

К ИСТОРИИ ВОПРОСА О ПРИМЕНЕНИИ ТЕРМОДИНАМИКИ В БИОЛОГИИ¹

Побиск Георгиевич Кузнецов, кандидат химических наук, специалист по системам целевого управления и планирования, один из основоположников физического подхода к экономическим системам, последний из Генеральных конструкторов СССР

В настоящее время, в связи с развитием теории информации, значительно увеличился интерес к термодинамическим исследованиям живого вещества. Обнаружена тесная связь информации с отрицательной энтропией, а также связь последней с явлениями жизни. В некоторых случаях приведенные выше сведения рассматриваются как научные результаты последних лет.

Необходимо отметить, что в науке редко «неожиданно» рождаются новые идеи — чаще всего эти идеи имеют длительную предысторию, но не были правильно поняты современниками.

Рождение термодинамики как самостоятельной науки, включая понятие энергии, которое появилось и оформилось как самостоятельное понятие лет через 10–20 после появления термодинамики, тесно связано с анализом биологических явлений. Это особенно заметно, если обратиться к анализу состояния науки до 1840 г. Понятие энергии отсутствует. Явления объясняются действием «сил», число которых приближается к числу наблюдаемых явлений. Наряду с «электрической», «магнитной» и другими силами существует и «жизненная сила», объясняющая явления жизни. Если объяснение с помощью «силы» не представляется удобным, то используется некоторый флюид — «теплород». Именно в этой ситуации и появляются работы врача, столь необычные для его современников — физиков. Роберт Юлиус Майер считает, что существует единство всех сил природы и закон сохранения силы. Он утверждает, что единственной силой, обеспечивающей существование всех живых организмов, обеспечивающей все разнообразие движения как животных, так и растений, является сила, получаемая в виде света от Солнца. Более того, эта же сила приводит в движение организм человека, позволяя ему перемещаться и даже думать. Эти соображения Р.Ю. Майера были столь необычны для того времени, сколь тривиальными они кажутся нашим современникам. Последствия этих высказываний рядового врача оказались трагическими. Р.Ю. Майер, автор трех основополагающих работ по термодинамике (Р.Ю. Майер. «Закон сохранения и превращения энергии». М.–Л., 1933), оказывается в

¹ От редакции: 18 мая 2014 г. исполняется 90 лет со дня рождения выдающегося русского учёного П.Г. Кузнецова. Настоящая работа публикуется в порядке подготовки к этому событию. Текст приводится согласно изданию: К.С. Тринчер «Биология и информация. Элементы биологической термодинамики», изд. 2, перераб. и доп. — М.: Наука, 1965.

ПРИЛОЖЕНИЕ

сумасшедшем доме, где почти десять лет его пытаются вылечить от столь необычных взглядов на мир.

К 1850 г. работами Томпсона и Клаузиуса (в кн. «Второе начало термодинамики». М.–Л., 1934; «Механическая теория тепла») устанавливаются основные закономерности термодинамики, получившие известность как первый и второй законы термодинамики.

Первый закон термодинамики — закон сохранения энергии — относится к числу широко известных законов. Второй закон термодинамики — закон возрастания энтропии — относится к числу менее известных. Одной из формулировок второго закона термодинамики была формулировка Томпсона, где этот закон рассматривался, как закон рассеяния лучистой энергии. Согласно этой формулировке, теплота нагретых тел рассеивается в мировом пространстве, и не может существовать процессов, в результате которых она может снова сосредоточиться и начать вновь активно функционировать.

Примерно через 25 лет после формулировки второго закона термодинамики как закона рассеяния энергии, или как закона невозможности вечного двигателя второго рода, появляются работы Л. Больцмана. К 1878 г. второй закон термодинамики получает статистическую интерпретацию и в таком виде существует до настоящего времени.

Уже в 1886 г. Л. Больцман совершает попытку дать термодинамический анализ явлений жизни. В своей блестящей речи, произнесенной на заседании Академии наук в Вене, он говорит:

«Всеобщая борьба за существование, охватывающая весь органический мир, не есть борьба за вещество: химические элементы органического вещества находятся в избытке в воздухе, воде и земле; это также не борьба за энергию, — она, к сожалению, в непревратимой форме, в форме теплоты, щедро рассеяна во всех телах; это борьба за энтропию, становящуюся доступной при переходе энергии от пылающего солнца к холодной земле» (цит. по К.А. Тимирязеву. Сочинения, т. I, 1937 г., стр. 442). Через 60 лет этот же вывод будет сделан Э. Шредингером в его книге «Что такое жизнь с точки зрения физики?» (ИЛ. 1947).

Цитируемая речь Л. Больцмана может быть и осталась бы незамеченной, если бы анализ этой проблемы не привлекал внимания К.А. Тимирязева. К.А. Тимирязев видел специфическую термодинамическую функцию хлорофиллового аппарата растений именно в том, что она играет роль посредника между рассеивающимся в мировом пространстве излучением и скрытой химической энергией продуктов фотосинтеза, являющихся основой всех проявлений движения, которые мы наблюдаем в растительном и животном мире. Эта

ПРИЛОЖЕНИЕ

точка зрения К.А. Тимирязева нашла отражение в его Крунианской лекции «О космической роли растения», прочитанной им в 1903 г. в Лондоне. Если не забывать о формулировке второго закона термодинамики, которая была распространена к началу XX века (т.е. закон рассеяния энергии), то позиция К.А. Тимирязева очевидна.

«...Вопрос о космической роли растения является какой-то пограничной областью между двумя великими обобщениями прошлого века, связанными с именами Лорда Кельвина и Чарльза Дарвина — между учением о рассеянии энергии и учением о борьбе за существование» (К.А. Тимирязев. Сочинения, т. I, 1937, стр. 442).

В этом же плане К.А. Тимирязев рассматривает термодинамическую особенность хлорофиллового аппарата. Он пишет:

«...Зерно хлорофилла тот фокус, та точка в мировом пространстве, в которой живая сила солнечного луча, превращаясь в химическое напряжение, слагается, накапливается для того, чтобы впоследствии исподволь освобождаться в тех разнообразных проявлениях движения, которые нам представляют организмы как растительные, так и животные. Таким образом, зерно хлорофилла — исходная точка всякого органического движения, всего того, что мы разумеем под словом жизнь».

Обращаясь к работам 1903 г., мы нарушили хронологическую последовательность использования термодинамического анализа явлений жизни. Еще в 1901 г. состоялся XI съезд русских естествоиспытателей и врачей. На этом съезде с докладом на тему «Физико-механическая модель живой материи» выступил Н.А. Умов. Если принять во внимание, что третий закон термодинамики, известный теперь под названием теоремы Нернста, еще не существовал, то речь Н.А. Умова содержит предложение о введении нового закона термодинамики для выражения специфических функций живой материи:

«Все акты материи, способной к стройным движениям и снабженной физико-химическими приспособлениями отбора, представляются стороннему зрителю сознательными актами. Отбор есть орудие борьбы с нестройностью, с ростом энтропии. Это сортирующий демон Максвелла, наблюдавший и отбирающий молекулы по своему усмотрению. Отбор включается в понятие стройности. Мы имеем два закона термодинамики, управляющих процессами природы; мы не имеем закона или понятия, которое бы включило процессы жизни в процессы природы. Существование в природе приспособлений отбора, восстанавливающих стройность и включающих в себя живое, должно, по-видимому, составить содержание этого третьего закона» (Н.А. Умов. «Физико-механическая модель живой материи». СПб., 1902).

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таким образом, еще в 1901 г. вносилось предложение о расширении термодинамики, которое включает наличие процессов, прямо противоположных второму закону термодинамики, преследующее цель указать специфическую термодинамическую закономерность явлений жизни. В настоящее время довольно трудно установить связь идей Н.А. Умова и К.А. Тимирязева. Можно полагать, что два русских ученых были согласны в своих позициях по термодинамическим особенностям живого вещества. В своих последующих работах Н.А. Умов, так же как и К.А. Тимирязев, неоднократно возвращается к этому вопросу.

С 1905 г. названная тема появляется в ряде работ Ф. Ауэрбаха. Однако, как бы развивая мысль Н.А. Умова, Ф. Ауэрбах вводит в термодинамику новое понятие «эктропия», т.е. понятие, прямо противоположное понятию «энтропия». Не менее характерна работа 1911 г. «Эктропизм или физическая теория жизни» (СПб.), написанная Ф. Ауэрбахом. В настоящее время, когда термин «отрицательная» энтропия стал встречаться в многочисленных статьях, полезно вспомнить условия возникновения этого понятия. Это понятие всегда связывалось с явлениями жизни и соответствовало, как точно отмечал Н.А. Умов, понятию отбора или, в современной формулировке, выбора.

Хотя все изложенное выше показывает, что большое число ученых пыталось найти в термодинамическом анализе некоторые существенные признаки живого вещества, эти работы значительно опередили свое время и практически остались непонятыми современникам авторов. Можно заметить, что каждый вывод приобретает значение лишь в определенное время, когда само естествознание ходом исторического развития науки оказывается подготовленным к этому выводу. Типичным примером такой «преждевременности» явились работы К.Э. Циолковского, посвященные этой же проблеме. Подробный анализ этих работ был выполнен И.И. Гваем в самое последнее время (И.И. Гвай. «К.Э. Циолковский о круговороте энергии», АН СССР, 1957; «О малоизвестной гипотезе Циолковского», Калуга, 1959).

Возникновение геохимии, а затем и биогеохимии, оказало существенное воздействие на дальнейшее развитие всей науки о жизни. Весьма велик вклад в основы термодинамического анализа явления жизни, сделанный В.И. Вернадским. Мы полагаем, что работы по биогеохимии обеспечили существенное изменение точки зрения на биологические явления. В первую очередь это относится к пониманию самого явления жизни.

Физиологи, исследуя отдельный, изолированный от окружающей среды организм, не всегда замечали различие изучаемого индивидуума от самого процесса жизни. Существует

ПРИЛОЖЕНИЕ

ряд свойств, присущих процессу жизни и не присущих отдельному индивидууму. К числу таких свойств относится смертность индивидуума и бесконечность явлений жизни в процессе эволюции.

Существует различие между совокупностью всего живого, населяющего поверхность нашей планеты, и совокупностью процессов обмена веществ внутри отдельного организма. Изучая отдельный организм, лишь в самое последнее время стали обращать внимание на существование тесной связи организма и среды, их взаимного воздействия друг на друга. Это положение является исходным в понимании явлений жизни с точки зрения биогеохимии.

В.И. Вернадский называет совокупность наружных оболочек Земли (до глубины порядка 20 км и вверх до ионосферы) биосферой. Таким образом, масса нашей планеты, заполняющая атмосферу, гидросферу и литосферу до глубины, указанной выше, включающая всю совокупность живых организмов, как растительных, так и животных, включается в понятие биосферы. Прежде чем говорить о термодинамическом анализе биосферы, следует установить: является ли биосфера замкнутой или термодинамически незамкнутой системой?

Если пренебречь обменом вещества с космическим пространством, т.е. пренебречь утечкой газов из верхних слоев ионосферы, и пренебречь приростом массы за счет падения метеоритов, то масса биосферы остается неизменной на протяжении значительных промежутков времени. Биосфера обменивается энергией с окружающей средой — к поверхности нашей планеты приходит лучистая энергия Солнца — и, наоборот, поверхность Земли излучает лучистую энергию в мировое пространство. Если допустить, что количество лучистой энергии, приходящей к Земле, равно количеству лучистой энергии, излучаемой нашей планетой в мировое пространство, то можно принять, что биосфера является замкнутой системой, находящейся в равновесии с окружающей средой.

Если бы на нашей планете отсутствовали явления жизни, то существовало бы равенство между количеством приходящей лучистой энергии Солнца и количеством лучистой энергии, излучаемой нашей планетой в мировое пространство. При отсутствии такого равенства, например, если приход солнечной энергии оказался больше, чем расход (при отсутствии жизни в биосфере), поднялась бы температура поверхности Земли. Это повышение температуры привело бы к увеличению потерь на излучение (в силу закона Стефана — Больцмана), и Земля пришла бы снова в состояние равновесия с окружающей средой, отдавая ровно столько энергии, сколько к ней приходит от Солнца.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Рассмотренный пример ничем не отличается от обыденного использования термометра. Когда мы помещаем термометр в термостат, то термостат облучает термометр большим потоком энергии, чем излучает термометр в сторону термостата. В результате неравенства входящего и уходящего потоков растет внутренняя энергия термометра, столбик ртути поднимается. С ростом энергии термометра растет и количество излучаемой им энергии. В конце концов устанавливается равновесие между притоком и оттоком энергии от термометра. В приведенном выше примере роль такого термометра играла вся поверхность биосферы.

Тем не менее существует и некоторое различие между термометром и биосферой. Если в явлениях обмена энергией с окружающей средой они тождественны друг другу, то их поведение существенно различно относительно судьбы поглощаемой энергии. Вся поглощаемая термометром энергия (с учетом его теплоемкости) превращается в кинетическую энергию, т.е. в теплоту, а поглощаемая биосферой энергия за счет процессов фотосинтеза превращается в потенциальную энергию продуктов фотосинтеза, что исключается в термометрическом теле в условиях измерения.

Можно было бы допустить, что после того, как некоторая часть лучистой энергии перешла в потенциальную форму энергии живого вещества на поверхности нашей планеты, то процесс дальнейшего накопления этой энергии будет остановлен. Однако исторический анализ эволюции живого вещества (т.е. совокупности всех живых организмов, включая людей) показывает, что такой тенденции по ходу эволюции не обнаруживается. За несколько миллиардов лет эволюции живого вещества на поверхности нашей планеты процесс жизни не только не обнаруживает тенденции затухания, а, наоборот, охватывает все большую и большую часть вещества биосферы. Было время, когда количество живого вещества на поверхности нашей планеты в биосфере исчислялось граммами, а теперь мы имеем 10^{14} т. При среднем содержании химической энергии порядка 4 ккал на грамм живого вещества мы обнаруживаем все прогрессирующее увеличение химической энергии живого вещества.

Эта особенность эволюции живого вещества позволила В. Анри отметить характерную особенность явлений жизни, совпадающую с точкой зрения ранее приведенных авторов. А.Е. Ферсман следующим образом приводит эти данные:

«1. В основе процессов жизни лежит интересное положение В. Анри, который отмечает, что «жизнь есть не что иное, как постоянное задержание и накопление химической и лучистой энергии, замедляющее превращение полезной энергии в теплоту,

ПРИЛОЖЕНИЕ

препятствующее рассеянию последней в мировом пространстве» (А.Е. Ферсман. «Геохимия», т. III, 1937, стр. 429).

Эта же особенность явлений жизни в наиболее яркой форме проявляется в процессе техногенеза, т.е. в геохимических измерениях на поверхности нашей планеты, вызванных промышленной деятельностью человечества. А.Е. Ферсман пишет:

«В процессах биогенеза и особенно техногенеза мы подошли к еще более крайним членам ряда, — сложные органические соединения живого вещества оказались с еще большими запасами энергии, и законы энтропии, если не нарушаются, то во всяком случае замедляются процессами жизни.

Продолжая, углубляя и усиливая их, промышленная деятельность человека — металлургия железа, меди, свинца, многочисленные синтезы карбида кальция, карборунда, алунда, азотных соединений, получение эндотермических комплексов в сложных производствах — ведет к такому же накоплению энергии, такой же борьбе с законом энтропии, как и в случае биогенеза...

Энергетически в области техногенеза мы имеем, таким образом, огромные амплитуды в ходе процессов, но несомненно, что ни в одной системе космоса мы не встречаемся с такими реакциями, которые шли бы столь очевидно вразрез с законом энтропии. Это явление нашло себе очень интересное освещение в книге Джинса «The New Background of Science» (1933), который указал, что деятельность человеческой мысли идет вразрез со вторым законом термодинамики, и что техника и организация ведут в сторону уменьшения энтропии вселенной» (А.Е. Ферсман. «Геохимия», т. III, 1937, стр. 422-433).

Приведенная выше геохимическая точка зрения на явления жизни, как на процесс эволюционного развития живого вещества, с одной стороны, существенно меняет наш подход к проблеме жизни, а с другой, намечает пути решения этой проблемы в целом. О явлениях жизни мы можем говорить как о процессе, а каждый процесс характеризуется тенденцией развития. Когда мы говорим о развитии явлений жизни, мы не можем высказать утверждение, которое позволяем себе высказать о совокупности физико-химических изменений в неживой природе — мы не можем утверждать, что эволюция этой системы (т.е. системы живого вещества) имеет тенденцию к уменьшению свободной энергии.

С другой стороны, естественно утверждение о росте свободной энергии живого вещества с течением времени. Это утверждение совершенно неприменимо к отдельному живому организму, так как он смертен и не может после смерти эволюционировать в

ПРИЛОЖЕНИЕ

названном направлении. Однако это утверждение вполне справедливо в отношении вида, в отношении всего живого вещества по ходу времени.

Теперь мы можем обратиться к замечательной работе В.И. Вернадского, в которой названная проблема приобрела необходимую ясность. Для людей, не часто имеющих дело с термодинамическими закономерностями, не всегда существенно указание на термодинамическое различие живого вещества от неживой природы, оцениваемое по отношению ко второму закону термодинамики. Этого нельзя сказать о работах В.И. Вернадского. Основатель геохимии использовал второй закон термодинамики для объяснения всей космической эволюции. Второй закон термодинамики служил буквально путеводной звездой, когда речь шла об образовании практически любой геохимической формации, не затронутой явлениями жизни. Разрозненные сведения минералогии и петрографии объединялись в величественную картину развития неживой природы именно благодаря использованию общего правила: эволюция физико-химических систем во времени направлена в сторону уменьшения свободной энергии системы, т.е. в сторону возрастания энтропии. Была внесена ясность в очень большое число самых разнообразных геохимических процессов, в то время как в анализе явлений биосферы начали появляться отдельные неувязки.

В.И. Вернадский в «Очерках геохимии» выполнил детальный анализ геохимической истории нашей планеты. Этот анализ, говорит ученый,

«...приводит нас в научную область, находящуюся в процессе образования и касающуюся великих задач жизни и энергетики. Эта наука есть область будущего — будущая энергетика нашей планеты. Приблизительно девяносто лет назад немецкий врач Р. Майер первый понял, что зеленые растения в силу факта своего существования изменяют энергетику земной коры. Они превращают лучистую энергию солнца в новую форму и захватывают ее в благоприятной для химических процессов, развивающихся на нашей планете, форме. Эти идеи Р. Майера остались непонятыми даже долго спустя после проникновения в научную мысль его же идей об единстве и сохранении энергии. Р. Майер несколько раз возвращался к этим представлениям после первого их опубликования; он из них вывел заключение (с тех пор само собою разумеющееся), что каменные угли содержат энергию потенциальную, энергию солнечных лучей, принадлежавшую прошлым геологическим эпохам, и что человек, употребляя эти горючие ископаемые, вновь пускает эту ископаемую энергию в ход.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Живое вещество в форме зеленого растительного мира накапливает солнечную энергию; собранная этим путем сила может быть сохранена миллионы лет в виде каменного угля, вадозного по началу генезиса минерала углерода.

Мы теперь должны обобщить идею Р. Майера. Солнечная энергия, через посредство живого вещества, пребывает в потенциальном состоянии не только в каменном угле, происходящем прямо из зеленых растений, но во всех вадозных минералах углерода, в углекислом кальции и в других биогенных минералах, в большинстве вадозных минералов и, думаю, в существенной мере во всех.

Несомненно, что все химические состояния, связанные с жизнью, являются собирателями солнечной энергии. Если даже энергия проявляется в них в виде молекулярной или химической энергии, ее существование стало возможным только благодаря лучистой энергии солнца, захваченной живым организмом, превратившем ее в химическую энергию.

Мы здесь касаемся явлений жизни самых глубоких из всех, какие были до сих пор изучаемы наукой» (В.И. Вернадский. «Очерки геохимии», 1934, стр. 208).

В.И. Вернадский весьма детально рассмотрел термодинамический аспект явлений жизни не только в рамках первого, но и в рамках второго закона термодинамики. Соответствующий раздел его работы прямо связан со вторым законом, иногда называемым и принципом Карно. В.И. Вернадский назвал этот раздел так:

«Энергия живого вещества и принцип Карно».

«...История идей, относящихся к энергетике жизни, взятой в рамках космоса, указывает на почти непрерывный ряд мыслителей, ученых и философов, приходивших более или менее независимо к одним к тем же идеям, но не углублявших поставленных ими проблем. Кажется, будто давно уже царила благоприятная современным идеям атмосфера. Мы находим краткие, но совершенно ясные указания, мысли и факты на энергетическое отличие живого и мертвого в трудах основателей термодинамики Р. Майера, В. Томсона (лорда Кельвина), Г. Гельмгольца. Эти указания не были поняты и оценены. Уже позже и самостоятельно С.А. Подолинский понял все значение этих идей и старался их приложить к изучению экономических явлений.

...Но мне кажется, что дублинский профессор Д. Джоли наиболее полно первый установил особый энергетический характер живого вещества — совокупности живых организмов, — как противоположного косной материи, и несколько раз выводил из этого положения важные следствия. С той поры к этому не раз возвращались независимо от него и в XX веке.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Эти идеи все больше проникают в нашу науку, хотя они еще и не приобрели необходимой устойчивости и не внедрились в наши представления о мире.

Геохимическая история углерода, неизбежно теснейшим образом связанная с живым веществом, приводит к различному энергетическому аспекту биогеохимических явлений по сравнению с геохимическими явлениями, вне влияния жизни происходящими.

Природные явления, выраженные энергетически, обыкновенно сводятся к принципу Карно. Мы знаем, что они всегда связаны с деградацией энергии; количество свободной энергии, способной производить работу, падает с каждым природным явлением. Энергия рассеивается в виде тепла, — энтропия мира, как говорил Клаузиус, увеличивается, и уровень тепла выравнивается. Если мир имеет границу, если совокупность природных явлений конечна — из этого должен последовать конец мира — уравнивание энергии, которое не позволит проявиться никакому природному явлению, связанному с энергией. Долгое время эти выводы считались достоверными следствиями, законом природы: не находили исключений из этого правила, приведшего к важным научным открытиям. Философская идея о конце мира вместе с тем соответствовала глубоким человеческим настроениям, идеальным антропоморфическим представлениям о природе. И до сих пор ценность и общность принципа Карно очень разно оценивается учеными и философами. К уточнению этой оценки все больше приводит нас эволюция современной научной мысли. Перед ней вскрывается здесь кажущееся свободным новое поле математических и философских построений, ибо глубоко меняется наше представление о соотношении между материей и энергией. Не только резко, коренным образом изменилось наше понимание материи. Давно отошла в прошлое материя не только С. Карно (1824), но и материя Р. Клаузиуса (1854). Само представление об энергии под влиянием эмпирических обобщений начинает меняться; ход и последствия этого изменения нами в нужной мере еще не могут быть даже представлены. Принцип Карно неизбежно получит новое понимание. Проявления жизни являются эмпирическим фактом, с трудом входящим в рамки других природных явлений в аспекте принципа Карно. Уменьшение энергии, ее рассеяние в виде тепла, не имеет места в жизни (такой, как мы ее понимаем) зеленых хлорофильных растений или автотрофных микробов, взятых в природном аспекте, т.е. неразрывно от биосферы.

Наоборот, в силу факта существования этих организмов количество свободной энергии, способной производить работу, очевидным образом увеличивается к концу их жизни в окружающей природе в конце концов с ходом геологического времени. Свободный кислород, изготавливаемый зелеными растениями, каменный уголь, образующийся из их

ПРИЛОЖЕНИЕ

остатков, органические соединения их тел, питающие животных, движения и другие физические и химические проявления, очень различные и многочисленные, представляют выявления новой деятельной энергии, не сопровождаемой никоим образом деградацией исходной лучистой энергии солнца, послужившей для нее исходной. Эта энергия перешла в такую форму, которая создает организм, обладающий потенциальным бессмертием, не уменьшающим, а увеличивающим действенную энергию исходного солнечного луча. Физиологи, изучающие отдельно взятый — вне среды — организм животных, особенно высших, не считали себя обязанными делать эти выводы. Однако мир животных существует лишь за счет зеленого растительного живого вещества и отдельно существовать не может. И если бы зеленые растения погибли, он неминуемо должен был бы разделить их судьбу. Это одно нераздельное явление природы.

Мир животных сам по себе не представляет жизни. Животный организм рассеивает внутри своей физиологической машины энергию, накопленную зелеными хлорофилсодержащими организмами. Но вся совокупность животных, особенно цивилизованное человечество, по-видимому, соответствует тем же энергетическим проявлениям, которые столь характерны для зеленых растений. В своей совокупности животные и растения, вся живая природа, представляют природное явление, противоречащее в своем эффекте в биосфере принципу Карно в его обычной формулировке. Обыкновенно в земной коре в результате жизни и всех ее проявлений происходит увеличение действенной энергии.

Если обратить внимание на всю биогеохимическую работу, производимую живыми организмами, от них неотделимую и ими создаваемую за счет захватываемой, мы видим, что создается этим путем сложный, единый комплекс самодовлеющих организмов, активная энергия которых при одной и той же исходной, непрерывной, но не увеличивающейся энергии солнца увеличивается. Она увеличивается в ходе геологического времени. Это увеличение активной энергии сказывается хотя бы в увеличении сознательности и в росте влияния в биосфере в геохимических процессах единого комплекса жизни. Одно создание, медленно шедшее в геологическом времени, такой геологической силы, какой является для нашей психозойской эры цивилизованное человечество, ясно это показывает.

...В явлениях биосферы, в силу существования жизни, энтропия вселенной должна была бы уменьшаться, а не увеличиваться. Это эмпирическое обобщение вызвало новые спекуляции. Немецкий физик Ф. Ауэрбах увидел в нем выражение нового принципа,

ПРИЛОЖЕНИЕ

противоречащего энтропии. Он назвал его эктропией. Он и другие исследователи старались вывести из него космогонические следствия.

Ничто, однако, не заставляет нас делать новые гипотезы. Энтропия Клаузиуса не имеет реального существования; это не факт бытия, это математическое выражение, полезное и нужное, когда оно дает возможность выражать природные явления на математическом языке. Оно верно только в пределах посылок. Отклонение такого основного явления, каким является живое вещество в его воздействии на биосферу, в биосфере от принципа Карно указывает, что жизнь не укладывается в посылки, в которых энтропия установлена... Сейчас происходит как раз в этом направлении работа мысли физиков, которая указывает на возможность именно такого объяснения энергетической особенности явлений жизни в биосфере — неподчинения ее здесь принципу Карно.

Может ставиться и более глубокий вопрос о самой возможности в этом разрезе ее изучения — изучение живого, а не умершего — нашими методами работы» (В.И. Вернадский. «Очерки геохимии», 1934, стр. 210–213).

Можно отметить, что исчерпывающая сводка термодинамического анализа явлений жизни, сделанная В.И. Вернадским, достаточно точно характеризует состояние рассматриваемого здесь вопроса до 1934 г. За последние тридцать лет интерес к термодинамическому анализу биологических явлений не только не угасал, но проявлялся в многочисленных дискуссиях, продолжающихся до настоящего времени.

В 1935 г. появляется работа советского биолога Э. Бауэра «Теоретическая биология». В основу этой работы Э. Бауэр положил принцип, характеризующий эволюцию живого вещества в том смысле, как понимал этот процесс В.И. Вернадский. Бауэр выдвинул гипотезу о существовании основного закона биологии, который он формулирует как «принцип устойчивой неравновесности», т.е. как принцип устойчивого поддержания биологической системы в условиях, удаленных от термодинамического равновесия. Широко известно, что любая физико-химическая система при изменении условий в окружающей среде начинает изменять свое состояние так, чтобы был совершен переход в новое состояние равновесия. Этот переход из начального в конечное состояние при изменении условий бросается в глаза как в живой, так и в неживой природе. Рефлекторное поведение живых организмов пытались толковать как действие правила Ле-Шателье. Э. Бауэр заметил, что физико-химическая система при изменении внешних условий реагирует так, что стремится к новому состоянию с уменьшенным значением свободной энергии. Это означает, что после перехода в состояние равновесия система обладает минимумом свободной энергии и не

ПРИЛОЖЕНИЕ

может производить работу. Живые организмы при изменении внешних условий также изменяют свое состояние, но это изменение направлено в прямо противоположном направлении — в сторону увеличения свободной энергии системы и обеспечивает возможность совершения работы над внешними условиями. Способность живых организмов в изменившихся условиях внешней среды уходить от состояния термодинамического равновесия и составило содержание принципа устойчивой неравновесности. После того как мы знакомы с историей термодинамического анализа живого вещества, этот вывод полностью соответствует и мыслям Л. Больцмана, и Н.А. Умова, К.А. Тимирязева и др. авторов, приведенных выше. Вот как характеризует это отличие принципа устойчивой неравновесности от принципа Ле-Шателье сам Э. Бауэр:

«Между двумя принципами — принципом Лешателье и установленным нами основным биологическим принципом — имеется, таким образом, внешнее сходство, заключающееся в том, что оба они содержат общее указание, в каком направлении будет происходить реакция, т.е. изменение состояния системы при каком-либо изменении окружающей среды. Кроме того, оба принципа говорят, что изменение состояния системы направлено в некотором смысле против изменения состояния окружающей среды. Физический смысл в обоих случаях, однако, совершенно различен и не имеет друг к другу никакого отношения. Несмотря на это, иногда считают, что между этими двумя принципами есть что-то общее, и что поведение живых систем при изменении состояния окружающей среды следовало бы выводить непосредственно из принципа Лешателье.

Эта ошибочная аналогия так же, как аналогия динамического равновесия, влечет за собой нежелательные последствия, так как она физически неправильна и приводит к ошибочным, не соответствующим фактам, заключениям. Чтобы это понять, надо иметь в виду следующее. Принцип Лешателье относится к системам, находящимся в равновесии, и изменение состояния, т.е. реакция системы, которую требует принцип при изменении окружающей среды, ведет к ожидаемому при данной окружающей среде равновесию, иначе говоря, принцип указывает, при каком именно направлении реакции при данной новой окружающей среде наступит равновесие.

Наш принцип относится к системам, не находящимся в равновесии, и изменение состояния, иначе — реакция систем, которую наш принцип требует при изменении окружающей среды, состоит в работе против ожидаемого при данной окружающей среде равновесия, следовательно, именно против того изменения, которого следовало бы ожидать по принципу Лешателье, если бы система находилась в равновесии» (Э.С. Бауэр.

ПРИЛОЖЕНИЕ

«Теоретическая биология». 1935, стр. 51–52). Несколько ниже Бауэр опять подчеркивает термодинамическое отличие реакции живой системы:

«Лишь в том случае, если мы будем постоянно помнить об этих особых законах, об особом состоянии и строении систем, мы сможем понять процесс обмена веществ и застрахуем себя от ошибок при применении законов термодинамики» (Э.С. Бауэр. «Теоретическая биология». 1935, стр. 59).

В настоящее время книга Э. Бауэра стала библиографической редкостью, и не очень часто встречаются биологи, достаточно хорошо знакомые с работами этого замечательного ученого.

В качестве следующего этапа термодинамического анализа биологических процессов можно рассматривать появление книги Э. Шредингера «Что такое жизнь с точки зрения физики?» Как указывалось выше, в этой работе было введено понятие «отрицательной энтропии», которая служит питанием для всех живых организмов. Некоторыми биологами эта мысль рассматривалась даже как новая. Достаточно обратиться к речи Л. Больцмана 1886 г., приведенной выше, или понятию эктропия Ауэрбаха, как становится очевидным тесная связь всего хода развития науки, неизбежно приводящая различных ученых к одинаковым выводам. В этой работе Э. Шредингер пишет:

«Каждый процесс, явление, событие — назовите это как хотите, — короче говоря, все, что происходит в природе, означает увеличение энтропии в той части мира, где это происходит. Так и живой организм непрерывно увеличивает свою энтропию — или, говоря иначе, производит положительную энтропию и таким образом приближается к опасному состоянию максимальной энтропии, которое представляет собой смерть. Он может избежать этого состояния, т.е. остаться живым только путем постоянного извлечения из окружающей его среды отрицательной энтропии, которая представляет собою нечто весьма положительное, как мы сейчас увидим. Отрицательная энтропия — вот то, чем организм питается. Или, чтобы выразить это менее парадоксально, существенно в метаболизме то, что организму удастся освободить себя от всей той энтропии, которую он вынужден производить, пока он жив.

...Для растений собственным мощным источником «отрицательной энтропии» служит, конечно, солнечный свет» (Э. Шредингер. «Что такое жизнь с точки зрения физики?». ИЛ, 1947, стр. 192–206).

С работами Э. Шредингера мы входим в последний период термодинамического анализа явлений жизни. В этот период благодаря существенным изменениям в состоянии

ПРИЛОЖЕНИЕ

термодинамики исчезает связь между классическим представлением о рассеивающейся в мировом пространстве лучистой энергии и представлением об энтропии. Значительная формализация термодинамики привела к созданию замкнутой и внутренне непротиворечивой системы понятий. Некоторую ясность в структуру этой системы оказалось возможным внести лишь в 1951 г. через введение абсолютных отрицательных температур. Таким образом, попытка термодинамического анализа биологических явлений в настоящее время приводит к значительно большим трудностям, чем в момент становления термодинамики.

Согласно принятым определениям, которые считаются исходными, записывается выражение, определяющее функциональную связь важнейших термодинамических величин. В статистической термодинамике температуру измеряют не в градусах, а в эргах, причем эти величины связаны между собой следующей зависимостью:

$$\theta = kT, \quad (1)$$

где

θ — температура, измеренная в эргах,

T — температура, измеренная в градусах Кельвина;

k — коэффициент пропорциональности, известный под названием постоянной Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-16}$ эрг/град.

При использовании температуры, измеряемой в градусах, приведенный выше коэффициент пропорциональности k вводят в определение энтропии, т.е. связывают безразмерную величину математической статистики σ с термодинамической величиной S :

$$S = k\sigma. \quad (2)$$

Эту величину тоже называют энтропией.

Используя введенные понятия, функциональную связь всех перечисленных величин определяют соотношением

$$\frac{dS}{d\theta} = \frac{1}{T}, \quad (3)$$

где обозначения совпадают с введенными выше понятиями.

Полученное выражение не является связанным со временем, а выводы из второго начала термодинамики, вообще говоря, должны отличать настоящее время от будущего, так как они позволяют предсказывать направление протекания процессов во времени. Анализ размерностей, который часто используется в точных науках, приводит к выводу, что должна существовать еще какая-то связь записанного выражения со временем. Эту неявную связь

ПРИЛОЖЕНИЕ

формулы (3) со временем указывают через значение знаков. Так, в приведенном выражении принято было считать, что температура в градусах Кельвина — величина существенно положительная, что и составляет основное содержание классического выражения второго закона термодинамики.

Действительно, если температура в градусах Кельвина может иметь не только положительное, но и отрицательное значение, то коэффициент полезного действия машины Карно будет принимать значения больше единицы. Так как это невозможно, то столь же невозможно и наличие отрицательного знака у производной от энтропии по энергии в левой части выражения (3). Формула (3) содержит правило знаков — если система получает энергию, то ее энтропия может только увеличиваться, т.е. изменение энтропии при получении энергии положительно.

В рассуждении Шредингера мы обнаруживаем прямо противоположное утверждение — при получении лучистой энергии извне в хлорофилловом аппарате растения происходит уменьшение энтропии, т.е. зеленому листу растения, в соответствии с формулой (3), мы должны приписать значение абсолютной отрицательной температуры. Названный парадокс статистической термодинамики разрешается при анализе теоремы Нернста. Пользуясь теоремой Нернста, мы позволили себе исключить некоторую постоянную, соответствующую значению энтропии при абсолютном нуле. Так, например, углекислоте и воде в состоянии абсолютного нуля мы будем приписывать ту же энтропию, что и сахару, который получен из углекислоты и воды в процессе фотосинтеза. Действительно, по теореме Нернста энтропия исходных веществ и конечного продукта одинакова, но мы не можем утверждать, что в этом примере энтропия однозначно определяет состояние той и другой системы, хотя обе системы будут находиться в равновесных условиях.

Химическая потенциальная энергия продуктов фотосинтеза, отличающая систему, состоящую из сахара и кислорода, от системы, состоящей из углекислоты и воды, может не иметь существенного значения в некоторых теоретических построениях, однако каждый ученый может обнаружить разницу между тем и другим, если вместо сахара на завтрак он будет получать газированную воду. Приведенная шутка имеет и более глубокий смысл — принцип Нернста, безусловно, полезный для облегчения вычисления энтропии, так как избавляет эту величину от «мешающей постоянной интегрирования», выплескивает с грязной водой и ребенка.

Абсолютные отрицательные температуры, вообще говоря, более распространены, чем это принято думать. Простой двигатель внутреннего сгорания использует вещества, которые

ПРИЛОЖЕНИЕ

имеют температуру, равную температуре окружающей среды. В результате вспышки (химическая реакция — именно эти процессы всегда исключали все основатели термодинамики как неравновесные) не только увеличивается температура смеси, но и совершается работа. Если такой двигатель будет работать при температурах, равных абсолютному нулю, то его кажущийся коэффициент полезного действия будет стремиться к бесконечности. В данном примере нет никакой принципиальной разницы между усилением мощности в квантовом генераторе и усилением мощности, подводимой к системе для инициирования химической реакции. Населенность верхнего энергетического уровня («с накопленной химической энергией») термодинамически невероятна, и система, освобождая энергию, возвращается в свое наиболее вероятное состояние. Остается открытым вопрос: что ответственно за населенность этого маловероятного состояния? Для любого вида двигателя мы пока (исключая ядерные реакции) можем назвать одну причину — органическая жизнь, существовавшая в одну из прежних эпох.

Введение «химического сродства» в термодинамике необратимых процессов или в химической термодинамике есть вынужденная мера — мы вынуждены были вводить представление о химических потенциалах вместо использования постоянной интегрирования в уравнении Клаузиуса. Менее ясна связь интеграла Клаузиуса со временем. Интеграл отличает начальное состояние системы от конечного, как последовательность состояний системы во времени, через положительный знак изменения энтропии. Если нам удалось бы обнаружить в некотором переходе отрицательное изменение энтропии, то мы должны были бы объяснить это явление «отрицательным» ходом времени, как это пытался делать Г. Рейхенбах («Направление времени». ИЛ, 1962). Значительно проще решать эту проблему в соответствии с предложением Н.А. Умова, т.е. принятием определенного направления изменения энтропии в биологических явлениях.

Есть еще одна особенность этого же понятия — энтропия есть неявная функция времени, т.е. в термодинамике через энтропию мы выражаем не энергию, а мощность. Эта мощность обеспечивает поддержание свободной энергии открытой системы на постоянном уровне. Только система, находящаяся при абсолютном нуле, имеет обменный поток с окружающей средой, равный нулю, что и соответствует значению энтропии, равной нулю при температуре абсолютного нуля. По мере роста температуры открытой системы растет излучение этой системы (т.е. мощность, излучаемая в единицу времени) и, следовательно, сохранение энергии в такой системе может быть обеспечено лишь большей мощностью,

ПРИЛОЖЕНИЕ

поступающей извне. Модуль этого обменного потока может соответствовать физическому смыслу понятия энтропия.

В последнее время, в связи с развитием кибернетики и теории информации, старые идеи о термодинамических особенностях живых организмов получили свое выражение через понятие информации, или негэнтропии, т.е. через понятия, тождественные энтропии Ф. Ауэрбаха и «отрицательной энтропии» Э. Шредингера. Проходит второй цикл бурных дискуссий по старой проблеме, которая по-прежнему еще далека от решения. Лучшим выражением состояния настоящего вопроса является положение, высказанное А.И. Опариным в его книге «Жизнь, ее природа, происхождение и развитие» (М., 1960, стр. 17).

«Сложнее обстоит дело со вторым законом, выражающим статистическую тенденцию природы к беспорядку, тенденцию к выравниванию и, таким образом, обесценению энергии в изолированных системах, что обычно выражается как возрастание энтропии.

...В противоположность этому в организмах не только не происходит нарастания энтропии, но даже возможно ее уменьшение. Таким образом, как будто бы получается, что основным законом физики является тенденция к беспорядку, увеличение энтропии, а основным законом биологии, напротив, рост организованности — уменьшение энтропии».

Этими словами академика А.И. Опарина и можно закончить исторический обзор нашей проблемы. Как будет развиваться это направление в будущем — еще не определено. Очевидно, наступит и такое время, когда в этом вопросе будет выяснено многое и никогда все. Велико разнообразие окружающего нас мира, и столь же длителен путь его познания. Молодому поколению советских ученых представляется обширное поле научной деятельности.