

ЭНТРОПИЯ КАК АХИЛЛЕСОВА ПЯТА ТЕРМОДИНАМИКИ

Д.т.н., проф. В.Эткин

Аннотация

Доказана несостоятельность термодинамической энтропии ни как координаты теплообмена, ни как критерия необратимости неравновесных процессов. Обоснована необходимость замены энтропии более адекватным носителем внутренней тепловой энергии – термоимпульсом как количеством движения, утратившим векторную природу вследствие его хаотичности. Показано, что в реальных процессах «термоимпульс» изменяется как вследствие теплообмена, так и при наличии внутренних источников тепла, и способен как возрастать, так и убывать при взаимопревращениях упорядоченных и неупорядоченных форм внутренней энергии. Тем самым устраняется вопиющее противоречие термодинамики с эволюцией и опровергается теория «тепловой смерти» Вселенной. Выявлены другие преимущества термоимпульса, облегчающие понимание и усвоение термодинамики квазистатических и нестатических процессов.

1. Введение

Прошло более 150 лет с той поры, как в естествознание вошло понятие энтропии и принцип её возрастания в необратимых процессах [1]. Однако до сих пор не утихают споры о сокровенном смысле этого понятия и о физических основаниях упомянутого принципа [2]. Тем временем этот принцип привёл к утрате термодинамикой былой славы теории, «чьи выводы никогда и никем не будут опровергнуты [3]. В обширной научной и околонаучной литературе энтропии посвящены сотни книг и тысячи статей, где эти вопросы обсуждены с различных точек зрения [4]. Тем не менее до сих пор не устранено «вопиющее противоречие термодинамики с эволюцией [5] и не опровергнута убедительным образом теория тепловой смерти Вселенной Р. Клаузиуса [2]. Напротив, понятие энтропии перешагнуло границы физики и проникло в самые сокровенные области человеческой мысли. Наряду с термодинамической энтропией появилась статистическая, информационная, математическая, лингвистическая, интеллектуальная и т. п. энтропии, что внесло ещё большую неопределённость в это плохо поддающееся интуитивному восприятию понятие.

На этом фоне оставались безуспешными все попытки доказать некорректность понятия энтропии [6]. В моей монографии «Паралогизмы термодинамики»¹, депонированной ещё в 1978, но изданной лишь в 2015 году [7], проанализированы многочисленные попытки исследователей доказать искусственность этого параметра и его неадекватность существу дела ни как меры количества хаотического движения, ни как критерия необратимости реальных процессов. В 11 главах этой монографии, легшей в основу моей докторской диссертации по термодинамике (МЭИ, 1998), показано, что энтропия подобно раковой опухоли проникла во все сферы приложения термодинамики и нанесла непоправимый вред её репутации как теории, следствия которой носят непреложный характер [3]. Наряду с широко известным парадоксом Гиббса, так и нашедшим удовлетворительного решения в рамках классической термодинамики, далеко не очевидные противоречия возникли в области отрицательных абсолютных температур, нетепловых и релятивистских машин, квантовой механики, теории эволюции, космологии

¹ Паралогизмом называется ошибочное утверждение, кажущееся правдоподобным.

т. п. [7]. Как показано в ряде моих статей, энтропия стала настоящей «ахиллесовой пятой» термодинамики [8].

Цель настоящего доклада – вскрыть истоки того невероятного сочетания истины и заблуждений, которые связаны с происхождением и применением понятия энтропии и до настоящего времени препятствуют простому и ясному пониманию природы многих явлений, и предложить более простые и физически понятные критерии эволюции и инволюции окружающего нас мира в диалектическом их понимании.

2. Гносеологические корни понятия энтропии

Термодинамика как одна из фундаментальных дисциплин формировалась в то время, когда под напором новых опытных фактов рушилось представление о теплоте как неуничтожимом флюиде (теплороде), а вместе с ним, как казалось тогда, и основанная на нем теория тепловых машин Карно (1824) [2]. Эта теория ставила вопрос о движущей силе теплоты тела, у которого имеется перепад температур ΔT между теплоисточником и тепла как особой формы энергии, именуемой теплородом. Согласно этой теории, движущая сила тепла возникала, если в среде, обладающей теплородом, имелся перепад температур ΔT , и теплород, подобно воде в мельничном колесе, переходил от температуры T_1 к температуре $T_2 < T_1$, даже в том случае, когда он не изменял своей величины. При этом наивысший термический КПД «идеальной» тепловой машины, равный (если пользоваться современной терминологией) отношению развиваемой машиной мощности к потоку теплорода, определяется исключительно относительным перепадом температур $\Delta T/T_1$ и не зависит от природы вещества-носителя теплорода («рабочего тела»). Этот КПД понижался при любом уменьшении перепада температур $\Delta T = T_1 - T_2$, не связанном с совершением работы.

Как мы теперь понимаем, теория тепловых машин С. Карно отличалась простотой и ясностью, указывая на пути повышения КПД, полностью реализованные в дальнейшем в теплоэнергетике. Единственным её недостатком было отнесение понятия теплорода к энергии, а не к её материальному носителю. Однако в первой половине XIX века в понимании теплоты не было ясности. Большая часть исследователей рассматривала теплоту в одном ряду с такими явлениями, как свет, звук, электричество, магнетизм и т. п. [2]. Да и сам Р. Клаузиус называл полной теплотой тела сумму тепла, полученного им извне в процессе теплообмена, и теплоту, выделившуюся вследствие совершения в нём «работы дисгрегации» диссипативного характера. Однако ввиду отсутствия в то время способа описания внутренних процессов, протекающих в объекте исследования (системе), он вынужден был ограничиться определением теплоты как «энергии в состоянии переноса», т. е. как функции процесса, служащей количественной мерой процесса теплообмена [1].

Такая трактовка теплоты сразу ограничивала его «механическую теорию тепла» равновесными системами и квазистатическими (бесконечно медленными) процессами. Дело в том, что в неравновесных системах изменение любой формы энергии обусловлено как обменом ею с окружающей средой, так и превращением в неё других

форм энергии (так называемыми «внутренними источниками»). Это касается и теплоты как хаотической формы движения материи, изменение которой может быть вызвано не только трением, но и нуклеосинтезом, ядерными, химическими, фазовыми и т. п. превращениями.

Определив теплоту как меру теплообмена, Р. Клаузиус исключил эти источники из рассмотрения, представив термодинамическую систему как некую однородную (внутренне равновесную) среду. В такой системе любые изменения состояния обусловлены исключительно внешним энергообменом. Этот энергообмен он разделил на теплоту Q как количественную меру процесса теплообмена и на работу W как меру процесса, связанного с преодолением каких-либо сил F . Это нашло отражение в самом уравнении 1-го начала равновесной термодинамики Р. Клаузиуса:

$$Q = \Delta U + W. \quad (1)$$

Такая трактовка теплоты Q сразу ограничила его термодинамику равновесными («квазистатическими») процессами, практически не нарушающими равновесия, где внутренними источниками можно было пренебречь. Само словосочетание «равновесный процесс» включало в себя два несовместимых понятия «равновесие» и «процесс», поскольку под равновесием в термодинамике понимается состояние, характеризующееся прекращением любых макропроцессов [2]. Это противоречие наложило отпечаток на всю систему обоснования термодинамики, превратив её по существу в термостатику и исключив из теории теплоты основополагающие для инженеров и технологов понятия мощности и производительности процессов.

Осознание этой ограниченности привело в первой трети XX столетия к разработке теории необратимых процессов (ТНП), изучающей нестатические (протекающие с конечной скоростью) процессы [9, 10]. Эта теория вернула в термодинамику утратившее актуальность в равновесных процессах понятие силы. Она привела к пониманию различия «теплоты тела» как количественной меры внутренней тепловой энергии, и «теплоты процесса» как количественной меры теплообмена. Однако эта теория ограничивалась изучением чисто диссипативными процессами типа теплопроводности, электропроводности, диффузии и т. п., вызывающими появление упомянутых выше внутренних источников тепла. В дальнейшем эта теория была обобщена на нестатические процессы полезного преобразования любых форм энергии и получила название термокинетики [11]. В ней различие «теплоты тела» и «теплоты процесса» подчёркивается дополнительно обозначением первой через U_q , а второй – через Q , причём для бесконечно малых приращений энергии применяется знак полного дифференциала « d », а для элементарных количеств теплоты dQ как функции процесса – знак неполного дифференциала « d », что указывает на её зависимость от характера процесса. Разница между ними проявляется в том, что при прекращении процесса теплообмена ($Q, dQ = 0$) энергия системы U , остаётся неизменной ($U = \text{const}, dU = 0$).

Переосмысление понятия теплоты и расширение сферы применения термодинамического метода исследования потребовало пересмотра методологии обоснования основных положений неравновесной термодинамики и её построения «с чистого листа» при максимально бережном отношении к её классическому наследию. Это касается и поиска более общего параметра, который мог бы служить истинной экстенсивной мерой

внутренней тепловой энергии неравновесной системы U_q . Результаты такого пересмотра кратко излагаются в настоящем докладе.

3. Сущность энтропии как координаты теплообмена

Понимание теплоты Q как меры теплообмена потребовала от Р. Клаузиуса как основоположника равновесной термодинамики отыскания *координаты* этого процесса, т. е. параметра, с необходимостью изменяющегося в этом процессе и остающегося неизменным в его отсутствие (в адиабатических процессах). Р. Клаузиус воспользовался для этого теорией циклических тепловых машин С. Карно (1824) [2]. Само понятие цикла означает существование параметра, возвращающегося по его окончании к прежнему значению. В идеальном цикле Карно одним из таких параметров служила абсолютная температура T , а его КПД $\eta^K = 1 - T_2/T_1$ определялся постоянными температурами теплоисточника T_1 и теплоприемника T_2 . В таком случае, представляя любой цикл в виде бесконечного числа циклов Карно с элементарными количествами подводимого и отводимого тепла dQ_1 и dQ_2 и выражая его КПД $\eta_t = 1 - dQ_2/dQ_1$ как через температуры T_1 и T_2 , так и через эти теплоты [7], имеем:

$$\eta_t = 1 - dQ_2/dQ_1 = \eta^K = 1 - T_2/T_1 \quad (2)$$

Отсюда с учётом различного знака Q_1 и Q_2 следовало, что круговой интеграл от «приведённой теплоты» $\oint dQ/T$ обращается в нуль независимо от конфигурации цикла тепловой машины. Это означало, что его подынтегральное выражений представляло собой полный дифференциал некоего параметра состояния S , названного им *энтропией* [1]. Этот термин составлен из двух греческих слов «эн» (внутренний) и «тропос» (путь, траектория), и обозначал появление внутренних источников тепла.

Однако Р. Клаузиус пошёл ещё дальше и показал, что в неравновесных адиабатически изолированных системах, где такие источники имеются, энтропия может возрасти и самопроизвольно, без внешнего вмешательства. Для этого он положил как нечто само собой разумеющееся, что термический КПД η_t реальной тепловой машины при тех же температурах теплоисточника T_1 и теплоприемника T_2 и количествах подведенного Q_1 и отведенного Q_2 тепла меньше, чем в обратимом цикле Карно $\eta^K = 1 - T_2/T_1$. В таком случае возникало неравенство [12]: $dS > dQ/T$. Так возник принцип (закон) возрастания энтропии, отражающий одностороннюю направленность («стрелу времени») самопроизвольных процессов. Не видя ограничений этого принципа, Р. Клаузиус распространил его на всю Вселенную, что выразилась ярче всего в его крылатой фразе: «Энергия Вселенной неизменна. Энтропия Вселенной возрастает» [2]. Современники Клаузиуса немедленно усмотрели в этом выводе далеко идущие последствия, начиная от «сотворения мира» и «Большого взрыва», и кончая неизбежностью «тепловой смерти Вселенной». Попытка Л. Больцмана в 1911 г. «спасти» Вселенную от тепловой смерти путем трактовки энтропии как меры «молекулярного хаоса», а принципа её возрастания – как наиболее вероятного, но не неизбежного следствия 2-го начала термодинамики [10], не решила этой проблемы, поскольку «физические основания монотонного возрастания энтропии...остались невыясненными [13]. Характерно, что признаки «тепловой смерти» Вселенной не проявились и после 13,5 миллиардов лет декларируемого «Стандартной моделью» её существования.

Более того, принцип возрастания энтропии сделал энтропию S «козлом отпущения» за «любую и всякую» необратимость. Нагляднее всего это проявилось в уравнения баланса энтропии, записанном И. Пригожиным в виде [5]:

$$dS = d_e S + d_u S, \quad (3)$$

где $d_e S = \dot{d}_e Q/T$ и $d_u S = \dot{d}_u Q/T$ – части изменения энтропии, обусловленные соответственно теплообменом $\dot{d}_e Q$ и внутренними источниками тепла $\dot{d}_u Q$.

Заметим, что $d_e S$ и $d_u S$ не являются частными дифференциалами энтропии, что выводит (3) за рамки теории дифференциального исчисления. Однако ещё важнее то, что согласно (3), любые необратимые процессы всегда вызывают изменение единственного параметра – энтропии S . В действительности же внутренние источники или стоки имеются и у других параметров. Таковы, в частности, числа молей k -х веществ N_k , которые также изменяются как вследствие химических реакций, так и при диффузии k -х веществ через границы системы. С другой стороны, согласно (3) энтропия S возрастает лишь вследствие превращения упорядоченных форм движения в хаотическую. Однако в действительности диссипация сопровождается переходом энергии и в нетепловые формы, в том числе в потенциальную энергию. В частности, в процессах резания металлов обнаружилось, отношение количества выделившегося тепла диссипации Q^d к затраченной работе W^r , именуемое «коэффициентом выхода тепла», как правило, меньше единицы. Это означает, что часть работы деструкции металлов переходит в потенциальную энергию стружки, а не в теплоту. Ещё отчётливее это обстоятельство проявляется в процессах дробления материалов, при которых возрастает не только температура, но и поверхностная энергия частиц материала. Таким образом, опыт подтверждает, что возрастание энтропии является отнюдь не единственным следствием превращения упорядоченных форм в неупорядоченные. Имеются и другие свидетельства несостоятельности этого принципа, суть которых изложена ниже.

4. Невозможность деления энергообмена на теплоту и работу

Введение Р. Клаузиусом понятия энтропии как параметра состояния неразрывно связано с его представлением о теплоте Q и работе W как двух единственно возможных способах энергообмена системы с окружающей средой, что и отражено в самом уравнении 1-го начала равновесной термодинамики (1). Однако такое деление энергообмена стало проблематичным уже в более сложных, чем термомеханические, системах, в которых наряду с работой расширения $\dot{d}W_p = p dV$ совершаются другие виды работ. К ним относится, в частности, особая категория «технических» работ W^r , которая перешла в термодинамику из механики (Л. Карно, 1783; Понселе, 1826) [2]. Такая работа измерялась скалярным произведением вектора результирующей силы \mathbf{F} на вызванное ею перемещение $d\mathbf{r}$ объекта её приложения $dW^r = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$. Она представляла собой количественную меру процесса превращения внешней энергии E из её i -й формы E_i в j -ю E_j , также являющуюся функцией состояния. Потому такая работа не зависела от пути процесса, и её элементарное количество dW_i^r выражалось полным дифференциалом $dW_i^r = \mathbf{F}_i \cdot d\mathbf{r}_i = dE_i$. Эта работа принципиально отличалась от той категории работ, которая фигурировала в уравнении (1), прежде всего векторной природой координат \mathbf{r}_i . Она имела смысл количественной меры процесса превращения энергии, а не её переноса, каковой

является работа расширения $dW_p = pdV$ и ввода в систему k -го вещества или заряда. Такие виды работ, совершаемые внутренними силами и зависящие от пути процесса, следовало бы называть «нетехническими» dW_i^H . Непонимание того, что «работа работе рознь», до сих пор мешает осознать, что истинная «линия водораздела» проходит не между теплотой Q и работой W , а между техническими W_i^T и нетехническими dW_i^H видами работ. К числу последних следовало бы отнести и теплообмен, поскольку он представляет собой работу ввода в систему некоторого количества неупорядоченного движения и энтропии как её меры. Для сложных (поливариантных) систем, совершающих как технические, так и нетехнические виды работ, доказательство существования энтропии до настоящего времени отсутствует [12, 14]. Отсутствует оно и для неравновесных (пространственно неоднородных) систем, где помимо внешнего теплообмена существуют внутренние источники тепла.

Далее, приложение термодинамики открытым системам, обменивающимся с окружающей средой веществом, привёл к установлению факта существования наряду с теплообменом Q и работой W ещё двух видов энергообмена: массообмена dU_m , характеризующегося изменением массы системы M при неизменности её состава, и диффузии k -го вещества через границы системы dU_k , характеризующейся изменением состава системы при неизменности её массы M . При этом выяснилось, что «на границе, где имеет место диффузия» «классические понятия теплоты и работы теряют свой смысл» [15].

Кроме того, понимание теплоты как «скрытого» движения особого рода оказалось единственно приемлемым и для ТНП [9, 10], акцентирующей внимание именно на изучении внутренних источников тепла. Такое понимание сохранилось до сих пор и в молекулярно-кинетической теории теплоёмкости, а также в теории теплообмена, которая определяет его как процесс обмена между телами внутренней тепловой энергией (по принципу: обмениваться можно только тем, чем располагают обе стороны).

Подмена внутренней тепловой энергии U_q теплотой процесса Q и отождествление их энергоносителей породило паралогизмы практически в каждой области приложения термодинамики. В смесях газов это привело к «парадоксу Гиббса» – утверждению о скачкообразном и не зависящем от природы газов возрастании энтропии при их смешении в отсутствие каких-либо тепловых или объёмных эффектов, т. е. их взаимодействия [5]. Характер паралогизма ему придаёт противоречие этого вывода третьему началу термодинамики, устанавливающему единое начало отсчёта энтропии ($S=0$ при $T=0$) для всех веществ [7]. В области микросистем с инверсной заселённостью энергетических уровней (с отрицательной абсолютной температурой $T<0$) статистическая трактовка энтропии $T \equiv (\partial U/\partial S)_v$ привела к утверждению о возможности полного превращения теплоты Q в работу W^T и невозможности, напротив, полного превращения W^T в Q , т. е. к «инверсии» принципа исключённого вечного двигателя 2-го рода [7]. В области релятивистских тепловых машин (с быстро движущимся источником тепла) статистическая трактовка энтропии привела к неинвариантности выражения КПД релятивистского цикла Карно η_r^K и выводу, что этот КПД при определённой скорости источника может стать отрицательным [7]. В термодинамической теории равновесия, основанной на принципе возрастания энтропии, был сделан ошибочный вывод о том, что механическое, электрическое, химическое и т. п. равновесие может наступить только вслед за тепловым равновесием [7]. В ТНП был сделан вывод о зависимости любого

потока энергоносителя от всех действующих в системе термодинамических сил, т. е. об отсутствии их результирующей [7]. В энергетике деление форм энергии на «энтропийные» и «безэнтропийные» привёл к утверждению о неравноценности КПД тепловых и нетепловых машин и к незаслуженным упрёкам первым в «расточительстве» энергии источников тепла. В термодинамике биологических систем получило распространение утверждение о возможности возникновения «порядка» из «хаоса» вопреки 2-му началу термодинамики Клаузиуса. В астрофизике принцип возрастания энтропии исключил возможность одновременного протекания процессов эволюции и инволюции (рождения одних и умирания других миров) вопреки их наблюдаемому характеру. Словом, понятие энтропии породило в каждой из них паралогизмы, превратив энтропию в «раковую опухоль» термодинамики [7].

5. Необходимость замены энтропии термоимпульсом

В обширной литературе, посвящённой энтропии, крайне редко встречаются попытки пересмотра и обобщения базовых концепций термодинамики. В этом отношении выделяется лишь монография А.И. Вейника «Термодинамика реальных процессов», в которой предлагается заменить энтропию «термическим зарядом» [16]. Однако в СССР это учебное пособие было запрещено Минвузом и по его настоянию изъяты из большинства вузовских библиотек. Столь негативное отношение к критике можно объяснить крайне болезненным восприятием всего нового специалистами и профессорами, избегающими хотя бы временной утраты общепризнанной опоры. Это приводит к догматизму и к тому, что ошибки накапливаются, так что становится все более затруднительным найти истоки явно абсурдных выводов.

К таким новым подходам относится и энергодинамика, которую кратко можно охарактеризовать как теорию мощности реальных процессов [17]. Главным отличием энергодинамики от термостатики Р.Клаузиуса является доказательство невозможности возникновения каких-либо макропроцессов в однородных (внутренне равновесных) системах и введение специфического класса переменных, характеризующих отклонение системы от внутреннего равновесия.

В справедливости первого положения можно убедиться, представив любой экстенсивный параметр системы Θ_i (её массу M , внутреннюю энергию U , число молей k -х веществ N_k , энтропию S , электрический заряд Q_e , импульс P , его момент L и т. п.) интегралом от его локальной $\rho_i = d\Theta_i/dV$ и средней $\bar{\rho}_i = \Theta_i/V$ плотности выражением $\Theta_i = \int \rho_i dV = \int \bar{\rho}_i dV$. В таком случае

$$d\Theta_i/dt = \int [(d(\rho_i - \bar{\rho}_i)/dt)] dV \equiv 0. \quad (4)$$

В однородной среде, где разность $(\rho_i - \bar{\rho}_i)$ обращается в нуль повсеместно, интеграл (1) тождественно обращается в нуль, т. е. *никакие процессы $d\Theta_i/dt$ (в том числе и теплообмен) невозможны* [11]. Это означает, что, полагая систему однородной (внутренне равновесной), Р. Клаузиус «выплеснул с водой и ребёнком», заложив в свою теорию неразрешимое внутреннее противоречие. Оно вылилось в фактическое превращение термодинамики в *термостатику*, поскольку вынудило её ограничиться

бесконечно медленными («квазистатическими») процессами. Для таких процессов и понятие их движущей силы, фигурирующей в законах теплопроводности, электропроводности, диффузии, вязкого трения (и в том числе «движущей силы тепла» С. Карно) стало излишним. Так из термодинамики исчезло и понятие силы, а с нею – и её способность объяснять причину возникновения процессов, вскрывать их «механизм», направление, момент завершения и т. д. Термодинамика была вынуждена привлекать «со стороны» физическую кинетику, молекулярно-кинетическую и статистико-механическую теории. Стало невозможным определять равновесие как равенство сил, что потребовало использования условий экстремума энтропии.

Признание неоднородности как причины возникновения процессов повлекло за собой обнаружение целого класса параметров неоднородности термодинамических систем, не признаваемых термодинамикой необратимых процессов. Действительно, при неравномерном распределении плотности $\rho_i(\mathbf{r}, t) = d\Theta_i/dV$ энергоносителя Θ_i по объёму системы V центр \mathbf{r}_i любого экстенсивного параметра системы Θ_i смещается от его изначального положения \mathbf{r}_{io} , соответствующего однородному состоянию с плотностью $\rho_{io}(t) = P_i/V$. Это положение в текущем и однородном состоянии определяется в механике известными выражениями «центра тяжести»:

$$\mathbf{r}_i = \Theta_i^{-1} \int \rho_i(\mathbf{r}, t) \mathbf{r} dV; \mathbf{r}_{io} = \Theta_i^{-1} \int \rho_{io}(t) \mathbf{r} dV, \quad (5)$$

где \mathbf{r} - бегущая (эйлерова) пространственная координата; t - время.

При этом возникает некоторый «момент распределения» количества движения

$$\mathbf{Z}_i = \Theta_i (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{io}) = \int [\rho_i(\mathbf{r}, t) - \rho_{io}(t)] \mathbf{r} dV \quad (6)$$

с плечом $\Delta \mathbf{r}_i = \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{io}$, названным нами «вектором смещения» [11].

Параметры \mathbf{Z}_i имеют смысл векторов поляризации системы в самом общем понимании этого термина как создания её пространственной неоднородности. Появление у любого i -го энергоносителя Θ_i момента распределения \mathbf{Z}_i с плечом $\Delta \mathbf{r}_i$ делает его энергию U_i функцией двух переменных Θ_i и \mathbf{r}_i (при $\mathbf{r}_{io}=0$), т. е. $U_i = U_i(\Theta_i, \mathbf{r}_i)$. В таком случае $U = \sum_i U_i(\Theta_i, \mathbf{r}_i)$, а её полный дифференциал можно представить в виде тождества [11]:

$$dU = \sum_i dU_i \equiv \sum_i \Psi_i d\Theta_i + \sum_i \mathbf{F}_i \cdot d\mathbf{r}_i, \quad (7)$$

где $\mathbf{F}_i \equiv (\partial U_i / \partial \mathbf{r}_i)$ – силы, характеризующие неоднородность поля Θ_i .

Т.о., силы $\mathbf{F}_i(\mathbf{r}_i)$ приобретают в энергодинамике однозначный смысл градиентов соответствующей формы энергии U_i . Это кладёт конец длительным дискуссиям о происхождении силовых полей, об их материальности, о разнообразии их природы, «механизме» взаимодействия (контактном или обменном), дальности действия, принадлежности к сильным или слабым взаимодействиям и т. п. Приобретает конкретный смысл и понятие потока любого энергоносителя \mathbf{J}_i , поскольку он определяется производной по времени от момента распределения $\mathbf{Z}_i = \Theta_i \Delta \mathbf{r}_i$ соответствующего энергоносителя Θ_i и имеет смысл его импульса:

$$\mathbf{J}_i = d\mathbf{Z}_i/dt = \Theta_i \mathbf{v}_i. \quad (8)$$

Это приводит к пониманию величины Θ_i как носителя i -й формы энергии U_i . На существование такого энергоносителя для внутренней тепловой энергии U_q указывает выражение «живой силы» Г. Лейбница $U_q = Mv^2$, известное ещё с 17 столетия, которое выражается произведением количества движения P . Декарта $P = Mv$ на модуль скорости v

[2]. Именно эта величина Mv^2 и была переименована по предложению Т. Юнга (1807) в «энергию» как более общую количественную меру движения, присущего системе, а после введения понятия «потенциальной энергии»² (В. Ренкин) – внутренней энергией U (В. Томсон).

В настоящее время между количеством движения Декарта $P = Mv$ и импульсом упорядоченного движения $\mathbf{P} = M\mathbf{v}$ не делают различия, полагая их синонимами. Между тем во времена Декарта ещё не существовало понятия вектора, так что под величиной v понималась усреднённая скорость, а под Mv^2 – энергия всей совокупности движущихся движения частиц или тел. Пропасть между ними лежит в отношении степени превратимости: если в однородном состоянии работоспособность теплоты U_q тела равна нулю, то энергия упорядоченного движения полностью превратима в работу. Здесь мы имеем ещё один пример того, как последователи великих мыслителей прошлого девальвируют их идеи. Во избежание этого количество движения P названо в энергодинамике для краткости «термоимпульсом» $\Theta_q = Mv$, т.е. импульсом, утратившим векторную природу вследствие хаотичности теплового движения. Заметим, что если под абсолютной температурой T понимать функцию усреднённой скорости частиц $T = T(v)$, то принадлежность термоимпульса $\Theta_q = \Theta_q(P)$ к параметрам состояния можно доказать тем же путём, что и энтропии, если подставить в (2) вместо Q_1 и Q_2 её энергию U_q' и U_q'' на входе и выходе тепловой машины. Тогда найдём, что $\oint dU_q/T = \oint d\Theta_q = 0$, а $dU_q = Td\Theta_q$. Заметим, однако, что при представлении термоимпульса как соотношения двух параметров $\Theta_q = U_q/T$ принадлежность его к параметрам состояния вообще не нуждалось в обосновании.

Замена энтропии термоимпульсом позволяет представить полный дифференциал $dU_q = d(PT)$ в виде суммы двух слагаемых:

$$dU_q = Td\Theta_q + \Theta_q dT. \quad (9)$$

Первое слагаемое правой части (9) определяет поток тепловой энергии U_q через границы системы (что для системы в целом соответствует теплообмену $\dot{d}_e Q/dt$), второе – внутренние источники тепла $\dot{d}_u Q/dt$. Таким образом, теплообмен в неравновесных системах может быть выражен через изменение параметров системы $\dot{d}Q = \Psi_q d\Theta_q$ без возникновения термодинамических неравенств [18].

Одним из очевидных преимуществ термоимпульса является его способность как возрастать в процессах теплообмена, массообмена, диффузии и диссипации энергии, так и убывать при затухании колебаний или при совершении над системой работы «против равновесия», делающей её более упорядоченной. Примером таких процессов является самопроизвольная эволюция, наблюдаемая на всех уровнях мироздания – от нуклеосинтеза до образования звёзд и скоплений галактик.

Остаётся показать, что замена энтропии на термоимпульс позволяет устранить ряд других паралогизмов, возникших в термодинамике при попытках использования энтропии в качестве экстенсивной меры теплового движения [11].

² Т. е. величины, способной превратиться в энергию при возникновении движения, а по существу – антипода энергии, которую следовало бы назвать *анергией*.

5. Что даёт замена энтропии термоимпульсом?

Термоимпульс как экстенсивная мера теплового движения имеет очевидные преимущества. Этот параметр не требует доказательств его существования и обладает той степенью очевидности, которая удовлетворяет понятию феноменологической теории. Он освобождает от необходимости обоснования применимости понятия энтропии к системам, далёким от равновесия, поскольку существует и в системах с произвольным распределением импульса между частицами. Этот параметр уточняет смысл абсолютной температуры T как меры интенсивности теплового движения и функции усреднённой скорости v неупорядоченного колебательного движения частиц, образующих систему. Понимание термоимпульса как количества колебательной формы движения позволяет вернуть энергии U её изначальный смысл «живой силы» Mv^2 , т. е. меры внутреннего движения и тем самым покончить с ситуацией, когда «современная физика не знает, что такое энергия» [19]. В отличие от энтропии, термоимпульс Θ_q в реальных процессах может как возрастать, так и убывать. В частности, при затухании колебаний ($v \rightarrow 0$) энергия U превращается в анергию (неработоспособную часть взаимодействия, именуемую в настоящее время *потенциальной энергией*³). Наконец, этот параметр на требует привлечения молекулярно-кинетической и статистико-механической теории для интерпретации его физического смысла, что делает энергодинамику вполне самостоятельной теорией. Ниже мы рассмотрим наиболее важные следствия такой замены.

5.1. Опровержение теории «тепловой смерти Вселенной»

Р.Клаузиус при обосновании принципа возрастания энтропии на основе знаменитого рассуждения о работе двух сопряжённых тепловых машин принимает как само собой разумеющееся, что термический КПД $\eta_t = 1 - Q_2/Q_1$ любой необратимой тепловой машины меньше, чем в обратимом цикле Карно $\eta_t^k = 1 - T_2/T_1$ при тех же температурах теплоисточника T_1 и теплоприёмника T_2 [13]. В таком случае $dS_2 = dQ_2/T_2 > dS_1 = dQ_1/T_1$, т. е. энтропия системы, включающей источник тепла, циклически действующую тепловую машину и теплоприёмник, возрастает.

Не найдя в этом рассуждении каких-либо противоречий, Р. Клаузиус придал этому выводу статус общезначимого «принципа возрастания энтропии» и положил его в основу «теории тепловой смерти Вселенной». Эта теория предсказывала прекращение во Вселенной в целом каких-либо макропроцессов вследствие наступления в ней термодинамического равновесия, что было равносильно утверждению о её «сотворимости». Тем самым эта теория до сих пор служит основанием для стандартной космологической модели происхождения Вселенной путём «Большого взрыва», несмотря на то, что упомянутая «тепловая смерть» не наступила и через 13,5 миллиардов лет её существования в соответствии с этой моделью [2].

Между тем в рассуждения Клаузиуса вкралась ошибка, которая станет более очевидной, если представить термический КПД любого цикла тепловой машины, в том

³ Последняя является в действительности антиподом энергии, поскольку не может совершать работу без возникновения движения.

числе цикла Карно, через так называемые «среднеинтегральные» температуры подвода и отвода тепла $\bar{T}_1 = Q_1/\Delta S_1$ и $\bar{T}_2 = Q_2/\Delta S_2$ [20]:

$$\eta_t = 1 - Q_2/Q_1 = 1 - \bar{T}_2/\bar{T}_1. \quad (10)$$

Согласно этому выражению, понижением термического КПД неизбежно связано с изменением средних температур подвода и отвода тепла \bar{T}_1 и \bar{T}_2 , т. е. с уменьшением «движущей силы тепла» $\bar{T}_1 - \bar{T}_2$, как это и следовало из теории С. Карно. Это означает несостоятельность самого изначального предположения Р. Клаузиуса о том, что необратимый цикл при тех же температурах T_1 и T_2 , что и в обратимом цикле Карно, будет иметь меньший КПД $\eta_t < \eta_t^K$.

Столь же несостоятельными оказываются на проверку и другие доказательства этого принципа. К этому выводу можно прийти наиболее общим путём, не прибегая к рассмотрению каких-либо конкретных процессов и устройств. Рассмотрим с этой целью произвольную термомеханическую систему, обладающую двумя степенями свободы: термической (обусловленной способностью к нагреву) и механической (обусловленной способностью к упругой деформации). Внутренняя энергия такой системы U как величина экстенсивная является функцией двух экстенсивных аргументов: энтропии S и объёма V , т.е. $U = U(S, V)$. Тогда, рассматривая энтропию S как обратную функцию $S = S(U, V)$, найдем, что в изолированных системах ($U, V = \text{const}$) энтропия в принципе не может изменяться, поскольку неизменными остаются все аргументы этой функции. Таким образом, *общих доказательств принципа возрастания энтропии в рамках равновесной термодинамики не может быть по самому существу дела*. Физически это довольно очевидно: в равновесной термомеханической системе не могут возникнуть процессы релаксации, приводящие к переходу упорядоченной энергии в хаотическую (к рассеянию энергии). Именно поэтому «вопрос о физических основаниях закона монотонного возрастания энтропии остается ... открытым» [13]. Кардинальное решение этого вопроса приходит с признанием термоимпульса P истинной мерой внутренней тепловой энергии $U_q = Pv(T)$. Замена энтропии термоимпульсом устраняет навязанную термодинамикой Клаузиуса для Вселенной «стрелу времени» - одностороннюю направленность процессов в ней к тепловому равновесию, и следовательно, к прекращению в ней каких-либо макропроцессов. В отличие от неё, энергодинамика не только допускает, но и доказывает возможность одновременного протекания во Вселенной процессов эволюции и инволюции, т. е. кругооборота в ней вещества и энергии, позволяющей ей функционировать неограниченное время, минуя состояние равновесия.

5.2. Единство движущих сил разнообразных процессов

В 1931 г. будущий нобелевский лауреат Л. Онзагер предложил «кваситермодинамическую» теорию скорости необратимых физико-химических процессов [8, 9]. Основными величинами, которыми оперирует эта теория, были скалярные («термодинамические») силы X_i как причины возникновения i -го скалярного процесса релаксации, и «потoki» J_i как их обобщённые скорости. Эти величины находились на основе выражения для скорости возникновения энтропии dS/dt как функции неких параметров α_i , характеризующих удаление таких систем от равновесия:

$$dS/dt = \sum_i (\partial S / \partial \alpha_i) d\alpha_i / dt = \sum_i X_i J_i. \quad (13)$$

Отыскание движущих сил $X_i = \partial S / \partial \alpha_i$ и обобщённых скоростей $J_i = d\alpha_i / dt$ разнообразных диссипативных процессов позволяет в принципе изучать методами термодинамики кинетику релаксационных процессов. Последнее означало бы переход от термостатики, каковой в действительности являлась классическая термодинамика [12], к термокинетики как теории скорости реальных процессов [11]. Однако параметры α_i заведомо отсутствовали в равновесной термодинамике. Поэтому его теория оставалась по существу пустым формализмом до тех пор, пока другой будущий нобелевский лауреат И. Пригожин не предложил метод нахождения векторных термодинамических сил X_i и потоков J_i для «стационарных» необратимых процессов [20]. Для этого он выдвинул гипотезу локального равновесия, согласно которой в элементах объёма континуума dV существует равновесие (несмотря на протекание в них нестатических процессов), так что их состояние характеризуется тем же набором переменных Θ_i , что и в равновесии (несмотря на появление дополнительных термодинамических сил X_i), а к ним применимы все соотношения равновесной термодинамики (несмотря на неизбежный переход их в неравенства).

При всей своей внутренней противоречивости эта гипотеза позволяла применить законы сохранения массы, импульса, заряда и энергии, взятые из других дисциплин, для нахождения сил X_i и потоков J_i . Это требовало составления довольно громоздких уравнений их баланса с целью выделения из dS/dt той их части $d_u S/dt$, которая характеризует «производство» энтропии вследствие диссипации. Однако разложить «производство энтропии» $d_u S/dt$ подобно выражению (17) на сомножители X_i и J_i можно множеством способов. В частности, для движущей силы процесса диффузии любого k -го вещества ТНП предлагает дюжину вариантов, отличающихся размерностью и смыслом. Этот произвол значительно затрудняет понимание и освоение предложенного ТНП метода исследования необратимых явлений.

Ещё более серьёзным недостатком теории необратимых процессов (ТНП), основанной на принципе возрастания энтропии, явилось то, что она исключила из рассмотрения обратимую часть реальных процессов, которая не даёт вклада в «производство» энтропии dS/dt . Это обусловило ограниченность ТНП чисто диссипативными процессами типа теплопроводности, электропроводности, диффузии, и вязкого трения, в то время как термодинамика была создана как теория преобразования различных форм энергии с минимальными потерями от необратимости.

Энергодинамика освобождает от этих недостатков. В ней показывается, что любые потоки J_i и есть обобщённые импульсы P_i упорядоченного движения, т. е. представляют собой произведение энергоносителя Θ_i на скорость его переноса в пространстве $J = \Theta_i v_i$. В таком случае и понятие термодинамической силы X_i получает вполне однозначное определение частной производной от энергии системы по моменту распределения его энергоносителя $X_i \equiv (dU_i / dZ_i) = F_i / \Theta_i$, т.е. сил F_i в их общезначимом понимании, отнесённой к величине энергоносителя Θ_i . Все такие силы выражаются градиентами соответствующего потенциала ψ_i ($X_i \equiv - \text{grad } \psi_i$) и имеют смысл напряжённости поля этого энергоносителя. Этим энергодинамика кардинально отличается от ТНП, которая допускает произвол в разбиении произведения $X_i J_i$ на сомножители X_i и J_i . В результате, например, для процесса диффузии какого-либо компонента смеси она предлагает до дюжины различных сил [7]. Энергодинамика освобождает от необходимости привлечения для их нахождения

других дисциплин и составления на их основе довольно громоздких уравнений баланса энтропии [9, 10]. Тем самым она позволяет обобщить понятийную систему и математический аппарат ряда инженерных дисциплин, кардинально облегчая переход от одной из них к другим [21].

5.3. Устранение противоречия термодинамики с теорией эволюции

Покажем теперь, что термоимпульс устраняет «вопиющее противоречие термодинамики с теорией биологической эволюции», обусловленное тем, что принцип возрастания энтропии предписывает природе лишь её деградацию [22]. Вероятностная трактовка энтропии Больцманом не разрешала это противоречие – она лишь давала Вселенной ничтожный шанс избежать «тепловой смерти», предписываемой ей «-м началом термодинамики. Между тем из энергодинамического тождества (16), как и из (1), следует, что в системах, где протекают какие-либо процессы, т. е. $d(\rho_i - \bar{\rho}_i)/dt \neq 0$), интеграл (1) обращается в нуль только в том случае, когда его слагаемые имеют противоположный знак и взаимно компенсируются. Это означает, что в любой неравновесной системе всегда имеются подсистемы, процессы в которых протекают в противоположном направлении. Это положение, названное нами «принципом противонаправленности» процессов, имеет общезначимый статус и может считаться математическим выражением диалектического закона «единства и борьбы противоположностей» [23]. Он устраняет навязанную термодинамикой Клаузиуса одностороннюю направленность процессов во Вселенной (пресловутую «стрелу времени»). Согласно энергодинамике, все реальные процессы носят циклический характер, претерпевая фазу рождения и фазу отмирания. Таковы не только климатические изменения на Земле, вызванные движением планет солнечной системы, но и те «циклы Феникса», о которых нам рассказывает Э. Левин.

К такому же выводу мы приходим, базируясь на законе сохранения энергии в изолированной системе $(dU/dt)_{\text{из}} = 0$ и тождестве (15), если представим $\mathbf{F}_i \cdot \mathbf{v}_i$ в виде произведения $\mathbf{X}_i \cdot \mathbf{J}_i$, как это принято в неравновесной термодинамике [9, 10]:

$$(dU/dt)_{\text{из}} = \sum_i dU_i/dt = \sum_i (\Psi_i dP_i/dt + \mathbf{X}_i \cdot \mathbf{J}_i) = 0, \quad (14)$$

где $\mathbf{X}_i \equiv (dU_i/d\mathbf{Z}_i) = \Theta_i^{-1}(\partial U/\partial \mathbf{r}_i) = \mathbf{F}_i/P_i$; $\mathbf{J}_i = P_i \mathbf{v}_i$.

Обращение в нуль суммы $\sum_i dU_i/dt$ означает, что отдельные слагаемые этой суммы имеют противоположный знак и взаимно компенсируются. Поскольку же в изолированных системах ускорение движения dP_i/dt обусловлено исключительно наличием у P_i внутренних источников, то противоположный знак имеют и мощности $\mathbf{X}_i \cdot \mathbf{J}_i$ разноимённых процессов превращения энергии. Это означает, что наряду с процессами диссипации, в которых $\mathbf{X}_i \cdot \mathbf{J}_i > 0$, в изолированных системах неизбежны и процессы «самоорганизации» некоторых j -х степеней свободы, в которых произведение $\mathbf{X}_j \cdot \mathbf{J}_j < 0$. Таковы, в частности, процессы «восходящей диффузии» (переноса вещества в сторону возрастания его концентрации), явления «сопряжения» химических реакций (протекания реакций в направлении возрастания её сродства), «активного транспорта» (накопления в органах веществ с большей энергией Гиббса) и т.п. Таким образом в неравновесных системах с необходимостью возникают противонаправленные процессы эволюции и инволюции (деградации), когда одна степень свободы системы приближается к

равновесию, в то время как другая – удаляется от него. Это и устраняет отмеченное выше противоречие термодинамики с эволюцией [5].

Более того, энергодинамика предлагает взамен энтропии более наглядные, более «физичные» и более информативные критерии равновесия, эволюции и инволюции, нежели не поддающийся вычислению максимум энтропии [24]. Этими критериями являются термодинамические силы X_i (напряжения), способные отразить как приближение или удаление системы от состояния равновесия по любой i -й степени её свободы в отдельности, так и условие этого равновесия [25]:

$$dX_i > 0 \text{ (эволюция); } dX_i = 0 \text{ (равновесие); } dX_i < 0 \text{ (инволюция).} \quad (15)$$

Тем самым энергодинамика возвращает понятию равновесия его изначальный смысл равенства противодействующих сил (отсутствия у них результирующей силы), каким он был в механике. Эти неэнтропийные критерии подтверждают, что природе свойственны не только разрушительные, но и созидательные тенденции, что наглядно проявляются в одновременном протекании на всех уровнях мироздания процессов рождения и отмирания объектов живой и неживой природы.

В заключение хочу отметить, что изгнание энтропии из теплофизики и замена её термоимпульс позволяет устранить и другие паралогизмы, связанные с энтропией. Это даст исследователям ключ к новому пониманию явлений природы, не искажённый равновесной термодинамикой Р. Клаузиуса.

Литература

1. *Clausius R.* Die mechanische Warmethorie. Braunschweig, 1876. Bd.1,2.
2. *Гельфер, ЯМ.* История и методология термодинамики и статистической физики. Изд. 2-е. – М.: Высшая школа, 1981. – 536 с.
3. *Эйнштейн А.* Творческая биография. //Физика и реальность, М. Наука, 1985.-С.131-166.
4. *Шамбадаль П.* Развитие и приложения понятия энтропии. М.: Наука, 1967; *Chambadal P.* Évolution et Applications du Concept D` Entropie – Paris, 1963.
5. *Пригожин И., Стенгерс И.* Порядок из хаоса: новый диалог человека с природой.- М.: Прогресс, 1986; *Prigogine I.* Order and Haos, Man's new dialog with Nature. London, 1984.
6. *Вейник АИ.* Термодинамика. Изд. 3-е. Минск, 1968.
7. *Эткин ВА.* Паралогизмы термодинамики. – Saarbrücken, Palmarium Ac. Publ., 2015.
8. *Эткин ВА.* Ахиллесова пята термодинамики. // Проблемы науки, 10(34) 2018. 5-18.
9. *Де Гроот С. Р., Мазур Р.* Неравновесная термодинамика. М.: Мир, 1964; *De Groot S.R., Mazur R.* Non-Equilibrium Thermodynamics:– Amsterdam, 1962.
10. *Дьярмати И.* Неравновесная термодинамика. Теория поля и вариационные принципы. – М.: Мир, 1974, 304 с.
11. *Эткин В.А.* Термокинетика (термодинамика неравновесных процессов переноса и преобразования энергии. –Тольятти, 1999, 228 с. *Etkin V.* Thermokinetics (Synthesis of Heat Engineering Theoretical Grounds).- Naifa, 2010. – 334 p.
12. *Базаров ИП.* Термодинамика. Изд. 4-е, М.: Высшая школа, 1991.
13. *Ландау Л.Д. Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Т.5. Статистическая физика.-М.: Наука, 1964.
14. *Гухман АА.* Об основаниях термодинамики. Изд. 2-е. - М.: Энергоатомиздат, 1986.
15. *Трайбус М.* Термостатика и термодинамика. М.: Энергия, 1970.

16. Вейник А.И. Термодинамика реальных процессов. – Минск, наука и техника, 1991.
17. Эткин В.А. Энергодинамика (синтез теорий переноса и преобразования энергии) – СПб.; «Наука»,2008; *Etkin V. Energodynamics (Thermodynamic Fundamentals of Synergetics).*- New York, 2011.
18. *Etkin V.* К решению проблемы термодинамических неравенств. // *Österreichisches Multiscience Journal*, 29 (1).2020. 49-54.
19. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т.5., М.: Наука, 1977.
20. Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов. М.: Изд-во иностр. лит.,1960; *Prigogine I. Etude Thermodynamique des Phenomenes Irreversibles.* – Liege, 1947,
21. Эткин В.А. Синтез основ инженерных дисциплин (Энергодинамический подход к интеграции знаний). – Saarbrücken, Lambert Academic Publishing, 2011.
22. *Etkin V.A.* Alternative to the entropy increase principle. // *The Papers of independent Authors* 49(2020).130-145.
23. *Etkin V.* Principle of non-equilibrium processes counter directivity. // *Reports of independent authors*, 37(2016). 86 –92.
24. *Etkin V.A.* New Criteria of Evolution and Involution of the Isolated Systems. // *International Journal of Thermodynamics (IJOT)* 2018, 21(2), pp. 120-126, doi: 10.5541/ijot.341037.
25. Эткин В. О диалектическом единстве эволюции и инволюции. // *Annali d'Italia*, 10 (2020).19-26; *Etkin V.* On the Dialectic Unity of Evolution and Involution. // *Global Journal of Science Frontier Research: A Physics and Space Science.* 20(10)2020.9-16.