 416 с.

81. **Дросселирование**//БСЭ. М., 1972. Т. 8. С. 509.

82. **Духин С. С., Дерягин Б. В.** Электрофорез. М.: Наука, 1976. 328 с.

83. **Еленев С. А.** Холодная штамповка. М.: Высшая школа, 1981. 252 с.

84. **Ерофеев А. А.** Пьезоэлектронные устройства автоматики. Л.: Машиностроение, 1982. 212 с.

85. **Жданов Л. С., Мараиджян В. А.** Курс физики. 4-е изд. Ч. 1. Механика и молекулярная физика. М.: Наука, 1971. 464 с.

86. **Желудев И. С.** Основы сегнетоэлектричества. М.: Атомиздат, 1973. 472 с.

87. **Желудев И. С. Физика кристаллических диэлек риков.** М.: Наука, 1968. 462 с.

88. **Заремба Л. К. Радиометр**//Ультразвук. Маленькая энциклопедия/Гл. ред. И. П. Голямина. М.: Сов. энциклопедия, 1979. С. 290—291.

89. **Заремба Л. К., Красильников В. А.** Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966. 519 с.

90. **Звелто О.** Принципы лазеров: Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 395 с.

91. **Зельдович Я. Б., Компанеец А. С.** Теория детонации. М.: Гостехиздат, 1955. 268 с.

92. **Зельдович Я. Б., Новиков И. Д.** Теория тяготения и эволюция звезд. М.: Наука, 1971. 380 с.

93. **Зисман Г. А., Тодес О. М.** Курс общей физики. М.: Наука, 1974. Т. 2. 348 с.

94. **Зотов В. Ф., Елин В. И.** Холодная прокатка металла. М.: Металлургия, 1988. 288 с.

95. **Зубарев Д. Н.** Броуновское движение//ФЭС. М., 1960. Т. 1. С. 211—213.

96. **Зубцов М. Е.** Листовая штамповка. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-е, 1980. 432 с.

97. **Идельчик И. Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1975. 367 с.

98. **Имшенник В. С.** Гравитационный коллапс//Физика космоса: Маленькая энциклопедия/Гл. ред. Р. А. Сюняев. М. 1986. С. 225—233.

99. **Инерция** в технике. М.: Знание, 1984. 64 с. (Новое в жизни, науке и технике. Сер. Техника, № 9).

100. **Ионные**, плазменные и дуговые реактивные двигатели: Сборник статей; Пер. с англ. М.: Госатомиздат, 1961. 406 с.

101. **Иродов И. Е.** Основные законы механики: Учебное пособие для физ. спец. вузов; 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1985. 248 с.

102. **Исакович М. А.** Общая акустика. М.: Наука, 1973. 495 с.

103. **Исакович М. А.** Эффект Доплера//Ультразвук: Маленькая энциклопедия/Гл. ред. Голямина. М.: Сов. энциклопедия, 1979. С. 133—134.

104. **Использование** солнечной энергии при космических исследованиях: Пер. с англ./Под ред. В. А. Баума. М.: Мир, 1964. 415 с.

105. **Каганов И. Л. Элек ронные и ионные преобразователи.** М.—Л.: Гос. энергетическое издательство, 1955. 456 с.

106. **Калачов Б. А.** Физические основы пластической деформации металлов. М.: МФТИ, 1978. 73 с.

107. **Калашников С. Г.** Электричество: Учебное пособие. М.: Наука, 1985. 576 с.

108. **Капица П. Л.** Сверхтекучесть гелия//Успехи физических наук. М., 1967. Т. 93. Вып. 3. С. 481—494.

109. **Катыс Г. П.** Массовые расходомеры. М.—Л.: Энергия, 1965. 88 с.

110. **Каулинг Т.** Магнитная гидродинамика. М.: Атомиздат, 1978. 144 с.

111. **Кауфман У.** Космические рубежи теории относительности. М.: Мир, 1981. 352 с.

112. **Квартин М. И.** Электромеханические и магнитные устройства автоматики. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1979. 352 с.

113. **Квитковская Е. А.** Компрессоры//БСЭ. 3-е изд. М., 1973. Т. 12. С. 595—596.

114. **Кильчевский Н. А.** Курс теоретической механики. М.: Наука, 1977. 479 с.

115. **Киренский Л. В.** Магнетизм. М.: Наука, 1967. 195 с.

116. **Киренский А. В.** Ферромагнетизм и его применение. М.: Учпедгиз, 1957. 103 с.

117. **Киселев П. Г.** Гидравлика: Основы механики жидкости. М.: Энергия, 1980. 360 с.

118. **Китайгородский А. И.** Введение в физику. 4-е изд. М.: Мир, 1981. 589 с.

119. **Клубович В. В., Прохоренко П. П.** Ультразвук в технологии. М.: Знание, 1977. 58 с.

120. **Клявин О. В.** Особенности пластической деформации кристаллических тел при гелиевых температурах//Физические процессы пластической деформации при низких температурах. Киев: Наукова думка, 1974. С. 5—30.

121. **Клявин О. В.** Физика пластичности кристаллов при гелиевых температурах. М.: Наука, 1987. 256 с.

122. **Коваленко А. Д.** Термоупругость. М.: Наука, 1975. 386 с.

123. **Ковка** и штамповка: Справочник: В 4-х т. Т. 4. Листовая штамповка/Под ред. А. Д. Матвеева. М.: Машиностроение, 1987. 544 с.

124. **Ковка** и штамповка: Справочник: В 4-х т. Т. 3. Холодная объемная штамповка/Под ред. Г. А. Навроцкого, 1987. 381 с.

125. **Кокоунина Л. Х.** Основы аэродинамики: Учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1982. 197 с.

126. **Колесников А. Е.** Ультразвуковые измерения. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Изд-во стандартов, 1982. 248 с.

127. **Коненков Ю. К., Ушаков И. А.** Вопросы надежности радиоэлектронной аппаратуры при механических нагрузках. М.: Сов. радио, 1975. 144 с.

128. **Коновалов С. Ф., Никитин Е. А., Селиванова А. М.** Гироскопические системы. Проектирование гироскопических систем. Ч. III. Акселерометры, датчики угловой скорости, интегрирующие гироскопы и гироинтеграторы: Учеб. пособие/Под ред. Д. С. Пельнова. М.: Высшая школа, 1980. 128 с.

129. **Конструкция** и проектирование космических летательных аппаратов/ Н. И. Паничкин, Ю. В. Слепушкин, В. П. Шишкин и др. М.: Машиностроение, 1986. 344 с.

130. **Конюшков Г. В., Копылов Ю. Н.** Диффузионная сварка в электронике. М.: Энергия, 1974. 167 с.

131. **Корлисс И.** Ракетные двигатели для космических полетов: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 489 с.

132. **Корнилов И. И., Белоусов О. К., Качур Е. В.** Никелид титана и другие сплавы с эффектом памяти. М.: Наука, 1977. 180 с.

133. **Космонавтика:** Малая энциклопедия/Под ред. В. П. Глушко. М.: Сов. энциклопедия, 1985. 528 с.

134. **Крагельский И. В.** Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.

135. **Крагельский И. В., Виноградова И. Э.** Коэффициенты трения: Справочное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машгиз, 1962. 220 с.

136. **Крагельский И. В., Михин Н. М.** Узлы трения машин. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.

137. **Крайнев А. Ф.** Словарь-справочник по механизмам. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1987. 560 с.

138. **Кремлевский П. П.** Расходомеры, и счетчики количества: Справочник. 4-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1989. 700 с.

139. **Кресин В. З.** Сверхпроводимость и сверхтекучесть. М.: Наука, 1978. 190 с.

140. **Крупин А. В., Соловьев В. Я. Шефтель Н. И.** Деформация металлов взрывом. М.: Металлургия, 1975. 416 с.

141. **Крылов А. Н.** О некоторых дифференциальных уравнениях математической физики, имеющих приложение в технических вопросах. 3-е изд. Л.: Изд. АН СССР, 1933. 472 с.

142. **Кудрявцев Л. В., Рис В. В.** Холодная объемная штамповка деталей машин и приборов. Л.: ЛДНТП, 1984. 32 с.

143. **Куликовский А. Г., Любимов Г. А.** Магнитная гидродинамика. М.: Госиздат физ.-мат. лит., 1962. 246 с.

144. **Курс** физической химии/Под ред. Я. И. Герасимова: М.: Химия, 1966. 656 с.

145. **Кутателадзе С. С.** Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.

146. **Кухлинг Х.** Справочник по физике: Пер. с нем./Под ред. Е. М. Лейкина. М.: Мир, 1982. 520 с.

147. **К Юпитеру** и Сатурну//Наука и человечество. М.: Знание, 1979. С. 316—318.

148. **Лавриненко В. В.** Пьезоэлектрические двигатели. М.: Энергия, 1980. 110 с.

149. **Ландау Л. Д.** Теория сверхтекучести гелия//Успехи физических наук. 1967. Т. 93. Вып. 3. С. 495—520.

150. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Механика сплошных сред. 2-е изд. М.: Гостехиздат, 1954. 624 с.

151. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Механика: Теоретическая физика. Т. 1. М.: Наука, 1988. 216 с.

152. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Теория поля: Теоретическая физика. Т. 2. М.: Наука, 1988. 512 с.

153. **Ландсберг Г. С.** Оптика. М.: Мир, 1980. Ч. 1. 456 с.

154. **Левинсон Л. Е.** Основы технической механики. М.: Высшая школа, 1966. 360 с.

155. **Леонтович М. Л.** Введение в термодинамику: Статистическая физика. М.: Наука, 1983. 416 с.

156. **Левантовский В. И.** Механика космического полета в элементарном изложении. 3-е изд., доп. и перераб. М.: Наука, 1980. 511 с.

157. **Лемлех И. М.** Высокотемпературный нагрев воздуха в черной металлургии. М.: Металлургия, 1962. 382 с.

158. **Литвинов В. Н., Михин Н. М. Мышкин Н. К.** Физико-химическая механика избирательного переноса при трении. М.: Наука, 1979. 187 с.

159. **Лихтман В. И.** Внутреннее трение//ФЭС. М., 1960. Т. 1. С. 284—286.

160. **Лойцянский Л. Г.** Механика жидкости и газа. 5-е изд. М.: Наука, 1978. 904 с.

161. **Ломанович В. А.** Химотроника. М.: Знание, 1965. 32 с.

162. **Ломанович В. А., Стрижевский И. В.** Химотронные приборы. М.: Энергия, 1968. 32 с.

162. **Магнитные** и магнитно-гидродинамические опоры: Обзор/Под ред. А. И. Бертинова. М.: Энергия, 1968. 192 с.

164. **Магнус К.** Гироскоп: теория и применения. М.: Мир, 1974. 526 с.

165. **Мартин Дж.** Вход в сейсмосферу: Пер. с англ. М.: Мир, 1969. 320 с.

166. **Мартыненко О. Г.** Свободноконвективный теплообмен: Справочник. М.: Наука и техника, 1982. 400 с.

167. **Матаушек И.** Ультразвуковая техника: Пер. с нем. М.: Гос. Науч. тех. изд-во лит. по черной и цветной металлургии, 1962. 511 с.

168. **Матвеев А. Н.** Молекулярная физика. М.: Высшая школа, 1987. 360 с.

169. **Мерин Б. В.** Электрогидравлическая обработка машиностроительных изделий. Л.: Машиностроение, 1985. 119 с.

170. **Минеев В. П.** Сверхтекучий гелий-3. М.: Знание, 1984. 63 с.

171. **Михайлова М. М.** Магнитомягкие ферриты для РЭП: Справочник. М.: Радио и связь, 1983. 198 с.

172. **Михеев М. А., Михеева И. М.** Основы теплоотдачи. М.: Энергия, 1973. 320 с.

173. **Мицкевич А. А.** Трение//Ультразвук: Маленькая энциклопедия/Гл. ред. И. П. Голямина. М.: Сов. энциклопедия, 1979. С. 346—347.

174. **Моззинский А. А.** Технология сборки неподвижных соединений. М.—С.: Гос. науч.-тех. изд-во машиностроительной литературы, 1962. 62 с.

175. **Морозов А. И.** Пьезоэлектрические преобразователи для радиоэлектронных устройств. М.: Радио и связь, 1981. 184 с.

176. **Морс Ф.** Теплофизика: Пер. с англ. М.: Наука, 1968. 416 с.

177. **Мэзон У.** Пьезоэлектрические кристаллы и их применение в ультраакустике: Пер. с англ./Под ред. А. В. Шубникова, С. Н. Ржевкина, М.: Изд-во иностр. лит., 1952. 447 с.

178. **Наугольных К. А.** Давление звукового излучения//Ультразвук: Маленькая энциклопедия/Гл. ред. И. П. Голямина. М.: Сов. энциклопедия, 1979. С. 99—100.

179. **Наугольных К. А.** Кавитация// Ультразвук: Маленькая энциклопедия/ Гл. ред. И. П. Голямина. М.: Сов. энциклопедия, 1979. С. 156—161.

180. **Неминский М. Л.** Применение эжекторов в гидротехнических сооружениях. М.: Энергоиздат, 1985. 95 с.

181. **Новиков И. Д., Фролов В. П.** Физика черных дыр. М.: Наука, 1986. 328 с.

182. **Обработка** металлов давлением/ Под ред. И. М. Павлова. М.: Гос. науч.-тех. изд-во лит. по черной и цветной металлургии, 1955. 483 с.

183. **Окунь Л. Б.** Понятие массы: (Масса, энергия, относительность)//Успехи физических наук. 1989. Т. 158 (вып. 3). С. 511—530.

184. **Основы** теории колебаний/ В. В. Мигулин, В. И. Медведев, Е. Р. Мустель, В. Н. Порыгин; Под ред. В. В. Мигулина. М.: Наука, 1978. 392 с.

185. **Основы** теплопередачи в авиационно-космической технике. М.: Наука, 1975. 349 с.

186. **Охрименко Я. М., Смирнов О. М.** Формовка полых изделий и листа в состоянии сверхпластичности. М.: Машиностроение, 1976. 38 с.

187. **Павлов В. И.** Механика: Молекулярная физика. М.: Изд. технико-теоретич. лит., 1955. 355 с.

188. **Пажи Д. Г., Галусов В. С.** Распылители жидкостей. М.: Химия, 1979. 214 с.

189. **Патруков А. Г.** Использование криогенных температур. М.: Знание, 1975. 62 с.

190. **Пашинин П. П., Распопов С. Ф., Суходольский А. Т.** Лазерная обработка и резка прозрачных материалов: Квантовая электроника, 1987. Т. 14. № 4. С. 869—870.

191. **Пенцак И. Н.** Теория полета и конструкция баллистических ракет. М.: Машиностроение, 1974. 344 с.

192. **Первые** люди на Луне//Наука и жизнь. 1989. № 9. С. 95—97.

193. **Плазменные** ускорители/Под ред. Л. А. Арцимовича. М.: Машиностроение, 1973. 183 с.

194. **Подкуйко В. П.** Низкотемпературная скачкообразная деформация в монокристаллах сплавов алюминий—магний//Физика металлов и металловедение. 1975. № 6. С. 1273—1281.

195. **Подшивалов С. А., Иванов Э. И., Муратов А. И.** Энергетические установки космических аппаратов. М.: Энергоиздат, 1981. 224 с.

196. **Покровский Г. И.** Взрыв. М.: Недра, 1980. 192 с.

197. **Покровский Г. И., Федоров И. С., Докучаев М. М.** Применение направленного взрыва в гидротехническом строительстве. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Госстройиздат, 1963. 223 с.

198. **Политехнический** словарь/Гл. ред. акад. А. Ю. Ишлинский. 2-е изд. М.: Сов. энциклопедия, 1980. 656 с.

199. **Половин Р. В., Демуцкий В. П.** Основы магнитной гидродинамики. М.: Энергоатомиздат, 1987. 208 с.

200. **Половинкин А. И., Соболев А. Н.** Закономерности типа «физические эффекты» и их использование в автоматизированном конструировании//Машинные методы обнаружения закономерностей: Материалы Всесоюзного симпозиума. Новосибирск: СО АН СССР, 1976. С. 135—145.

201. **Полякова А. Л.** Физические принципы работы полупроводниковых датчиков механических величин/Акустический журнал. 1972. Т. 18. Вып. 1. С. 1.

202. **Пономарев С. Д., Андреева Л. Е.** Расчет упругих элементов машин и приборов. М.: Машиностроение, 1980. 326 с.

203. **Постников В. С.** Внутреннее трение в металлах. 2-е изд. М.: Металлургия, 1974. 352 с.

204. **Прандтль Л.** Гидроаэромеханика: Пер. с нем./Под ред. Г. А. Вольперта. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 575 с.

205. **Применение** ультразвука в металлургии: Науч. тр./МИС и С. М.: Металлургия, 1977. № 90. С. 128.

206. **Простяков А. А.** Индукционные нагревательные установки. М.: Энергия, 1970. 120 с.

207. **Прохоренко П. П., Дежкунов Н. В., Коновалов Г. Е.** Ультра-

звуковой капиллярный эффект. Минск: Наука и техника, 1981. 136 с.

208. **Прохоренко П. П., Пугачев С. И., Семенова Н. Г.** Ультразвуковая металлизация материалов. Минск: Наука и техника, 1987. 270 с.

209. **Раймпель Й.** Шасси автомобиля: Элементы подвески: Пер. с нем. А. Л. Карпухина. М.: Машиностроение, 1987. 288 с.

210. **Райнхарт Дж. С., Пирсон Дж.** Взрывная обработка металлов: Пер. с англ. М.: Мир, 1966. 389 с.

211. **Распопов С. Ф., Суходольский А. Т.** О перемещении тел по опоре лазерным лучом//ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 9. С. 1833—1834.

212. **Распопов С. Ф., Суходольский А. Т.** Самоорганизация теплового цикла при термокавитации в процессе непрерывного лазерного нагрева жидкости/ДАН СССР. 1987. Т. 295. № 5. С. 1108—1112.

213. **Реди Дж.** Промышленное применение лазеров: Пер. с англ. М.: Мир, 1981. 638 с.

214. **Рогинский Г. А.** Техника разделения сред. М.: Знание, 1978. 64 с.

215. **Розенберг Г. В.** Садовского эффект//ФЭС. М., 1965. Т. 4. С. 457.

216. **Ройтенберг Я. Н.** Гироскопы. М.: Наука, 1975. 592 с.

217. **Руденко О. В.** Теоретические основы нелинейной акустики. М.: Наука, 1975. 286 с.

218. **Савельев И. В.** Курс общей физики. М.: Наука, 1987. Т. 1. 432 с.

219. **Садовский М. А., Губкин К. Е.** Кумулятивный эффект//БСЭ. 3-е изд. М.: 1973. Т. 13. С. 606—607.

220. **Саттон Д., Шерман А.** Основы технической магнитной газодинамики. М.: Мир, 1966. 483 с.

221. **Сварка** трением: Справочник/ В. К. Лебедев, И. А. Черненко, Р. Михальски и др.; Под общей ред. В. К. Лебедева, И. А. Черненко, В. И. Вилля. Л.: Машиностроение, 1987. 236 с.

222. **Сверхпластическая** формовка конструкционных сплавов: Пер. с англ./Под ред. Пейтона Н., Гамильтона К. М.: Металлургия, 1985. 312 с.

223. **Северденко В. П., Клубович В. В.** Применение ультразвука в промышленности. Минск: Наука и техника, 1967. 264 с.

224. **Северденко В. П., Клубович В. В., Степаненко А. В.** Ультразвук и пластичность. Минск: Наука и техника, 1976. 448 с.

225. **Сивухин Д. В.** Общий курс физики. Механика. М.: Наука, 1979. 519 с.

226. **Сивухин Д. В.** Общий курс физики. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Наука, 1979. 554 с.

227. **Скорчеллетти В. В.** Теоретическая электрохимия. Л.: Химич. лит., 1963. 608 с.

228. **Скундин Г. И., Никитин В. Н.** Шлицевые соединения. М.: Машиностроение, 1981. 128 с.

229. **Смиренской Е. А., Соболев А. Н.** Физический анализ технических систем на этапе поиска идей изобретательских задач//Республ. конф. Методы решения конструкторско-изобретательских задач, 15—16 ноября 1978 г. Тез. докл. Рига, 1978. С. 80—82.

230. **Смирнов О. М.** Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности. М.: Машиностроение, 1979. 184 с.

231. **Справочник.** Космонавтика/Под ред. Н. Я. Кондратьева. М.: Военное изд-во Министерства обороны СССР, 1966. 325 с.

232. **Соболев А. Н.** Автоматизация синтеза технических решений: Учеб. пособие. Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т, 1983. 125 с.

233. **Соболев А. Н.** Автоматизация синтеза технических решений чувствительных элементов оборудования гибких производственных систем//Автоматизированное проектирование в технологической подготовке производства: Межвуз. сб. Устинов: Устиновский механический институт, 1986. С. 40—48.

234. **Соболев А. Н.** Об одной модели физических эффектов и ее практической реализации в автоматизированном проектировании//Математическое моделирование и программное обеспечение в САПР: Межвуз. сб. Горький: Горьк. гос. ун-т, 1984. С. 109—118.

235. **Соболев В. В.** Курс теоретической астрофизики. М.: Наука, 1985. 504 с.

236. **Современная** кристаллография. В 4-х т. Т. 4. Физические свойства кристаллов/Л. А. Шувалов, А. А. Урусовская, И. С. Желудев и др. М.: Наука, 1981. 496 с.

237. **Соколов Е. Я., Зингер Н. М.** Струйные аппараты. М. Л.: Госэнергоиздат, 1960. 208 с.

238. **Спроул Р.** Современная физика: Пер. с англ. М.: Наука, 1974. 591 с.

239. **Стрижевский И. В., Дмитриев В. И., Финкельштейн Э. Б.** Хемотроника. М.: Наука, 1974. 190 с.

240. **Сыркин Л. Н.** Дельта Е-эффект//Ультразвук: Маленькая энциклопедия/Гл. ред. И. П. Голямина. М.: Сов. энциклопедия, 1979. С. 104—105.

241. **Таблицы** физических величин: Справочник/Под ред. акад. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.

242. **Тарг С. М.** Гироскоп//БСЭ. М.: 1971. Т. 6. С. 557—558.

243. **Теория** пластических деформаций металлов/Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров и др.; Под ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. М.: Машиностроение, 1983. 598 с.

244. **Терегулов И. Г.** Сопротивление материалов и основы теории упругости и прочности. М.: Высш. шк., 1984. 472 с.

245. **Термопрочность** деталей машин/ Под ред. И. А. Биргера и Б. Ф. Шорра. М.: Машиностроение, 1975. 455 с.

246. **Термоупругий** эффект//БСЭ. М.: 1972. Т. 25. С. 434.

247. **Тимошенко В. А.** Листовая и объемная холодная штамповка. Кишинев, 1978. 51 с.

248. **Тихонов А. С.** Эффект сверхпластичности металлов и сплавов. М.: Наука, 1978. 141 с.

249. **Трение,** изнашивание, смазка: Справочник. М.: Машиностроение, 1978. 400 с.

250. **Турбулентность** Пер. с англ./ Под ред. А. С. Гиневского. М.: Машиностроение, 1982. 434 с.

251. **Турута Н. У., Лучко И. А., Поплавский В. А.** Взрыв и его мирные профессии. Киев: Наук. думка, 1982, 174 с.

252. **Угарев В. А.** Специальная теория относительности. 2-е изд. М.: Наука, 1977. 383 с.

253. **Улащик В. С.** Теория и практика лекарственного электрофореза. М.: Наука, 1976. 198 с.

254. **Ультразвук** Маленькая энциклопедия, 1979. 400 с.

255. **Ультразвуковая** технология/Под ред. Б. А. Аграната. М.: Металлургия, 1974. 503 с.

256. **Ультразвуковые** преобразователи: Пер. с англ./Под ред. И. П. Голяминой. М.: Мир, 1972. 424 с.

257. **Ультразвуковое** резание/ Л. Д. Розенберг, В. Ф. Казанцев, Л. О. Макаров, Д. Ф. Яхимович. М.: Изд-во АН СССР. 1962. 251 с.

258. **Успенский В. А., Кузнецов Ю. М.** Струйные вакуумные насосы. М.: Машиностроение. 1973. 145 с.

259. **Фаворский О. Н., Фишгойт В. В., Янтовский Е. И.** Основы теории космических электрореактивных двигательных установок. М.: Высш. шк. 1974. 486 с.

260. **Фастовский В. Г.** Криогенная техника. М.: Наука, 1974. 214 с.

261. **Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.** Фейнмановские лекции по физике. Т. 3, 4. Пер. с англ./Под ред. Я. А. Смородинского. М.: Мир, 1977. 496 с.

262. **Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.** Фейнмановские лекции по физике. Т. 5: Пер. с англ./Под ред. Я. А. Смородинского. М.: Мир, 1977. 300 с.

263. **Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.** Фейнмановские лекции по физике. Т. 6: Пер. с англ./Под ред. Я. А. Смородинского. М.: Мир, 1977. 347 с.

264. **Феоктистов Л. Г.** Электрокинетические явления//ФЭС. М., 1966. Т. 5. С. 458.

265. **Фертрет М.** Основы космонавтики: Пер. с англ. А. Н. Рубашова. М.: Просвещение, 1969. 301 с.

266. **Физика** микромира: Маленькая энциклопедия/Гл. ред. Ширков Д. В. М.: Сов. энциклопедия, 1980. 527 с.

267. **Физическая** акустика. Т. 1. Ч. А.: Пер. с англ./Под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1966. 592 с.

268. **Физическая** энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия, 1988. 873 с.

269. **Физический** энциклопедический словарь/Гл. ред. В. А. Введенский, Б. М. Вул. М.: Сов. энциклопедия, 1963. Т. 3. 928 с.

270. **Физический** энциклопедический словарь/Под ред. А. М. Прохорова. М.: Сов. энциклопедия, 1983. 928 с.

271. **Франк И. М.** Эйнштейн и оптика//Успехи физических наук. 1979. Т. 129. Вып. 4. С. 685—703.

272. **Франк-Каменецкий Д. А.** Диффузия//Физический энциклопедический словарь/Гл. ред. А. М. Прохоров. М.: Сов. энциклопедия, 1983. С. 174—175.

273. **Франкфурт У. И., Френк А. М.** Оптика движущихся тел. М.: Наука, 1972. 210 с.

274. **Фридман Я. Б.** Механические свойства металлов. В г-х ч. Ч. 1. Де-

формация и разрушение. М.: Машиностроение, 1974. 472 с.

275. **Фриш С. Э.** Современная оптика. М.: Знание, 1968. 64 с.

276. **Хавкин Ю. И.** Центробежные форсунки. Л.: Машиностроение, 1976. 168 с.

277. **Хайкин С. Э.** Силы инерции и невесомость. М.: Наука, 1967. 312 с.

278. **Хайкин С. Э.** Физические основы механики. 2-е изд. М.: Наука, 1971. 518 с.

279. **Халатников И. М.** Квантовые жидкости. М.: Знание, 1965. 15 с.

280. **Хачин В. Н.** Память формы. М.: Знание, 1984. 64 с.

281. **Химический** энциклопедический словарь/Гл. ред. И. Д. Кнунянц. М.: Сов. энциклопедия, 1983. 792 с.

282. **Хоникомб Р.** Пластическая деформация металлов. М.: Мир, 1972. 408 с.

283. **Чандрасекар С.** Стохастические проблемы в физике и астрономии. М.: Иностр. лит., 1947. 168 с.

284. **Чугаев Р. Р.** Гидравлика. 4-е изд. Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд., 1982. 672 с.

285. **Шаврин О. И.** Технология и оборудование термомеханической обработки деталей машин. М.: Машиностроение, 1983. 176 с.

286. **Шапиро С. А., Тьюколски С. А.** Черные дыры, белые карлики и нейтронные звезды. Ч. 2. М.: Мир, 1985. С. 257—656.

287. **Шаров В. С.** Электромагнитные индукторные генераторы. М.: Госэнергоиздат, 1961. 144 с.

288. **Шеванин Ю. Ф., Шайкевич В. С.** Обработка металлов давлением. М.: Металлургия, 1972. 248 с.

289. **Шишков А. А., Силин Б. М.** Высотные испытания ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1985. 208 с.

290. **Школьник Л. М., Коваленко Ю. Е., Мартынов Н. И.** и др. Полые оси и валы. М.: Машиностроение, 1968. 184 с.

291. **Штулингер Э.** Ионные двигатели для космических полетов. М.: Воениздат, 1966. 341 с.

292. **Щелкин К. И.** Детонация. М.: Знание, 1968. 32 с.

293. **Эйнштейн А., Смолуховский И.** Броуновское движение. М.: ОНТИ. Гл. ред. общетехнич. лит., 1936. 607 с.

294. **Электрические** измерения неэлектрических величин/Под ред. П. В. Новицкого. Л.: Энергия, 1975. 576 с.

295. **Элементарный** учебник физики/Под ред. Г. С. Ландсберга. М.: Наука, 1966. 520 с.

296. **Эскин Г. И.** Звукокапиллярный эффект//Ультразвук: Маленькая энциклопедия/Гл. ред. И. П. Голямина. М.: Сов. энциклопедия, 1979. С. 140—141.

297. **Эффект** памяти формы в сплавах: Пер. с англ. М.: Металлургия, 1979. 472 с.

298. **Юткин Л. А.** Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, 1986. 253 с.

299. **Якоб М.** Вопросы теплопередачи/Под ред. В. П. Мотулевича. М.: Изд-во иностр. лит., 1960. 516 с.

300. **Яковлев И. А.** Джоуля—Томсона эффект//БСЭ. М., 1975. Т. 8. С. 212—213.



Стекломикрошарики

Стекломикрошарики предназначены для струйного упрочнения тонкостенных, ажурных деталей и деталей, имеющих малые габариты и тонкие кромки.

Высокочастотная установка позволяет изготавливать 2 кг/час стекломикрошариков диаметром 20 . . . 300 мкм из кварца, электрокорунда, двуокиси циркония со степенью оплавления до 98%.

Долговечность стекломикрошариков при использовании их при струйном упрочнении превышает 300 часов.

Стекломикрошарики отличаются высокой прочностью и идеальной сферичностью.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ:

Обработка стекломикрошариками обеспечивает:

— химическую чистоту поверхности под покрытия и по покрытиям;

— повышение выносливости малогабаритных деталей с малоразмерными конструктивными концентраторами напряжений на 20 . . . 50%;

— обеспечение низкой шероховатости поверхности.

ПРЕДЛАГАЕМ:

Изготовление и поставку стекломикрошариков по договору.

Разработчик:

443026, г. Самара, КНПО «ТРУД».

Дробеметная установка УДМ-2

Установка предназначена для упрочнения микрошариками деталей с малыми радиусами переходов, галтелями, острыми кромками.

Техническая характеристика

Частота вращения дробомета, мин$^{-1}$	2800—3600
Частота вращения детали, мин$^{-1}$	18
Число одновременно обрабатываемых деталей	9—15
Время обработки, мин	3—12
Гнбаритные размеры деталей, мм	350×75×75
Габаритные размеры установки, мм	2000×1150×850

Рабочая среда — микрошарики из стали ШХ-15 диаметром 100—300 мкм.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ:

— повышение сопротивления усталости деталей на 15 — 50%;

— повышение долговечности деталей в 10 — 25 раз;

— повышение производительности упрочнения в 2—4 раза благодаря созданию многоместных установок, автоматизации процесса и сокращению времени эффективного наклепа;

— повышение поверхностной твердости на 30—50%.

ПРЕДЛАГАЕМ:

— упрочнение деталей другим организациям по договору;

— передачу техдокументации, инструкций, проектов установок;

— проектирование и изготовление установок по договору применительно к номенклатуре заказчика.

Разработчик:
443026, г. Самара, КНПО «ТРУД»

ВИБРАЦИОННО-ТОРОВЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ШЛИФОВАНИЯ И УДАЛЕНИЯ ЗАУСЕНЦЕВ

Вибрационно-торовые установки предназначены для удаления заусенцев, притупления острых кромок после штамповки и механической обработки, очистки деталей после литья, термообработки, покраски для шлифования и полирования поверхностей в среде с различными наполнителями.

Технические характеристики

	ТУБ-30	ВТУБ-100
Емкость контейнера, л	30	100
Допускаемая загрузка, л	20	60
Тип вибратора	Центробежный	
Частота колебаний, Гц	24	24
Амплитуда колебаний, мм	4—5	4—5
Мощность электродвигателя, кВт	2,2	4
Система смачивания гранул	Циркулярная	
Уровень шума, дБ	80	80
Масса установки, кг	520	1150
Габаритные размеры установки, м	0,7×0,85×1,1	1,5×1,2×2,0

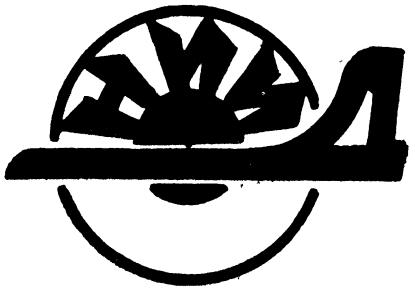
ЭФФЕКТИВНОСТЬ:

— снижение трудоемкости слесарно-доводочных работ в 3—4 раза;
— возможность многостаночного обслуживания;
— механизация ручного труда;
— снижение шероховатости на 1—2 класса.

ПРЕДЛАГАЕМ:

— техническую документацию и авторское сопровождение внедрения;
— изготовление установок по договору.

Разработчик:
443026, г. Самара, КНПО «ТРУД»



НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ОТДЕЛ НИИД ПРЕДЛАГАЕТ

Руководителям
машиностроительных предприятий и организаций!

Конструкторские разработки прогрессивного режущего инструмента, защищенного авторскими свидетельствами и прошедшего промышленные испытания.

Торцовые фрезы с механическим креплением многогранных режущих пластинок диаметром 40—250 мм. Фрезы обеспечивают увеличение производительности труда в 3 раза и сокращение материалов на их изготовление.

Фрезы отрезные, с новой формой режущих зубьев, диаметром 60—250 мм, толщиной 3—8 мм. Фрезы обеспечивают увеличение стойкости в 2,5 раза при работе на повышенных в 3 раза подачах на зуб.

Резцы отрезные, канавочные и резьбовые с механическим креплением режущих элементов. Резцы обеспечивают в 10 раз и более снижение расхода материалов и повышают производительность процесса обработки в 1,5 раза.

Развертки двухзубые из быстрорежущих сталей диаметром от 10 до 80 мм. Долговечность разверток в 5—7 раз превышает долговечность стандартных, а для их изготовления требуется в 2—4 раза меньше быстрорежущих сталей. Достигается точность по Н6, шероховатость менее 0,16 мкм.

Инструмент концевой биметаллический диаметром до 8 мм (сверла, фрезы, развертки и др.). Инструмент обеспечивает снижение расхода быстрорежущей стали до 70% и снижение трудоемкости изготовления в 3 раза, стойкость инструмента в 1,5—1,8 раза выше стандартных.

Клеесборные конструкции инструментов (метчики, протяжки, фрезы и др.). Инструмент обеспечивает уменьшение расхода быстрорежущих сталей на 50—60%. Стойкость инструмента увеличивается в 2,2 раза.

Все работы выполняются на договорных условиях.
НАШ АДРЕС: 248633, г. Калуга, ул. Московская, д. 247. НИО НИИД.
ТЕЛЕФОН: 2-72-69 или 6-34-48.

НПО „ВНИИМ им. Д. И. Менделеева“

Обеспечение высокой точности измерений позволяет как отраслям промышленности в целом, так и отдельным предприятиям занять лидирующее положение в условиях жесткой конкуренции на мировом рынке.

НПО «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», являясь главным центром обеспечения единства измерений в СССР, создает и активно использует в интересах народного хозяйства государственные эталоны единиц физических величин, определяющие уровень всех измерений в стране.

НПО «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» выполняет научные исследования и разработки с целью создания новых и совершенствования имеющихся первичных эталонов и прецизионных средств измерений, контроля и испытаний, улучшения их метрологических и эксплуатационных характеристик в следующих областях:

измерение ионизирующих излучений;
электромагнитные измерения;
механические измерения;
температурные и теплофизические измерения;
физико-химические измерения;
гидрофизические измерения;

Благодаря высокому научно-техническому уровню продукция объединения пользуется спросом на мировом рынке и поставляется по контрактам.

НПО «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» готово заключить договора на разработку новых прецизионных средств измерений, гарантируя их сертификацию и аттестацию на Государственных эталонах единиц физических величин.

Обязательным условием ввоза в СССР средств измерений является рассмотрение этого вопроса метрологическим институтом.

Государственный испытательный центр средств измерений при ведущем метрологическом институте страны предлагает совместным предприятиям комплекс услуг, в том числе:

выявление потребностей и возможных покупателей в СССР изготовляемых Вами средств измерений;

проведение сертификационных испытаний средств измерений;

метрологическое обеспечение сертификации технологий и продукции различного назначения;

подготовку заключений таможенным службам СССР о возможности ввоза в страну средств измерений;

разработку методик поверки ввозимых в страну средств измерений с использованием отечественных эталонов;

сервисное обслуживание эксплуатируемых в СССР средств измерений.

Государственный испытательный центр средств измерений располагает уникальной эталонной базой и высококвалифицированными специалистами в области линейно-угловых измерений, измерений массы, силы, параметров движения, электрических, магнитных, физико-химических величин, температуры, средств измерений ионизирующих излучений, а также специального оборудования для испытаний средств измерений на внешние воздействующие факторы.

Адрес:

198005, Ленинград,
Московский пр. 19

Телефон: 292-50-03
Телекс: 122113, Палата;
121486 IMMSU
Телефакс: /812/ 113 01 14

реклама

ЦНИИТОЧМАШ

предлагает:

— научно-технические консультации;
— прочностное проектирование;
— расчеты динамики, устойчивости и напряженно-деформированного состояния;
— прикладное программное обеспечение для ЕС ЭВМ и ПЭ ЭВМ;
— экспериментальные исследования и измерение параметров кинематики, динамики, устойчивости и напряженно-деформированного состояния высоконагруженных сложных пространственных конструкций и механизмов;
— техническую документацию на программные и измерительные средства;
— отдельные виды приборов и датчиков.

ОБРАЩАТЬСЯ:

142080, Московская обл., Климовск, ул. Заводская, 2, ЦНИИТОЧМАШ. Тел. 546-61-97 (в Москве).

РАЗРАБОТКА

составов композиционных древесных материалов, конструкций изделий из них, проектирование пресс-форм, создание технологий и производств

Вы имеете отходы древесины?

Они могут дать прибыль Вашему предприятию, ведь в США 1 м³ опилок от лесопиления стоит 30 долларов!!!

НИИ строительных материалов (НИИ СМ) готов оказать Вам помощь в рациональном использовании отходов. Наши специалисты могут выполнить для Вас следующие работы:

1. ОПРЕДЕЛИТЬ ПАРАМЕТРЫ Ваших отходов с помощью системы машин и приборов «Аргус».
2. По этим параметрам РАССЧИТАТЬ ЭКОНОМИЧЕСКИ НАИБОЛЕЕ ВЫГОДНОЕ направление использования отходов.
3. СКОНСТРУИРОВАТЬ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ЧИСТЫЕ ПЛИТКИ ИЗ ДРЕВЕСНЫХ ЧАСТИЦ БЕЗ СВЯЗУЮЩИХ (ТУ 21-38-03—90) и пресс-формы для их прессования.
4. РАЗРАБОТАТЬ ПРОЕКТ ПРОИЗВОДСТВА плиток без связующих.
5. СПРОЕКТИРОВАТЬ НЕСТАНДАРТИЗИРОВАННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ для производства плиток без связующих.
7. ОСУЩЕСТВИТЬ ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ЛИНИИ производства плиток без связующих.

Наш адрес:
634003, Томск, Соляная пл. 2, НИИ СМ при ТИСИ
Телефоны:
75-29-01, 75-13-61, 75-18-74.



КОМПОЗИТ

НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ИЗ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ:

- детали насосов (крыльчатки, подшипники) для перекачки агрессивных жидкостей при повышенных температурах
- трубопроводы и детали теплообменников для агрессивных жидкостей
- тепловые экраны
- тормозные диски, подшипники

СВОЙСТВА

Плотность, кг/м^3 . . . . . $1{,}95 \cdot 10^3$
Прочность, МПа, при растяжении . . . . $30 \div 100$
Прочность, МПа, при сжатии . . . . . $100 \div 200$
Теплопроводность, Вт/мК . . . . . $1 \div 20$
Коэффициент линейного расширения 1/°С . . . . . $2 \cdot 10^{-6}$
Максимальные габаритные размеры различных заготовок, мм . . . . . $1000 \times 1000 \times 1000$

ВСЕ РАБОТЫ ВЫПОЛНЯЮТСЯ НА ДОГОВОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Наш адрес:

141070, Калининград, Московской области, НПО «Композит».

Телефон: 516-81-72



КОМПОЗИТ

УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

ПРИМЕНЯЮТСЯ

для вакуумных печей с инертной атмосферой до температур 3500 К преимущественно в технологических и исследовательских установках, линиях, устройствах на производстве и в лабораторных условиях.

СВОЙСТВА

Плотность, кг/м^3 . . . . . $(0{,}2 \div 1{,}9) \cdot 10^3$
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м $(1 \div 200) \cdot 10^6$
Коэффициент теплопроводности, Вт/мК . . . . . $0{,}1 \div 20$
Прочность при растяжении, МПа . . . $30 \div 100$
Прочность при сжатии, МПа . . . . . $100 \div 200$
Прочность при изгибе, МПа . . . . . $50 \div 80$

ВСЕ РАБОТЫ ВЫПОЛНЯЮТСЯ НА ДОГОВОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Наш адрес:

141070, Калининград, Московской области, НПО «Композит»

Телефон: 516-81-72

Творческое объединение „КОМПОЗИТ“

(«Soviet Composite Software»)

предлагает программные комплексы для персональных компьютеров типа IBM PC в области механики композитных материалов и конструкций из них.

STRAN — Система анализа прочности и деформативности многослойных гибридных композитов.

GeCAD — Универсальная система оптимального проектирования многослойных пакетов композиционных материалов.

ASSA-PC — Автоматизированная конечно-элементная система анализа нелинейного напряженно-деформированного состояния многослойных анизотропных разветвленных оболочек вращения с произвольной формой меридиана.

BARD — Система расчета и оптимального проектирования многослойных гибридных композитных стержней.

TRELA — Комплекс программ расчета и оптимизации цилиндрических трехслойных оболочек с многослойными композитными обшивками и легким (сотовым) заполнителем при нескольких случаях термосилового нагружения.

Наши программы —

ключ к реальному освоению инженером современного уровня знаний в области механики композитов. Их общие черты:

— широкая экспериментальная проверка и тщательное тестирование;
— ввод исходных данных и представление результатов с использованием современной цветной компьютерной графики;
— наличие встроенных банков данных о композитных материалах.

По Вашему запросу

могут быть высланы как общий каталог имеющихся программ, так и подробная информация по каждой из них.

Наш адрес:

129329, Москва, ул. Кольская, 13,
НПО «Союз», ТО «Композит»

Телефон: 571-05-16