

УДК 536:53

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ

В.В. Рындин*Павлодарский государственный университет
им. С.Торайгырова*

Классикалық термодинамикамен және қайтымсыз үрдістер термодинамикасымен қосылуына, термодинамиканың бөліктерге бөлініп, олардың аттарының өзгеруімен, координаталарымен уақытты термодинамика теңдеулерінде қолдану, термодинамика пәнімен оның тәсілдеріне байланысты сұрақтарын қарастыру.

Рассматриваются вопросы, связанные с формулировками предмета термодинамики и методами её изложения, использованием координат и времени в уравнениях термодинамики, делением термодинамики на части и её переименованием, слиянием классической термодинамики и термодинамики необратимых процессов.

The problems, connectet with statements of thermodynamics subject and methods of its enunciating, usage of coordinates and time in equations thermodynamics, division of thermodynamics into parts and thir renaming, merging of classical thermodynamics and thermodynamics of irreversible processes, are considered.

Термодинамика является наукой общезначимого содержания, теоретической основой многих специальных курсов. Как справедливо отмечал П. Эткинс: «Ни один из разделов физики не способствовал в такой мере возвышению человеческого духа, как термодинамика» [1]. Как и всякая наука, термодинамика непрерывно развивается и этому посвящена данная статья.

Предмет термодинамики. В курсах термодинамики и физики даются следующие формулировки предмета термодинамики.

“Слово “термодинамика” греческого происхождения: **терме** означает тепло, жар, динамикос – силу, движение, всё вместе – **движущую силу тепла (огня)**”. Впервые это словосочетание (“движущая сила огня”. – В.Р.) в

указанном смысле было применено на французском языке С. Карно в 1824 г. в работе “Размышления о движущей силе огня и о машинах”, способных развивать эту силу”, с которой и началось развитие термодинамики” [2].

“Сложившееся название **“термодинамика”** употребляется вне связи с понятием динамики и определяет не учение о движении теплоты, а науку о **“движущих силах”**, возникающих при тепловых процессах... Здесь под **“движущей силой”** понимается полезное действие (работа), которое двигатель может дать за счет теплоты” [3].

Термин **“термодинамика”** впервые появился в статье В. Томсона в 1854 г. Томсон писал **“термо-динамика”**, в переводе означает **“теплота-работа”** (от греч. слов **терме** – **теплота** и **динанмис** – **сила, работа**)” [4].

“Исторически термодинамика сложилась в процессе изучения сравнительно узкого круга вопросов, связанных с работой тепловых двигателей, т. е. устройств, в которых за счёт тепла, выделяющегося при сгорании топлива, получается механическая энергия. Отсюда и первоначальное название этой науки – **механическая теория теплоты. Термодинамика – это наука о свойствах энергии** в различных её видах, а также о закономерностях перехода энергии от одних тел к другим и из одного вида в другой” [5].

“Термодинамика как наука возникла в начале XIX в. в связи с задачами совершенствования тепловых машин и включает как основную часть **учение о превращениях энергии**. Этим определяется общность её значения для таких наук, как физика, химия и для многочисленных отраслей техники, поскольку любые процессы, происходящие в природе, сопровождаются изменением энергии” [6].

Итак, первоначально **термодинамика** рассматривалась как наука о силах, возникающих за счет тепла, или о превращениях тепла в работу, а в последнее время – **как наука об энергии**.

Как видим, термин **“энергия”** является ключевым при определении предмета **“термодинамика”**. Из приведенных контекстов видно, что термин **“энергия”** является многозначным. С одной стороны, он используется для обозначения **объективной реальности – движения** (“энергия превращается, передаётся...”), а с другой стороны, для наименования **физической величины** – понятия, предназначенного для количественного выражения различных свойств тел, процессов или явлений, – т. е. для обозначения мысленной модели свойства (а не самого свойства), которая ни во что превращаться не может. Ещё Энгельс отмечал, что термин **“энергия”** является модным синонимом термина **“движение”**: “Но, что

сказать об изменении формы движения или так называемой энергии? ... Но теплота есть одна из форм так называемой энергии” [7].

Движение – неотъемлемое свойство материи, важнейший её атрибут. Движение характеризуется качеством и количеством. Качественная сторона движения определяется таким понятием, как “форма (вид, состояние) движения”, а количественная – **физическими величинами**: импульсом, моментом импульса, **энергией** и др.

Энергия (как физическая величина) является наиболее **универсальной количественной характеристикой** (мерой) **движения** в различных его формах (хаотической и упорядоченной). Однако поскольку эта величина скалярная, то она не определяет направление движения и, следовательно, отражает не все свойства движения (их учитывают другие величины, например, импульс).

Поскольку термин “энергия” обладает категориальной многозначностью: он означает одновременно и объективную реальность – само движение и предмет из мира идей – физическую величину, то его нецелесообразно использовать в качестве ключевого при определении предмета термодинамики, поскольку такое определение двусмысленно или в лучшем случае иносказательно.

Очень непросто однозначно и исчерпывающе определить границы конкретной науки и строго выделить её среди смежных наук. Очевидно, в определениях необходимо использовать наиболее общие категории, наименования которых не совпадают с наименованиями каких-либо физических величин. Одним из таких наиболее общих философских понятий является “движение”, которое никак не путаешь с физической величиной. Если в определениях термодинамики заменить многозначные термины “энергия”, “теплота”, “работа” на однозначные соответственно – “движение”, “хаотическое движение”, “упорядоченное движение”, а также учесть то обстоятельство, что термодинамика изучает не только процессы, но и свойства тел, то формулировка термодинамики как науки будет следующей:

термодинамика (от греч. *терме* – тепло, хаотическое движение и *динамис* – работа, упорядоченное движение) – **наука о законах взаимопреобразования хаотического (тепла) и упорядоченного (работы) видов (форм) движения и о макроскопических свойствах тел, обусловленных хаотическим (тепловым) движением всех микрочастиц системы.**

Если использовать общепринятые многозначные термины, то определение термодинамики получается более компактным: термодинамика – наука о законах взаимопреобразования тепла и работы и о свойствах

тел, обусловленных тепловым движением микрочастиц этих тел, но требующим дополнительных пояснений относительно тепла и работы.

В зависимости от особенностей изучаемых видов (форм) движения термодинамика делится на физическую и химическую термодинамику, термодинамику плазмы, диэлектриков, ядерных превращений и др. Основным содержанием современной физической термодинамики является изучение закономерностей тепловой (хаотической) формы движения материи и связанных с ней физических явлений. Приложения термодинамики к тепловым двигателям, холодильным установкам и прочим вопросам теплотехники выделились в самостоятельный раздел, называемый технической термодинамикой.

О делении термодинамики на части и её переименовании. Термодинамику по аналогии с гидромеханикой иногда делят на подразделы: **термостатику**, **термокинетiku** и собственно **термодинамику** [8]. На наш взгляд, аналогия будет более полной, если термодинамику сравнивать не с **гидромеханикой**¹, а с **гидродинамикой**, входящей, наряду с гидростатикой и кинематикой жидкости, в состав гидромеханики. В таком случае термодинамика будет входить в состав более общей науки, которую можно было бы назвать “**термомеханика**”. Исходя из понятия “формы, виды движения” можно дать такие определения термомеханики и её частей:

Термомеханика – наука о законах теплового движения, его переносе (распространении) в пространстве и преобразовании его в другие виды движения.

Термостатика – раздел термомеханики, в котором изучаются свойства тел, обусловленные хаотической формой движения (здесь рассматриваются параметры состояния, уравнения состояния, внутренняя энергия, теплоемкости и др.).

Термокинетика – раздел термомеханики, в котором изучаются законы переноса (распространения) хаотического движения (тепла) в пространстве (рассматриваются явления теплопроводности и термодиффузии).

Термодинамика – раздел термомеханики, в котором изучаются законы преобразования различных форм движения, включая и тепловую (рассматриваются основные законы классической термодинамики, включающие такие понятия, как “теплота”, “работа”, “энергия”, “циклы” и др.).

¹ Иногда равновесную термодинамику, изучающую системы в равновесном состоянии, предлагают называть **термостатикой**: по аналогии с гидростатикой, изучающей жидкости, находящиеся в покое, равновесии. Однако основу термодинамики составляют процессы, в которых происходит **преобразование (динамика)** теплового движения (тепла) в упорядоченное движение (работу), следовательно, переименование термодинамики в термостатику не имеет оснований.

Такое деление общей науки термомеханики на части весьма заманчиво, хотя трудности с распределением материала по разделам велики, т. к. одни и те же понятия могут относиться к разным разделам. Например, понятие теплоемкости (по крайней мере, изохорной) и энтропии должно входить в раздел термостатики. Однако это понятие определяется через теплоту, которая должна вводиться в разделе “термодинамика”. Следует отметить, что такие трудности с распределением материала по различным разделам существуют и в гидромеханике, и поэтому многие авторы гидромеханики такого деления на подразделы полностью не придерживаются.

Возможно, что со временем произойдет слияние традиционной термодинамики с термокинетикой, и термин “термомеханика”, как более общий, придет на смену термину “термодинамика” (подобно тому, как на смену термину “гидродинамика” пришел термин “гидромеханика”). В настоящее время термокинетика не входит в состав термодинамики. Содержание этого раздела изучается в таких дисциплинах, как “теория теплообмена” и “термодинамика необратимых процессов”. Включение этих дисциплин в полном объеме в состав термодинамики (точнее термомеханики) вряд ли целесообразно, но введение отдельных понятий (например, таких как “тепловой поток”, “поток энергии”, “мощность”, “градиент температуры” и др.) и соответствующих уравнений для них просто необходимо, т. к. позволит осуществить постепенный переход от термодинамики к теории теплообмена – между двумя дисциплинами, составляющими теоретическую базу теплотехники, – и тем самым углубить содержание каждой из этих дисциплин.

Методы изложения термодинамики. Термодинамика и молекулярная физика (молекулярно-кинетическая теория строения вещества, статистическая физика) изучают один и тот же круг явлений, а именно макроскопические процессы в телах, т. е. такие явления, которые связаны с хаотическим движением большой совокупности атомов и молекул. В то же время эти разделы физики, взаимно дополняя друг друга, отличаются различным подходом к изучаемым явлениям.

В отличие от молекулярной физики, рассматривающей наряду с макроскопическими свойствами и строение отдельных молекул, термодинамика не вводит никаких специальных гипотез и конкретных представлений о строении вещества, т. е. она рассматривает внешние стороны **явлений (феноменов)**. И в этом смысле термодинамика – наука **феноменологическая**: она рассматривает вещество как сплошную среду и использует для его исследования такие макропараметры, как давление, удельный объем, температура, определяемые путем прямого измерения.

Термодинамика построена по **аксиоматическому принципу**. Её основу составляют фундаментальные законы природы, принимаемые за **аксиомы**; из этих аксиом логическим путем выводятся все главнейшие следствия, касающиеся термодинамических систем. Фундаментальные законы, совокупность которых составляет аксиомы термодинамики, представляют собой обобщение опыта и называются **началами термодинамики**. Не все эти законы одинаковы по своему физическому значению и общности, однако каждый из них является независимой аксиомой, которую нельзя исключить при построении термодинамики как науки.

Термодинамика имеет свои преимущества и недостатки перед молекулярной теорией. Преимущество её в том, что она не вводит никаких гипотез, касающихся строения вещества, и поэтому имеет большую общность, а её положения так же достоверны, как и законы, на которых она основана. На основе сопоставления частных явлений с общими термодинамическими законами устанавливается возможность процессов и их закономерности. К недостаткам термодинамики следует отнести отсутствие наглядности и невозможность объяснить с её помощью причину происходящих процессов. Ответ на вопрос о причине происходящих явлений даёт молекулярно-кинетическая теория.

При изучении физических явлений возможен не только феноменологический, но и статистический (молекулярно-кинетический) подход. Во втором случае вещество рассматривается как совокупность очень большого количества микрочастиц, о состоянии вещества судят по характеру их движения. Эти теории стоят рядом и дополняют друг друга. Молекулярно-кинетическая теория обладает достоинством большей наглядности; используя её методы можно оценить некоторые физические величины, но зато она сложнее термодинамики, её математический аппарат громоздок.

В XIX веке, когда существование атомов и молекул ставилось под сомнение, гипотетические методы молекулярно-кинетической теории не находили сочувствия среди тех физиков, которые отрицательно относились ко всяким гипотезам и основанным на них теоретическим построениям. Именно это обстоятельство и вынуждало к аксиоматическому построению термодинамики. В этих условиях строгое разграничение между термодинамикой и молекулярной теорией было оправдано; надо было отделить достоверные факты от гипотез, хотя бы и в высшей степени правдоподобных. В XX веке молекулярно-кинетическая теория утратила гипотетический характер. Поэтому отпала необходимость в том резком

разграничении между термодинамикой и молекулярной теорией, которое так строго проводилось (а некоторыми авторами учебников проводится и сейчас) на ранней стадии развития этих разделов физики.

Обобщая сказанное, можно отметить следующее. В настоящее время нет никаких оснований на проведение резкой грани между феноменологическими (изучающими внешние стороны феноменов – явлений) и механистическими (изучающими явления изнутри) теориями (науками). Нет абсолютно феноменологических (изучающих макро процессы) и абсолютно механистических (изучающих микро процессы) теорий. Каждая теория (наука) в отношении некоторых объектов механистична, а в отношении других феноменологична. Так, квантовая механика (которая теснейшим образом связана с конкретной структурой вещества) рассматривает элементарные частицы как “чёрные ящики”. Любая чисто эмпирическая наука (в том числе и термодинамика) ограничена в своих возможностях и в своём развитии без привлечения молекулярных представлений о строении вещества. В частности, обоснование всех законов и понятий термодинамики было достигнуто на основе молекулярной теории. Последняя, кроме того, значительно расширила круг явлений, рассматриваемых термодинамикой, и вооружила термодинамику многими методами исследования.

С точки зрения современной физики классическая феноменологическая термодинамика явно недостаточна, несмотря на её большое значение в описании многочисленных явлений и общих выводов. Она недостаточна потому, что, помимо систематики фактов и описания макропроцессов, мы стремимся ещё к **объяснению этих фактов**, а это без **привлечения молекулярной теории строения вещества невозможно**. Вот почему все исследователи (Р. Клаузиус, В. Томсон, Л. Больцман и др.), имена которых связаны с развитием термодинамики, уделяли большое внимание молекулярно-кинетическому обоснованию результатов различных термодинамических процессов, а также представлению различных параметров термодинамики (давления, температуры, внутренней энергии и др.) через кинетическую энергию молекул.

Об использовании координат и времени в уравнениях термодинамики. Несмотря на то, что все процессы протекают в пространстве и во времени, т. е. любой параметр состояния можно задать в функции от координат и времени, например, давление $p = f(x, y, z, t)$, а его полный дифференциал как сумму частных приращений по координатам и времени, например, полное приращение давления

$$dp = \frac{\partial p}{\partial t} dt + \frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz, \quad (1)$$

термодинамике, в отличие от гидромеханики и теории теплообмена, “удается” обойтись без использования координат и времени в соответствующих уравнениях. Это связано с тем, что в термодинамике рассматриваются такие процессы, в которых частные приращения величин по координатам или по времени равны нулю. В результате те частные приращения, которые не равняются нулю, становятся полными приращениями и отпадает необходимость вводить приращения величин по координатам или по времени в явном виде.

Например, в термодинамике рассматриваются установившиеся (стационарные) течения газа, для которых частные приращения величин по времени равны нулю, например, давления $\frac{\partial p}{\partial t} dt = 0$. В этом случае в соответствующих дифференциальных уравнениях движения элемента среды частные приращения величин по координатам становятся равными полным приращениям соответствующих величин и заменяются последними. Например, при стационарном течении сумма частных приращений давления по координатам, появляющаяся при выводе уравнения энергии для подвижного элемента среды в механическом виде, заменяется полным приращением давления $\frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz = dp$.

Таким образом, классическая термодинамика не рассматривает нестационарные (неустановившиеся) потоки, которые имеют место на практике в периодически работающих устройствах (в ДВС, поршневых компрессорах и др.) и тем самым ограничивает область своего применения. Кроме того, даже при рассмотрении установившихся потоков термодинамика не в состоянии получить уравнение энергии в механическом виде (уравнение Бернулли), а берет его в готовом виде из гидромеханики, где для его вывода используются зависимости давления от координат. И как результат, в рамках классической термодинамики не удастся правильно установить смысл работы $-v dp$ и её связь с работами $p dv$ и $d(pv)$.

Рассматривая полное приращение давления (1) как сумму локального и конвективного приращений, в работе [9] получено уравнение ПЗТ для нестационарного потока в виде

$$\delta q^e = g dz + dh + dc^2 / 2 + \delta w_{\text{тех}} - v \frac{\partial p}{\partial t} dt,$$

а в работе [10] решён дискуссионный вопрос, связанный с работой $-v dp$, которая в случае стационарного потока приобрела смысл работы результирующей сил давления по перемещению элемента среды как целого:

$$-v dp = -v \left(\frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz \right).$$

Следовательно, введение координат и времени в курс термодинамики является необходимым условием её развития, даже в рамках классической (равновесной) термодинамики.

О взаимоотношении классической термодинамики и термодинамики необратимых процессов. Термодинамика **необратимых (неравновесных)** процессов зародилась в 30-х годах прошлого столетия и успешно развивается параллельно классической термодинамике. Само название этой дисциплины должно было показать её отличие от **классической (равновесной, обратимой)** термодинамики. Однако такое наименование новой дисциплины оказалось неудачным, т. к. и в обычной термодинамике рассматриваются как необратимые процессы, например, течение с трением, так и неравновесные процессы, например, при рассмотрении потоков среды или второго закона термодинамики; в свою очередь, неравновесная термодинамика основывается на локальной равновесности. В соответствии с концепцией неравновесности, положенной в основу второго закона термодинамики, термодинамику **неравновесных (необратимых) процессов** следовало бы назвать **термодинамикой неравновесных систем** [11].

Часто различие этих дисциплин видят в отсутствии в уравнениях классической термодинамики координат и времени в явном виде. Это даёт основание считать, что классическая термодинамика никогда не рассматривает неравновесные системы. Однако термодинамика изучает потоки вещества, которые могут возникать только в **неравновесных системах**, а отсутствие в соответствующих уравнениях координат и времени в явном виде, как уже отмечалось, обусловлено специфичностью самих рассматриваемых процессов – **их стационарностью**. Включение в поле зрения термодинамики вопросов, связанных с нестационарным течением среды, неизбежно приведет к необходимости выражения параметров состояния через координаты и время в явном виде.

Главное отличие термодинамики необратимых процессов от классической термодинамики заключается в том, **что составляет основу термокинетики**, – в наличии дополнительных опытных законов и уравнений, описывающих **процессы переноса** (распространения) материи и движения в пространстве (например, законов Фурье для теплопроводности, Фика для диффузии, принципов линейности и взаимности Онзагера, уравнений теплопроводности и др.).

В существующем виде термодинамика необратимых процессов весьма абстрактная дисциплина (она имеет громоздкий и трудно усваиваемый логический и сложный математический аппараты), которая перегружена деталями и ещё не отработана в методическом плане, что затрудняет её изучение и применение на практике. Существует обширная литература по термодинамике необратимых процессов, но она малопригодна для первоначального ознакомления широкого круга читателей (особенно практиков). Включение вопросов переноса материи (массы) и движения (энергии) в термодинамику (термомеханику) позволит отработать эти разделы в методическом плане и приблизить достижения неравновесной термодинамики к их применению на практике. В дальнейшем следует ожидать сближение (и даже слияние) термодинамики необратимых процессов – авангарда термодинамики – с классической термодинамикой за счёт развития математического аппарата последней и введения дополнительных законов переноса материи и движения.

Термодинамика издавна называется **королевой наук** (её изучают и физики-теоретики, и химики, и философы, и биологи, и электрики, и, естественно, теплотехники – все, кого интересуют вопросы преобразования различных видов энергии и направление протекания процессов в неравновесных системах). Однако, чтобы поддерживать свой “королевский сан” на должном уровне, она должна непрерывно перенимать у других наук всё новое, что связано с переносом движения (энергии) и изменением (превращением) его формы (вида); перерабатывать и обобщать это новое в соответствии со своим **термодинамическим методом** – ограничиваться **минимальным количеством основных законов**, использовать, по возможности, **упрощённый математический аппарат** и **раскрывать суть явлений**, не ограничиваясь их математическим описанием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эткинс П. Порядок и беспорядок в природе. – М.: Мир, 1987. – 224 с.
 2. Алексеев Г. Н. Общая теплотехника: Учеб. пособие. – М.: Высш. школа, 1980. – 552 с.
 3. Базаров И. П. Термодинамика: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 1991. – 376 с.
 4. Кричевский И. Р. Понятия и основы термодинамики. – М.: Химия, 1970. – 440 с.
 5. Мурзаков В. В. Основы технической термодинамики: Учеб. пособие для заоч. вузов. – М.: Энергия, 1973. – 304 с.
 6. Жуковский В. С. Термодинамика / Под ред. А. А. Гухмана. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 304 с.
 7. Энгельс Фридрих. Диалектика природы. – М.: Политиздат, 1982. – 359 с.
-
-