



В помощь изучающим историю и философию науки

ПОНЯТИЕ ЭНЕРГИИ В ФИЗИКЕ: ИСТОРИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

Д.А. Максимов

С древнейших времен людей интересовали процессы, происходящие в природе. Сначала это были просто наблюдения, постепенное накопление знаний, необходимых для жизнедеятельности и выживания. Так, было замечено, что огонь обжигает, что вода жидкая, что из снега при таянии образуется вода. Люди наблюдали за движением Солнца, Луны, планет и звезд, за сменой суток и времен года. Было собрано огромное множество и других сведений. Параллельно формировались понятия для описания общих явлений и свойств, наблюдаемых многократно разными людьми и в разных местах. Первые теории устройства мира появились еще в древних цивилизациях: Египте, Китае и Греции.

Первыми науками были астрономия и геометрия. Их появление было вызвано практической необходимостью в земледелии. Накапливались знания по оптике и механике. Формировалось само понятие физики как науки о природе. Людей постоянно волновал вопрос о том, откуда возник наш мир и что заставляет его двигаться. Первоначально высказывались идеи, что у каждого движения есть свои причина и цель. Была высказана мысль о том, что для движения нужна некоторая «сила», запас «силы». Начиная с Галилея наука стала давать не только качественное, но и количественное описание физических явлений. В то же время началось интенсивное развитие математики, особенно благодаря работам Декарта, Лейбница и Ньютона. Новый математический аппарат, и в первую очередь исчисление бесконечно малых, стал языком развивающейся физики.

В процессе развития усиливалась конкретизация и повышалась логическая строгость используемых терминов. Например, из существовавшего ранее понятия силы выделилось понятие количества движения, или импульса, и понятие собственно силы – в современной интерпретации. Число областей знания, доступных для изучения, постепенно увеличивалось. Так, к XVIII в. люди занялись систематическим изучением тепловых процессов. В XIX в. в результате большой экспериментальной и теоретической работы была построена теория теплоты. Было сформировано понятие работы. Была замечена связь между тепловыми и механическими процессами. В то же время была создана кинетическая теория теплоты.

Тогда же при изучении электричества и магнетизма была обнаружена связь этих явлений между собой: движение электрических зарядов представляет собой электрический ток, который обладает магнитным действием. В XIX в. Герцем были открыты радиоволны, затем была обнаружена схожесть их поведения со светом. Как и для света, наблюдались их прямолинейное распространение, дифракция и интерференция. Была разработана волновая теория электромагнетизма и понято, что все эти феномены суть проявления единого электромагнитного взаимодействия.

В экспериментах Джоуля также исследовалось тепловое действие электрического тока, и были найдены законы, связывающие тепловыделение с параметрами электрического тока и цепи (силой тока, напряжением и сопротивлением). Был обнаружен и изучался обратный эффект термоэлектричества, когда под действием разности температур в материале возникает разность потенциалов. Нашли также способ преобразования электрической энергии в механическую и обратно – электромотор и генератор. Во многих экспериментах были измерены механические и электрические эквиваленты теплоты, было выяснено, что их величина не зависит от природы взаимодействующих объектов: ни от источника электроэнергии, ни от тепловыделяющего элемента электрической цепи, ни от используемого газа в тепловой машине.

В результате всех этих экспериментов возникла гипотеза о том, что существует некая величина, которая способна переходить из одной формы в другую, но ее полное количество при этом сохраняется. Эта величина первоначально называлась и «живой силой», и просто «силой», а также часто смешивалась с понятием количества движения из механики. В 1849 г. лорд Кельвин предложил для

данной величины использовать термин «энергия», введенный Т. Юнгом еще в 1807 г., окончательно разделив понятие силы и понятие количества движения (импульса). Закон сохранения энергии представляет собой проявление единства всех процессов, протекающих в природе.

Позднее, с развитием теории относительности, понятие энергии было пересмотрено и расширено, было установлено ее единство с массой, понятие которой ввел еще Ньютон. Последовало открытие, что массу, т.е. материю, можно создавать, имея для этого достаточное количество энергии. Таким образом, был создан фундамент для многих современных исследований, например в области физики элементарных частиц, в которых рассматривается взаимодействие относительно легких частиц (электронов, протонов), разогнанных до огромных энергий, таких, что при их столкновении друг с другом становится возможным образование новых частиц, свойства которых и изучаются.

Древние цивилизации

Человек добывал знания об окружающем его мире в суровой борьбе за существование. В этой борьбе обособились от животного мира его далекие предки, развились его руки и интеллект. От случайных и неосознанных применений палок и камней для защиты и добывания пищи он перешел к изготовлению орудий. Сначала это были грубо и примитивно обработанные куски камня, затем – все более совершенные каменные орудия, лук и стрелы, рыболовные снасти, охотничьи ловушки. Величайшим завоеванием человека было получение и использование огня.

В этой занявшей тысячи и тысячи лет эволюции формировалось сознание человека, развивалась речь, накапливались знания и представления о мире, возникли первые антропоморфные объяснения окружающих явлений, остатки которых сохранились и в нашем языке. Как и у первобытного человека, у нас Солнце «ходит», месяц «смотрит» и т.д. Другого способа понять природу, как уподобить ее себе, живому существу, наделить ее чувствами и сознанием, у первобытного человека не было. Из этого источника развились и научные знания, и религиозные представления.

Наряду с этими фантастическими представлениями о природе человек обогащался реальными знаниями о небесных светилах, рас-

тениях и животных, о движении и силах, метеорологических явлениях и т.д. Накопленные знания и практические навыки, передаваемые от поколения к поколению, образовывали первоначальный фон будущей науки.

Древний Египет и Вавилон. С развитием общества и общественного труда накапливались предпосылки для создания устойчивой цивилизации. Решающую роль здесь сыграло возникновение земледелия. Там, где сложились условия для получения стабильных урожаев на одном и том же месте и из года в год, создавались поселения, города, а затем и государства.

Такие условия возникли в Северной Африке в долине Нила, ежегодные разливы которого оставляли на полях плодородный ил, в Междуречье, где уже в IV тыс. до н.э. начали складываться древнейшие рабовладельческие государства, ставшие колыбелью современной науки. Система орошаемого земледелия, добыча металла и его обработка, развитие техники и изготовление орудий создали предпосылки для возникновения сложного общественного организма с развитой экономикой. Общественные потребности привели к появлению письменности (иероглифов в Египте, клинописи в Вавилонии), к возникновению астрономических и математических знаний.

Определение времени начала разлива Нила требовало тщательных астрономических наблюдений. Египтяне разработали календарь, состоявший из 12 месяцев по 30 дней и пяти дополнительных дней в году. Месяц был разделен на три десятидневки, сутки – на 24 часа: 12 дневных и 12 ночных. Поскольку продолжительность дня и ночи менялась со временем года, величина часа была не постоянной и также менялась в зависимости от времени года.

Высокого уровня достигли вавилонская математика и астрономия. Вавилоняне знали теорему Пифагора, вычисляли квадраты и квадратные корни, кубы и кубические корни, умели решать системы уравнений и квадратные уравнения. Им принадлежит также разделение эклиптики на 12 созвездий зодиака.

Следует подчеркнуть, что математика у египтян и вавилонян носила практический характер и выросла из потребностей хозяйственной и строительной практики.

Древняя Греция. Несмотря на огромные достижения Древнего Востока, подлинной родиной современной науки стала Древняя

Греция. Именно здесь возникла теоретическая наука, разрабатывающая научные представления о мире, не сводящиеся к сумме практических рецептов, именно здесь развивался научный метод. Если египетский или вавилонский писец, формулируя правило вычисления, писал: «поступай так», не поясняя, почему надо «поступать так», то греческий ученый требовал доказательства.

В Древней Греции были заложены основы многих современных наук. Этому способствовали работы по математике и астрономии (к примеру, Эратосфен в III в. до н.э. измерил диаметр Земли, а Аристарх Самосский определил расстояние от Земли до Луны), основополагающие открытия Архимеда в механике (статике) и гидростатике, труд Евклида по геометрии «Начала», атомистическая гипотеза Демокрита и многое другое.

Первое объединение и обобщение существовавших к тому моменту научных знаний были сделаны *Аристотелем*. Он собрал обширный экспериментальный и теоретический материал в единую систему, которая была основой научных представлений на протяжении почти 2 тыс. лет.

Аристотель родился в 384 г. до н.э. в Стагире во Фракии. Его отец был наследственным домашним врачом у царя Македонии. В возрасте 18 лет Аристотель приехал в Афины и стал учеником Платона. Он оставался в Академии около 20 лет, вплоть до смерти Платона в 347 г. до н.э., затем в течение некоторого времени путешествовал. В 343 г. до н.э. Аристотель стал воспитателем Александра Македонского, которому тогда было 13 лет.

С 335 до 323 г. до н.э. (в 323 г. до н.э. Александр умер) Аристотель жил в Афинах. В эти 12 лет он основал свою школу и написал большинство своих книг. Сразу после смерти Александра афиняне восстали и обратились против его друзей, включая Аристотеля, который был осужден за неверие, но, в противоположность Сократу, бежал, чтобы уйти от наказания. В следующем году (322 г. до н.э.) он умер.

Название книги Аристотеля, посвященной исследованию природы, – «Физика», стало названием физической науки. Сам Аристотель в начале своей книги определяет цели и задачи этой науки следующим образом: «Так как знание, и [в том числе] научное познание, возникает при всех исследованиях, которые простираются на начала, причины и элементы, путем их уяснения (ведь мы тогда уверены, что знаем ту или иную вещь, когда уясняем ее первые

причины, первые начала и разлагаем ее вплоть до элементов), то ясно, что и в науке о природе надо попытаться определить прежде всего то, что относится к началам». Из этого высказывания Аристотеля вытекает, что наука о природе должна исследовать «первые причины» природы, ее «первые начала» и «элементы». Говоря современным языком, физика должна изучать основные закономерности («первые причины») и принципы («первые начала») природы и ее элементарные частицы («элементы»). Аристотель также строит свое учение о движении, которое будет господствовать в физике около 1,5 тыс. лет.

В учении Аристотеля движение понимается в более широком смысле, чем это делалось впоследствии во времена Галилея. Под движением Аристотель подразумевает любое количественное или качественное изменение, благодаря которому явление реализуется. Он признает четыре причины (принципа) движения: материю, или пассивную возможность становления; форму (сущность, суть бытия), действительность того, что в материи дано лишь как возможность; начало движения; цель. Вся природа рассматривается у Аристотеля в виде последовательных переходов от материи к форме и обратно. В материи Аристотель видит лишь пассивное начало, а всю активность приписывает форме, к которой сводит начало движения и цель.

Движение, или изменение, проявляющееся во всяком переходе от возможности (формы) к действительности (материи) бывает четырех родов: пространственное (перемена места), качественное (превращение), количественное (увеличение и уменьшение) и субстанциональное (возникновение и уничтожение). Абсолютного субстанционального движения, по Аристотелю, не существует, а относительное движение сводится к первым трем. Имея прямое отношение к механическим, химическим и органическим изменениям, эти три рода движения представляют собой градацию от высшего к низшему, причем последнее обуславливается первым: пространственное, например, является основным для прочих, но не в том смысле, чтобы все в мире объяснялось именно этим движением и механическими причинами, а только как необходимое условие. Природа, по убеждению Аристотеля, ничего не производит без цели, стремится всегда к лучшему, о чем свидетельствует наблюдаемая в ней целесообразность.

Движение различается у Аристотеля по форме как круговое и прямолинейное. Круговое движение, само в себе замкнутое, неиз-

ненное, непрерывное и равномерное, является наиболее совершенным и господствует в мире «небесном» (в сфере планет и неподвижных звезд). Прямолинейное движение обладает противоположными свойствами и имеет место в «подлунном», несовершенном мире, где существуют изменения и разнообразие.

Каждое тело в зависимости от своей природы устремляется к своему «естественному месту». Весь подлунный мир, учит Аристотель, состоит из четырех стихий, или элементов: из земли, воды, воздуха и огня. Земля и вода как «тяжелые стихии» движутся «по природе своей» к центру мира, т.е. к центру Земли; воздух же и огонь как стихии «легкие» устремляются от центра мира к периферии. Когда тело находится в своем естественном месте, оно пребывает в покое. Если же оно не находится в естественном месте, то стремится к нему. Это движение к естественному месту есть движение естественное, движение по природе. Если же тело не перемещается к своему естественному месту (например, тяжелое тело, будучи брошено вверх, удаляется от своего естественного места – центра Земли), то такое движение называется насильственным.

Повторяемость небесных явлений заставляет думать, что это вызвано особыми свойствами небесной материи. Следовательно, «эфир», «пятой стихии», или «пятой сущности», присуще, в отличие от четырех земных стихий, одно и то же неизменное движение. Если в подлунном мире все состоит из земных стихий и подвержено постоянным изменениям, то небо, напротив, нетленно и неизменно.

Первоначальным источником всякого движения, по Аристотелю, является Бог – нечто, что порождает движение, и при этом само является неподвижным и вечным. Первый движитель не имеет частей или размеров и находится на окружности мира. В современной науке мало что осталось от учения Аристотеля, но уже в древности было осознано, что движение не может возникнуть само по себе, необходимо наличие причины, к примеру некоторого начального толчка. Или, используя современные термины, можно сказать, что телу необходимо придать энергию.

Эпоха Галилея

В эпоху Галилея происходит существенное изменение взглядов на мир. Начинается новый этап в развитии науки. Достаточно четко оформляется понятие физического эксперимента как целенаправлен-

ных действий по изучению явлений природы, в ходе которых максимально возможным образом контролируются как условия постановки наблюдения, так и само наблюдаемое явление. Эксперимент объявляется единственным критерием правильности научных гипотез. Впервые начинает применяться численное описание экспериментов.

Г. Галилей (1564–1650) в своих трудах сформулировал принципы относительности движения и принцип инерции, которые сохранились в науке и в наше время, закон сложения скоростей и сил, подробно описал равноускоренное движение, в частности тот факт, что в поле тяжести все тела движутся с одинаковым ускорением независимо от их массы. Труды Галилея заложили основу для возникновения и развития нового научного мировоззрения. В своих рассуждениях он пользовался понятием, сходным с понятием энергии.

XVII– XVIII века

Р. Декарт (1596–1650). Рене Декарт (в латинском написании – Картезий) – французский философ, математик, физик, физиолог. Философия Декарта связана с его математикой, космогонией и физикой. В механике он указал на относительность движения и покоя, сформулировал общий закон действия и противодействия, а также закон сохранения полного количества движения при ударе двух неупругих тел.

На основе математических и физических исследований Декарта сложилось его учение о материи как о телесной субстанции. Декарт отождествлял материю с протяжением. Это означало, что всякая протяженность телесна и абсолютно пустого пространства не существует, а плотность и геометрические свойства составляют всю сущность телесности.

Материи, по Декарту, присущи определенные законы движения. Эти законы сводятся к следующим положениям. Первое состоит в том, что всякая вещь сохраняет свое состояние и изменить его можно лишь под действием другой вещи. Действие возможно при наличии непосредственного контакта – удара, давления, толчка. Второе положение представляет собой закон инерции: если частица материи начала двигаться, то будет продолжать это движение постоянно с равной силой до тех пор, пока другие ее не остановят или не замедлят ее движения. Формулируя это положение, Декарт идет дальше Галилея в своем понимании закона инерции, хотя и не дает его общей формулировки, как

позже это сделает Ньютон. Третье положение содержит формулировку закона сохранения движения. Декарт формулирует его так: «...Если одно тело сталкивается с другим, оно не может сообщить ему никакого другого движения, кроме того, которое потеряет во время этого столкновения, как не может и отнять у него больше, чем одновременно приобрести себе». Под «силой» движения Декарт понимает произведение «величины» тела (т.е. массы) на абсолютное значение его скорости. Таким образом, Декарт говорит о сохранении движения в природе, пытаясь придать этому общему положению конкретную форму в виде естественно-научного закона. Этот закон, установленный Декартом, получил название закона сохранения количества движения.

Учение Декарта представляло собой всеобъемлющую систему, претендовавшую на установление наиболее общих истин, на выявление основных принципов механики мира и одновременно на объяснение всей природы на основе этих принципов. Декарт дал понятие материи как некоей физической модели. Рассуждая о свойствах материи, он сформулировал конкретные законы ее движения, считая их единственными законами, из которых вытекают с необходимостью все остальные частные законы. Учение Декарта являлось единой наукой, мировоззрением, подобно науке и мировоззрению древности.

Физика в XVII столетии быстро развивалась и накапливала новый фактический материал, устанавливая количественные соотношения между различного рода физическими величинами. Картезианская методология, не отводившая должного места экспериментальным исследованиям, не всегда позволяла объяснить реальную физическую картину мира. Поэтому физика Декарта, явившаяся родоначальницей механистического мировоззрения, давшая отпор схоластике, была опровергнута в трудах Лейбница, Ньютона и др.

Г. Лейбниц (1646–1716). В развитие концепции энергии и связанных с нею понятий большой вклад внес Лейбниц. В механике он обратил внимание, с одной стороны, на трудности, возникшие в связи с законом сохранения движения Декарта, а с другой стороны, на новые результаты, относящиеся к частным случаям закона сохранения энергии (например, результаты Гюйгенса). Правильно проанализировав то и другое, Лейбниц дал свое обобщение в форме закона сохранения живых сил. Этот закон он связал со всей своей философской системой и рассматривал его как подтверждение последней и как опровержение философии Декарта.

В 1686 г. Лейбниц опубликовал статью «Краткое доказательство примечательной ошибки Декарта и других относительно закона природы, согласно которому бог всегда сохраняет одно и то же количество движения, и которым неправильно пользуются, между прочим, в механической практике». В этой статье, а затем и в ряде других сочинений Лейбниц опровергает закон сохранения движения Декарта, не признает количество движения мерой движения, предлагает свою меру движения и формулирует свой закон сохранения. Между Лейбницем и его последователями с одной стороны и картезианцами – с другой разгорелся спор о мере движения и о том, что сохраняется в природе.

Утверждая, что количество движения является мерой движения, картезианцы опирались не только на авторитет Декарта, но и на положение, что сила измеряется, как писал еще Галилей, моментом, или импульсом, сообщаемым ею, последний же пропорционален приобретенным скоростям. В соответствии с этим формулировался и принцип виртуальных скоростей, по которому действие грузов определялось приобретаемым количеством движения. Таким образом, многим казалось естественным измерять действие силы приобретенным количеством движения и считать его мерой, или «силой» движения.

Лейбниц рассуждал иначе: сила должна измеряться тем действием, которое она может произвести. Таким действием является, например, поднятие тела вверх на определенную высоту. Для того чтобы поднять тело на высоту вдвое большую, нужно, чтобы оно имело скорость, в четыре раза большую. Вообще, высота поднятия тела пропорциональна не скорости, а квадрату скорости тела. Отсюда Лейбниц и делал заключение, что сила движущегося тела равна не произведению массы на скорость, а произведению массы на квадрат скорости. Эту величину Лейбниц назвал «живой силой».

Что касается закона Декарта, то Лейбниц доказывал, что он не выполняется, и даже показал, что если принять этот закон, то должен существовать вечный двигатель. Закон Декарта справедлив только если принять, что количество движения может иметь и положительный, и отрицательный знак, т.е. направление. Этот закон Лейбниц назвал законом сохранения «направления», или законом сохранения «движения вперед». Он писал: «Кроме изложенного выше закона природы, по которому сумма сил остается неизменной, существует другой не менее общий и не менее согласный с разумом закон: в телах, связанных друг с другом, а также и во всей природе общее количество направления

оастается неизменным». Под направлением Лейбниц подразумевал здесь количество движения как геометрическую величину, а сумму количеств движения он понимал как геометрическую сумму. Однако Лейбниц подчеркивал, что сохранение этой величины в природе «не удовлетворяет тем требованиям, которые предъявляются к абсолютному. Ибо возможно, что скорость, количество движения и сила тел будут весьма велики, а их движение вперед будет равно нулю».

В природе должно сохраняться нечто, сохранение которого абсолютно, утверждал Лейбниц. Этим абсолютным является «сила». Сила измеряется произведением массы на высоту, или для тела, упавшего с высоты, – произведением массы на квадрат скорости. Эта величина сохраняется и при соударении шаров, как показал еще Гюйгенс, и должна сохраняться в природе. Этот закон сохранения Лейбниц назвал законом «сохранения живых сил».

Лейбниц также ввел понятие «мертвой силы». Мертвая сила – это сила, которая не производит движение, а лишь образует стремление к движению (например, тяжесть, сжатая пружина и т.п.). Мертвая сила измеряется мерой Декарта, т.е. произведением массы на скорость – на ту скорость, которую она сообщила бы телу в первый момент своего действия. Между живыми и мертвыми силами существует определенная связь; живая сила как бы рождается от бесконечного количества движений мертвой силы.

Учение о живых силах Лейбниц положил в основу учения о движении, названного динамикой. В этом сочинении он пытался представить общую систему механики, в основе которой лежит закон сохранения живых сил.

Заслугой Лейбница является то, что он в своеобразной форме вводит понятие энергии – живой силы и отделяет его от понятия собственно силы, которую называет мертвой силой.

Впоследствии понятием живой силы пользовался *И. Бернулли* (1667–1748). Он отождествлял энергию с работой, поддерживая идеи Лейбница и говоря о сохранении живой силы, рассматривал случай исчезновения механического движения и понятие не исчезающей при этом способности производить работу. Он утверждал, что эта способность сохраняется в другой форме, например в виде сжатия.

Л. Эйлер (1707–1783) сохранение живых сил рассматривал как универсальный закон механики. Он показал, что живая сила мате-

риальной точки, находящейся в поле тяготения или в поле сил отталкивания некоторого неподвижного центра, принимает начальное значение, когда точка возвращается к начальному положению в пространстве. У Эйлера можно встретить понятие, совпадающее с понятием работы.

И. Ньютон (1643–1727) – английский физик и математик, создавший теоретические основы механики и астрономии, открывший закон всемирного тяготения, разработавший (наряду с Лейбницем) дифференциальное и интегральное исчисления. Он изобретатель зеркального телескопа и автор важнейших экспериментальных работ по оптике.

В «Оптике» Ньютон описал проведенные им тщательнейшие эксперименты по обнаружению дисперсии света и показал, что дисперсия вызывает искажения в линзовых оптических системах – хроматическую аберрацию. Он исследовал интерференцию света в тонких пластинках и изменение интерференционных цветов в зависимости от толщины пластинки в наблюдаемых при этом кольцах (впоследствии их стали называть кольцами Ньютона). По существу, Ньютон первым измерил длину световой волны. Кроме того, он описал в этой работе опыты по дифракции света.

В «Началах» Ньютон обобщил результаты, полученные его предшественниками (Г. Галилей, Р. Декарт, Х. Гюйгенс, Р. Гук, Э. Галлей и др.), и свои собственные исследования и впервые создал единую, стройную систему земной и небесной механики, которая легла в основу всей классической физики. В этом труде Ньютон дал определения исходных понятий: количества материи, эквивалентного массе, плотности; количества движения, эквивалентного импульсу; и различных видов силы. Определяя понятия пространства и времени, он отделял «абсолютное неподвижное пространство» от ограниченного подвижного пространства, называемого «относительным», а равномерно текущее, абсолютное, истинное время, называемое «длительностью», – от относительного, кажущегося времени, служащего в качестве меры «продолжительности». Эти понятия пространства и времени легли в основу классической механики. Затем Ньютон сформулировал три закона движения: закон инерции (первый закон Ньютона, ранее открытый Г. Галилеем), закон пропорциональности ускорения силе инерции (второй закон Ньютона) и закон равенства действия и противодействия (третий закон Нью-

тона) Из второго и третьего законов он выводит закон сохранения количества движения для замкнутой системы. Также в «Началах» Ньютон изложил свое учение о всемирном тяготении и показал, что из него вытекают законы Кеплера.

Открытие первого закона движения изменило представление о материи: материя, однажды приведенная в движение, продолжает двигаться до тех пор, пока какая-нибудь внешняя причина не изменит его; внешние причины всякий раз оказываются материальными; система сохраняет движение посредством действия своих собственных законов, теперь уже не требуется внешнего вмешательства. Бог Ньютону был необходим только для того, чтобы придать планетам первоначальное движение.

XIX век

Существенное влияние на развитие физики XIX в. оказали как развитие философской мысли, так и накопленный экспериментальный материал во многих областях знаний. В первой половине столетия быстро развивались все разделы физики: механика и оптика, учение об электричестве и магнетизме. Весь этот период завершается установлением закона сохранения и превращения энергии – одного из самых общих законов физики и естествознания, который вместе с законом сохранения массы образует фундамент всего естествознания.

Развитие механики. «Живая сила» – эквивалент понятия энергии, последнее же связано с такими понятиями, как работа и мощность. Через понимание, что такое работа и мощность, через определение их количественных характеристик в XIX в. подошли к пониманию энергии в современном смысле.

В развитии механики и теплофизики в первой половине XIX в. одним из наиболее важных моментов было установление понятия работы и связанных с ним представлений и соотношений. Понятие «работа» развивалось в рамках прикладной механики, его возникновение было вызвано необходимостью найти способ оценки и подсчета работоспособности машин.

Уже в XVIII в. для оценки работоспособности водоподъемных машин начинают использовать количество воды, поднимаемой на определенную высоту за определенный отрезок времени. Так, Т. Сэвери, характеризуя изобретенную им машину, сравнивает ее работо-

способность с работоспособностью лошади: «Вода при своем падении с некоторой определенной высоты имеет силу, как раз равную той, которая нужна чтобы ее поднять. Таким образом, если машина будет поднимать столько воды, сколько поднимают две лошади, работающие одновременно, для чего нужно постоянно держать десять или двадцать лошадей, то я говорю, что такая машина выполняет работу, или труд, десяти или двадцати лошадей». В описании водоподъемной паровой машины конструкции Т. Ньюкомена говорится: «Когда она машина исправно учреждена, то каждый час вышиною на сорок шесть сажень пятьсот восемьдесят ведер воды поднимает».

Постепенно такой метод оценки мощности машин начинают включать и в теоретические курсы, посвященные механике.

В 1783 г. французский инженер и математик Л. Карно (1753–1823) в сочинении «Опыт о машинах вообще» ввел понятие работы, сформулировав его как «момент деятельности» («moment d'activité»). Вводя это понятие, Карно писал: «Если сила P движется со скоростью u , и угол, образованный u и P , будет ζ , то величина $P \cos \zeta u dt$, где dt – элемент времени, будет названа моментом деятельности (moment d'activité), произведенным силой P в течение времени dt ». В 1803 г. в сочинении «Основные принципы равновесия и движения» он уточнил определение работы: «Я буду называть произведенным моментом деятельности мертвой силы произведение этой силы на путь, который описала точка ее приложения в направлении действия этой силы, то есть произведение этой силы на путь, описываемый точкой приложения силы на косинус угла проекции, или угла, образованного направлением данной силы и направлением скорости».

Л. Карно показал, что введенная им величина связана с живой силой так, что изменение живой силы тела равно совершенной работе. В связи с этим он считал, что в случае силы тяжести величина ph , где p – вес, а h – высота поднятия, выражает скрытую живую силу. Карно придавал большое значение введенной им величине в теории машин. В своих работах французский ученый исследовал вопрос о потере живой силы (энергии) при ее передаче в машинах и установил, что такая потеря происходит в результате трения или удара. Он доказал специальную теорему о потере живой силы при неупругом ударе, известную ныне как теорема Карно.

В первые десятилетия XIX в., опять-таки в рамках прикладной механики, понятие работы получает дальнейшее развитие и обобщение. Большое значение в становлении и теоретическом осмысле-

нии термина «работа» имело сочинение французского ученого **Г. Кориолиса** (1792–1843) «Трактат по механике» (1829 г.), где автор писал: «Я употребил в этом сочинении некоторые новые термины: я обозначил словом *работа* (*travail*) количество, которое называют *механической мощностью, количеством действия и динамическим эффектом*. Это слово *работа* так естественно в том смысле, который я ему придаю...». Введя термин «работа», Кориолис сформулировал также теорему живых сил почти в том виде, как это затем стало принятым в теоретической механике, и одновременно, вопреки уже установившейся традиции, начал называть живой силой не произведение массы на квадрат скорости, а половину этого произведения. Для случая материальной точки теорема живых сил у Кориолиса формулируется следующим образом: в течение движения разность между работой двигателя и работой сопротивления, совершаемых силами, приложенными к материальной точке, равна приращению живой силы за этот промежуток времени.

Хотя уже к 30-м годам XIX в. в рамках прикладной механики сложилось понятие «работа» и была дана новая формулировка принципа, или теоремы, живых сил, ученые, занимавшиеся исследованиями по теоретической механике, тем не менее, еще не придавали большого значения этому обстоятельству.

Развитие понятия работы и исследование связанных с ней закономерностей сыграли самую непосредственную роль в подготовке и установлении закона сохранения энергии. Были уточнены связь между работой и живой силой, т.е. кинетической энергией, смысл закона, или принципа, сохранения живых сил, исследовался вопрос о работе силы трения и т.д. Наконец, чрезвычайно важным было то обстоятельство, что вместе с развитием понятия работы и применением его в прикладной механике более определенно формулировался принцип невозможности создания вечного двигателя – машины, которая могла бы совершать работу сама по себе, без использования какого-либо источника энергии.

Развитие теплофизики. Исследования превращения теплоты в механическую работу и превращения работы в теплоту имели большое значение для осознания понятия «энергия» и явления перехода энергии из одной формы в другую.

Основным трудом в этом направлении было посвященное теории тепловых машин сочинение французского физика и инженера **С. Карно**

(1796–1832) «Размышление о движущей силе огня» (1824 г.). Анализируя работу тепловой машины, ученый исходил из того, что для такой работы необходимы наличие разности температур и затем их выравнивание. Подчеркивая это обстоятельство, С. Карно, признававший теорию теплорода, увидел в нем аналогию с работой водяных машин. Как вода, падая с большей высоты на меньшую, совершает работу, так и теплород, переходя от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой, может совершать работу. Он отмечал: «Возникновение движущей силы обязано в паровых машинах не действительной трате теплорода, а его переходу от горячего тела к холодному, т.е. восстановлению его равновесия».

От чего же зависит количество работы, получаемой при передаче теплорода от теплого тела к холодному? С. Карно установил, что прежде всего это количество не определяется точно разностью температур. Более того, работа может быть совсем не произведена, хотя процесс передачи теплорода и происходит, что, например, имеет место, если теплород перетекает от одного тела к другому при непосредственном контакте. В этом случае происходит бесполезное восстановление теплового равновесия.

Для того чтобы производилась работа, считал С. Карно, должно существовать рабочее вещество, которое отбирает теплоту у нагревателя при более высокой температуре и отдает теплоту холодильнику при температуре более низкой. Этого можно достигнуть, если в качестве рабочего тела взять газ, который забирает и отдает теплоту, совершая изотермический процесс. Изменение температуры самого рабочего вещества происходит в результате изменения его объема адиабатически. В этом случае, говорит Карно, мы получаем максимально возможную работу.

Выяснив это важное положение, С. Карно доказывает теорему для такой идеальной машины: «Движущая сила тепла не зависит от агентов, взятых для ее развития; ее количество определяется исключительно температурами тел, между которыми в конечном счете производится перенос теплорода». Доказательство этой теоремы Карно основывает на принципе сохранения теплорода и принципе невозможности вечного двигателя.

С. Карно не определил коэффициент полезного действия идеальной машины как функцию температур, но он нашел, что «движущая сила теплоты» при снижении единицы теплорода с температурой t до 0° будет пропорциональна t .

Таковы основные результаты, полученные С. Карно в исследовании тепловых машин. Несмотря на неверные представления о природе теплоты и самом процессе работы тепловой машины, основываясь на одном ложном (закон сохранения теплорода) и другом неправильно применяемом (невозможность вечного двигателя первого рода) принципах, он получил правильный и важный вывод. В этом отношении случай с С. Карно является одним из интересных примеров того, когда опираясь на неверные предположения, получают правильные результаты.

Работа С. Карно в 1834 г. была продолжена **Б. Клапейроном** (1799–1864). В его сочинении «Мемуар о движущей силе теплоты» были сделаны некоторые новые шаги в развитии термодинамики. Клапейрон ставил своей задачей перевести рассуждения С. Карно на строгий математический язык. Он вывел уравнение, которое в настоящее время называется уравнением Менделеева – Клапейрона.

Клапейрон продолжал держаться теории теплорода и считал, что работа тепловых машин происходит за счет перехода теплорода от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой. Такой взгляд привел Клапейрона к необходимости признать, что «живая сила» в природе непрерывно теряется. Действительно, для того чтобы создать разность температур, необходимо затратить определенную работу, тогда как эта разность температур может исчезнуть без произведения какой-либо работы, например при непосредственном обмене теплом между телами.

Неправильные представления Клапейрона о природе теплоты и о процессах, происходящих в тепловой машине, не позволили ему уйти далеко вперед от С. Карно. Клапейрон также не смог до конца разрешить поставленный вопрос и определить коэффициент полезного действия тепловых машин.

Следует, однако, отметить, что С. Карно в конце жизни изменил свой взгляд на природу тепла, признал существование кинетической энергии и пришел к мысли о сохранении и превращении энергии в природе. В записках Карно, опубликованных после его смерти, указывается: «Тепло – не что иное, как движущая сила, или, вернее, движение, изменившее свой вид; это движение частиц тел; повсюду, где происходит уничтожение движущей силы, возникает одновременно теплота в количестве, точно пропорциональном количеству исчезнувшей движущей силы. Обратное: всегда при исчезновении тепла возникает движущая сила. Таким образом, можно

высказать общее положение: движущая сила существует в природе в неизменном количестве; она, собственно говоря, никогда не создается, никогда не уничтожается; в действительности она меняет форму, т.е. вызывает то один род движения, то другой, но никогда не исчезает».

С. Карно не только пришел к общей идее о сохранении и превращении «сил» и о теплоте как движении, но и впервые определил механический эквивалент тепла.

Рассматривая исследования, посвященные изучению процессов превращения теплоты в механическую работу и обратно, следует указать, что они не ограничиваются только изучением работоспособности тепловых машин. Таковы, например, работы Б. Румфорда и Г. Дэви о трении и количестве теплоты, на основе которых оба независимо друг от друга сделали вывод, что теория теплового вещества является неверной и что теплота есть движение. Взгляда на теплоту как на движение придерживались и другие ученые первой половины XIX в., например А. Ампер, Т. Юнг, Г. Гесс. Однако господствующее положение занимала вещественная теория теплоты. И так продолжалось вплоть до установления закона сохранения энергии.

История установления закона сохранения и превращения энергии. На протяжении всей первой половины XIX столетия в различных областях физики все большее и большее значение приобретали исследования превращения различных «сил» природы друг в друга: механического движения – в теплоту и электричество; электричества – в магнетизм, теплоту и механическое движение; теплоты – в механическое движение и т.д. Одновременно в прикладной механике, а затем и в теоретической механике, а также в термодинамике возникло и было развито понятие работы, которое получило применение в теории тепловых машин, исследовавшей процесс превращения теплоты в механическую работу. Параллельно некоторые физики развивались и общую идею о единстве «сил природы», их неуничтожимости и превращаемости друг в друга. Эта идея получала все более конкретное выражение в непрерывно добываемом фактическом материале.

Одну из первых попыток систематического обобщения такого материала предпринял английский физик **У. Гров**. Физическими силами, согласно Грову, являются движение, теплота, свет, электричество, магнетизм, химическое сродство. Они представляют собой определенное

состояние материи. Эти силы «находятся в непрерывной зависимости; ни одно из этих свойств, будучи взято в отвлеченном смысле, не может быть названо существенною и непосредственною причиною других; но каждое из них, будучи рассматриваемо как сила, может быть в свою очередь причиною других; таким образом, теплота посредственно или непосредственно может произвести электричество; электричество же может произвести теплоту и т.д.». Гров писал, что сила не может быть уничтожена, что она только подразделяется и изменяется в своем направлении и своем характере.

Однако рассмотрев и проанализировав многочисленные случаи превращения различных форм энергии друг в друга, Гров не установил наличия количественных соотношений между различными видами энергии. Последний и решающий шаг в оформлении общей идеи о сохранении и взаимопревращаемости «физических сил» в естественно-научный закон был сделан в 40-х годах XIX столетия. Наиболее важную роль в этом сыграли работы немецких ученых Майера и Гельмгольца и английского физика Джоуля.

Немецкий врач-физиолог *Р. Майер* (1814–1878), занимаясь медициной и физиологией, пришел к общей идее о неразрушимости «сил природы» и о способности их превращаться друг в друга. Основные положения учения Майера о сохранении и превращении энергии заключаются в следующем. В природе имеется два рода причин: одним причинам присуще свойство весомости и непроницаемости, – это материя; другая группа причин – это силы. Материя и силы неразрушимы. Это следует из принципа, что причина всегда равна действию, которое, в свою очередь, является причиной для последующего действия. Одновременно причины способны принимать различные формы: «Причины суть (количественно) неразрушимые и (качественно) способные к превращениям объекты». В связи с этим, по Майеру, и силы – неразрушимые, способные к превращениям объекты.

Согласно Майеру, в природе существует несколько качественно различных сил. Одна из них – движение: «движение есть сила». Эта сила измеряется величиной живой силы. При соударении упругих тел общая сумма живых сил остается постоянной.

Другой силой является «сила падения». Под этой силой Майер подразумевает потенциальную энергию поднятого груза. Он разделяет понятия силы падения и силы тяжести, или тяготения, которую он не считает возможным назвать силой. Это не сила, а свойство,

считает Майер, к ней неприменимо понятие неразрушимости. Сила падения измеряется произведением веса на высоту. При движении тела в поле силы тяжести сила падения и сила движения взаимно превращаются, общая же их сумма остается постоянной.

Тепло также является силой. Оно может быть превращено в механическое движение, и наоборот. Превращение механического эффекта (общее название у Майера для кинетической и потенциальной энергии) в теплоту и обратно происходит всегда в строго эквивалентных количествах. В работе «Органическое движение и обмен веществ» Майер приводит более точное значение механического эквивалента теплоты – 425 кг·м/ккал и дает его расчет из различия теплоемкости газа при постоянном давлении и постоянном объеме.

Четвертая форма проявления физической силы – это электричество. В случае трения механическая энергия превращается в электричество, то же самое происходит при индукции.

Существует также химическая сила. Этой силой, по Майеру, обладают химические вещества, способные соединяться, будучи разобращенными: химически раздельное сосуществование, или химическая разность веществ, есть сила.

Именно Майер впервые указал на существование качественных превращений различных форм энергии друг в друга и ее количественное постоянство. Но его первые работы не обратили на себя внимания физиков. Напечатаны они были не в физических журналах и в значительной степени носили общий характер, не содержали конкретных экспериментальных или теоретических результатов и находились в противоречии с еще господствовавшими представлениями о невесомых субстанциях.

Работы английского физика *Дж. Джоуля* (1818–1889) основывались на экспериментальных данных. Проводя экспериментальные исследования, связанные с выделением теплоты электрическим током, он обнаружил существование механического эквивалента теплоты и пришел к выводу о сохранении и превращении энергии.

В 1841 г. Джоуль опубликовал работу «О теплоте, выделяемой металлическим проводником электричества и в элементе батареи в процессе электролиза». Главным результатом описанных в этой работе экспериментальных исследований было установление Джоулем закона, по которому количество теплоты, выделенной электрическим током, пропорционально квадрату силы тока и сопротивлению. Этот же закон был получен независимо Э. Ленцем. Кроме

того, в данной работе, опираясь на измерения количества теплоты, выделяемой в различных участках цепи, Джоуль высказал мысль о существовании связи между количеством теплоты и тепловым эффектом реакции окисления, к которой сводятся химические процессы в гальванической батарее.

В последующих работах, посвященных исследованию тепловых явлений в гальванических цепях, а также изучению процессов выделения теплоты при протекании некоторых химических реакций, Джоуль развил эту мысль и пришел к важному выводу. Этот вывод заключался в том, что теплота, выделяемая в гальванической цепи, определяется химическими изменениями, происходящими в гальванических батареях, включенных в цепь, и равна теплоте химических реакций, происходящих в этих батареях. В связи с этим поначалу Джоуль заключил, что теплота, выделяемая в гальваническом элементе в результате химических реакций, происходящих в нем, распространяется по всей электрической цепи и выделяется на различных ее участках.

Джоуль также исследовал вопрос о количестве теплоты, выделяемой индукционным током. Для этого он взял проволочную катушку, намотанную на железный стержень, поместил ее в стеклянную трубку, наполненную водой, и вращал ее в магнитном поле, образованном полюсами магнита. Измеряя величину индукционного тока гальванометром, соединенным с концами проволочной катушки при помощи ртутного коммутатора, и одновременно определяя количество теплоты, выделенной током в стеклянной трубке, Джоуль пришел к заключению, что индукционный ток, как и гальванический, выделяет теплоту, количество которой пропорционально квадрату силы тока и сопротивлению.

Затем Джоуль включил индукционную спираль в гальваническую цепь. Вращая ее в противоположных направлениях, он измерял силу тока в цепи и выделенную при этом теплоту за определенный промежуток времени. В одном случае индукционная катушка играла роль мотора, в другом – генератора электрического тока. В результате этого эксперимента Джоуль обнаружил, что в первом случае энергия батареи расходовалась и на выделенную теплоту, и на совершенную работу, во втором же случае и работа батареи, и работа, затраченная на вращение катушки, равна выделенной теплоте, т.е. химическая энергия батареи и механическая энергия, затраченная на вращение катушки, в конечном счете трансформировались в выделенную током теплоту.

После этих опытов Джоуль приходит к выводу о необходимости существования постоянного соотношения между «механической силой» и теплотой и доказывает его при помощи следующего эксперимента. На той же самой установке он производит вращение индукционной катушки уже не рукой или посредством тока гальванической батареи, включенной в цепь, а с помощью падающих грузов. Измеряя выделившуюся теплоту в трубке с индукционной катушкой и совершаемую грузами при их опускании работу, Джоуль и получил механический эквивалент теплоты, который, по его данным, был равен 460 кг·м/ккал. Кроме того, Джоуль проделал опыт, в котором механическое движение непосредственно превращалось в теплоту. Он измерил теплоту, развиваемую водой при продавливании через узкие трубы. По этим данным механический эквивалент получался равным 423 кг·м/ккал.

В 1844 г. Джоуль сделал сообщение в Манчестерском обществе литературы и философии, выступив по вопросу о природе теплоты. Здесь он отверг субстанциональную теорию теплоты и объявил себя приверженцем кинетической теории тепла. При этом Джоуль развил целый ряд гипотез о характере теплового движения молекул и атомов, дал молекулярно-кинетическое толкование скрытой теплоте плавления и т.д.

Джоуль высказывал и общие положения о сохранении и превращении «сил» природы. В 1847 г. он сформулировал закон сохранения силы: «Теплота, живая сила и притяжение на расстоянии (к которым я могу прибавить свет) взаимно превратимы друг в друга. Причем в этом превращении ничего не теряется».

В последующее время Джоуль применил различные методы для измерения механического эквивалента теплоты, пытаясь получить наиболее точные результаты. В 1849 г. он произвел классический опыт по измерению механического эквивалента теплоты, известный сегодня каждому школьнику. С помощью падающих грузов Джоуль заставил вращаться колесо с лопастями внутри калориметра, наполненного жидкостью. Измеряя совершенную грузами работу и выделенную теплоту в калориметре, он получил механический эквивалент равным 424 кг·м/ккал.

Первые работы Джоуля, как и работы Майера, не обратили на себя практически никакого внимания. Однако в 1847 г. появилась новая работа, посвященная обоснованию закона сохранения и превращения энергии, принадлежавшая немецкому врачу и естествоиспытателю *Г. Гельмгольцу* (1821–1894), – «О сохранении силы».

Гельмгольц пришел к идее о сохранении энергии, занимаясь изучением физиологических процессов. В его время имело значительное распространение учение о так называемой «жизненной силе», управляющей деятельностью живого организма. Будучи противником этого учения, Гельмгольц задался вопросом: какие отношения должны существовать между различными силами природы, если принять, что вечный двигатель вообще невозможен?

Гельмгольц исходил из представления, что все окружающие нас вещи состоят из материальных частиц, или материальных точек, между которыми действуют центральные силы, поэтому «задача естествознания, в конце концов, заключается в том, чтобы свести явления природы на неизменные притягательные или отталкивательные силы, величина которых зависит от их расстояния». Но для системы материальных точек, между которыми действуют центральные силы, как уже давно установлено, действует закон сохранения живых сил. Этот закон исключает возможность вечного двигателя для такой системы, ибо при всяких процессах в ней, приводящих ее в первоначальное состояние, общая живая сила системы остается без изменения и произведенная работа должна равняться нулю.

Гельмгольц несколько изменяет формулировку закона сохранения живых сил. Он вводит понятие потенциальной энергии, назвав ее «силой напряжения». В связи с этим он формулирует закон сохранения живых сил как неизменности суммы кинетической энергии (живой силы) и потенциальной энергии (силы напряжения). «Когда тела природы действуют друг на друга притягательными или отталкивательными силами, не зависящими от времени и скорости, то сумма их живых сил и сил напряжения остается постоянной, так что максимум полученной работы будет, следовательно, величиной определенной и конечной».

Непосредственным выражением этого принципа живых сил и является принцип сохранения силы, который может быть применен к любому физическому процессу, если известны выражения в данном процессе для «живой силы» и «силы напряжения».

В этой же работе Гельмгольц рассмотрел применение принципа живых сил к конкретным физическим явлениям. К ряду физических процессов, как указывал Гельмгольц, этот принцип уже применялся. Его применяли в механике в тех случаях, когда не действуют силы трения или другие неконсервативные силы, в теории упругих волн, когда волновое движение не поглощается и не превращается в теп-

ло. Гельмгольц указал, что этот принцип применялся Френелем при выводе законов отражения и преломления световых волн.

В общем случае в физических процессах живая сила видимых движений теряется. Она может превращаться в теплоту. При этом ее исчезновению всегда соответствует появление определенного количества тепла. Из факта превращаемости живой силы в теплоту, по Гельмгольцу, следует справедливость кинетической теории тепла.

Гельмгольц применил принцип «сохранения силы» к электрическим явлениям. Он рассмотрел потенциал электрических зарядов как их энергию, способную превратиться в кинетическую энергию заряженных тел, притягивающих или отталкивающих друг друга. Также он вычислил энергию конденсатора, которая получается равной половине квадрата заряда, деленного на емкость конденсатора. При разрядке конденсатора вся энергия может превратиться в теплоту, выделенную в проволоке замыкающей пластины конденсатора.

Гельмгольц рассмотрел энергетические процессы в гальванической цепи. Он показал, что количество выделенной теплоты Q в гальванической цепи с сопротивлением R в результате протекания электрического тока силы I равно $I^2 Rt = EIt$, где E – э.д.с. батареи. Следовательно, EIt есть работа батареи, равная в соответствующих единицах теплоте химических реакций, протекающих в батарее.

Далее Гельмгольц перешел к рассмотрению магнитных и электромагнитных явлений. Здесь особо интересен вывод из принципа «сохранения силы» закона электромагнитной индукции.

В конце своей работы Гельмгольц останавливается на вопросе о применимости принципа сохранения силы к органическим процессам и решает его положительно. Он пишет: «Я думаю, что приведенные данные доказывают, что высказанный закон не противоречит ни одному из известных в естествознании фактов и поразительным образом подтверждается большим числом их...».

Как можно увидеть, в статье «О сохранении силы» Гельмгольц не ограничивается рассмотрением только механической и тепловой «силы» (т.е. энергии, если пользоваться термином, применявшимся еще Т. Юнгом и вновь предложенным лордом Кельвином в 1849 г.), а исследует и другие виды энергии. По существу, Гельмгольц, развивая подход Майера, называет энергией некоторую величину, которая может переходить из одной формы в другую, и, так же как и Майер, приписывает ей свойства неразрушимости, так что она ведет себя подобно веществу, т.е. не может быть ни создана, ни уничтожена.

Теперь, когда мы привыкли к понятию «энергия» (вернее, к самому слову), может показаться, что работа Гельмгольца не добавляет ничего нового к тому, что утверждали Майер и Джоуль. Но необходимо вспомнить, что Майер и Джоуль рассматривали пусть важные, но все же частные случаи, тогда как Гельмгольц ввел в физику величину, ранее неизвестную или смешиваемую с понятием силы, величину, участвующую во всех физических явлениях, способную меняться по форме, но неуничтожимую, невесомую, но определяющую форму существования материи.

Работа Гельмгольца также не вызвала особого интереса у современников. Однако несмотря на холодный прием, оказанный сначала работам Майера, а потом и работам Джоуля и Гельмгольца, их отдельные представления, а затем и общая идея стали получать все большее распространение и применение в практике физических исследований. Постепенно мысль, что установлен новый, очень важный физический и, более того, естественно-научный закон, овладела умами ученых. В развитии основных положений закона сохранения и превращения энергии большую роль сыграли работы У. Томсона, Р. Клаузиуса, У. Ранкина и др.

Вся физика второй половины XIX в. покоится на представлении о двух различных сущностях – материи и энергии, подчиняющихся каждой своему закону сохранения. Характерным различием этих сущностей является то, что материя обладает весом, тогда как энергия невесома.

XX век

Специальная теория относительности. Дальнейшее развитие теоретической мысли связано с созданием специальной теории относительности (СТО). Эта теория была разработана в начале XX в. усилиями *Г. Лоренца*, *А. Пуанкаре* и *А. Эйнштейна*. Основные положения и полный математический аппарат теории, включая групповые свойства преобразований Лоренца, в абстрактной форме впервые сформулировал Пуанкаре в работе «О динамике электрона». Явный абстрактный вывод базиса теории – преобразований Лоренца из минимума исходных постулатов был дан Эйнштейном в практически одновременно опубликованной работе «К электродинамике движущихся сред».

В основе работы Эйнштейна лежат два постулата: 1) законы, описывающие все физические явления, – одни и те же для двух ко-

ординатных систем, движущихся равномерно и прямолинейно относительно друг друга; 2) скорость света не зависит от скорости движения источника во всех инерциальных системах отсчета. Но представленные в этой работе идеи идут гораздо дальше простой электродинамики. Следствием постулатов СТО являются преобразования Лоренца, заменяющие собой преобразования Галилея для нерелятивистского, «классического» движения. Эти преобразования связывают между собой координаты и времена одних и тех же событий, наблюдаемых из различных инерциальных систем отсчета.

Именно преобразования Лоренца описывают такие знаменитые эффекты, как замедление хода времени и сокращение длины быстро движущихся тел, существование предельной скорости движения тела, относительность одновременности (два события происходят одновременно по часам в одной системе отсчета, но в разные моменты времени по часам в другой системе отсчета).

При движении с околосветовыми скоростями видоизменяются также и законы динамики. Так, можно вывести, что второй закон Ньютона, связывающий силу и ускорение, должен быть модифицирован при скоростях тел, близких к скорости света. Кроме того, можно показать, что и выражение для импульса и кинетической энергии тела уже имеет более сложную зависимость от скорости, чем в нерелятивистском случае.

Специальная теория относительности имеет многочисленные экспериментальные подтверждения и верна в своей области применения. СТО перестает работать в случаях сильных полей тяготения, где ее заменяет общая теория относительности.

В 1905 г. Эйнштейн вывел чисто математическим путем из экспериментально наблюдаемой зависимости массы от скорости исключительно важное следствие. Позже он дал ему наглядное объяснение, которое здесь и приводится. Предположим, что в коробке покоятся несколько шариков. Если к коробке приложить внешнюю силу, то она приобретет определенное ускорение, зависящее от массы покоя шариков. Но пусть эти шарики движутся по всем направлениям, подобно молекулам газа, со скоростями, близкими к скорости света. Вызовет ли при этом внешняя сила такой же эффект? Конечно, нет, поскольку скорость шариков увеличивает их массу. Следовательно, кинетическая энергия шариков оказывает, подобно массе, сопротивление движению. Этот частный случай был блестяще обобщен Эйнштейном на все формы энергии: энергия в любой фор-

ме ведет себя как вещество. Таким образом, в теории относительности нет существенного различия между массой и энергией: энергия обладает массой, а масса представляет собой энергию.

Классическая физика ввела представления о двух субстанциях – веществе и энергии и провозгласила два соответствующих закона сохранения. Теория относительности свела эти две субстанции к одной, а законы их сохранения – к одному закону сохранения массы-энергии. Масса и энергия преобразуются друг в друга во вполне определенном соотношении, описываемом релятивистской формулой $E = m_0 c^2$, где E – энергия, m_0 – масса покоя, c – скорость света в пустоте. Таким образом, был установлен один из самых общих законов природы – закон единства энергии и материи.

Квантовая механика. Квантовая теория родилась в 1900 г., когда **М. Планк** предложил теоретический вывод о соотношении между температурой тела и испускаемым этим телом излучением, вывод, который долгое время ускользал от других ученых. Как и его предшественники, Планк предположил, что излучение испускают атомные осцилляторы, но при этом он считал, что энергия осцилляторов (и, следовательно, испускаемого ими излучения) существует в виде небольших дискретных порций, которые Эйнштейн назвал квантами. Энергия каждого кванта пропорциональна частоте излучения.

Хотя выведенная Планком формула вызвала всеобщее восхищение, принятые им допущения некоторое время оставались непонятными, так как противоречили классической физике.

В 1905 г. Эйнштейн воспользовался квантовой теорией для объяснения некоторых аспектов фотоэлектрического эффекта – испускания электронов поверхностью металла, на которую падает ультрафиолетовое излучение. Попутно Эйнштейн отметил кажущийся парадокс: свет, о котором на протяжении двух столетий было известно, что он распространяется как непрерывные волны, при определенных обстоятельствах может вести себя и как поток частиц.

Примерно через восемь лет **Н. Бор** распространил квантовую теорию на атом и объяснил частоты волн, испускаемых атомами, возбужденными в пламени или в электрическом заряде. Бор предположил, что электроны могут находиться только на определенных дискретных орбитах, соответствующих различным энергетическим уровням, и что «перескок» электрона с одной орбиты на другую, с меньшей энергией, сопровождается испусканием фотона, энергия которого равна разности

энергий двух орбит. Частота, по теории Планка, пропорциональна энергии фотона. Таким образом, модель атома Бора установила связь между различными линиями спектров, характерными для испускающего излучение вещества, и атомной структурой.

В квантовой теории прекрасно описывается явление, не имеющее объяснения в классической физике, – рассеяние фотона на электроны, в результате которого у фотона изменяется энергия. В классической электродинамике при поглощении и последующем испускании излучения его частота не изменяется, может происходить только рассеяние.

Важным элементом квантовой механики является принцип соответствия: в рамках квантовой механики доказывается, что в пределе больших квантовых чисел (квазиклассический предел) и в случае, когда квантовая система взаимодействует с внешним миром, уравнения квантовой механики переходят в уравнения классической физики. Таким образом, квантовая механика не противоречит классической физике, а дополняет ее на микроскопических масштабах.

К принципиально новым принципам в квантовой механике относится принцип неопределенности, сформулированный **В. Гейзенбергом** в 1927 г. Этот принцип может быть сформулирован следующим образом:

«Если приготовлены несколько идентичных копий системы в данном состоянии, то измеренные значения координаты и импульса будут подчиняться определенному распределению вероятности, – это фундаментальный постулат квантовой механики. Измеряя величину стандартного отклонения Δx координаты и стандартного отклонения Δp импульса, мы найдем, что $\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$.

Это неравенство дает несколько возможностей: состояние может быть таким, что x может быть измерен с высокой точностью, но тогда p будет известен только приблизительно, или, наоборот, p может быть определен точно, в то время как x – нет. Во всех же других состояниях и x , и p могут быть измерены с “разумной” (но не произвольно высокой) точностью».

В повседневной жизни мы обычно не наблюдаем неопределенность потому, что значение \hbar чрезвычайно мало.

Помимо соотношения между импульсами и координатами частиц аналогичное соотношение существует для любой пары пере-

менных, которым соответствуют некоммутирующие операторы, например, компоненты углового момента. Между неопределенностью энергии ΔE какого-либо состояния и временем его существования Δt также действует подобное соотношение: $\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$. Так, например, согласно этому неравенству возможно нарушение закона сохранения энергии на короткие моменты времени, или точнее, если произведение $\Delta E \Delta t$ не превышает $\frac{\hbar}{2}$, то такое нарушение не может быть экспериментально обнаружено. Это явление чисто квантовое и не имеет аналогов в классической механике.

Общая теория относительности. В 1915–1916 гг. А. Эйнштейн опубликовал общую теорию относительности (ОТО) – геометрическую теорию тяготения. В рамках этой теории, являющейся дальнейшим развитием специальной теории относительности, постулируется, что гравитационные эффекты вызываются не силовым взаимодействием тел и полей, находящихся в пространстве-времени, а представляют собой проявления деформаций самого пространства-времени, вызываемых, в частности, присутствием массы-энергии. Таким образом, в ОТО, как и в других метрических теориях, гравитация – не силовое взаимодействие. Общая теория относительности отличается от других метрических теорий тяготения тем, что в ней используются уравнения Эйнштейна, связывающие геометрию пространства-времени с распределенными в нем массами.

ОТО описывает с высокой точностью многие экспериментальные явления, например такие, как аномальная прецессия перигелия Меркурия. Для отклонения света в гравитационном поле ОТО предсказывает величину вдвое большую, чем классическая физика. Первая проверка была проведена в 1919 и 1922 гг. во время солнечных затмений, и была обнаружена правильность предсказаний ОТО, которая затем неоднократно подтверждалась более поздними экспериментами. С тех пор много других наблюдений и экспериментов подтвердили многие из предсказаний теории, включая гравитационное замедление времени, гравитационное красное смещение, задержку сигнала в гравитационном поле и, пока лишь косвенно, гравитационное излучение. Кроме того, многочисленные наблюдения интерпретиру-

ются как подтверждение одного из самых таинственных и экзотических предсказаний ОТО – существования черных дыр.

Проблема энергии в ОТО. Так как энергия, с точки зрения математической физики, представляет собой величину, сохраняющуюся из-за однородности времени, а в общей теории относительности, в отличие от специальной, вообще говоря, время неоднородно, то закон сохранения энергии может быть выражен в ОТО только локально, т.е. в ОТО не существует такой величины, эквивалентной энергии в СТО, чтобы интеграл от нее по пространству сохранялся при движении по времени. Локальный же закон сохранения энергии-импульса в ОТО существует и является следствием уравнений Эйнштейна. Переход от него к глобальному закону невозможен, потому что так интегрировать тензорные поля, кроме скалярных, в римановом пространстве, чтобы получить тензорные (инвариантные) результаты, вообще говоря, математически невозможно.

Многие физики считают это существенным недостатком ОТО. С другой стороны, очевидно, что если соблюдать последовательность до конца, то в полную энергию кроме энергии материи необходимо включать также и энергию самого гравитационного поля. А последняя не может быть хорошо определена (как тензор), что является еще одним аспектом проблемы. Различными авторами вводятся так называемые псевдотензоры энергии-импульса гравитационного поля, которые обладают некими «правильными» свойствами, но уже одно их многообразие показывает, что удовлетворительного решения задача не имеет. В общем случае проблема энергии и импульса может считаться решенной только для островных систем, т.е. таких распределений массы, которые ограничены в пространстве и пространство-время которых на пространственной бесконечности переходит в пространство Минковского.

Современная космология и астрофизика

Темная материя. Согласно многочисленным наблюдательным данным, во Вселенной имеется большое количество массы, недоступной для прямого наблюдения, но при этом она оказывает существенное влияние на движение наблюдаемых объектов, например галактик.

Темная материя сродни обычному веществу в том смысле, что она способна собираться в сгустки (размером, скажем, с галактику или скопление галактик) и участвует в гравитационных взаимодействиях.

виях так же, как обычное вещество. Скорее всего, она состоит из новых, не открытых еще в земных условиях частиц. По различным оценкам, на долю обычного вещества приходится около 5% всей массы Вселенной, на долю темной материи – около 25%, а остальные 70% составляет загадочная субстанция, называемая темной энергией.

Темная энергия. Темная энергия – гораздо более странная субстанция, чем темная материя. Начать с того, что она не собирается в сгустки, а равномерно «разлита» во Вселенной. В галактиках и скоплениях галактик ее столько же, сколько вне их. Самое необычное то, что темная энергия в определенном смысле испытывает антигравитацию. Современными астрономическими методами можно не только измерить нынешний темп расширения Вселенной, но и определить, как он изменялся со временем. Так вот, астрономические наблюдения свидетельствуют о том, что сегодня (и в недалеком прошлом) Вселенная расширяется с ускорением: темп расширения растет со временем. В этом смысле и можно говорить об антигравитации: обычное гравитационное притяжение замедляло бы разбегание галактик, а в нашей Вселенной, получается, все наоборот.

Такая картина, вообще говоря, не противоречит общей теории относительности, однако тогда темная энергия должна обладать специальным свойством – отрицательным давлением. Это резко отличает ее от обычных форм материи.

Гипотеза о существовании темной энергии, решает и так называемую «проблему невидимой массы». Теория нуклеосинтеза Большого Взрыва объясняет формирование в молодой Вселенной легких химических элементов, таких как гелий, дейтерий и литий. Теория крупномасштабной структуры Вселенной объясняет образование звезд, квазаров, галактик и галактических скоплений. Обе эти теории предполагают, что плотность барионной материи и темной материи составляет около 30% от критической плотности, требуемой для образования «закрытой» Вселенной, т.е. плотности, необходимой для того, чтобы форма Вселенной была плоской. Измерения реликтового излучения Вселенной, недавно проведенные спутником WMAP, показывают, что форма Вселенной действительно очень близка к плоской. Следовательно, некая ранее неизвестная форма невидимой энергии должна давать отсутствующие 70% плотности Вселенной.

Природа темной энергии. Сущность темной энергии является предметом споров. Известно, что темная энергия очень равномерно распределена, имеет низкую плотность и не взаимодействует сколько-нибудь заметно посредством известных фундаментальных типов взаимодействия, за исключением гравитации. Поскольку гипотетическая плотность темной энергии не слишком велика – порядка 10^{-29} г/см³, ее вряд ли удастся обнаружить лабораторным экспериментом (хотя уже были заявления о таком обнаружении). Темная энергия может оказывать такое глубокое влияние на Вселенную (составляя 70% всей энергии) только потому, что она однородно наполняет пустое (в иных отношениях) пространство. Существуют две главные модели, объясняющие природу темной энергии: «космологическая константа» и «квинтэссенция».

Один из кандидатов на роль темной энергии – вакуум. Плотность энергии вакуума, связанная с космологической постоянной в уравнении Эйнштейна, не изменяется при расширении Вселенной, а это и означает отрицательное давление вакуума. Второй кандидат – новое сверхслабое поле, пронизывающее всю Вселенную; для него употребляют термин «квинтэссенция». Есть и другие кандидаты, но в любом случае темная энергия представляет собой что-то совершенно необычное.

Еще один путь объяснения ускоренного расширения Вселенной состоит в том, чтобы предположить, что сами законы гравитации видоизменяются на космологических расстояниях и космологических временах. Такая гипотеза далеко не безобидна: попытки обобщения общей теории относительности в этом направлении наталкиваются на серьезные трудности.

* * *

Понятие энергии, столь важное для современной науки, имеет длинную историю. Сначала оно возникло в механике как характеристика движения и возможностей движения. Позже с развитием теплофизики и электродинамики была обнаружена величина, которая характеризует степень взаимодействия частей системы между собой и системы с внешним миром. В результате многочисленных экспериментов и теоретических построений было сформулировано понятие энергии как «общая мера различных форм материального движения». Было также установлено, что энергия может переходить из

одной формы в другую, и был открыт закон сохранения энергии, состоящий в том, что в любых физических процессах полное количество энергии остается неизменным.

В дальнейшем такие разделы физики, как квантовая механика, специальная и общая теории относительности, расширяли круг описываемых явлений природы. Вместе с этим расширялся набор понятий, используемых для описания, а также появлялись все новые, более фундаментальные вопросы.

Как часто бывает в науке, впечатляющие успехи в какой-либо области деятельности позволяют дать ответы на существующие вопросы, но в результате появляются новые. Так и теперь достижения физики частиц и космологии поставили неожиданные и фундаментальные вопросы. Мы сегодня не знаем, что представляет собой основная часть материи во Вселенной. Мы можем только догадываться, какие явления имеют место на сверхмалых расстояниях и какие процессы происходили во Вселенной на самых ранних этапах ее эволюции. Замечательно, что на многие из этих вопросов ответы будут найдены в обозримом будущем – в течение 10–15 лет, а может быть, и раньше. Наше время – это время кардинального изменения взгляда на природу, и главные открытия здесь еще впереди.

Литература

- Аристотель*. Физика // Аристотель. Сочинения.: В 4 т. – М.: Мысль, 1981.
- Кудрявцев П.С.* Курс истории физики. – М.: Просвещение, 1982.
- Львоци М.* История физики. – М.: Мир, 1970
- Спасский Б.И.* История физики. – М.: Изд-во МГУ, 1963. – Ч. I.
- Спасский Б.И.* История физики. – М.: Изд-во МГУ, 1964. – Ч. II.
- Невзоров Б.П., Поплавной А.С., Тутицын В.Е.* История фундаментальных понятий физики. – Кемерово: Кемер. гос. ун-т, 2001. – Ч. III.
- Карнап Р.* Философские основания физики. – М.: Едиториал УРСС, 2003.
- Гейзенберг В.* Философские проблемы атомной физики. – М.: Едиториал УРСС, 2004.
- Нагорский И.С.* Готфрид Лейбниц. – М.: Мысль, 1972.
- Штекли А.Э.* Галилей. – М.: Молодая гвардия, 1972.
- Философский словарь* / Под ред. И.Т. Фролова. – 5-е изд. – М.: Политиздат, 1986.
- URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Принцип_неопределенности_Гейзенберга (дата обращения 21.03.2007).
- URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Специальная_теория_относительности (дата обращения 23.06.2007).
- URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Общая_теория_относительности (дата обращения 06.05.2007).
- URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Темная_энергия (дата обращения 13.06.2007).

URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Скрытая_масса (дата обращения 08.03.2007).

Рубаков В.А. Материалы лекции «Темная материя и темная энергия во Вселенной» / Физический институт Российской академии наук (ФИАН), 2005. URL: <http://elementy.ru/lib/25560>.

Дата поступления 22.07.2009
Институт ядерной физики
СО РАН, г. Новосибирск