

К. РЕБАНЕ

ТРИ ЗАМЕЧАНИЯ К ПРОБЛЕМЕ ВОЗРАСТАНИЯ ЭНТРОПИИ

1. О «тепловой смерти»

Проблема имеет два существенно различных уровня постановки. Первый, более высокий уровень, есть традиционная постановка проблемы «тепловой смерти» для «всей вселенной» или для ее части, доступной наблюдениям в данное время. Вторая возможность заключается в формулировке вопроса об установлении теплового равновесия для нашей солнечной системы.

Первая постановка проблемы очень интересна для общих проблем физики, астрофизики, космологии и философии.¹ Вторая постановка много скромнее, но во столько же раз более актуальна для нас, поскольку мы живем и работаем в солнечной системе. Особенно актуальной становится проблема «тепловой смерти», если ее поставить не как проблему установления полного термодинамического равновесия в солнечной системе, а как проблему достижения на Земле некоторого высокого уровня энтропии², при котором человеку уже невозможно жить или развивать производственную деятельность. При достигнутом уровне техники и военного потенциала человечеству уже сейчас вполне под силу настолько испортить биосферу, например, радиоактивным заражением, что оно погубит себя. В условиях отсутствия радиоактивного заражения, но при неразумном развитии обычной (не атомной) промышленности, без должного внимания к сохранению и восстановлению главных богатств природы — чистого воздуха, чистой морской и пресной воды, чистой поверхности земли, излучения солнца — также можно в течение небольшого числа десятилетий достигнуть такого состояния испорченности, которое с точки зрения жизни и деятельности человека может быть охарактеризовано как состояние «тепловой смерти для нас». Это есть состояние, в котором исчерпаны источники негэнтропии, необходимые для жизни и развития производственной деятельности человека.

В этой связи проблема прогнозов будущего сводится к вопросу об источниках энергии, более точно — об источниках негэнтропии.³ При обсуждении проблемы замкнутости или баланса (термодинамической)

¹ Хотя сама проблема сводится, на наш взгляд, прежде всего к вопросу о том, как ее корректно поставить.

² Поскольку речь идет о сильно неравновесных состояниях, то, очевидно, для их описания только уровня энтропии недостаточно; подобные состояния характеризуются весьма большим числом параметров.

³ У нас речь идет об источниках внутри системы. В силу закона сохранения энергии нет смысла говорить об источниках энергии внутри системы.

системы обычно ограничиваются внешними связями ее. Но в случае сложной большой системы, в особенности такой, в которой развивается жизнь и разумная целенаправленная производственная и научная деятельность человека, исключительно важное значение приобретают источники негэнтропии внутри самой системы. Ведь вся история развития энергетике по сути дела есть история открытий источников негэнтропии и реализации путей их применения. С точки зрения физики речь идет об отыскании метастабильных состояний вещества и способов перевода их в другие состояния, которые характеризуются той же энергией всей системы (закон сохранения энергии!), но с возросшей энтропией. Весь полезный для нас эффект достигается в ходе процесса возрастания общей энтропии системы.

Очевидно, что принципиальная проблема существования последовательности все более мощных источников негэнтропии сводится к проблеме существования на глубоких микроуровнях материи последовательности «метастабильных» состояний и возможности их изменения.

В настоящее время в эксплуатацию взяты процессы перестройки элементарных частиц в атомных ядрах, т. е. используется негэнтропия, заключенная на ядерном уровне структуры вещества.

По сравнению с эффектами химических превращений количество превращаемой энергии на грамм вещества и возможные здесь в принципе полезные эффекты огромны. Велики также степень загрязнения биосферы (в том числе радиоактивностью) и бесполезные тепловые эффекты. Иными словами, огромна и степень возрастания энтропии на Земле, как и должно быть, ибо полезный для нас эффект локального убывания энтропии обязательно сопровождается большим по величине эффектом возрастания энтропии всей системы.

Для прогнозов будущего жизненно важно знать, имеются ли на уровне внутренней структуры так наз. элементарных частиц состояния, которые могут быть изменены с полезным эффектом освобождения негэнтропии. Если да, то этот же вопрос встанет снова относительно следующего, еще более глубокого, уровня строения вещества и материи. Проблема почти совпадает с проблемой существования «истинных элементарных» частиц. Физика пока не может дать ответа на этот вопрос.

Если истинных элементарных частиц нет, если баланс негэнтропии при превращениях на все более глубоких уровнях положительный⁴ и если количество освобождаемой негэнтропии тем больше, чем глубже уровень, то система оказывается «открытой во внутрь». «Тепловой смерти» в ней не будет даже тогда, когда нет притока энергии извне.

Отсюда еще раз видно, насколько важны фундаментальные знания об элементарных частицах и следующих за ними более глубоких уровнях строения вещества и материи. Открытие новых и все более мощных источников негэнтропии — одно из основных необходимых условий продолжения существования и развития человечества. Не менее важны знание и реализация путей содержания окружающей нас природы в достойном для жизни человека состоянии в условиях все ускоряющихся процессов возрастания энтропии, с неизбежностью сопровождающих развитие жизни и производства. Это — второе необходимое условие прогресса. Ясно, что названные два условия далеко еще не составляют набора достаточных условий, но то, что они необходимы — бесспорно.

⁴ Негэнтропия, затрачиваемая на организацию превращения меньше, чем освобождаемая в его ходе.

2. О балансе негэнтропии Земли

Очень много внимания уделено балансу излучений Земли (см. например [1]). Делается это в энергетическом и спектральном аспектах. Основной величиной является солнечная постоянная \varkappa — количество энергии, которое приносят солнечные лучи за 1 мин на площадку в 1 см^2 , поставленную вне земной атмосферы перпендикулярно к солнечным лучам на среднем расстоянии Земли от Солнца. Постоянная $\varkappa = 2 \text{ кал см}^{-2} \text{ мин}^{-1}$ [2].

Излучение Солнца действительно является основным источником энергии для всех процессов на поверхности и в атмосфере Земли.

С другой стороны очевидно, что средний за подходящий промежуток времени энергетический баланс для Земли в целом прост: из приблизительной стационарности в среднем энергетического состояния Земли следует, что количество энергии, поступающей из мирового пространства в виде излучения, в среднем примерно равно количеству энергии излучения, уходящего обратно в мировое пространство. Все дело в «ухудшении качества энергии», т. е. в возрастании энтропии того же количества энергии в ходе преобразования ее на поверхности и в атмосфере Земли. За счет разности энтропий приходящего на Землю излучения и излучения, уходящего в мировое пространство, сохраняется приблизительно стационарный режим процессов превращения энергии на Земле. Поэтому представляется интересным дать хотя бы грубую оценку величины этого изменения энтропии.

Простейшую оценку проведем следующим образом.

Во-первых, будем считать, что как в приходящем на Землю, так и уходящем от нее излучении связь между энтропией S и внутренней энергией U такая же, как в равновесном излучении (в излучении абсолютно черного тела): $S = \frac{4}{3} \frac{U}{T}$, где T — температура излучения⁵.

Во-вторых, примем, что температура приходящего излучения T_1 (для оценок $T_1 \approx 6000^\circ \text{ К}$), намного выше температуры уходящего излучения T_2 ($T_2 \approx 300^\circ \text{ К}$).

Для годовой разности энтропии мы имеем

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \frac{4}{3} \left(\frac{U_2}{T_2} - \frac{U_1}{T_1} \right), \quad (1)$$

где U — энергия излучения Земли в течение года (индекс 1 относится к приходящему, 2 — к уходящему излучениям). Количество энергии U_1 за одну минуту выражается через солнечную постоянную \varkappa :

$$U_1 = \pi R^2 N \varkappa, \quad (2)$$

где R — радиус Земли, N — число минут в году.

Из соображений годового баланса энергии излучения для Земли в среднем следует, что $U_2 = U_1$.

Тогда мы получаем

$$\Delta S = \frac{4}{3} \pi R^2 N \varkappa (T_2^{-1} - T_1^{-1}). \quad (3)$$

После подстановки численных значений получаем

$$\Delta S \approx 2 \cdot 10^{21} (T_2^{-1} - T_1^{-1}) \text{ ккал год}^{-1} \text{ град}^{-1}. \quad (4)$$

⁵ Подчеркнем, что само излучение не предполагается равновесным. Поэтому у нас T не есть истинная температура излучения, а лишь параметр с размерностью температуры. Также нет однозначной связи между внутренней энергией и температурой.

Поскольку согласно второму предположению $T_2^{-1} \gg T_1^{-1}$, то имеем

$$\Delta S \approx \frac{2 \cdot 10^{21}}{T_2} \text{ ккал год}^{-1} \text{ град}^{-1}. \quad (5)$$

Если принять $T_2 \approx 300^\circ \text{K}$, получим следующую оценочную цифру для годового возрастания энтропии излучения в сфере влияния Земли:

$$\Delta S \approx 10^{19} \text{ ккал год}^{-1} \text{ град}^{-1}. \quad (6)$$

Мы надеемся, что эта величина может служить некоторой оценкой годового «рациона негэнтропии» для Земли. ΔS является той величиной, в пределах которой в принципе возможно наладить приближенно стационарную систему жизни и производства. Из (5) видно, что в принципе ΔS не ограничено: за счет уменьшения T_2 при той же солнечной постоянной κ можно использовать больше негэнтропии.⁶ Фактически предел кладет фон теплового излучения космоса с температурой в несколько градусов Кельвина.⁷ Рассмотренная здесь модель очень и очень груба, но последний вывод согласуется и с общими соображениями. Действительно, чем более длинноволновым является уходящее излучение, тем больше может быть его энтропия: на одно и то же количество энергии приходится больше фотонов и вместе с тем больше возможностей распределения между ними данной энергии.

3. Энтропия и критерий научно-технического прогресса

Если предпринять попытку сформулировать некоторый общий и единый критерий научно-технического прогресса, выражающий его физическую сторону, то представляются довольно очевидными следующие два обстоятельства.

1. В основе производства лежит превращение энергии. Однако в силу закона сохранения энергии о самой энергии заботиться не надо и в качестве критерия она не годится: количество энергии в точности всегда сохраняется. Говорить, например, о производстве энергии бессмысленно. Фактически имеют в виду количество энергии, превращаемой из одних видов в другие виды, т. е. изменение качества энергии при точном сохранении количества ее. Физической величиной, характеризующей ситуацию, служит энтропия или величина, отличающаяся от нее только знаком — негэнтропия. Чем более интенсивен процесс использования негэнтропии, тем выше, вообще говоря, уровень производства.

2. Для производственных процессов необходимы источники высокой негэнтропии: запасы различных видов высококачественной энергии, залежи полезных ископаемых, достаточно чистые воздух и вода для технологических целей и т. д.

Мы живем в такое время, когда стало очевидным, что нет неисчерпаемых источников негэнтропии. Поэтому критерий развития производства должен отражать и состояние источников негэнтропии.

Исходя из вышесказанного представляется возможным предложить

⁶ В частности, роль растительного покрова на Земле сводится в этом аспекте к уменьшению эффективной температуры уходящего излучения T_2 . Растительность на Земле ускоряет рост энтропии во вселенной, но увеличивает запасы негэнтропии на Земле. Это общее свойство всякой жизнедеятельности: она ускоряет процессы роста энтропии в системе в целом.

⁷ Кстати, отсюда вытекает связь «тепловой смерти» для Земли с «тепловой смертью» для вселенной.

в качестве исходного приближения для критерия научно-технического прогресса $P(t)$ следующую формулу:

$$P(t) = \alpha(t)N(t) (-\Delta N(t)/\Delta t), \quad (7)$$

где t — время; $N(t)$ — запасы негэнтропии, реально доступные использованию в данное время; $\Delta N(t)/\Delta t$ — количество использованной за время Δt негэнтропии (знак минус взят, чтобы получить $P(t)$ положительным); $\alpha(t)$ — положительный коэффициент, характеризующий степень полезности использования негэнтропии.

Несколько дополнительных замечаний относительно формулы (7).

1. Содержание ее определено только сформулированными выше двумя довольно очевидными обстоятельствами и имеется множество возможностей для выбора вида функции от негэнтропии и скорости ее изменения. В частности, не исключено, что несколько лучше рассмотреть величину $\Delta P(t)/\Delta t$, где $P(t)$ определен согласно (7), ибо истинный прогресс означает ускорение прогресса.

2. $\alpha(t)$ является сложной и чрезвычайно трудно оценимой количественно величиной. Очевидно только, что этот коэффициент должен состоять из двух частей, одна из которых характеризует техническое и технологическое совершенство процессов использования негэнтропии, другая — ценность человеческих целей, достигнутых в результате производственной деятельности.

3. $N(t)$ убывает медленно, но неумолимо из-за обычных производственных процессов в результате сжигания топлива, загрязнения воды и т. д. Она восстанавливается постепенно и медленно (в наши дни восстановление явно медленнее убывания) за счет солнечного излучения. Открытие и взятие в эксплуатацию новых природных богатств также увеличивает $N(t)$. Однако характерным и определяющим для $N(t)$ являются большие скачки роста, обусловленные фундаментальными открытиями науки, такими как, например, открытие и применение ядерной энергии, которые приводят к использованию источников негэнтропии, запасенной на глубоких уровнях структуры вещества.

*

В заключение необходимо признать, что приведенные выше рассуждения основаны по крайней мере на трех существенных допущениях, которые вкратце сводятся к следующему.

Во-первых, предполагается, что энтропия имеет смысл также для сильно неравновесных состояний весьма сложных открытых систем. (Об определении энтропии для неравновесных физических систем см. [3]).

Во-вторых, считается, что наличие жизни и даже разумной целенаправленной деятельности, включая разработку и применение научных теорий, не может быть источником негэнтропии. (Краткая постановка проблемы имеется, например, в [4]).

В-третьих, именно энтропия (или достаточно близкая к ней величина), а не какая-нибудь другая характеристическая функция термодинамики является определяющей величиной. (В частности, Пасынский [5] критикует точку зрения Шредингера [6] об определяющей в жизнедеятельности роли негэнтропии⁸).

Перечисленные положения не бесспорны, их обсуждение может служить предметом специальных исследований.

⁸ На наш взгляд Пасынский прав, что организм извлекает из среды и использует не негэнтропию в чистом виде, а свободную энергию. Однако критика Шредингера в целом бьет мимо цели: из закона сохранения энергии следует, что в конечном счете в системе изменяется только энтропия. Это очевидно, если рассматривать баланс энергии и вещества для взрослого организма или результат годичного цикла развития растительности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратьев К. Я., Авасте О. А., Федорова М. П., Якушевская К. Е., Поле излучения Земли как планеты, Л., 1967.
2. Физический энциклопедический словарь, 4, М., 1965, с. 572.
3. Файн В. М., УФН, 79, 641 (1963).
4. Толпыго К. Б., Термодинамика и статистическая физика, Киев, 1966, с. 344—352.
5. Пасынский А. Г., Биофизическая химия, М., 1963, с. 27—28.
6. Шредингер Э., Что такое жизнь с точки зрения физики?, М., 1947.

Институт физики и астрономии
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
27/1 1970

K. REBANE

KOLM MÄRKUST ENTROOPIA SUURENEMISE KOHTA

1. Küllalt suures ja keerukas süsteemis (näit. Maal) ei tarvitse soojussurm saabuda isegi siis, kui puudub energia juurdevool väljastpoolt. Taoline süsteem osutub «avatuks sissepoole» ning temas on põhimõtteliselt võimalik säilitada negentroopia kõrget nivood tingimusel, et aine ehituses on olemas hierarhia üha sügavamaid nivooisid (ei ole olemas «tõelisi elementaarosakesi») ja et nendel nivoodel on võimalikud küllalt suure positiivse negentroopia bilansiga protsessid.

2. Kuna Maa energiarežiim on keskmiselt ligikaudu statsionaarne, siis peab Päikeselt saabuva kiirgusvoo energia ligikaudu võrduma Maa poolt transformeeritud ja maailma-ruumi hajutatud kiirgusvoo energiaga. Sellepärast on oluline hinnata energia «kvaliteedi langust» kiirguse muundumise kestel Maa pinnal ja atmosfääris. Väga lihtsa mudeli najal on saadud entroopia suurenemise hinnanguks $\Delta S \approx 10^{19}$ kcal aasta⁻¹ kraad⁻¹.

3. Teaduslik-tehnilise progressi füüsikalise külje jämedates joontes, kuid üldiseks iseloomustamiseks esitatakse seos $P(t) = \alpha(t)N(t)$ ($-\Delta N(t)/\Delta t$), kus t on aeg; $N(t)$ — antud ajal reaalselt kasutusele võetavad negentroopia varud; $\Delta N(t)/\Delta t$ — ajavaheemikul Δt kulutatud negentroopia; $\alpha(t)$ — positiivne koefitsient, mis iseloomustab kulutatud negentroopia kasulikkust.

On lühidalt sõnastatud eeldused, millest töös lähtuti.

K. REBANE

THREE REMARKS ABOUT THE INCREASE OF ENTROPY

1. In a sufficiently big and complicated system (e. g. the Earth) "heat death" need not arrive even in case of an absence of energy inflow from outside. Such a system appears to be "open inwards" and it is, in principle, possible to keep the level of negentropy high in it, if in the structure of matter there are ever deeper levels of hierarchy (no "real elementary particles" exist) and if there occur processes on these levels with a sufficiently high positive negentropy balance.

2. Since the energy conditions on the Earth are, on the average, approximately stationary, the energy of the radiation flow coming from the Sun must be roughly equal to the energy of the radiation flow transformed and scattered back into space by the Earth. Thus, it is important to estimate the "quality lowering" of energy in the course of radiation transformation on the surface of the Earth and in the atmosphere. With the aid of a very simple model, the estimation of the growth of entropy has been obtained as $\Delta S \approx 10^{19}$ kcal year⁻¹ degree⁻¹.

3. Speaking roughly about the physical aspect of the progress of science and engineering the following relation is proposed: $P(t) = \alpha(t)N(t)$ ($-\Delta N/\Delta t$) where t is time; ΔN — supplies of negentropy made actually use of at a given time; $\Delta N/\Delta t$ — amount of negentropy spent in time interval Δt ; $\alpha(t)$ — positive coefficient characterizing the utility of spent negentropy.

The assumptions from which the paper proceeds are briefly given.