

К ЕДИНОЙ ТЕОРИИ РЕАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

Д.т.н., проф. Эткин В.А.

Показывается, что энергодинамика приводит к новым результатам практически в каждой области ее приложения, позволяя обобщить законы классической и квантовой механики, теории тепловых и нетепловых машин, физической химии и биофизики, электродинамики и теории эволюции

1. Введение. Для решения проблем, возникающих в различных областях науки и техники, весьма необходима теория, позволяющая дать единообразное описание физических, химических, биологических и тому подобных свойств и форм движения материального мира. Самые большие научные достижения прошлого были шагами к этой цели. К ним можно отнести объединение земной и небесной механики И. Ньютоном в 17 столетии; оптики с теорией электричества и магнетизма Д.К. Максвеллом в 19 столетии; химии и атомной физики в квантовой механике 20 столетия. Значительным шагом на этом пути стало создание теории элементарных частиц и сил, известной как Стандартная Модель, и объединение электромагнетизма со слабыми взаимодействиями.

Однако попытки создания единой теории всех взаимодействий сопровождается нарастанием негативных тенденций в развитии фундаментальных наук. Ученые перестали тяготиться тем, что теории не проясняют реальности, и уже не ставят задачей понимание причинно-следственных связей в проявлениях тех или иных законов. Объяснение явлений перестало быть основной функцией науки. Стали появляться, как грибы после дождя, эффектные «теории», обещающие возможность двигаться вспять во времени, преодолевать световой барьер скорости, извлекать энергию из «пустоты» или использовать всю энергию покоя тела, переходить в «параллельные миры» и т.п. Такие «теории всего» будоражат воображение и богаты на сенсации, однако от них бессмысленно ждать отдачи, поскольку объекты их изучения находятся далеко за пределами современных возможностей их обнаружения и измерения.

В этих условиях представляется целесообразным обратиться к термодинамике, о которой А.Эйнштейн отозвался как о «единственной физической теории общего содержания, относительно которой я убежден, что в рамках применимости ее основных понятий она никогда не будет опровергнута (к особому сведению принципиальных скептиков)». Одной из наиболее привлекательных черт термодинамического метода всегда была возможность получения огромного множества следствий, относящихся к различным явлениям, на основе небольшого числа первичных принципов (начал), носящих для термодинамических систем характер опытных законов. Будучи последовательно феноменологическим (т.е. опирающимся на опыт), этот метод позволил выявить основные закономерности разнообразных процессов, не вскрывая их молекулярного механизма и не прибегая к модельным представлениям о строении и структуре исследуемой системы. За эти свойства классическую термодинамику издавна называют «королевой наук». Как справедливо отмечал М. Планк, «это замечательная научная система, детали которой ни по красоте, ни по блестящей законченности не уступает всей системе в целом».

Современная термодинамика давно переросла первоначальные рамки теории тепловых машин и превратилась в весьма общий макроскопический метод исследования кинетики разнообразных процессов переноса в их неразрывной связи с тепловой формой движения¹⁾ [1]. Междисциплинарный характер этой теории, а также ее успехи в познании глубинных взаимосвязей разнородных процессов и объяснении явлений на стыках наук выдвинули ТНП в число магистральных направлений развития современного естествознания. По мнению И. Пригожина, высказанному в его нобелевской лекции, термодинамиче-

¹⁾ Это направление получило название термодинамики необратимых процессов (ТНП).

ские концепции будут играть в современном естествознании все возрастающую роль. Шагом на этом пути является обобщение ТНП на процессы полезного преобразования энергии с включением в ее уравнения полезной мощности (производительности) различных систем, что позволило распространить сферу компетенции этой теории на обширнейшую область процессов с КПД выше нуля [2,3]. Дальнейшая задача состоит в распространении методов термодинамики на системы, развивающиеся минуя состояние равновесия (объекты микро-и мегамира, биологические и т.п. системы) и создания на этой основе энергодинамики²⁾ – фундаментальной дисциплины, изучающей общие закономерности реальных (нестатических) процессов переноса и преобразования энергии независимо от их принадлежности к той или иной области знания [4].

2. Методологические особенности энергодинамики. Наследуя основные черты термодинамики как строго дедуктивного метода исследования, и неукоснительно следуя системному подходу³⁾, энергодинамика рассматривает в качестве объекта исследования всю совокупность взаимодействующих (взаимно движущихся) тел⁴⁾. Для них все процессы являются внутренними и обусловлены исключительно взаимодействием между частями системы, т.е. отсутствием в системе внутреннего равновесия. Тем самым энергодинамика решительно порывает с концепцией равновесия в условиях протекания реальных (необратимых) процессов. Именно к таким системам, называемым обычно изолированными или замкнутыми, относятся все известные законы сохранения в их наиболее строгом и общем виде.

Далее, энергодинамика отличается формой, в которой она использует закон сохранения энергии. Известно, что термодинамика формулирует этот закон в виде уравнения баланса энергии, в котором внешний энергообмен (теплообмен, работа, массообмен) выражаются через параметры системы. Поскольку же при протекании реальных (необратимых) процессов некоторые параметры системы (ее энтропия, состав и т.п.) изменяются самопроизвольно, они уже не отражают внешний энергообмен, и уравнение баланса энергии переходит в неравенство. Это и является основной причиной, ограничивающей применение математического аппарата классической термодинамики. В этом отношении энергодинамика изолированных систем также отличается от классической термодинамики. В основе предлагаемой ею математической модели реальных процессов лежит теорема о числе степеней свободы, согласно которой число независимых координат, требуемых для однозначного описания ее состояния, равно числу независимых процессов, реально протекающих в ней. При этом под независимыми понимаются процессы, вызывающие особые, качественно отличимые и не сводимые к другим изменениям состояния. Это положение, названное для удобства ссылки "принципом детерминированности состояния", позволяет выразить энергию любой (равновесной или неравновесной, простой или сложной, открытой или закрытой, изолированной или неизолированной) системы в функции строго определенного числа независимых переменных и тем самым избежать недоопределения или переопределения системы, которое является источником большинства методологических ошибок существующих теорий. Это делает излишней *идеализацию процессов и систем*²⁾ в основаниях теории и позволяет придать основному уравнению энергодинамики характер тождества, остающегося справедливым во всем диапазоне реальных процессов.

Наконец, в отличие от полевых теорий энергодинамика изучает процессы, переходя от описания свойств элементов континуума к системе в целом подобно тому, как в механике переходят от описания движения точек к движению центра масс. Чтобы понять суть такого перехода, рассмотрим некоторую неоднородную систему, которая характеризуется

²⁾ Термин «энергодинамика», предложенный А. Вейником, подчеркивает, что речь в ней идет не только о тепловой форме движения.

³⁾ Этот подход требует сохранения всех значимых для исследователя взаимосвязей частей и целого.

⁴⁾ Таким образом, то, что в классической термодинамике рассматривается как «расширенная» система (включающая источники и приемники тепла), в энергодинамике является лишь подсистемой.

²⁾ что выражается понятиях *идеальный, обратимый, квазистатический, равновесный* и т.п.

неравномерным распределением плотности $\rho_i = d\Theta_i/dV$ каких-либо экстенсивных физических величин Θ_i , характеризующих ее свойства (например, массы системы M и всех ее компонентов M_k , их импульса \mathbf{P}_k , объема системы V , ее энтропии S , электрического заряда области Θ_e и т.д.). Тогда положение радиус-вектора \mathbf{R}_i центра этой величины определится известным выражением:

$$\mathbf{R}_i = \theta_i^{-1} \int \mathbf{r} \rho_i(\mathbf{r}, t) dV, \quad (1)$$

где \mathbf{r} – «бегущая» (эйлерова) координата точки поля; V – объем системы. Согласно (1), в пространственно неоднородных средах возникают некоторые «моменты распределения» \mathbf{Z}_i параметра Θ_i :

$$\mathbf{Z}_i = \Theta_i \mathbf{R}_i = \int \mathbf{r} \rho_i(\mathbf{r}, t) dV. \quad (2)$$

Равенство нулю моментов распределения для произвольной изолированной системы означает ее пространственную однородность и, следовательно, служит достаточным условием прекращения в ней каких-либо макропроцессов, поскольку в таких системах они обусловлены исключительно отсутствием внутреннего равновесия. Поэтому эти моменты \mathbf{Z}_i являются мерой отклонения системы в целом от внутреннего равновесия по одному из ее свойств (составляющих внутренней энергии).

Вектор \mathbf{R}_i может быть выражен произведением базисного (единичного) вектора \mathbf{e}_i , характеризующего его направление, на модуль $R_i = |\mathbf{R}_i|$ этого вектора. Поэтому полное изменение момента распределения \mathbf{Z}_i может быть представлено тремя слагаемыми:

$$d\mathbf{Z}_i = \mathbf{R}_i d\Theta_i + \Theta_i d\mathbf{R}_i + \Theta_i R_i d\mathbf{e}_i. \quad (3)$$

Согласно этому выражению, изменение любого экстенсивного свойства системы является результатом протекания в системе трех независимых процессов. Первый из них, протекающий в условиях $\mathbf{R}_i = \text{const}$, состоит в равномерном изменении физической величины Θ_i во всех частях системы за счет переноса ее через границы системы. Такие процессы напоминают равномерное выпадение осадков на неровную (в общем случае) поверхность). Именно такие процессы в частном случае пространственно однородных сред изучает классическая термодинамика.

Процессы, характеризуемые вторым слагаемым правой части (3), протекают в условиях постоянства параметров θ_i и состоят в перераспределении их плотности $\rho_i = d\Theta_i/dV$ между частями (областями) неоднородной системы при понижении, например, температуры T , давления p , концентраций k -х веществ c_k , их импульсов \mathbf{P}_k и т.п. в одних частях системы, и их повышении – в других. Такие процессы обусловлены переносом части величины θ_i внутри системы и напоминают выравнивание вязкой жидкости в сосуде. Третья категория процессов выражается в переориентации вектора \mathbf{R}_i , как это происходит, например, при ориентационной поляризации в «жестких» диэлектриках и магнетиках. Величину $d\mathbf{e}_i$, характеризующую изменение направления момента распределения, удобнее представить через вектор угла поворота $\boldsymbol{\varphi}$, нормальный к плоскости вращения, образованной векторами \mathbf{e}_i и $d\mathbf{e}_i$ [3]. Тогда последнее слагаемое в (3) определится внешним произведением $d\boldsymbol{\varphi}_i \times \mathbf{Z}_i$ векторов $d\boldsymbol{\varphi}_i$ и \mathbf{Z}_i .

Поскольку дальнейшее разложение векторов \mathbf{Z}_i невозможно, все протекающие в неоднородных системах процессы можно разделить на три группы: *переноса*, *перераспределения* и *переориентации*. Обозначая величину сдвига (смещения) $\mathbf{e}_i d\mathbf{R}_i$ вектора \mathbf{Z}_i через $d\mathbf{R}_i$, находим, что искомыми координатами названных выше процессов могут служить параметры Θ_i , \mathbf{R}_i и $\boldsymbol{\varphi}_i$, так что внутренняя (собственная) энергия \mathcal{E} изолированной неоднородной системы как функция ее состояния имеет в общем случае вид $\mathcal{E} = \mathcal{E}(\Theta_i, \mathbf{R}_i, \boldsymbol{\varphi}_i)$, где $i = 1, 2, \dots, n$ – число ее составляющих, а ее полный дифференциал выражается соотношением:

$$d\mathcal{E} \equiv \sum_i \Psi_i d\Theta_i - \sum_i \mathbf{F}_i \cdot d\mathbf{R}_i - \sum_i \mathbf{M}_i \cdot d\boldsymbol{\varphi}_i, \quad (4)$$

где $\Psi_i \equiv (\partial\mathcal{E}/\partial\Theta_i) = \mathbf{R}_i^{-1}(\partial\mathcal{E}/\partial\mathbf{Z}_i)$ – так называемые обобщенные потенциалы системы, смысл которых станет ясен чуть позже; $\mathbf{F}_i \equiv -(\partial\mathcal{E}/\partial\mathbf{R}_i)$ – обобщенные силы в их обычном (ньютоновском) понимании; $\mathbf{M}_i \equiv -(\partial\mathcal{E}/\partial\boldsymbol{\varphi}_i) = \mathbf{F}_i \times \mathbf{R}_i$ – обобщенные крутящие (ориентационные) моменты [4-6].

Это выражение представляет собой результат дальнейшего обобщения термодинамики на пространственно неоднородные среды. Оно применимо как к изолированным системам в целом (для которых $d\mathcal{E} = 0$), так и для любой ее макроскопической части, рассматриваемой в качестве подсистемы (в этом случае $d\mathcal{E} \neq 0$). В частном случае неподвижных ($\mathbf{P}_k = 0$) и внутренне равновесных систем, в которых отсутствуют процессы перераспределения и переориентации ($d\mathbf{R}_i, d\boldsymbol{\varphi}_i = 0$), тождество (4) переходит в объединенное уравнение 1-го и 2-го начал классической термодинамики открытых систем в форме соотношения Гиббса

$$dU \equiv \sum_i \Psi_i d\Theta_i = TdS - pdV + \sum_k \mu_k dM_k, \quad (5)$$

члены которого характеризуют соответственно элементарный теплообмен системы $dQ = TdS$, элементарную работу расширения $dW_p = pdV$ и элементарный конвективный перенос энергии k -м веществом (энергомассообмен) $dU_k = \mu_k dM_k$ ¹⁾. При этом обобщенные потенциалы Ψ_i приобретают смысл соответственно абсолютной температуры T , абсолютного давления p и химического потенциала k -го вещества μ_k , а в более общем случае движущейся поливариантной системы – векторов линейной и угловой скорости \mathbf{v} и $\boldsymbol{\omega}$, электрического потенциала области ϕ и т.д. Согласно (4) и (5), для неизолированных систем функция \mathcal{E} имеет смысл суммы всех действий, которые может оказать рассматриваемая система на окружающую среду. Это соответствует известному определению понятия энергии системы, данному ей Дж. Максвеллом. В отсутствие каких-либо воздействий на систему ($dQ, dW_i, dU_k = 0$) ее энергия \mathcal{E} неизменна, так что уравнения (4) и (5) выражают закон сохранения энергии. Этот закон выполняется независимо от того, чем вызвано изменение параметров Θ_i, \mathbf{R}_i и $\boldsymbol{\varphi}_i$ – внешним энергообменом или внутренними (в том числе релаксационными) процессами [3,4].

Тождество (4) удобно записать в форме, содержащей время t в качестве физического параметра:

$$d\mathcal{E}/dt \equiv \sum_i \Psi_i d\Theta_i/dt - \sum_i \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{v}_i - \sum_i \mathbf{M}_i \cdot \boldsymbol{\omega}_i, \quad (6)$$

где $\mathbf{v}_i \equiv \mathbf{e}_i d\mathbf{R}_i/dt$ – поступательная (трансляционная) скорость перемещения полевой величины Θ_i ; $\boldsymbol{\omega}_i \equiv d\boldsymbol{\varphi}_i/dt$ – угловая скорость ее вращения (переориентации). В частном случае, когда параметр Θ_i имеет смысл массы k -го компонента системы, величины \mathbf{v}_k и $\boldsymbol{\omega}_k$ характеризуют его линейную и угловую скорость.

Выражение (4) является наиболее общим из известных уравнений закона сохранения энергии, поскольку справедливо для систем с любым числом составляющих энергии [7]. В то же время оно является и наиболее детальным из них, поскольку описывает все возможные категории процессов, протекающих в неоднородных системах. Будучи дополненным условиями однозначности, относящимися к частным свойствам исследуемых систем (в том числе уравнениями состояния газов, жидкостей и твердых тел, 2-м и 3-м началами для термических систем; законами Ньютона, Кулона, Фарадея, Ома и т.п. для электродинамики; уравнениями Фика, Фурье, Ома, Дарси, Ньютона и т.п. для теории переноса), тождество (6) позволяет решать задачи, относящиеся к механике, термодинамике, гидродинамике, электродинамике и другим дисциплинам, а также справляться с проблемами, возникающими

¹⁾ Символ d подчеркивает, что речь идет об элементарно малом количестве, а не о полном дифференциале какой-либо величины.

ми на их стыках. Поскольку сами эти условия однозначности привлекаются энергодинамикой извне, а не закладываются (как в других дисциплинах) в основание теории, энергодинамика как метод исследования становится независимой от модельных представлений, гипотез и постулатов, используемых при формулировании этих условий однозначности. Все это позволяет ей сохранить все достоинства классической термодинамики как строго дедуктивного метода, главным из которых является, без сомнения, непреложная справедливость ее следствий в пределах применимости упомянутых условий однозначности. При этом энергодинамика, в отличие от термодинамики, частично берет на себя функции объяснения тех или иных процессов, выявляя причину их возникновения, направление и скорость, взаимосвязь с другими процессами, «побочные» эффекты, конечный результат и т.п. В частности, в энергодинамике вполне естественно рассматривать физический вакуум как неизменный невещественный компонент любой материальной системы, принимая напряженность и индукцию физических полей в нем за его энергетические параметры. Все это наряду с междисциплинарным характером энергодинамики обуславливают ее чрезвычайную эвристическую ценность как средства исследования природы и позволяет получать нетривиальные результаты практически в каждой области ее приложения.

3. Важнейшие следствия энергодинамики. Упомянутые выше принципы построения энергодинамики превращают ее в единую теорию процессов переноса и преобразования различных форм энергии безотносительно к их принадлежности к той или иной области знания. В этом отношении все упомянутые выше дисциплины можно рассматривать как частные случаи энергодинамики. Ее метод универсален и применим для самого широкого круга объектов, начиная от мегасистем, развивающихся минуя состояние равновесия, до объектов микромира, которым тепловая форма движения не свойственна вообще. Ниже мы увидим, насколько радикальными могут быть изменения в ряде фундаментальных дисциплин при их рассмотрении с более общих позиций энергодинамики.

3.1. Термодинамика. Свойственный энергодинамике междисциплинарный подход обнаруживает возможность дальнейшего обобщения термодинамического метода исследования на пространственно неоднородные, изолированные, ориентируемые и т.п. системы с любым конечным числом степеней свободы. Прежде всего, такой подход оказался полезным для самой термодинамики. Во-первых, он сделал совершенно излишним использование понятий равновесных процессов, идеальных газов и идеальных циклов для обоснования важнейших положений классической термодинамики. Во-вторых, более общий подход позволил уточнить границы применимости ее принципов. Это коснулось прежде всего принципа возрастания энтропии. Энтропия в энергодинамике понимается всего лишь как один из параметров, характеризующий тепловую форму движения и имеющий смысл «термоимпульса» - количества внутреннего движения в системе, утратившего векторную природу вследствие его хаотичности [8]. При этом становится особенно очевидным, что термодинамическая энтропия не может служить критерием эволюции систем, не обладающих термической степенью свободы или располагающих такими степенями свободы, для которых самопроизвольное течение процессов приводит к упорядочиванию системы [9]. В качестве альтернативы энергодинамика предлагает более общее и более «физичное» понятие упорядоченной энергии (инергии) E как количественной меры превратимой части энергии (т.е. как аналога понятия внешней энергии, утрачивающего свой смысл в изолированных системах):

$$E = \sum_i E_i = \sum_i \mathbf{X}_i \cdot \mathbf{Z}_i, \quad (7)$$

где $\mathbf{X}_i = \mathbf{F}_i / \Theta_i$ – так называемые термодинамические силы.

Этот параметр намного более информативен, нежели энтропия, и способен, в отличие от нее, отразить направление эволюции не только системы в целом, но и каждой степени ее

свободы в отдельности, и не только приближение ее к равновесию ($dE = \sum_i \mathbf{X}_i \cdot d\mathbf{Z}_i < 0$), но и удаление от него ($dE = \sum_i \mathbf{X}_i \cdot d\mathbf{Z}_i > 0$) [10]. Кроме того, он применим к любым (открытым и закрытым, равновесным и неравновесным, изолированным и неизолированным) системам.

Что же касается принципов исключенного вечного двигателя 2-го рода и недостижимости абсолютного нуля температуры (2-го и 3-го законов термодинамики), то их анализ с позиций энергодинамики, напротив, обнаруживает их универсальность, т.е. возможность распространения на другие формы энергии [11,12].

Далее, осуществленное энергодинамикой расширение пространства переменных с введением параметров пространственной неоднородности \mathbf{F}_i и \mathbf{R}_i (или \mathbf{X}_i и \mathbf{Z}_i) позволило дать последовательно термодинамическое (не основанное на гипотезах, постулатах и соображениях статистико-механического характера) обоснование всех важнейших положений теории необратимых процессов переноса (ТНП), включая обобщенные законы переноса Онсагера [13] и его знаменитые соотношения взаимности [14,15]. При этом было показано, что какой-либо i -й независимый процесс переноса (тепла, вещества, заряда, импульса и т.п.) порождается не всеми действующими в системе термодинамическими силами, а всеми компонентами одной (результатирующей) силы \mathbf{F}_i [16,17]. На этой основе был предложен новый, термокинетический метод исследования стационарных эффектов наложения разнородных нестатических процессов, основанный на взаимной компенсации составляющих этой силы в состоянии частичного равновесия [18]. Этот метод позволил преодолеть ограниченность термодинамики необратимых процессов линейными системами и состояниями вблизи равновесия.

Результатом такого подхода явилась возможность дальнейшего обобщения термодинамической теории необратимых явлений переноса на процессы полезного преобразования энергии [19]. Единство математической модели процессов преобразования энергии, опирающейся на уравнение (6), сделало еще более отчетливым единство законов преобразования любых форм энергии [20] и позволило заложить основы теории производительности энергопреобразующих систем [21], а также теории подобия процессов энергопреобразования [22]. Важнейшим следствием энергодинамики, однако, следует считать вывод о возможности создания альтернаторов, т.е. устройств, преобразующих энергию активного (возбужденного) физического вакуума, в частности энергию электрических, магнитных и гравитационных полей, являющихся мерой его напряженного состояния [23].

2. Механика. Важнейшим результатом рассмотрения механики с более общих позиций энергодинамики является обобщение всех трех законов Ньютона. В частности, из основного уравнения энергодинамики (4) непосредственно следует, что в изолированной системе ($d\mathcal{E}/dt = 0$) в отсутствие каких-либо сил и их моментов ($\mathbf{F}_i, \mathbf{M}_i = 0$) импульс системы \mathbf{P} и момент ее количества движения \mathbf{L} остаются неизменными ($\mathbf{P} = M\mathbf{v} = \text{const}; \mathbf{L} = I\boldsymbol{\omega} = \text{const}$). Это положение, утверждающее неизменность состояния движения или покоя изолированной системы, обобщает 1-й закон Ньютона (закон инерции), распространяя его на вращающиеся системы без каких-либо предположений относительно однородности или изотропности пространства и времени [24].

Столь же несложно показать, что и 2-й закон Ньютона вытекает как частный случай из законов энергодинамики. При этом энергодинамика позволяет ввести наряду с понятием силы \mathbf{F}_i более общее понятие термодинамической силы \mathbf{X}_i как количественной меры взаимодействия между частями замкнутой системы. Поскольку в (6), сила \mathbf{F}_i определяется в условиях постоянства Θ_i и ϕ_i , то $(\partial\mathcal{E}/\partial\mathbf{R}_i) = \Theta_i (\partial\mathcal{E}/\partial\mathbf{Z}_i)$, откуда следует :

$$\mathbf{X}_i \equiv - (\partial\mathcal{E}/\partial\mathbf{Z}_i) = \mathbf{F}_i/\Theta_i \quad (8)$$

Это выражение устанавливает связь термодинамических сил \mathbf{X}_i с силами \mathbf{F}_i в их ньютоновском понимании и дает наиболее общее определение понятия силы $\mathbf{F}_i \equiv \mathbf{X}_i\Theta_i$. Такой подход вскрывает единство физического смысла и размерности сил различной природы:

ускоряющей силы $\mathbf{F}_m \equiv (\partial\mathcal{E}/\partial\mathbf{R}_m) = M\mathbf{v}\nabla\mathbf{v}$, центробежной силы $\mathbf{F}_\omega \equiv (\partial\mathcal{E}/\partial\mathbf{R}_\omega) = \partial(Mv^2/2)/\partial\mathbf{R}_\omega = M\omega^2\mathbf{R}_\omega$ (где \mathbf{R}_ω – радиус-вектор точки в системе отсчета, связанной с мгновенным центром ее вращения), электростатической силы $\mathbf{F}_e \equiv (\partial\mathcal{E}/\partial\mathbf{R}_e) = -\Theta_e\nabla\varphi$, силы диффузии k -х веществ $\mathbf{F}_k \equiv (\partial\mathcal{E}/\partial\mathbf{R}_k) = -M_k\nabla\mu_k$, «термодвижущей» силы $\mathbf{F}_s \equiv (\partial\mathcal{E}/\partial\mathbf{R}_s) = -S\nabla T$ и т.п.[3]. На этом основании именно «энергодинамическое» определение силы (4) следует считать обобщенным аналитическим выражением 2-го закона Ньютона, а не соотношение $\mathbf{F} = M\mathbf{a}$, относящееся лишь к процессу ускорения. Действительно, если в кинематике точки скорость рассматривается только как функция времени $\mathbf{v} = \mathbf{v}(t)$, то в энергодинамике учитывается то обстоятельство, что тело или частицу нельзя ускорить, не перемещая их в пространстве. Поэтому в действительности скорость тела, движущегося по произвольной траектории $\mathbf{R} = \mathbf{R}(t)$, меняется в зависимости от ее положения в пространстве, т.е. является сложной функцией времени $\mathbf{v} = \mathbf{v}[\mathbf{R}(t)]$ и $d\mathbf{R}_m/dt = (\mathbf{v}\cdot\nabla)\mathbf{v}$. Хотя это выражение формально сохраняет смысл полной производной от вектора скорости по времени $\mathbf{a} \equiv d\mathbf{v}/dt$ (ввиду неприменимости к скорости понятия «локальной производной»), из него следует, в частности, необходимость уточнения физического содержания понятия ускорения.

Таким образом, традиционную формулировку 2-го закона Ньютона: «сила, действующая на тело, равна произведению массы тела на сообщаемое этой силой ускорение» следует заменить на более общую: «движущая сила какого-либо неравновесного процесса равна производной от энергии системы по координате этого процесса» [24].

С позиций энергодинамики коррективы необходимо внести и в 3-й закон Ньютона. Из (6) для произвольной пространственно неоднородной системы, части которой перемещаются в противоположных направлениях со скоростями \mathbf{v}_i и \mathbf{v}_j под действием сил \mathbf{F}_i и \mathbf{F}_j следует:

$$-dE/dt = \mathbf{F}_i\cdot\mathbf{v}_i + \mathbf{F}_j\cdot\mathbf{v}_j = 0. \quad (9)$$

Это выражение представляет собой не что иное, как закон сохранения энергии (точнее, мощности) применительно к механическим явлениям. Это соотношение является математической формой представления закона действия рычага Архимеда, который в оригинале звучит так: «сколько проигрываем в скорости, столько выигрываем в силе». Лишь в частном случае, когда $\mathbf{v}_i = \mathbf{v}_j$ (например, когда совершение работы сопровождается перемещением границы раздела двух тел) $\mathbf{F}_i = -\mathbf{F}_j$, что составляет содержание 3-го закона Ньютона в его традиционной трактовке («действие равно противодействию» или «действию всегда соответствует и равная реакция»). Поэтому именно выражение (9) следует считать обобщенной формулировкой 3-го закона Ньютона. Именно из нее следует, в частности, и ньютоновское определение силы $\mathbf{F} = M\mathbf{a}$. Следует также заметить, что в обобщенной формулировке 3-го закона Ньютона, соответствующей выражению (9), отсутствует требование, чтобы силы действия \mathbf{F}_i и противодействия \mathbf{F}_j , а также векторы скорости \mathbf{v}_i и \mathbf{v}_j были направлены по одной прямой. Напротив, уравнение (4) учитывает возможность возникновения крутящих моментов в случае, когда силы действия и противодействия оказываются направленными не по одной прямой. Это и объясняет известные случаи нарушения 3-го закона Ньютона, в частности, при взаимодействии двух проводников с током. Кроме того, становится очевидным, что в природе существуют лишь пары сил и их моменты, а не одиночные силы, которыми оперирует механика. В самом деле, во всех случаях, когда мы говорим о действии силы на тело, мы сознательно исключаем из рассмотрения противодействие, которое оказывает тело на «источник» силы. Наличие такого противодействия также вытекает из закона сохранения энергии для изолированной системы, поскольку ее энергия остается неизменной именно вследствие равенства действия противодействию. Насколько это важно, показывает такой пример. Известно, насколько широко применяются в механике и электродинамике понятия «пробного» заряда или «пробной» массы. При изучении их движения как самостоятельных объектов исследования приходится учитывать центростремительные, Кариолисовы силы и магнитные составляющие силы Лоренца, действие кото-

рых направлено по нормали к траектории движения. Отсюда следует неизбежный вывод о том, что эти силы не совершают работы и, следовательно, не изменяют энергии системы. Между тем с позиций энергодинамики изменение импульса одной из частей неоднородной системы неизбежно сопровождается равным по величине и противоположным по знаку изменением импульса остальных ее частей. Поскольку силы, вызывающие это изменение импульса, направлены в противоположную сторону от «пробной силы», неизбежен вывод, что в замкнутой системе возникают моменты M_i упомянутых выше сил, которые и совершают работу переориентации. Пренебрежение этим обстоятельством нарушает не только искажает реальную картину явления, но и нарушает закон сохранения энергии. Поэтому с позиций энергодинамики во всех случаях, когда мы говорим о силах X_i , F_i или их моментах, мы в действительности имеем в виду количественную меру взаимодействия, т.е. пару сил или пару моментов.

3. Квантовая механика. Рассмотрение законов, которым подчиняются объекты микромира, с более общих позиций энергодинамики показывает, что классическая физика не столь беспомощна перед квантовыми законами действия света, как принято считать. Если в качестве системы рассматривать не одиночный атом (как в модели Бора), а всю совокупность атомов, находящихся в поле межатомных сил и внешних силовых полей, то становится ясным, что излучение атомов происходит при торможении электронов сторонними (нецентральными) силами, исходящими из внешних для атома полей. При этом в каждом акте торможения электрона совершается работа против этих сил и возникает единичное возмущение внешнего силового поля, которое распространяется в нем в виде солитона (уединенной электромагнитной волны). Последовательность таких солитонов и образует волну, частота которой определяется числом актов торможения электрона в единицу времени, а амплитуда – величиной изменения скорости электрона. Свойства солитона, как известно, близки к свойствам частицы, что и объясняет природу дуализма «волна - частица». Процесс торможения электрона ограничен во времени, поэтому энергия и излучается порциями (квантами). В этом порядке идей постулат Планка о квантовании энергии излучения вовсе не выглядит противоречащим классической физике. Этого достаточно, чтобы дать классическое объяснение всех закономерностей фотоэффекта [25], предложить термодинамический вывод стационарного уравнения Шрёдингера (в котором постоянная Планка заменена функцией параметров орбиты электрона) [26] и получить известные выражения для спектральных серий Бальмера, Лаймана, Пашена и др. [27], в которых квантовые числа приобретают смысл числа актов торможения электрона за один виток его орбиты. Более того, предлагаемый подход позволяет по известной частоте излучения рассчитать параметры орбиты электрона, что выходит за рамки существующей теории. При этом снимается также ряд трудностей квантовой теории (в том числе вероятностной трактовки волновой функции) [28].

4. Электродинамика. Переход от рассмотрения единичного «пробного» заряда к изучению поведения всей совокупности зарядов, произвольным образом распределенных в пространстве, заставляет по-новому взглянуть на происхождение ряда трудностей современной электродинамики. Прежде всего, это касается закона Кулона, согласно которому бесконечное сближение точечных зарядов обращает их потенциал в бесконечность. Для произвольной же совокупности зарядов, образующих электронейтральную систему, их совмещение в пространстве обращает электрический потенциал в нуль. Это указывает на необходимость учета в законе Кулона минимального расстояния R_0 между центрами двух заряженных подсистем, вследствие чего этот закон принимает вид [2,3]:

$$\Psi_e = f_e e (1/R - 1/R_0), \quad (10)$$

где Θ_e – полеобразующий электрический заряд; R, R_0 – текущее и исходное смещение зарядов подсистем (расстояние между центрами подсистем). Это выражение не нарушает закона Кулона. Однако расходимости при этом не возникают.

Далее, в соответствии с требованиями термодинамики необратимых процессов энергодинамика делает необходимым дополнение силы Лоренца другими составляющими результирующей силы, в частности, «термодвижущей» силой $-S\nabla T$, ответственной за целую группу так называемых термоэлектрических эффектов [2,3].

Наконец, учет моментов распределения \mathbf{Z}_i как обязательного условия протекания в изолированной системе каких-либо процессов позволяет энергодинамике обобщить предложенное Максвеллом понятие вектора электрического смещения на все без исключения составляющие энергии системы [3]. Такой подход позволил предложить термодинамический (не основанный на модельных представлениях) вывод уравнений электромагнитного поля Максвелла [29] и выявить неполноту их современного вида, обусловленную заменой Хэвисайдом полных производных по времени от векторов электрической и магнитной индукции $d\mathbf{D}/dt$ и $d\mathbf{B}/dt$ частными производными $(\partial\mathbf{D}/\partial t)$ и $(\partial\mathbf{B}/\partial t)$ [30]. Восстановление исходной формы уравнений Максвелла проливает новый свет на происхождение и сущность целого ряда явлений, не находящих объяснения в рамках существующей теории из-за отсутствия в ней конвективной составляющей токов смещения.

5. Физическая химия и биофизика. Распространение термодинамического метода на пространственно неоднородные среды вскрывает векторную природу химических реакций, происходящих в гальванических элементах, поточных реакторах, клеточных мембранах и т.п., и позволяет дать математическое описание таких реакций. При этом в отличие от описания Де Донде движущей силой реакции становится градиент локального химического сродства какой-либо r -й реакции $A_r\xi_r$, выражающегося произведением ее стандартного сродства A_r и локального значения степени полноты этой реакции ξ_r как функции текущей концентрации реагентов [31]:

$$\mathbf{J}_r = -L_r \text{grad}(A_r\xi_r) \quad (11)$$

\mathbf{J}_r - поток реагентов r -й реакции; L_r – константа ее скорости.

Понимание единой векторной природы локальных химических реакций, протекающих в клеточных мембранах и процессов метаболизма в них снимает известные трудности приложения теории необратимых процессов к биологическим системам, обусловленные недопустимостью в ней взаимосвязи явлений различного тензорного ранга [32].

Далее, вытекающая из принципа детерминированности необходимость различения условий однозначности процессов теплообмена, массообмена, диффузии, осмоса и фильтрации потребовало уточнения понятий теплоты и работы в открытых системах [33] как процессов, не связанных с изменением состава системы. Далее, появилась возможность введения понятия результирующей движущей процессов переноса [14] и перехода к более простой (диагональной) форме законов переноса [34]:

$$\mathbf{J}_i = L_{ii}\mathbf{F}_i = L_{ii}\sum_j \mathbf{F}_{ij}, \quad (12)$$

где \mathbf{J}_i – потоки тепла, вещества, заряда, импульса и т.д.; \mathbf{F}_{ij} – компоненты единственной (результирующей) движущей силы i -го процесса \mathbf{F}_i ; L_{ii} – кинетические коэффициенты. Это позволило разделить термодинамические и кинетические факторы, определяющие скорость процессов переноса, и сократить число кинетических коэффициентов L_{ii} от $n(n+1)/2$ до n . Кроме того, такой подход позволил установить истинное происхождение так называемых «стационарных эффектов наложения» разнородных процессов, объяснив их как следствие равновесия противоборствующих сил, а не результат «увлечения» одного потока другим.

Одновременно вскрылась несостоятельность установившегося мнения о том, что материальное равновесие может наступить только при наличии теплового равновесия.

В свою очередь, это повлекло за собой необходимость замены химического потенциала компонента соответствующим этим условиям осмотическим, диффузионным фильтрационным и т.п. потенциалами, т.е. пересмотр условий материального равновесия, найденных Гиббсом [35]. Однако главным результатом приложения энергодинамики следует считать вывод термодинамики необратимых процессов за рамки линейности [36].

6. Синергетика и теория эволюции. Изучение проблем эволюции с позиций энергодинамики обнаруживает существование в окружающем нас мире тенденции не только к хаосу, но и к упорядочиванию, что проявляется в самопроизвольном установлении неоднородного распределения массивных объектов во Вселенной, единой ориентации спинирующих объектов (от систем ядерных спинов до спиралей Галактик), законах роста кристаллов и т.п. [37]. С другой стороны, становится очевидным, что протекание в биосистемах процессов упорядочивания (так называемая «самоорганизация») является результатом совершения над нею (или в ней самой) полезной работы. Эта работа сопровождается убылью инергии одних и вынужденным увеличением инергии других степеней свободы системы. Это заставляет критически отнестись к концепции «рождения порядка из хаоса», тем более что внутренние процессы энергопревращения сопровождаются уменьшением свободной энергии системы в целом, т.е. осуществляются за счет «порядка» в системе более высокой иерархии [38]. Удастся показать также, что все «три кита» дарвиновского учения об эволюции – *изменчивость, наследственность и приспособляемость* – являются следствием энергодинамики в ее приложении к расширенным системам [39].

6. Теория относительности. В соответствии с основным уравнением энергодинамики (4), в замкнутых системах, не находящихся во внутреннем равновесии, действуют внутренние силы \mathbf{F}_i и их моменты \mathbf{M}_i , которые способны вызвать изменение состояния движения такой системы в целом. Это положение не зависит от структуры физического вакуума и может служить основой для разработки новых принципов движения и транспортных средств.

С другой стороны, это означает, что движение замкнутой системы «по инерции» не всегда будет прямолинейным и равномерным – оно может быть и вращательным. Поэтому всеобщий принцип относительности, согласно которому равномерное и прямолинейное движение замкнутой системы не влияет на ход протекающих в ней процессов и потому оставляет все физические законы инвариантными в любой инерциальной системе отсчета, не может оставаться справедливым для всех систем и всех процессов без исключения.

Далее, принципы энергодинамики свидетельствуют о необходимости измерения всех параметров системы в абсолютных шкалах, остающихся неизменными при любых протекающих в ней процессах. Впервые это было осознано в механике жидкостей и газов для величины давления. С появлением термодинамики необходимость знания абсолютной величины стала ясной и в отношении температуры T , а с переходом к открытым системам – и в отношении энтропии S . Но лишь в энергодинамике это требование стало относиться к любым параметрам системы. Действительно, если бы величина моментов $\mathbf{Z}_i = \Theta_i \mathbf{R}_i$ (или их сомножителей Θ_i и \mathbf{R}_i) изменялась вследствие смещения начала их отсчета под влиянием каких-либо причин, энергия изолированной системы $\mathcal{E} = \mathcal{E}(\Theta_i, \mathbf{R}_i)$ как функция этих переменных также изменялась бы, что противоречило бы закону ее сохранения. Это означает, что энергодинамику при желании можно называть *теорией абсолютноного*.

7. Единая теория поля. Проблема единства физического знания нашла свое воплощение в многочисленных попытках создания единой теории поля, которая объединила бы теории электромагнитного и гравитационного полей. Основная идея единой теории поля состоит в том, чтобы для любого физического поля, входящего в уравнения единой теории, найти

такую систему отсчета, в которой это поле обращалось в нуль¹⁾. При таком подходе изучение свойств конкретных объектов и протекающих в них процессов постепенно уступило место изучению свойств самих систем отсчета.

Существующая тенденция геометризации физики, т.е. попытка свести все многообразие явлений к геометрическим свойствам пространства-времени, выглядит с позиций энергодинамики по меньшей мере странной. Она идет вразрез с общей тенденцией развития естествознания «от простого к сложному», которая привела к дифференциации научных дисциплин и к обнаружению огромного пласта термомеханических, термоэлектрических, термохимических, термомагнитных, электрокинетических, гальваномагнитных и т.п. явлений на стыках этих наук. Эти явления обусловлены именно противоборством явно различимых сил, поэтому попытки подмены одной силы силами другой природы путем отыскания «единого поля» приводит к глубокому кризису в понимании физической реальности и представляются нам движением вспять.

Альтернатива, предложенная энергодинамикой, выражается в унификации методов нахождения сил и взаимодействий, благодаря чему механические, электрические, магнитные, гравитационные, термические, химические, гидродинамические и т.п. силы приобретают *единое определение, единую размерность и единый смысл*. Это и открывает путь к единообразному описанию явно различных процессов и форм движения материального мира [40].

Заключение. Вышеупомянутые принципы построения энергодинамики превращают ее в весьма общую теорию процессов переноса и преобразования любых форм энергии. Ее метод универсален и применим для самого широкого круга объектов, начиная от мегасистем, развивающихся минуя состояние равновесия, до объектов микромира, которым тепловая форма движения не свойственна вообще. Наряду с междисциплинарным характером энергодинамики это обуславливает ее чрезвычайную эвристическую ценность как средства исследования природы

Литература.

1. *Эткин В.А.* Термодинамика неравновесных процессов переноса и преобразования энергии. - Саратов: Изд.-во Саратов. Гос. университета, 1991.- 168 с.
2. *Эткин В.А.* Синтез и новые приложения теорий переноса и преобразования энергии. - Автореферат диссертации на соискание уч. степени докт. техн. наук. - М.: МЭИ, 1998. - 35 с.
3. *Эткин В.А.* Термокинетика (Термодинамика неравновесных процессов переноса и преобразования энергии). Тольятти, 1999.- 228 с.
4. *Эткин В.А.* Основы энергодинамики. – Тольятти, 1992. - 120 с.
5. *Эткин В.А.* Об основном уравнении неравновесной термодинамики. //Журн. физ. химии.- 1988- Т.62.-№8.- С.2246-2249.
6. *Эткин В.А.* К термодинамике ориентируемых систем. http://zhurnal.lib.ru/e/etkin_w_a/.
7. *Эткин В.А.* О некорректном обобщении термодинамики. http://zhurnal.lib.ru/e/etkin_w_a/.
8. *Эткин В.А.* Многоликая энтропия. http://zhurnal.lib.ru/e/etkin_w_a/.
9. *Эткин В.А.* Энергия и анергия. http://zhurnal.lib.ru/e/etkin_w_a/.
10. *Эткин В.А.* Эксергия как критерий эволюции, равновесия и устойчивости неравновесных систем. // Журн. физ. химии.- 1992.- Т.66.-№5.- С.1205-1212.
11. *Эткин В.А.* О максимальном КПД нетепловых двигателей. /Теплотехника. М.: Высшая шк., 1980.- Вып.3.- С.43-45.

¹⁾ В случае гравитационного поля такая система отсчета связана со свободно падающим лифтом (в ней падающее под действием сил гравитации тело покоится).

12. Эткин В.А. Об универсальном характере 3-го начала термодинамики. http://zhurnal.lib.ru/editors/e/etkin_w_a/.
13. Эткин В.А. О форме законов многокомпонентной диффузии. // Журн. физ. химии.- 1994.- Т.68.-№12.- С.2115-2119.
14. Эткин В.А. Феноменологический вывод соотношений взаимности термодинамики необратимых процессов. //Химическая термодинамика и термохимия.-М.: Наука,1979.-С.8-13.
15. Эткин В.А. Соотношения взаимности обратимых процессов. // Сиб. физ.-техн. журнал.- 1993.-Вып.1.-С.2117-2121.
16. Эткин В.А. О единственности движущих сил необратимых процессов. //Журн. физ. химии.- 1989-Т.63.-№6.- С.1660-1662.
17. Эткин В.А. О форме законов многокомпонентной диффузии. // Журн. физ. химии.- 1994.- Т.68.-№12.- С.2115-2119.
18. Эткин В.А. Метод исследования линейных и нелинейных необратимых процессов. // Журн. физ. химии.- 1991.- Т.65.-№3.- С.642-651.
19. Эткин В.А. К неравновесной термодинамике энергопреобразующих систем. //Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук -1990.- Вып.6.-С.120-125.
20. Эткин В.А. О единстве законов преобразования энергии. http://zhurnal.lib.ru/e/etkin_w_a/.
21. Эткин В.А. К термодинамической теории производительности технических систем.// Известия РАН. Энергетика, 2000.- №1.- С. 99 - 106.
22. Эткин В.А. To the similarity theory of power plants. //Atti del 49° Congresso Nat. ATI.- Perugia, 1994.-V.4.-P.433-443.
23. Эткин В.А. Теоретические предпосылки создания альтернаторов. <http://sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/5349.html>.
24. Эткин В.А. Коррекция механики с позиций энергодинамики. http://zhurnal.lib.ru/e/etkin_w_a/.
25. Эткин В.А. О трактовке фотоэффекта. http://zhurnal.lib.ru/e/etkin_w_a/.
26. Эткин В.А. Термодинамический вывод уравнения Шрёдингера. http://zhurnal.lib.ru/e/etkin_w_a/.
27. Эткин В.А. О происхождении спектральных серий. http://zhurnal.lib.ru/e/etkin_w_a/.
28. Эткин В.А. Классические основания квантовой механики. http://zhurnal.lib.ru/e/etkin_w_a/.
29. Эткин В.А. Термодинамический вывод уравнений Максвелла. <http://sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/7628.html>.
30. Эткин В.А. О неполноте уравнений Максвелла. http://zhurnal.lib.ru/e/etkin_w_a/.
31. Эткин В.А. Химическая энергия открытых систем. http://zhurnal.lib.ru/e/etkin_w_a/.
32. Эткин В.А. К неравновесной термодинамике биологических систем. //Биофизика.-1995.- Т.40.- Вып.3.-С.668-676.
33. Эткин В.А. Теплота и работа в неравновесных процессах. // Изв. вузов. Энергетика.- 1988.-№4.-С.118-122.
34. Эткин В.А. Альтернативная форма обобщенных законов переноса. //Инж.-физич. журн., 1999.-Т.72.- №1. -С. 776-782.
35. Эткин В.А. О неадекватности условий материального равновесия. <http://www.citeclibrary.ru/rus/catalog/pages/7448.html>.
36. Эткин В.А. К термодинамической теории нелинейных необратимых процессов. // Журн. физ. химии.- 1985.- Т.59.-№3.- С.560-567.
37. Эткин В.А. О существующей в природе тенденции к порядку http://zhurnal.lib.ru/e/etkin_w_a/.
38. Эткин В.А. К термодинамической теории эволюции. http://zhurnal.lib.ru/e/etkin_w_a/.
39. Эткин В.А. Свободная энергия биологических систем. «Биофизика»,2003, Т.48, № 4, С.740-746.
40. Эткин В.А. Альтернатива полевым теориям. http://zhurnal.lib.ru/e/etkin_w_a/.

