

## ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ И ЕГО РАЗВИТИЕ

<sup>1</sup>Сосновский Л.А., <sup>2</sup>Щербаков С.С.<sup>1</sup>ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», Гомель<sup>2</sup>УО «Белорусский государственный университет», Минск

Всякая система, как считается, обладает энергией и энтропией. В основе термодинамики по существу лежат два закона, или начала: одно из них относится к энергии (закон сохранения энергии), другое – к энтропии (закон изменения энтропии)[1]. Впервые Клаузиус [2] определил энтропию ( $S$ ) как функцию, которая зависит от начального ( $A$ ) и конечного ( $B$ ) состояний термодинамической системы

$$S_B - S_A = \int_A^B \frac{dQ}{T} \quad \text{или} \quad dS = \frac{dQ}{T} \geq 0, \quad (1)$$

где  $T$  – температура,  $Q$  – количество тепла. Теплоота – это форма энергии, а температура объекта – мера средней кинетической энергии движения его атомов. Согласно (1), энтропия тела, все части которого имеют одинаковую температуру, равна частному от деления (соотношению) количества тепла, которое выделило бы тело при охлаждении до абсолютного нуля, на его абсолютную температуру.

Таким образом, энтропия  $S$  – это мера необратимого рассеяния энергии, которая характеризует состояние термодинамической системы [1, 3].

«Предлагаю величину  $S$  называть энтропией от греческого τροπή – преобразование. Я специально подобрал слово энтропия, чтобы оно было созвучно со словом энергия, так как эти две величины настолько сходны по своему физическому значению, что созвучие их названий кажется мне полезным» [2, с. 357, курсив наш].

В самом деле, в общем случае открытой системы изменение  $dU$  внутренней энергии  $U$  представляется, с учетом (1), в виде взаимосвязи энергии и энтропии

$$dU = dQ + dA + dU_{sub} = TdS - pdV + \sum_1^n \mu_k dN_k, \quad (2)$$

откуда следует, что изменение энтропии может быть описано уравнением

$$dS = \frac{dU + pdV}{T} - \frac{1}{T} \sum_1^n \mu_k dN_k \geq 0, \quad (3)$$

в правой части которого отдельные компоненты энергии считаются аддитивными.

Здесь  $dQ$  – количество тепла;  $dA$  – количество механической энергии;  $dU_{sub}$  – количество вещества, которым система обменивалась с окружающей средой за интервал времени  $dt$ ;  $p$  – давление;  $\mu_k$  – химические потенциалы;  $dN_k$  – изменение числа молей вещества вследствие необратимых химических реакций и обмена веществом с внешней средой. Планк особо подчеркивал [4], что в формуле (2)  $dU$  есть бесконечно малая разность, тогда как  $dQ$ ,  $dA$ ,  $dU_{sub}$  – бесконечно малые количества.

Приращение энтропии (3), по Пригожину (см. [1]) может быть представлено как сумма ее изменения  $d_e S$ , обусловленного обменом системы энергией и веществом с внешней средой, и изменения  $d_i S$ , обусловленного необратимыми процессами внутри системы:

$$dS = d_e S + d_i S \geq 0. \quad (4)$$

Хотя *понятие* о термодинамической энтропии является простейшим (см. (1)), оказалось, что оно имеет *фундаментальное значение* для анализа *эволюции* систем во времени

$$dS/dt \geq 0. \quad (5)$$

Отсюда следует предположение, что положительное направление времени *связано* с увеличением энтропии при необратимом процессе (знак неравенства в (5)). Это предположение было образно интерпретировано как знаменитая *стрела времени*, представление о которой затем было востребовано в общей теории относительности.

Таким образом, разные формулировки второго закона термодинамики гласят (см., например, [1]):

- Энтропия Вселенной стремится к максимуму.
- Теплота не может самопроизвольно переходить от более холодного тела к более нагретому.
- Сумма изменений энтропии системы и внешней среды не может убывать.
- Для любого необратимого процесса энтропия должна увеличиваться (знак неравенства в (1), (3)-(5)), тогда как для обратимого процесса она остается постоянной (знак равенства).
- При температуре абсолютного нуля энтропия любого химически однородного твердого или жидкого тела принимает нулевое значение.
- Построить вечный двигатель невозможно и др.

В открытой системе, способной обмениваться энергией и веществом с окружающей средой, *однонаправленный энтропийный поток* (см. (3) и (5)) может отличаться от *производства энтропии во времени*

$$P \equiv \frac{d_i S}{dt} = \sum_k J_k X_k \geq 0, \quad (6)$$

где  $J_k$  – поток (или скорость),  $X_k$  – обобщенная термодинамическая сила необратимого процесса. Также процессы могут быть *источниками порядка* внутри системы [5]. Пригожин построил *обобщенную термодинамику*, в которой (6) – основное уравнение необратимых состояний. Согласно (3) и (6), *состояние равновесия характеризуется либо минимумом (ноль производства энтропии), либо максимумом энтропии*. Тем самым прогнозируется *тепловая смерть Вселенной*, впервые образно сформулированная Гельмгольцем и позже популяризированная Эддингтоном. Все это означает, что низкий энтропийный порядок постепенно, но неумолимо вырождается в *хаос*, поскольку Вселенная стремится к термодинамическому равновесию.

*Необратимость* оказалась глубокой концепцией, на базе которой термодинамика пытается построить *космологическую теорию эволюции*. Но она не поддерживалась механикой, так как все законы динамики, напротив, *обратимы*. Чтобы сгладить обратимость механики с необратимостью термодинамики, *Больцман* предложил *статистическую интерпретацию* второго закона термодинамики [6]

$$S = kW, \quad (7)$$

где  $W$  – число микросостояний среды, соответствующих тому ее макросостоянию, энтропия которого равна  $S$ ;  $k$  – постоянная Больцмана.

По формуле (7), чем больше  $W$ , тем вероятнее, что это макросистема, которая подчиняется статистическим законам. Следовательно, согласно *статистической механике*, необратимые процессы, происходящие с ростом энтропии, соответствуют эволюции к наиболее вероятным состояниям. Равновесное состояние характеризуется тем, что значение  $W$  достигает максимума. Формула (7) справедлива только для замкнутой системы, способной обмениваться с окружающей средой энергией, но не веществом. Она хорошо описывает поведение газов, столкновения частиц (атомов) в которых *статистически независимы*.

В классической динамике делается попытка *встроить* второй закон термодинамики в динамическую систему, в которой возникают некоторые особенности – временные неустойчивости (см., например, [7]). Предложено (в частности, в (7)) это сделать, используя известную переменную (функционал) *Ляпунова* путем введения в гамильтониан динамического оператора  $M$ :

$$\int_{\Gamma} d\mu_r M \rho_r. \quad (8)$$

Здесь  $M$  играет роль энтропии на микроскопическом уровне. Способен ли этот *энтропийный оператор* описать необратимые состояния? Вопрос остается пока открытым.

Дальнейшее развитие второго закона термодинамики дано в одной из космологических концепций [8, 9]. Бекенштейн выдвинул предположение, которое казалось невероятным: в *черных дырах* может содержаться огромная энтропия.

Есть веские причины полагать, что черные дыры существуют реально. Их нельзя увидеть, однако можно наблюдать то, что происходит в их окрестностях. Так, некоторые черные дыры образуются в результате коллапса очень массивных звезд. Последние могут иметь соседей, которые вращаются вокруг главной звезды. Потoki газа, испускаемые звездой-компаньоном, могут *падать* на черную дыру, образуя вокруг нее аккреционный диск, который, в свою очередь, нагревается до гигантских температур и генерирует мощное рентгеновское излучение. Спутники обнаружили множество источников такого излучения, анализ которого позволяет понять некоторые свойства черных дыр.

Имеются также доказательства существования сверхмассивных черных дыр в центрах галактик – их массы в миллионы раз превышают массу Солнца. На ранних стадиях образования галактик эти гигантские черные дыры *поглощают* все вещество вокруг себя, затягивая его мощнейшими вихрями, которые мы наблюдаем как квазары. Согласно общей теории относительности – это не просто *плотно упакованный объем* исходного материала. Это чистое гравитационное поле. После завершения формирования черной дыры у нее остаются три характеристики, поддающиеся измерению: ее полная масса, скорость вращения и электрический заряд.

Установлена *аналогия* термодинамики и механики черных дыр (см. [8, 9]: *энергия, температура и термодинамическая энтропия* – характеристики, аналогичные *массе, поверхностной гравитации и площади горизонта событий* для черных дыр. В результате Бекенштейн [8] предложил *обобщенное* второе начало термодинамики, представляющее собой, по сути, обычное второе начало термодинамики, но с добавлением *энтропии черных дыр*. Согласно расчетам Хокинга [9], энтропия черной дыры равна  $\frac{1}{4}$  площади ее горизонта, измеренного в единицах планковской площади

$$S_{BH} = \frac{1}{4} \frac{A}{L_p^2}. \quad (9)$$

Нижний индекс  $BH$  можно читать как Black Hole (черная дыра), или Bekenstein–Hawking (Бекенштейн–Хокинг).

В (9) площадь  $A$  горизонта событий выражается в единицах планковской площади  $L_p$ . *Планковская длина*, равная  $10^{-33}$  см, есть невероятно маленькое расстояние, на котором квантовая гравитация начинает играть заметную роль; планковская площадь – это квадрат планковской длины. Для черной дыры, масса которой сравнима с массой Солнца, площадь горизонта событий составляет около  $10^{77}$  планковских площадей. Это огромное число: энтропия, равная  $10^{77}$ , – это больше, чем энтропия всех звезд, газа и пыли во всей галактике Млечный путь.

Согласно Хокингу [9], хотя и можно уменьшить массу/энергию вращающейся черной дыры, существует величина, которая всегда либо увеличивается, либо остается неизменной – площадь горизонта событий, которая, по сути, характеризует размер

черной дыры. Это *похоже* на то, как ведет себя энтропия согласно второму началу термодинамики. Площадь горизонта зависит от сочетания массы, углового момента и заряда. И всякая конкретная их комбинация никогда не уменьшается. Например, если есть две черные дыры, они могут столкнуться друг с другом и *слиться* в одну черную дыру. Однако *площадь нового горизонта событий всегда больше, чем суммарная площадь двух исходных горизонтов*, а одна большая черная дыра *никогда не может распасться на две меньшие*, так как в этом случае ее площадь пришлось бы уменьшить.

Площадь горизонта событий пропорциональна квадрату массы черной дыры:

$$A = 16\pi G^2 m^2 / c^4, \quad (10)$$

где  $G$  – гравитационная постоянная,  $c$  – скорость света.

Задумаемся над изложенной аналогией. Следует признать, что термодинамическая энтропия, которая характеризует *рассеяние энергии* (см. (1) и (3)), все же *далека* от черной дыры, которая характеризуется процессами *поглощения вещества*. Ближе к ней (по содержательному смыслу) оказывается *трибофатическая энтропия* [10, 11], изменение которой дается формулой

$$(d_i S)_{TF} = \frac{\gamma_1^{(w)}}{T_\Sigma} \omega_\Sigma dV_{P_\gamma}. \quad (11)$$

Согласно (11), трибофатическую энтропию порождают *необратимые повреждения*  $\omega_\Sigma$  в *опасных объемах*  $V_{P_\gamma}$  движущихся и деформируемых твердых тел, взаимодействующих между собой и/или со средой. Здесь  $T_\Sigma \geq T$  – температура, обусловленная всеми источниками ( $T$  – температура среды),  $\gamma_1^{(w)}$  – давление (напряжение), которое приводит к повреждению опасного объема единичной величины.

Согласно обобщенным представлениям (см., например, [12-15]), *повреждение* есть *необратимое изменение* состава, строения, структуры, размеров, формы, объема, массы (и т.д.) и, следовательно, соответствующих физико-химических, механических и других свойств объекта; в конечном счете, повреждение связывают с нарушением *сплошности* и *целостности* тела, вплоть до его *разложения* (например, на атомы). Таким образом, повреждаемость трактуется как *фундаментальное свойство* (и обязанность) движущихся и деформируемых систем.

Комплекс ( $\Sigma$ ) необратимых повреждений ( $\omega_\Sigma$ ) определяется *эффективной (поглощенной в системе) энергией* ( $U_\Sigma^{eff}$ ), обусловленной силами любой природы:

$$\omega_\Sigma(U_\Sigma^{eff}) = \omega_\Sigma(U_n^{eff}, U_\tau^{eff}, U_T^{eff}, U_{ch}^{eff}, \dots, U_0, t) = \omega_{\Sigma U} \geq 0. \quad (12)$$

В (12) индексы  $n$  и  $\tau$  указывают на нормальные и сдвиговые механические нагрузки,  $T$  и  $Ch$  – на тепловые и электрохимические нагрузки, которые порождают соответствующие энергетические потоки.

Согласно (12), повреждаемость  $\omega_\Sigma$  является *энергетической термомеханической функцией*, поскольку учитывает как любые силовые факторы, так и температуру  $T_\Sigma$ . Это означает, что *трибофатическая энтропия есть мера поглощения энергии, обусловленной всеми источниками*. Методики определения  $U_\Sigma^{eff}$  разработаны (см., например, [12-16]).

Установлено [13] *пространственное условие* физической повреждаемости объектов, которое гласит: развитие процессов *необратимой повреждаемости возможно* и *реализуется* с некоторой вероятностью  $P > 0$ , когда в объекте возникает конечная область  $V_{P_\gamma}$  с ненулевым уровнем эффективной энергии  $U_\Sigma^{eff} > 0$  (внутренней энтропии  $S_i > 0$ ) – *опасный объем*

$$V_{P\gamma} \in V_{P\gamma}(Q_i, U_{\Sigma}^{eff}, S_i) \geq 0, \quad (13)$$

где  $Q_i$  – внутренние силовые факторы.

Если  $V_{P\gamma} = 0$ , то и  $\omega_{\Sigma} = 0$  и, следовательно, эволюция объекта по поврежденности невозможна (обратимая система). В необратимой системе  $V_{P\gamma} \leq V$  есть *абсолютная величина (мера) ее пространственной поврежденности* ( $V$  – ее геометрический объем). Методики расчета и классификация опасных объемов ( $V_{P\gamma}$ ) для типичных материальных объектов (деформируемых твердых тел и систем) в различных условиях разработаны (см., например, [14]) Согласно (13), масштаб повреждаемости системы может быть любым.

Используя понятие о трибофатической энтропии, можно дать *энтропийное толкование повреждаемости*: необратимое повреждение объекта *тождественно* изменению внутренней энтропии в его опасном объеме

$$\omega_{\Sigma}(S_{TF}) \equiv \frac{(d_i S)_{TF}}{dV_{P\gamma}} = \omega_{\Sigma S}. \quad (11a)$$

Теперь рассмотрим *открытую* термодинамическую систему, в которой распределены (рассеяны) повреждаемые твердые или плотные объекты; это – *механотермодинамическая система* (МТД). Как показано в [16, 17], изменение энтропии в такой системе определяется функцией термодинамической (индекс  $TD$ ) и трибофатической (индекс  $TF$ ) энтропий:

$$\begin{aligned} dS_{MTD} &= \left[ (dS)_{TD} \rightleftharpoons (d_i S)_{TF} \right] = \\ &= \Lambda_{TD\backslash TF} \left[ \left( \frac{dU + pdV}{T} - \frac{1}{T} \sum_1^n \mu dN_k \right)_{TD} + \left( \gamma_1^{(w)} \frac{\omega_{\Sigma}}{T_{\Sigma}} dV_{P\gamma} \right)_{TF} \right] \uparrow, \Lambda \gg 1. \quad (14) \end{aligned}$$

Уравнение (14) *принципиально отличается* от уравнений (3) и (4) или (11): оно допускает анализ любого (мыслимого) состояния системы. Согласно (11) и (14), именно рост трибофатической энтропии, обусловленный термомеханическим состоянием системы, может привести и к разрушению, и к разложению движущихся и деформируемых объектов и систем; в термодинамических уравнениях (3) и (4) о подобных состояниях речи не идет. Следует обратить особое внимание на то, что уравнение (14) построено с учетом различных механизмов взаимодействия между компонентами энтропии. Таким образом, (14) – это *всеобщий закон возрастания энтропии*, провозглашенный в философии и физике и впервые аналитически записанный в *трибофатике* и *механотермодинамике* [16, 17]. Фактически оно характеризует *объединение* двух великих конкурентов – механики и термодинамики с целью создания *обобщенной теории эволюции систем* [18]. Так был разработан новый раздел физики – механотермодинамика [19].

Согласно *второму принципу механотермодинамики* [16, 19], потоки эффективной энергии (энтропии), и следовательно, повреждений, обусловленных источниками разной природы, *не аддитивны* – они *диалектически взаимодействуют*. Этот принцип указывает *движущую силу* и *основную причину* возникновения и развития процессов внутренней повреждаемости любой системы – это диалектические  $\Lambda$ -*взаимодействия* (рисунок 1) составляющих эффективной энергии (энтропии) и, следовательно, повреждений в поглощающей среде.

### Правило взаимодействия повреждений

$$F_{\Lambda} \left[ (\omega_p \rightleftharpoons \omega_{\sigma}) \rightleftharpoons \omega_T ] = [ (\omega_p + \omega_{\sigma}) \Lambda_{\sigma \setminus p} + \omega_T ] \Lambda_{M \setminus T} = \omega_{\Sigma}, \quad \Lambda \geq 1$$

### Правило взаимодействия составляющих энтропии

$$F_{\Lambda} (S_{TD} \rightleftharpoons S_{TF}) = (S_{TD} + S_{TF}) \Lambda_{TD \setminus TF} = S_{MTD}, \quad \Lambda_{TD \setminus TF} \geq 1$$

Рис. 1. Схема  $\Lambda$ -взаимодействий при необратимых процессах ( $\omega_p$ ,  $\omega_{\sigma}$ ,  $\omega_T$  – повреждения, обусловленные контактной (индекс  $p$ ), механической (индекс  $\sigma$ ) и термодинамической (индекс  $T$ ) нагрузками)

Анализ  $\Lambda$ -взаимодействий в деформируемых объектах и системах выполнен, например, в работах [13-15]. Анализ взаимодействия двух черных дыр описан выше.

Таким образом, из изложенного следует, что эволюция системы в общем случае определяется интенсивностью процессов необратимого изменения энтропии – термодинамической и трибофатической; производство внутренней механотермодинамической энтропии так же вечно, как и движение и повреждение.

Уравнение (14) обладает практически неограниченной общностью: оно применимо для анализа любых явлений и процессов, сопровождающихся возникновением и развитием необратимых повреждений любой природы.

Можно полагать, что в (14) успешно достигнуто примирение механики и термодинамики в описании эволюции любых систем: неорганических и органических. И достигнуто оно путем использования основных идей трибофатики, механотермодинамики и механики повреждений (а не на базе статистической механики и классической динамики, как ранее).

Как видно, в количественном плане анализ изменения состояний систем по поврежденности более информативен, чем, например, исследование их энергетического или энтропийного состояний, поскольку всякое повреждение реально, тогда как материальные носители энергии или энтропии не известны или вовсе отсутствуют [20]. Однако использование фундаментальных понятий энергия и энтропия является весьма эффективным в науке, поскольку они лежат в основе многих физических законов, например, всеобщих законов сохранения. В этой связи анализ энергетического и энтропийного состояний систем оказывается безусловно плодотворным.

Что касается механики черных дыр, то из изложенного ясно, что следует изучить и описать их энтропийное состояние не только по аналогии с термодинамической, но, главным образом, по аналогии с трибофатической энтропией, или, возможно, лучше с механотермодинамической энтропией. Полагаем, что такие исследования впереди.

В заключение надо сказать, что, согласно нашим представлениям [16, 18], Вселенная эволюционирует не во времени, а по необратимым повреждениям (см. уравнения (11)-(14)):

$$\left. \begin{array}{l} \omega_{\Sigma} (U_{\Sigma}^{eff}) \\ V_{P_f} \\ S_{MTD} \end{array} \right\} \Rightarrow \infty. \quad (15)$$

Согласно (15), рост повреждаемости всего сущего, как и энтропии любой системы, не имеет мыслимых границ, а масштаб повреждаемости простирается от атомного (и меньше) до космического (и больше) уровней. Заметим, что  $V_{P_f} = f_P V$ , то есть это вероятностная (индекс  $P$ ) функция  $f$  геометрического объема  $V$ . Последний нетрудно связать с массой (плотностью) вещества в объектах. А стрела времени

доминирует только в нашем собственном существовании, она есть результат воображения Homo Sapiens [21, 22]: материя не исповедует время, поскольку она вечна и неуничтожима. Изложение этой концепции выходит за рамки нашего доклада. Но следует заметить, что такая точка зрения вполне небесспорна, более того, она весьма дискуссионна. Что ж, будем ожидать дискуссию.

Похоже, что в работах [21-33] мы обращаемся к философской концепции глобального эволюционизма (см., например, [34]), но на новом уровне количественного анализа. Как известно, идею всеобщей эволюции, охватывающей все процессы, начиная с неорганических изменений и заканчивая социальными и нравственными явлениями, была предложена Спенсером еще в XVIII веке. А мы в наше время изучаем их методами количественной диалектики [35].

Таким образом, закон неограниченного возрастания энтропии действительно приобретает вселенское содержание и, соответственно, всеобщее значение.



Рис. 2. Всеобщая А-эволюция как парадигма глобальной науки

На основании изложенного мы думаем, что *мультидисциплинарные исследования* (рисунок 2) фундаментальных закономерностей взаимосвязанных и взаимообусловленных явлений рассеяния и поглощения энергии любой природы в разнообразных средах, в том числе с использованием обобщенной характеристики – механотермодинамической энтропии будут способствовать лучшему пониманию материального мира и его эволюции [16-28 и мн. др.]).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kondepudi, D., Prigogine, I. *Modern Thermodynamics (From Heat Engines to Dissipative Structures)*. John Wiley & Sons, 1998. – 486 p., I. Prigogine. *Modern Thermodynamics (From Heat Engines to Dissipative Structures)*. John Wiley & Sons, 1998. – 486 p.
2. Clausius, R. *Mechanical Theory of Heat*. – London : John van Voorst, 1867.
3. *Физический энциклопедический словарь*. – М. : Советская энциклопедия, 1983. – 928 с.
4. Planck, M. *Treatise on Thermodynamics*. – N.Y.: Dover, 3<sup>rd</sup> ed., 1945.
5. Prigogine, I., Stenger, S. *Order out of Chaos*. – N.Y.: Bantam, 1984. – 108 p.
6. Boltzmann, L. *Sitzungsber. Acad. Wiss. Wien. Vol. 66, 1872*. – P. 275–370.
7. Peter V. Coveney. *The Second Law of Thermodynamics: Entropy, Irreversibility and Dynamics // Nature. Vol. 333 1988*. – P. 409–415.
8. Bekenstein, J. D. *Black Holes and Entropy // Physical Review, 1973, D 7, p. 2333–2346*.
9. Bardeen, J. M., Carter, B., Hawking, S. W. *The Four Laws of Black Hole Mechanics // Communications in Mathematical Physics, 1973, 31, – P. 161–170*.

10. Sosnovskiy, L. A., Sherbakov, S. S. *Surprises of Tribo-Fatigue. Magic Book*, 2009. – 200 p.
11. Сосновский, Л. А. Об одном виде энтропии как мере поглощения энергии, расходуемой на производство повреждений в механотермодинамической системе // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2007. – Т. 51. – № 6. – С. 100–104.
12. Сосновский, Л. А. Основы трибофатики : учеб. пособие : [доп. Мин-вом образования Респ. Беларусь в качестве учебного пособия для студентов технических высших учебных заведений] / Л. А. Сосновский. – Гомель : БелГУТ, 2003. – Т. 1. – 246 с.; Т. 2. – 234 с.; Sosnovskiy, L. A. *Tribo-Fatigue. Wear-Fatigue Damage and Its Prediction* / L. A. Sosnovskiy // *Series : Foundations of Engineering Mechanics*, Springer, 2005. – 424 p.; 摩擦疲劳学 磨损 – 疲劳损伤及其预测. L. A. 索斯洛-夫斯基著, 高万振译 – 中国矿业大学出版社, 2013. – 324 p.
13. Сосновский, Л. А. *Механика износоусталостного повреждения*. – Гомель : БелГУТ, 2007. – 434 с.
14. Щербаков, С. С. *Механика трибофатических систем* / С. С. Щербаков, Л. А. Сосновский. – Минск : БГУ, 2011. – 407 с.
15. Сосновский, Л. А. *Фундаментальные и прикладные задачи трибофатики : курс лекций* / Л. А. Сосновский, М. А. Журавков, С. С. Щербаков. – Минск : БГУ, 2011. – 488 с.
16. Sosnovskiy, L. A., Sherbakov, S. S. *Mechanothermodynamics*. – Springer, 2016. – 155 p.
17. Sosnovskiy, L. A., Sherbakov, S. S. *Mechanothermodynamical System and Its Behavior // Continuum Mechanics and Thermodynamics*. – 2012. – № 24. – P. 239–256.
18. Сосновский, Л. А., Щербаков, С. С., Лазаревич, А. А. *Основы теории эволюции неорганических и органических систем, в том числе живых и разумных // Национальная философия в глобальном мире : материалы Первого белорусского философского конгресса, Минск, 18–20 окт. 2017 г.* – Минск : Беларуская навука, 2018. – С. 155–178.
19. Сосновский, Л. А. *Механотермодинамика (об объединении великих конкурентов: 1850-2015)* / Л. А. Сосновский // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2016. – № 4 (37). – С. 19–41.
20. Фейнман, Р. *Лекции по физике* / Р. Фейнман. – М. : Мир, 1963. – Т. 4. – 261 с.
21. Сосновский, Л. А. *Принципы механотермодинамики : [моногр.]* / Л. А. Сосновский, С. С. Щербаков. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 150 с.
22. Лазаревич, А. А. *На пути к синергии техно- и биоразвития: техносология и трибофатика* / А. А. Лазаревич // *Вестник БелГУТа : Наука и транспорт*. – 2016. – № 1 (32). – С. 39–44.
23. Лойко, А. И. *Трибофатика и философия: стратегия трансдисциплинарных исследований* / А. И. Лойко // *Вестник БелГУТа : Наука и транспорт*. – 2016. – № 1 (32). – С. 45–48.
24. Сороко, Э. М. *Трансдисциплинарность и трибофатика: о новой линии разработки информационных технологий, их эвристических возможностях, инновационном потенциале* / Э. М. Сороко // *Вестник БелГУТа : Наука и транспорт*. – 2016. – № 1 (32). – С. 49–51.
25. Спасков, А. Н. *Генезис, регенерация и нелинейная эволюция сложных систем в механотермодинамической и субстанциально-информационной концепциях* / А. Н. Спасков // *Вестник БелГУТа : Наука и транспорт*. – 2016. – № 1 (32). – С. 52–58.
26. Сосновский, Л. А. *Философия и трибофатика* / Л. А. Сосновский, А. А. Лазаревич // *Тр. VI Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 окт.* – 1



- нояб. 2010 г., Минск (Беларусь) / редкол. : М. А. Журавков (пред.) [и др]. – Минск : БГУ, 2010. – Т. 2. – С. 591–620.
27. Сосновский, Л. А. О возможности построения общей теории эволюции систем / Л. А. Сосновский // *Философия в Беларуси и перспективы мировой интеллектуальной культуры : материалы Междунар. науч. конф. к 80-летию Института философии НАНБ, Минск, 14–15 апр. 2011 г.* – Минск : Право и экономика, 2011. – С. 152–157.
28. Щербаков, С. С. Обобщенная модель механотермодинамических состояний среды / С. С. Щербаков, Л. А. Сосновский // *Теоретическая и прикладная механика : межвед. сб. науч.-метод. статей.* – Вып. 29. – Минск : БНТУ, 2014. – С. 29–40.
29. Сосновский, Л. А. Жизнь как особый способ накопления повреждений и золотое сечение / Л. А. Сосновский // *Проблемы гармонии, симметрии и золотой пропорции в природе, науке и искусстве : сб. науч. тр. Винницкого Государственного аграрного университета.* – Винница, 2003. – Вып. 15. – С. 214–221.
30. Youtube – Tribo-Fatigue life – <https://youtu.be/ССЕНик5lkL0>
31. Сосновский, Л. А. Поле судьбы: первое представление / Л. А. Сосновский // *Наука и инновации.* – 2009. – № 10 (80). – С. 29–33.
32. Лазаревич, А. А. О возможности количественного анализа добра и зла в социогуманитарных исследованиях / А. А. Лазаревич, Л. А. Сосновский // *Тр. VI Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 окт. – 1 нояб. 2010 г., Минск (Беларусь) / редкол. : М. А. Журавков (пред.) [и др].* – Минск : БГУ, 2010. – Т. 2. – С. 497–500.
33. Сосновский, Л. А. Человек и общество с позиций трибофатической концепции качества жизни / Л. А. Сосновский, А. А. Лазаревич, Е. С. Таранова // *Довгирдовские чтения III : философская антропология и социальная философия : материалы Междунар. науч. конф., Минск, 26–27 апр. 2012 г.* – Минск : Право и экономика, 2012. – С. 70–74.
34. Водопьянов, П. А., Мельникова, Л. Л. Синергетика и глобальный эволюционизм: диалог науки и философии // *Проблемы управления.* – № 2(27). – 2008. – С. 225–232.
35. Сосновский, Л. А. Трибофатика : о диалектике жизни. – Изд. 2-е. – Гомель : БелГУТ, 1999. – 116 с.