

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72
М99

**Одобрено Научно-редакционным советом корпорации
«Российский учебник» под председательством академиков
Российской академии наук В. А. Тишкова и В. А. Черешнева**

Методический аппарат учебника разработан
О. А. Крысановой, Н. В. Ромашкиной

Мякишев, Г. Я.

М99 Физика : Молекулярная физика. Термодинамика. Углублённый уровень : 10 класс : учебник / Г. Я. Мякишев, А. З. Сияков. — 6-е изд., стереотип. — М. : Дрофа, 2018. — 350, [2] с. : ил.

ISBN 978-5-358-16933-3

В учебнике на современном уровне изложены фундаментальные вопросы школьной программы, представлены основные технические применения законов физики, рассмотрены методы решения задач, разнообразные вопросы и задания, способствующие эффективному усвоению учебного материала.

Книга адресована учащимся физико-математических классов и школ, слушателям и преподавателям подготовительных отделений вузов, а также читателям, занимающимся самообразованием и готовящимся к поступлению в вуз.

Учебник соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту среднего общего образования.

**УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72**

ISBN 978-5-358-16933-3

© ООО «ДРОФА», 2013
© ООО «ДРОФА», 2016, с изменениями

Глава 1

РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРИРОДЕ ТЕПЛОТЫ

§ 1.1. ФИЗИКА И МЕХАНИКА

Механика составляет фундамент всей физики, но, конечно, не исчерпывает её. Теперь мы приступим к изучению других разделов физики. На очереди теплота.

Что даёт механика Ньютона?

Механика Ньютона, напомним, позволяет определить координаты и скорости тел в любой момент времени по известным значениям этих величин в начальный момент времени. Для решения этой задачи нужно знать силы, действующие между телами, т. е. знать, как зависят силы от расстояний между телами и их скоростей. Таким образом, механика количественно описывает движение: перемещение тел в пространстве с течением времени.

Физика во времена Ньютона

Во время создания классической механики были известны и изучались другие физические явления: тепловые, оптические, электрические и магнитные. Сам Ньютон много внимания уделял исследованию оптических явлений. Результаты этих исследований были им изложены в трактате «Оптика». Гораздо меньше внимания он уделял тепловым явлениям и, по-видимому, не проявлял заметного интереса к электричеству и магнетизму.

Успехи в изучении всех перечисленных выше процессов были несравненно меньшими, чем в изучении механическо-

го движения. Но и в самой механике оставался совершенно неясным вопрос о том, почему, вследствие каких физических причин появляются те или иные силы; какова природа сил. Силы необходимо было определять экспериментально.

Всё это понимал и сам Ньютон. Ему принадлежат замечательные слова: «Я не знаю, чем я кажусь миру; мне же самому кажется, что я был только мальчиком, играющим на берегу моря и развлекающимся тем, что от времени до времени находил более гладкий камушек или более красивую раковину, чем обыкновенно, в то время как великий океан истины лежал предо мной совершенно неразгаданным».

Механическая картина мира

Последовавшие за созданием основных принципов механики успехи в изучении Солнечной системы, движения не только твёрдых, но и жидких и газообразных тел настолько захватили воображение учёных, что они стали склоняться к мысли, что механика Ньютона всесильна.

Всё богатство, всё качественное многообразие мира — это результат различия в движении частиц, составляющих тела. Механика лежит в основе всех процессов в природе. Объяснить какое-либо явление — это свести его в конечном счёте к действию законов механики Ньютона. Такова сущность механической картины мира, сложившейся к середине XIX в.

Считалось, что тепловые явления можно свести к механическому движению частиц — атомов и молекул*, из которых, предположительно, построены все тела Вселенной. Электрические, магнитные и оптические явления — в своей основе это механические явления в гипотетической всепроникающей среде — мировом эфире.

Крах механической картины мира

Применение законов механики к описанию движения атомов и молекул в телах привело к определённым успехам.

Была построена молекулярно-кинетическая теория тепловых явлений или, как говорили в те времена, механическая теория тепла.

Однако при построении этой теории выяснилось, что одни только законы механики не в состоянии объяснить своеобраз-

* От латинского слова *moles* — «масса», с уменьшительным суффиксом *-cula* — «наименьшая частица вещества».

зие всей совокупности тепловых процессов. Для этого необходимы дополнительные гипотезы.

С полной очевидностью ограниченность механической картины мира обнаружилась при развитии теории электромагнитных явлений. Выяснилось, что электромагнитное поле, осуществляющее взаимодействие между электрически заряженными частицами, не подчиняется законам механики Ньютона. Оно описывается своими специфическими законами — уравнениями Максвелла для поля.

В XX в. было установлено, что законы механики Ньютона описывают движение атомов и молекул лишь приближённо. Далеко не все тепловые явления можно понять, допуская применимость законов Ньютона для движения микрочастиц. Была построена новая механика движения микрочастиц — квантовая механика.

Тепловые и электромагнитные явления

После изучения классической механики мы перейдём к знакомству с новыми видами явлений, объяснение которых в рамках одной механики невозможно. Вначале будем рассматривать тепловые явления, а затем электрические и магнитные.

- ?** 1. Назовите фамилию учёного, исследования которого заложили основу классической механики.
2. В чём заключается сущность механической картины мира?
3. Укажите причины краха механической картины мира.
4. Сформулируйте основную задачу механики.

§ 1.2. ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Тепловые явления в окружающем нас мире столь же распространены, как и механические. Это самые значительные, самые заметные после механического движения явления. Они, как правило, связаны с нагреванием или охлаждением тел, с изменением их температуры.

Роль тепловых явлений

Привычный облик нашей планеты существует и может существовать только в довольно узком интервале температур. Если бы температура превысила 100 °С, то на Земле не стало бы рек, морей и океанов, не было бы воды вообще. Вся вода превратилась бы в пар. При понижении температуры на

несколько десятков градусов моря и океаны превратились бы в громадные ледники*.

При смене времён года на средних широтах изменение температуры на 20—30 °С меняет весь облик планеты. С наступлением весны начинается пробуждение природы. Леса одеваются листвой, зеленеют луга. Зимой жизнь растений замирает. Толстый слой снега покрывает землю.

Ещё более узкие интервалы температур необходимы для поддержания жизни теплокровных животных. Температура животных и человека поддерживается внутренними механизмами терморегуляции на строго определённом уровне. Достаточно температуре повыситься на несколько десятых градуса, как мы уже чувствуем себя нездоровыми. Изменение температуры на несколько градусов ведёт к гибели организмов.

Поэтому неудивительно, что тепловые явления привлекали внимание людей с древнейших времён. Умение добывать и поддерживать огонь сделало человека относительно независимым от колебаний температуры окружающей среды. Это было одним из величайших открытий человечества. Роль огня отражена в поэтическом древнегреческом мифе о Прометее. Прометей похитил огонь с Олимпа и передал его людям. За это он был прикован Зевсом к скале и обречён на многолетние мучения.

Свойства тел и температура

Почти все свойства тел зависят от температуры. Так, при нагревании и охлаждении меняются размеры твёрдых тел и объёмы жидкостей. Значительно меняются при нагревании или охлаждении обычные механические свойства тел, например упругость. Кусок резиновой трубки не пострадает, если при комнатной температуре ударить по нему молотком. Но при сильном охлаждении резина становится хрупкой, как стекло, и от лёгкого удара резиновая трубка разбивается на мелкие кусочки. Лишь после нагревания резина вновь обретает прежние свойства.

Кроме механических свойств, при изменении температуры меняются и другие свойства тел: сопротивление электрическому току, магнитные свойства, оптические и пр. Так, если сильно нагреть постоянный магнит, то он перестанет притягивать железные предметы.

* Предполагается, что давление воздуха при этом остаётся равным обычному атмосферному.

Тепловые процессы и строение вещества

Течение тепловых процессов непосредственно связано со строением вещества, его внутренней структурой. Например, тот факт, что нагревание парафина на несколько десятков градусов делает его жидким, а нагревание железного стержня на столько же градусов заметным образом на него не влияет (он только начинает обжигать пальцы), несомненно, связан с тем, что внутреннее строение парафина и железа различно. Поэтому тепловые явления можно использовать для выяснения структуры вещества. И наоборот, определённые представления о строении вещества способны пролить свет на физическую сущность тепловых явлений, дать им глубокое и наглядное истолкование.

Тепловые явления в технике

Очень важно, что открытие законов, которым подчиняются тепловые явления, позволяет с максимальной пользой применять эти явления на практике и в технике. Современные тепловые двигатели, холодильные установки, установки для сжижения газов и многие другие устройства конструируют на основе этих законов.

- ?** 1. Как зависят физические свойства тел от их температуры?
2. Почему протекание тепловых процессов связано со строением вещества и, наоборот, каким образом строение вещества определяет протекание тепловых процессов?
3. Приведите примеры проявления тепловых явлений в быту и технике.

§ 1.3. КРАТКИЙ ОЧЕРК РАЗВИТИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРИРОДЕ ТЕПЛОВЫХ ЯВЛЕНИЙ

Несмотря на видимую простоту и очевидность тепловых явлений, для понимания их сути учёным пришлось напряжённо работать несколько сотен лет. История создания теории тепловых процессов — пример того, каким сложным и подчас противоречивым путём добываются научные истины.

Воззрения древних

Большинство философов древности были склонны рассматривать огонь и связанную с ним теплоту как одну из стихий, которая наряду с землёй, водой и воздухом образует все

тела. Одновременно были сделаны попытки связать теплоту с внутренними движениями в телах, так как было замечено, что при соударении тел или трении их друг о друга они нагреваются.

Зарождение научной теории тепла

Первые успехи на пути построения научной теории тепла относятся к началу XVII в., когда был изобретён термометр и появилась возможность количественного исследования тепловых процессов. Этот прибор, к которому мы все так привыкли, по словам Р. Майера (одного из первооткрывателей закона сохранения энергии), явился «могущественным инструментом в титанической борьбе между истиной и заблуждением». Но о том, что же именно измеряют термометром, единого мнения не было. Вплоть до второй половины XVIII в. отсутствовало ясное разграничение понятий «температура» и «количество теплоты».

Экспериментальные исследования с применением термометра вновь остро поставили вопрос о том, что же такое теплота. Чётко наметились две диаметрально противоположные точки зрения. Согласно так называемой *вещественной теории тепла*, теплоту связывали с особым рода невесомой жидкостью, способной перетекать от одного тела к другому. Эта жидкость была названа *теплородом*. Чем больше теплорода в теле, тем выше температура тела.

Согласно другой точке зрения, теплота — это вид внутреннего движения частиц, составляющих тела. Чем быстрее движутся частицы, тем выше температура тела. В этой теории тепловые явления связывались с атомистическим учением древних философов о строении вещества. Теория первоначально называлась *корпускулярной теорией тепла* (от лат. *corpusculum* — частица). Её придерживались такие выдающиеся учёные, как И. Ньютон, Р. Гук, Р. Бойль, Д. Бернулли и др.

Большой вклад в развитие корпускулярной теории был сделан великим русским учёным М. В. Ломоносовым. Ломоносов рассматривал теплоту как вращательное движение частиц вещества. С помощью своей теории он дал правильное, в общих чертах, объяснение явлений плавления, испарения и теплопроводности. Им был сделан вывод о существовании «наибольшей или последней степени холода», когда движение частиц вещества прекращается. Благодаря работам Ломоносова и его авторитету среди русских учёных было мало сторонников вещественной теории тепла.

Теория теплорода

Несмотря на привлекательность и глубину корпускулярной теории тепла, к середине XVIII в. временную победу одержала теория теплорода. Это произошло после того, как экспериментально было доказано сохранение количества теплоты при теплообмене. Отсюда был сделан вывод о сохранении (неуничтожимости) тепловой жидкости — теплорода. На основе вещественной теории теплоты были введены понятия теплоёмкости тел, удельных теплот парообразования и плавления, построена количественная теория теплопроводности. Многими терминами, введёнными в то время, мы пользуемся и сейчас.

С помощью корпускулярной теории теплоты не удавалось получить столь важные для физики количественные связи между различными величинами, характеризующими тепловые процессы. В частности, эта теория не смогла объяснить, почему теплота сохраняется при теплообмене. В те времена не была ясна связь между механической характеристикой движения частиц — их кинетической энергией и температурой тела. Понятие энергии вообще ещё не было введено в физику. Поэтому на основе корпускулярной теории в XVIII в. не могли быть достигнуты те немалые успехи в развитии количественной теории тепловых явлений, какие были сделаны с помощью простой теории теплорода. Для своего времени теория теплорода была прогрессивной.



Ломоносов Михаил Васильевич (1711—1765) — великий русский учёный-энциклопедист, поэт и общественный деятель, основатель Московского университета, носящего его имя. А. С. Пушкин назвал М. В. Ломоносова «первым русским университетом». М. В. Ломоносову принадлежат выдающиеся труды по физике, химии, горному делу и металлургии. Он развил молекулярно-кинетическую теорию теплоты, в его работах предвосхищены законы сохранения массы и энергии. М. В. Ломоносов создал фундаментальные труды по истории русского народа, он является основоположником современной русской грамматики.

Крах теории теплорода

В конце XVIII в. вещественная теория теплоты начала сталкиваться со всё бóльшими и бóльшими трудностями и к середине XIX в. потерпела полное и окончательное поражение.

Большим числом разнообразных опытов было показано, что сохраняющейся «тепловой жидкости» не существует. Например, при совершении работы силами трения можно получить от двух тел любое количество теплоты; тем большее, чем большее время силы трения совершают работу. В то же время при совершении работы паровой машиной пар охлаждается, и теплота исчезает.

Итак, простая идея о сохранении невесомой жидкости — теплорода оказалась ложной. Но нельзя сказать, что учёные с самого начала стали жертвами грубого, непростительного заблуждения. Сходная мысль о сохранении некой «электрической жидкости», высказанная в начале развития теории электричества, оказалась в общих чертах верной. В неё после открытия дискретного строения электричества и двух знаков электрических зарядов были внесены лишь поправки.

В середине XIX в. опытным путём была доказана эквивалентность механической работы и количества теплоты, переданной телу. Подобно работе, количество теплоты оказалось мерой изменения энергии. Нагревание или охлаждение тела связано не с увеличением или уменьшением в нём количества особой невесомой жидкости, а с увеличением или уменьшением его энергии.

Принцип сохранения теплорода был заменён более общим и глубоким принципом — законом сохранения энергии.

§ 1.4. ТЕРМОДИНАМИКА И МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

Термодинамика

Открытие закона сохранения энергии позволило создать во второй половине XIX в. количественную теорию тепловых процессов — **т е р м о д и н а м и к у**.

Термодинамика возникла при изучении оптимальных условий использования теплоты для совершения работы задолго до того, как молекулярно-кинетическая теория получила всеобщее признание. (Вещество обладает многими

свойствами, которые можно изучать, не углубляясь в строение вещества.)

Термодинамика — это теория тепловых явлений, в которой не учитывается молекулярное строение тел. Так как в этой теории не вскрывается сущность тепловых процессов, то термодинамику называют феноменологической (описательной) теорией тепла.

В термодинамике тепловые явления описываются с помощью величин, регистрируемых приборами, не способными реагировать на воздействие отдельных молекул (термометр, манометр и др.). *Все законы термодинамики относятся к большим телам, число молекул в которых огромно.* Такие тела в физике называют *макроскопическими*. Энергия макроскопического тела во много раз превышает энергию отдельных молекул. Газ в баллоне, вода в стакане, песчинка, камень, стальной стержень, земной шар (рис. 1.1) — всё это примеры макроскопических тел. Наше тело — это тоже макроскопическое тело.

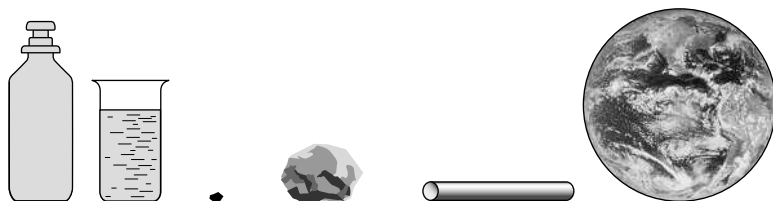


Рис. 1.1

Тепловые процессы связаны с передачей и превращением энергии. Поэтому основные законы термодинамики относятся к поведению энергии. *Первым законом термодинамики является закон сохранения энергии, распространённый на тепловые явления.*

Во втором законе речь идёт о направлении энергетических превращений: утверждается, что теплота не может быть целиком превращена в работу.

Молекулярно-кинетическая теория

Открытие закона сохранения энергии дало мощный импульс развитию корпускулярной теории тепла, получившей название молекулярно-кинетической теории.

В этой теории ставилась задача объяснения всех процессов, происходящих в макроскопических телах, на основе предположения о том, что вещество состоит из атомов и мо-

лекул, движение которых подчиняется законам механики Ньютона.

В конце XIX в. по-прежнему не было прямых экспериментальных доказательств реальности атомов и молекул, хотя многие факты можно было легко объяснить, допустив существование атомов. Учёным, развивавшим молекулярно-кинетическую теорию, пришлось вести длительную борьбу со сторонниками так называемого энергетизма.

Приверженцы энергетизма считали единственной посильной задачей науки описание явлений, доступных непосредственному наблюдению. Попытки привлечения в науку таких неосязаемых объектов, как атомы и молекулы, они полагали недопустимыми. По их мнению, не только получить достоверные сведения о свойствах атомов и молекул, но и доказать экспериментально их существование невозможно. Признавая закон сохранения энергии, эти учёные, по существу, отрывали энергию от её материальных носителей — движущихся атомов и молекул.

Лишь в начале XX в. борьба с энергетизмом завершилась полной победой сторонников молекулярно-кинетической теории. *Была построена последовательная теория поведения больших коллективов атомов и молекул* — статистическая механика (современное название молекулярно-кинетической теории). Справедливость этой теории была доказана многочисленными опытами.

Термодинамика и статистическая механика

После создания статистической механики термодинамика не утратила своего значения. Её общие законы справедливы для всех веществ независимо от их внутреннего строения. С помощью термодинамики сравнительно просто объясняются тепловые явления и выполняются расчёты важных технических устройств, однако при этом многие величины, например теплоёмкости, должны быть определены экспериментально.

Статистическая механика позволяет на основе определённых представлений о строении вещества вычислять теплоёмкости тел и другие величины, которые термодинамика заимствует непосредственно из опыта. Но количественная теория твёрдого и особенно жидкого состояния вещества очень сложна, и не всегда необходимые вычисления могут быть выполнены до конца. В ряде случаев простые расчёты, осно-

ванные на законах термодинамики, оказываются незаменимыми.

В настоящее время в науке и технике с успехом используются оба метода описания тепловых явлений — термодинамический и статистический. Они взаимно дополняют друг друга. Но статистическая механика — более глубокая теория, в которой полностью вскрывается сущность тепловых явлений. Сами законы термодинамики можно обосновать в рамках статистической механики.

- ?** 1. Почему термодинамика является феноменологической теорией тепла?
2. Назовите основные законы термодинамики.
3. Сформулируйте основную задачу молекулярно-кинетической теории.
4. Обоснуйте современное название молекулярно-кинетической теории — статистическая механика.



Напишите эссе «Развитие представлений о природе тепловых явлений».

Глава 2

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Мы начнём с основных положений молекулярно-кинетической теории. Они вам частично известны из предшествующего курса физики. Затем познакомимся с количественной теорией самого простого макроскопического тела — газа.

§ 2.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

*«Если бы в результате какой-либо мировой катастрофы все накопленные научные знания оказались бы уничтоженными и к грядущим поколениям живых существ перешла бы только одна фраза, то какое утверждение, составленное из наименьшего количества слов, принесло бы наибольшую информацию? Я считаю, что это — а т о м н а я г и п о т е з а (можете называть её не гипотезой, а фактом, но это ничего не меняет): **все тела состоят из атомов — маленьких телец, которые находятся в непрерывном движении, притягиваются на небольшом расстоянии, но отталкиваются, если одно из них плотнее прижать к другому.***

В одной этой фразе, как вы убедитесь, содержится невероятное количество информации о мире, стоит лишь приложить к ней немного воображения и чуть-чуть соображения».

Приведённое нами высказывание принадлежит выдающемуся американскому физику Р. Фейнману.

Итак, в основе молекулярно-кинетической теории лежат три утверждения, каждое из которых в настоящее время строго доказано экспериментально: вещество состоит из частиц; эти частицы хаотически движутся; частицы взаимодействуют друг с другом.

Доказательства существования молекул

Предположение о том, что все тела состоят из отдельных частиц и, следовательно, ни одно тело нельзя разделить на сколь угодно малые части, высказывалось Демокритом и другими древнегреческими мыслителями ещё за 2500 лет до нашего времени. Качественное объяснение многих явлений с помощью молекулярной теории было дано в XVIII в. Однако бесспорные доказательства существования молекул и атомов удалось получить только в начале XX в. Дело в том, что атомы очень малы. Они не видны не только простым глазом, но и в обычный оптический микроскоп. Именно поэтому все тела кажутся нам сплошными.

Первое убедительное, хотя и косвенное, доказательство существования атомов и молекул было получено английским химиком Д. Дальтоном (1766—1844). Дальтон объяснил закон постоянных отношений. Согласно этому закону при образовании любых химических соединений массы реагирующих веществ находятся в строго определённых отношениях. Так, например, при образовании воды из водорода и кислорода отношение масс прореагировавших газов водорода и кислорода всегда равно 1 : 8. Этот факт становится понятным лишь в том случае, если допустить, что при образовании мельчайшей частички воды — молекулы — некоторое определённое число атомов водорода соединяется с определённым числом атомов кислорода. Молекула воды состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода. Поэтому отношение масс водорода и кислорода при образовании воды должно быть равно отношению удвоенной массы атома водорода к массе атома кислорода. Это отношение не может измениться ни при каких условиях.

Мы не будем перечислять все известные сейчас доказательства существования атомов и молекул. В этом нет никакой необходимости. Современные приборы позволяют рассматривать отдельные атомы на поверхностях тел и измерять их размеры. Самый совершенный из них, называемый туннельным микроскопом, был создан в середине

80-х гг. XX в. сотрудниками знаменитой компьютерной фирмы IBM (г. Цюрих) Г. Биннингом и Г. Рорером, удостоенными за его изобретение Нобелевской премии.

Туннельный микроскоп

Саму идею туннельного микроскопа понять не очень сложно. Изготавливается чрезвычайно тонкое вольфрамовое остриё-зонд (рис. 2.1), настолько тонкое, что оно заканчивается одним или несколькими атомами. Остриё почти вплотную подводится к поверхности проводящего электрический ток вещества. При этом электронные облака атома на кончике острия и ближайшего к нему атома поверхности начнут перекрываться. Если приложить небольшое (порядка 0,01 В) напряжение к поверхности и острию, то в зазоре остриё—поверхность появится слабый ток — порядка миллиардных долей ампера. Этот ток называется туннельным. (Его появление объясняется с помощью квантового эффекта, называемого туннельным.) Туннельный ток чрезвычайно сильно зависит от расстояния между зондом и поверхностью. При изменении расстояния на $2 \cdot 10^{-8}$ см (примерно на размер атома) сила тока изменяется в тысячи раз.

Если остриё перемещать вдоль поверхности, то сила тока должна меняться в очень широких пределах, увеличиваясь при прохождении зонда над атомом и уменьшаясь до ничтожных значений, когда зонд висит над промежутком между атомами поверхности. Это очень неудобно для регистрирующей ток системы, не говоря уже о том, что остриё может просто зацепиться за неровность недостаточно тщательно отшлифованной поверхности. Чтобы избежать этого, используют следующий приём: специальное устройство перемещает зонд по вертикали таким образом, чтобы протекающий через прибор ток оставался неизменным. Это достигается с помощью устройства обратной связи, которое улавливает изменение силы тока и даёт команду приблизить зонд к поверхности или удалить от неё.



Рис. 2.1

Основная проблема состоит в том, чтобы зонд перемещать контролируемым образом на расстояния в миллиардные доли метра (~ 1 нм). Это достигается с помощью так называемого пьезоэлектрического манипулятора. Некоторые кристаллы, например кварц, и специальные