

Использование эксергетического метода для оценки термодинамической эффективности природных процессов

В.С. Степанов^a, Т.Б. Степанова^b, Н.В. Старикова^c

Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия

^{a, b}stepanov@istu.edu, ^cnatalia-starikova@yandex.ru

^a<https://orcid.org/0000-0001-8331-8337>,

^b<https://orcid.org/0000-0002-1546-8816>,

^c<https://orcid.org/0000-0002-2649-5318>

Статья поступила 17.06.2019, принята 22.07.2019

Отмечается, что за последние десятилетия методы термодинамического исследования технических систем получили заметное развитие. Имеется в виду более широкое распространение исследований с привлечением второго начала термодинамики с введением нового понятия — эксергия. С этой целью был разработан специальный инструмент — полный энергетический баланс, который совмещает балансы энергии и эксергии. В нем учитывается качество всех форм энергии, включая химическую энергию материальных потоков как на входе, так и на выходе из системы. На основе данных баланса эффективность исследуемой системы определяется двумя КПД, энергетическим и эксергетическим. При этом оценка ее полезной продукции в энергетических единицах осуществляется на основе новых показателей — ее химической энергии и эксергии. Поскольку фундаментальные концепции термодинамики и ее законы имеют универсальный характер, термодинамические методы могут быть применены для исследования не только любой технической, но и естественной системы. Предлагается использовать эту методику для исследования эффективности процессов вегетации. Выполнен обзор научных представлений о процессе вегетации и его основных фазах. Рассмотрены основные показатели этого процесса, принятые в биологической науке, и существующие методы оценки его эффективности. Как правило, это коэффициент полезного действия, рассчитанный на основе первого начала термодинамики. При этом полезный эффект процесса оценивается по калорийности (теплоте сгорания) произведенной продукции. Для иллюстрации, в качестве примера, выбран процесс вегетации древесных пород, показаны методы определения их химической энергии и эксергии и определены энергетический и эксергетический КПД процесса вегетации соснового леса.

Ключевые слова: вегетация растений; оценка эффективности; термодинамические методы; эксергетический анализ; энергетический и эксергетический КПД.

Using the exergy method to evaluate thermodynamic efficiency of natural processes

V.S. Stepanov^a, T.B. Stepanova^b, N.V. Starikova^c

^{a, b}stepanov@istu.edu, ^cnatalia-starikova@yandex.ru

^a<https://orcid.org/0000-0001-8331-8337>,

^b<https://orcid.org/0000-0002-1546-8816>,

^c<https://orcid.org/0000-0002-2649-5318>

Received 17.06.2019, accepted 22.07.2019

It is noted that over the past decades, the methods of thermodynamic research of technical systems have received significant development. This refers to the wider dissemination of research involving the second law of thermodynamics with the introduction of a new concept - exergy. For this purpose, a special tool was developed — a complete energy balance, which combines the balances of energy and exergy. It takes into account the quality of all forms of energy, including the chemical energy of material flows both at the input and at the exit from the system. Based on the balance data, the effectiveness of the system under study is determined by two efficiency factors, energy and exergy. Moreover, the evaluation of its useful products in energy units is based on new indicators — its chemical energy and exergy. Since the fundamental concepts of thermodynamics and its laws are universal, thermodynamic methods can be applied to study not only any technical, but also natural systems. It is proposed to use this technique to study the effectiveness of vegetation processes. A review of scientific ideas about the vegetation process and its main phases is carried out. The main indicators of this process, adopted in biological science, and existing methods for assessing its effectiveness are considered. As a rule, this is a coefficient of performance calculated on the basis of the first law of thermodynamics. At the same time, the useful effect of the process is estimated by the calorific value (calorific value) of the produced product. For illustration purposes, as an example, the vegetation process of tree species was selected, methods for determining their chemical energy and exergy were shown, and the energy and exergy efficiency of the process of vegetation of a pine forest were determined.

Keywords: plant vegetation; efficiency mark; thermodynamic methods; exergy analysis; energy and exergy efficiency.

Понятие эксергии. Энергетический и эксергетический КПД. При исследовании технических систем и оценке их термодинамической эффективности следует принимать во внимание, что различные формы энергии характеризуются разной способностью к преобразованию одной в другую (включая работу) при определенных параметрах окружающей среды (p_0, T_0). В соответствии с этим используемые в практике виды энергии по степени их превратимости можно разделить на три группы [1–4]:

1) неограниченно превратимые (безэнтропийные) формы энергии;

2) ограниченно превратимые, которые характеризуются энтропией, отличной от нуля (химическая энергия, внутренняя энергия окружающей среды, теплота при температуре T , не равной температуре окружающей среды T_0 , т. е. при $T \neq T_0$);

3) непревратимые при заданных неизменных параметрах окружающей среды.

В *первую группу* включают формы энергии, которые полностью превратимы в любые другие формы. Сюда относятся механическая (кинетическая и потенциальная), электрическая энергия всех видов и др. Поскольку все формы энергии этой группы равнозначны и по количеству, и по качеству, они в полной мере обладают свойствами аддитивности. Превратимость этих форм не зависит от параметров окружающей среды.

К *второй группе* относят виды энергии, которые не способны в общем случае полностью преобразовываться в другие формы энергии. Возможности их преобразования определяются как параметрами этой энергии, так и параметрами окружающей среды. Такие формы энергии характеризуются энтропией, не равной нулю.

Энергия 2-й группы (внутренняя энергия рабочего тела; энергия, передаваемая в виде теплоты, теплового потока; энергия химических реакций) не может быть полностью преобразована в другие формы. Превратимость таких форм энергии определяется не только ее собственными параметрами, но и параметрами окружающей среды. В пределе, когда параметры носителя энергии станут равными параметрам окружающей среды, ее техническая ценность будет равна нулю, т. е. она из этой группы перейдет в 3-ю группу (группу непревратимых форм).

В 3-ю группу включают формы энергии 1-й и 2-й групп, которые при заданных неизменных параметрах окружающей среды находятся с ней в полном термодинамическом равновесии. Следовательно, преобразование их в другие формы согласно второму закону термодинамики невозможно.

Все балансовые расчеты, рассматривающие формы энергии 1-й группы, могут вестись на основе только первого начала термодинамики. При исследовании процессов, в которых участвуют формы энергии 2-й группы, необходимо учитывать ограничения, накладываемые не только первым, но и вторым началом термодинамики. Поэтому понятия энергии в этих случаях недостаточны.

Мерой превратимости, пригодности заданного количества энергии, характеризуемой энтропией, принято

считать максимальную работу, которая может быть получена из этой энергии в обратимом процессе ее взаимодействия с равновесной окружающей средой. Эта величина была названа З. Рантом эксергией [2], и определяется она с привлечением второго начала термодинамики.

Химическая энергия и эксергия веществ. Одной из существенных проблем при использовании в биологии термодинамических методов является оценка полезного эффекта процессов вегетации. Однозначно можно сказать, что рассчитывать ее по теплоте сгорания полученного объема биомассы абсолютно неверно.

Для определения полезной энергии/эксергии в середине XX в. учеными были предложены новые, более совершенные характеристики для оценки энергетического потенциала любого как неорганического, так и органического вещества — его химическая энергия — и разработаны методы ее определения.

Понятия химической энергии и эксергии вещества были введены в термодинамические исследования вместе с эксергетическим методом анализа. Эти показатели впервые ввел и предложил методы их определения польский ученый Я. Шаргут [3]. Для каждого элемента устанавливается *вещество отсчета* — энергетически полностью обесцененное вещество, содержащееся при нормальных условиях в окружающей среде (ОС). После этого для каждого элемента составляется уравнение *реакции девальвации*, т. е. реакции для идеализированного процесса приведения рассматриваемого элемента в состояние принятого для него вещества отсчета. Изменение энтальпии в реакции девальвации было названо *энтальпией девальвации* рассматриваемого элемента и принято за величину химической энергии этого элемента i_3 :

$$i_3 = \Delta H_3^0 + \sum_j \Delta H_j^0 - \sum_k \Delta H_k^0, \quad (1)$$

где ΔH^0 — стандартная теплота образования, т. е. изменение энтальпии при реакции образования соответственно рассматриваемого элемента и веществ отсчета из простых веществ в стандартном состоянии ($T_0 = 298,15$ К, или 25 °С; $p_0 = 101,325$ кПа); j, k — индексы соответственно дополнительного и результирующего веществ отсчета.

Подобным же образом определяется *свободная энтальпия девальвации* (химическая эксергия) элемента e_3 :

$$e_3 = \Delta G_3^0 + \sum_j \Delta G_j^0 - \sum_k \Delta G_k^0, \quad (2)$$

где ΔG^0 — стандартная свободная энергия образования, т. е. изменение изобарного потенциала при реакции образования вещества отсчета в стандартном состоянии.

Значение химической эксергии может быть определено и на основании следующей зависимости:

$$e_3 = i_3 - T_0 \sigma_3, \quad (3)$$

где T_0 — абсолютная температура, характеризующая стандартное состояние; σ_z — энтропия деэвалюации:

$$\sigma_z = S_z^0 + \sum_j S_j^0 - \sum_k S_k^0. \quad (4)$$

Здесь S_z^0 — абсолютная энтропия рассматриваемого элемента в стандартном состоянии; S^0 — то же для веществ отсчета.

Аналогичным образом могут быть найдены значения химической энергии, энтропии деэвалюации и свободной энтальпии деэвалюации для химического соединения. Реакции деэвалюации для них можно получить сложением соответствующих реакций для содержащихся в них элементов. Однако суммирование тепловых эффектов при этом недопустимо, так как суммарное значение термодинамических функций химического соединения не является суммой значений соответствующих функций входящих в него элементов.

В специальной справочной литературе имеются значения стандартной теплоты (энтальпии), свободной энергии (изобарного потенциала) образования однородных химических веществ, их абсолютной энтропии, которые служат для расчета обсуждаемых величин.

Однако процедуру определения значений i , σ и e для химических соединений можно упростить, если предварительно определить указанные характеристики для элементов и простых веществ. В этом случае значения энтальпии деэвалюации (i_z) и свободной энтальпии деэвалюации (e_z) какого-либо соединения могут быть найдены по выражениям:

$$i_z = \sum_j m_j i_j^0 + \Delta H_z^0; \quad (5)$$

$$e_z = \sum_j m_j e_j^0 + \Delta G_z^0, \quad (6)$$

где i_j^0 , e_j^0 — соответственно энтальпия деэвалюации j -го элемента (простого вещества), входящего в состав вещества z ; m_j — мольная масса j -го элемента; ΔH_z^0 , ΔG_z^0 — соответственно стандартная теплота образования и стандартная свободная энергия образования вещества z .

При вычислении значений химической энергии и эксергии сложных веществ заданного состава и структуры предполагается, что, не совершив большой ошибки, их можно рассматривать как механические смеси. Тогда, располагая удельными значениями химической энергии и эксергии соединений (элементов), входящих в состав рассматриваемого вещества, можно рассчитать аналогичные характеристики для последнего по выражениям:

$$i_x = \sum_j V_j i_{xj}^0; \quad (7)$$

$$e_x = \sum_j V_j e_{xj}^0, \quad (8)$$

где V_j — доля j -го химического элемента или соединения в единице рассматриваемого вещества (газа);

i_{xj}^0 , e_{xj}^0 — соответственно удельная химическая энергия и эксергия j -го элемента или соединения.

Для подобных расчетов нами была разработана специальная методика составления энергобаланса анализируемого баланса, построенного как на первом, так и на втором законах термодинамики. Такой баланс совмещает балансы энергии и эксергии, в нем учитывается качество энергии всех форм, включая химическую энергию материальных потоков как на входе, так и на выходе из системы. Он получил название *полный энергетический баланс* [4]. Для его сопровождения и широкого использования были рассчитаны величины энергии и эксергии большого числа неорганических и органических веществ [5; 6], в том числе растительного происхождения (древесных топлив).

Введение понятия эксергии для учета качества различных форм энергии привело к необходимости использования двух КПД — энергетического ($\eta_{эн}$) и эксергетического ($\eta_{экс}$). Первый из них рассчитывается по данным энергетического баланса, построенного на основе лишь первого начала термодинамики, второй — по данным баланса эксергии. Принцип расчета этих КПД одинаков: нужно составить отношение, в числитель которого подставляется соответствующий полезный эффект в единицах энергии (I) или эксергии (E), а в знаменатель — суммарные затраты соответственно энергии или эксергии, т. е.:

$$\eta_{эн} = \sum I_{пол} / \sum I_{затр}; \quad (9)$$

$$\eta_{экс} = \sum E_{пол} / \sum E_{затр}. \quad (10)$$

Для того чтобы исследовать эффективность какой-либо системы, нужно четко установить ее границы и определить составляющие приходной и расходной частей энергетического и эксергетического балансов. Это означает, что можно определить термодинамическую эффективность процесса вегетации в целом, а можно выделить границами любую его часть и исследовать ее, например, только фотосинтез или фотосинтез вместе с дыханием. Проблема заключается только в подготовке соответствующей исходной информации.

Покажем возможности использования эксергетического анализа для исследования процессов вегетации древесины.

Объект исследования. В настоящее время теоретические основы биохимических процессов, происходящих в растениях, достаточно хорошо изучены. Они состоят в преобразовании веществ, поступающих в растения из почвы и воздуха, во вполне определенные вещества, материал, из которого они формируются [7–11]. Этот сложный продукционный процесс состоит из трех фундаментальных физиологических процессов: *фотосинтеза*, *дыхания* и *роста*. Рассмотрим кратко существо каждого из этих процессов.

Растения, поглощая листьями CO_2 из атмосферы и корневой системой воду из почвы, создают в процессе *фотосинтеза* под действием энергии солнечной радиации органическое вещество в виде ассимилянтов. Одновременно происходит транспирация, которая от-

ветственна за снабжение растений водой и элементами минерального питания и за регуляцию теплового режима растений. В зависимости от интенсивности фотосинтетически активной радиации (ФАР), водного и температурного режима, скорости ветра, концентрации CO_2 в воздухе, плодородия почвы и видовых особенностей растения процесс фотосинтеза может происходить с большей или меньшей скоростью.

Другой фундаментальный процесс, *дыхание*, ответствен за снабжение энергией различных биохимических процессов синтеза, связанных с ростом, построением новых структурных элементов растений и с транспортом веществ. Кроме того, дыхание обеспечивает поддержание живых структур органов растений. При этом затрачиваются органические вещества, накопленные в растениях.

Третий фундаментальный процесс — *рост*. В этом процессе все свежие ассимилянты используются немедленно на рост, часть их накапливается в резерв, который может находиться в любом органе (листьях, стеблях) и используется при отклонении внешних условий от оптимальных, например, при снижении температуры. Ассимилянты, запасенные на более длительный период, накапливаются большей частью в корнях.

В результате прироста отдельных органов возрастает их биомасса и биомасса растения в целом, увеличивается и относительная площадь листа. Vegetация растений оценивается характеристиками, обычно включающими понятие *продуктивность* [8]. Например, *первичная продуктивность* экологической системы, *валовая первичная продуктивность*, *чистая первичная продуктивность* и т. д. Чтобы перейти от показателя *продуктивность* (скорость) к показателю *продукция*, нужно ввести фактор времени, т. е. речь должна идти о количестве энергии, фиксированной за определенное время. Например, урожай за год, за вегетационный период.

Как известно, излучение не всех длин волн одинаково биологически активно. Отдельные участки спектра даже для одного и того же биологического процесса имеют различную активность. Биологически активную радиацию I_6 (свет, эритемная радиация, ФАР) можно представить в виде:

$$I_6 = \int_0^{\infty} v(\lambda) I(\lambda) d\lambda, \quad (11)$$

где $I(\lambda)$ — спектральная плотность потока радиации; $v(\lambda)$ — спектр биологического действия радиации.

Спектр действия фотосинтеза растений в настоящее время сравнительно четко установлен. Фотосинтетически активной радиацией считается лучистая энергия в области спектра 380–710 нм. Основные закономерности изменения потоков прямой, рассеянной и суммарной радиации определяются высотой Солнца, прозрачностью атмосферы, облачностью, продолжительностью солнечного сияния и некоторыми другими факторами. Предложены формулы для расчета суточного хода суммарной радиации при безоблачном небе, с учетом облачности и т. д.

Таким образом, формирование растения — это сложная совокупность целого ряда физиологических процессов, интенсивность которых определяется не только факторами внешней среды и биологическими особенностями растений, но и взаимосвязями самих процессов. Решающую роль в функционировании этого комплекса играет поступление, потребление и перенос энергии. По структуре это очень напоминает сложный технологический процесс в промышленности. Поэтому биологи для своих исследований используют те же приемы и показатели, что и при исследовании технических систем.

Существующие методы оценки эффективности процесса вегетации. Рассмотрим, какими показателями эффективности процесса вегетации пользуются в настоящее время биологи. Обычно в литературе рассматривается теоретически возможный КПД листьев для чистого фотосинтеза [7; 9–11]:

$$\eta_{L,\Phi} = \frac{c_{\Phi} \Phi_L}{\Pi} \quad (12)$$

или, с учетом дыхания, по формуле:

$$\eta_{L,\Phi} = \frac{c_{\Phi} (\Phi_L - R_L)}{\Pi}. \quad (13)$$

Здесь c_{Φ} — коэффициент перехода от единиц массы восстановленной углекислоты в mgCO_2 к энергетическим единицам в калориях; Φ_L — интенсивность фотосинтеза листа, $\text{mgCO}_2/(\text{dm}^2 \cdot \text{ч})$; R_L — интенсивность дыхания листа, $\text{mgCO}_2/(\text{dm}^2 \cdot \text{ч})$; Π — поглощенная листом фотосинтетически активная радиация.

Эффективность использования солнечной энергии фитоценозами характеризуется КПД, который определяется отношением количества энергии, запасенной в продуктах фотосинтеза или образовавшейся в фитомассе урожая, к количеству использованной радиации:

$$\eta_{\text{эн}} = \frac{qY \cdot 100}{\sum Q_{\Phi}}, \quad (14)$$

где q — калорийность растения, kcal/kg ; Y — биологический урожай общей сухой фитомассы, g/cm^2 ; $\sum Q_{\Phi}$ — сумма ФАР за вегетационный период.

КПД фитоценозов можно выразить как относительно падающей, так и относительно поглощенной фитоценозом радиации. Они связаны соотношением:

$$\eta_{\text{п}}^{\text{эн}} = \alpha_{\text{п}} \eta_{\alpha}^{\text{эн}}, \quad (15)$$

где $\eta_{\text{п}}^{\text{эн}}$ — КПД, определенный относительно падающей радиации; $\eta_{\alpha}^{\text{эн}}$ — КПД относительно поглощенной радиации; $\alpha_{\text{п}}$ — функция поглощения радиации фотосинтезом.

То есть мы видим попытку использовать термодинамические методы для исследования процессов живой природы. Но здесь следует сделать два важных замечания.

Предлагаемые биологами показатели эффективности процесса вегетации определяются на основе баланса энергии, построенного с использованием первого начала термодинамики. Однако такой баланс не позволяет учитывать неодинаковое качество разных форм энергии, участвующих в рассматриваемых процессах.

Общеизвестно, что термодинамические методы исследования технических процессов и технологий носят универсальный характер и могут быть использованы для изучения процессов живой природы.

В работе [3] сделана попытка использовать для исследования энергетических преобразований при вегетации растений понятие «эксергия». Авторы предположили, что эксергия, подводимая к растениям, складывается из эксергии солнечного излучения E_s и эксергии атмосферных осадков E_a . Приращение материала растений на рассматриваемой площади за данный промежуток времени обусловлено приращением эксергии E_r . Баланс эксергии замыкают ее потери δE , возникающие в результате необратимости вегетационного процесса:

$$E_s + E_a = E_r + \delta E. \quad (16)$$

Эксергетический КПД процесса вегетации растений при этом определяется:

$$\eta_{br} = \frac{E_r}{E_s + E_a}. \quad (17)$$

Поскольку величина E_a не превышает 1 % эксергии солнечного излучения E_s , авторы ее обычно не учитывают [3].

Эксергию солнечного излучения, исходя из предположения, что оно является неполяризованным и равномерным, можно рассчитать по следующей формуле, в которой используется экспериментально полученное спектральное распределение солнечной энергии по данным [12]:

$$e_c = \frac{ac_r}{12} (3T^4 + T_0^4 - 4T_0 T^3), \quad (18)$$

$$e_{c\omega} = \frac{e_c}{\pi} \iint_{\omega} \cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta d\varphi, \quad (19)$$

где e_c — эксергия яркости неполяризованной равномерной черной радиации при температуре $T = 6000$ К, распространяющейся в пространственный угол 2π ; ω — пространственный угол, под которым Солнце видно с Земли; ϑ и φ — координаты направлений, охваченных пространственным углом ω (см. рисунок).

На основе этой формулы получено значение $E_s = 1,28$ кВт/м², равное эксергии излучения Солнца, находящегося в зените, или эксергии, отнесенной к 1 м² поверхности, перпендикулярной направлению солнечного излучения. Эксергия солнечного излучения, достигающего земной поверхности, меньше, поскольку оно ослабляется содержащимися в атмосфере озонем,

диоксидом углерода, водяным паром и другими примесями. Величина поглощенной растениями солнечной радиации E_{Π} составляет ориентировочно 10 % E_s , т. е. $E_{\Pi} = 0,1 \cdot E_s$.

Радиус Солнца $R = 695\,500$ км; среднее расстояние от Земли до Солнца $L = 149\,500\,000$ км; ω_s — пространственный угол, под которым Солнце видно с Земли; ϑ_s — угол между перпендикуляром к излучающей поверхности и направлением угла ω_s (на рисунке 1).

Результаты экспериментальных расчетов. В качестве примера была выполнена оценка энергетической эффективности процесса вегетации для соснового леса. Продолжительность вегетационного периода для условий Иркутска равна 2 850 ч в год. Величину солнечной радиации на 1 м² находим, используя следующие выражения:

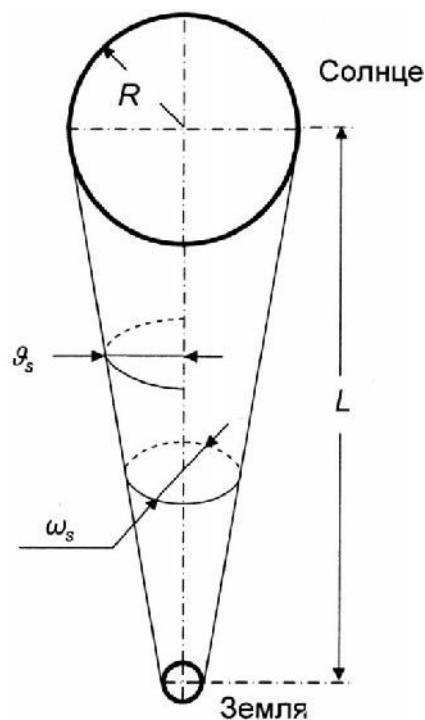


Рис. 1. Схема излучения Солнца на Землю

$$e_c = \frac{\sigma_0}{3} (3T^4 + T_0^4 - 4T_0 T^3) = 1,89 \cdot 10^{-11} (3 \cdot 6000^4 + 300^4 - 4 \cdot 300 \cdot 6000^3) = 68550 \text{ кВт/м}^2.$$

$$\iint_{\omega} \cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta d\varphi = \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} d\varphi \int_{\vartheta=0}^{\vartheta=\vartheta_s} \cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta = \pi \cdot \sin^2 \vartheta_s.$$

$$e_{s\omega} = e_s \cdot \sin^2 \vartheta_s = 68550 \cdot 2,16 \cdot 10^{-5} = 1,48 \text{ кВт/м}^2,$$

$$\text{где } \sin^2 \vartheta_s \cong \left(\frac{R}{L} \right)^2 = \left(\frac{695000}{149500000} \right)^2 = 2,16 \cdot 10^{-5}.$$

Энергия солнечной радиации на 1 м² площади может быть рассчитана согласно закону Стефана – Больцмана по следующей формуле:

$$i_s = \sigma_0 \cdot T^4 = 5,67 \cdot 10^{-11} \cdot 6000^4 = 73485 \text{ кВт/м}^2;$$

$$i_{s\omega} = i_s \cdot \sin^2 \vartheta_s = 73485 \cdot 2,16 \cdot 10^{-5} = 1,59 \text{ кВт/м}^2.$$

Полагая, что величина поглощаемой растениями радиации составляет 10 % от найденных значений, определим суммарные значения приходной части балансов эксергии и энергии рассматриваемой нами системы:

$$E_s = 0,1 \cdot 1,48 \cdot 2850 \cdot 3,6 \cdot 10^4 = 15185 \text{ ГДж/га};$$

$$I_s = 0,1 \cdot 1,59 \cdot 2850 \cdot 3,6 \cdot 10^4 = 16313 \text{ ГДж/га}.$$

Полезная энергия и эксергия процесса вегетации определяются по величине химической энергии и эк-

сергии массы древесины, приростшей на указанной площади за год:

$$I_r = M \cdot i_x, \quad (20)$$

$$E_r = M \cdot e_x, \quad (21)$$

где M — годовое приращение массы древесины; i_x и e_x — соответственно ее удельная энергия и эксергия.

Принятый в расчетах элементарный состав органической массы древесины разных пород деревьев приведен в табл. 1. Нами были проведены расчеты всех четырех показателей (высшей и низшей теплоты сгорания, химической энергии и эксергии древесины), определяющих энергетический потенциал для этих же пород древесины при разной их влажности (табл. 2).

Таблица 1

Элементарный состав древесины различных пород дерева на органическую (горючую) массу и зольность сухой массы, %

Порода дерева	Химический состав, %					
	C ^r	H ^r	O ^r	N ^r	S ^r	A ^c
Береза	49,3	6,1	44,05	0,5	0,05	1,0
Ольха	49,0	6,25	44,20	0,5	0,05	1,3
Осина	48,8	6,1	44,55	0,5	0,05	1,5
Лиственные (средний состав)	49,03	6,15	44,27	0,5	0,05	1,2
Сосна	50,2	6,0	43,25	0,5	0,05	1,0
Ель	50,1	5,8	43,50	0,5	0,10	1,5
Пихта	50,0	5,8	43,65	0,5	0,05	1,1
Хвойные (средний состав)	50,1	5,87	43,46	0,5	0,07	1,2

Таблица 2

Энергетические характеристики древесных пород

Вид древесины	W^p , %	S_T , кДж/кг	Теплота сгорания, МДж/кг		Химическая энергия и эксергия, МДж/кг	
			Q_H^p	Q_B^p	i_x	e_x
Лиственные породы						
Береза	40	1,423	10,815	12,583	12,680	12,106
Береза	60	1,254	7,210	9,203	9,267	8,794
Ольха	40	1,421	10,805	12,590	12,686	12,109
Ольха	60	1,252	7,203	9,207	9,272	8,796
Осина	40	1,420	10,617	12,381	12,477	11,905
Осина	60	1,250	7,078	9,068	9,132	8,660
Хвойные породы						
Сосна	40	1,424	10,986	12,741	12,838	12,268
Сосна	60	1,256	7,324	9,308	9,373	8,901
Ель	40	1,415	10,769	12,494	12,687	12,096
Ель	60	1,247	7,179	9,143	9,272	8,787
Пихта	40	1,419	10,786	12,514	12,611	12,048
Пихта	60	1,251	7,191	9,157	9,162	8,859

В расчетном примере принято, что за рассматриваемый период прирост древесины составил $V = 18,5$

м³. энергетические характеристики древесины (химическая энергия и эксергия) были рассчитаны нами и

приведены в [6]. Для сосны плотностью 700 кг/м³ и содержании влаги 40 % они соответственно равны $i_x = 12,838$ МДж/кг и $e_x = 12,268$ МДж/кг. Тогда для рассмотренной системы получим:

$$I_{\text{пол}} = I_x = \rho \cdot V \cdot i_x = 18,5 \cdot 700 \cdot 12,838 = 166,252 \text{ ГДж}$$

и:

$$E_{\text{пол}} = E_x = \rho \cdot V \cdot e_x = 18,5 \cdot 700 \cdot 12,268 = 158,871 \text{ ГДж}.$$

Полученные величины позволяют определить энергетический и эксергетический КПД процесса вегетации для соснового леса:

$$\eta_{\text{эн}} = \frac{I_{\text{пол}}}{I_{\text{затр}}} = \frac{166,252}{16313} \cdot 100 \cong 1,02 \%;$$

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{E_{\text{пол}}}{E_{\text{затр}}} = \frac{158,871}{15185} \cdot 100 \cong 1,05 \%.$$

Важно подчеркнуть, что эти два показателя не отрицают, а только дополняют друг друга. В отдельных случаях, когда исследуется объект, к которому подводится и в котором получается безэнтروпийная энергия, значения энергетического и эксергетического КПД могут совпадать. Если же в процессе используется и получается энергия разного качества, то тогда их термодинамическое совершенство более правильно характеризует эксергетический КПД.

Выводы

Как показано в настоящей статье, термодинамика является универсальной дисциплиной, ее законы и методы применимы для исследования процессов как неживой, так и живой природы. Так же, как в технических системах, для того, чтобы рассчитать эффективность какой-либо подсистемы, нужно четко установить ее границы и определить составляющие приходной и расходной частей энергетического и эксергетического балансов. Это означает, что можно определить термодинамическую эффективность процесса вегетации в целом, а можно исследовать, например, только фотосинтез или фотосинтез вместе с дыханием. Проблема заключается только в подготовке соответствующей исходной информации. Многочисленные исследования подтверждают универсальность термодинамических методов.

Литература

1. Эксергетические расчеты технических систем: справ. пособие / под ред. А.А. Долинского, В.М. Бродянского. Киев: Наукова думка, 1991. 360 с.
2. Rant Z. Exergie, ein neues Wort für "technische Arbeitsfähigkeit" // Forsch. Ing. Wes. 1956. Bd. 22, № 1. P. 36–37.

3. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия. М.: Энергия, 1968. 279 с.
4. Степанов В.С., Степанова Т.Б., Старикова Н.В. Эксергетический анализ систем генерирования, транспорта и потребления энергии. Иркутск: Изд-во ИРННТУ, 2016. 278 с.
5. Степанов В.С., Степанова Т.Б., Старикова Н.В. Химическая энергия и эксергия веществ: методы расчета, область применения, справочные данные. Иркутск: Изд-во ИРННТУ, 2017. 214 с.
6. Степанов В.С., Степанова Т.Б., Старикова Н.В. Определение химической энергии и эксергии древесных топлив // Системы Методы Технологии. Братск: Изд-во БрГУ, 2017. №1 (33). С. 91–96.
7. Ничипорович А.А. Фотосинтез и теория получения высоких урожаев // Тимирязевские чтения. М.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 1–93.
8. Одум Ю. Экология: в 2 т. М.: Мир, 1986. Т. 1. 376 с.
9. Полевой А.Н. Теория и расчет продуктивности сельскохозяйственных структур. Л.: Гидрометеоздат, 1983.
10. Тооминг Х.Г. Солнечная радиация и формирование урожая. Л.: Гидрометеоздат, 1977.
11. Тимофеев-Ресовский Н.В. Биосфера и человечество // Химия и жизнь. 1987. № 7. С. 20–25.
12. Кондратьев К.А. Лучистая энергия солнца. Л.: Госметеоздат, 1954. 600 с.

References

1. Eksergeticheskie raschety tehnikeskikh sistem: Spravochnoye posobiye / Pod red. A.A. Dolinskogo, V. M. Brodianskogo. Kiev: Naukova dumka. 1991. 360 s.
2. Rant Z. Exergie, ein neues Wort für "technische Arbeitsfähigkeit" // Forsch. Ing. Wes. 1956. Bd. 22, No 1. S. 36–37.
3. Shargut Ya., Petela R. Eksergia. M.: Energiya. 1968. 279 s.
4. Stepanov V.S., Stepanova T.B., Starikova N.V. Exergeticheskiy analis sistem generirovaniya. transporta i potrebleniya energii. Irkutsk: Izd-vo IRNITU, 2016. 278 s.
5. Stepanov V.S., Stepanova T.B., Starikova N.V. Himicheskaya energiya i ekcergiya veschestv: metody rastcheta, oblast primeneniya, spravochnye dannye/. Irkutsk: Izd-vo IRNITU, 2017. 214 s.
6. Stepanov V.S., Stepanova T.B., Starikova N.V. Opredeleniye himicheskoy energii i ekcergii drevesnyh topliv // Sistemy Metody Tehnologii. Bratsk: Izd-vo BrGU. 2017, № 1 (33). S. 91–96.
7. Nitchiporovitch A.A. Fotosintez i teoriya polucheniya visokikh urojaev // Timiryazevskie chteniya. M: Izd-vo AN SSSR. 1956. S. 1–93.
8. Odum Yu. Ekologiya. M.: Mir.1986. T. 1. 376 p.
9. Polevoy A.N. Teoriya i raschet produktivnosti selskohozyajstvennyh struktur. L. Gidrometeoizdat, 1983.
10. Tooming H. G. Solnechnaya radiatsiya i formirovaniye urojaya.L. Gidrometeoizdat, 1977.
11. Timofeev-Resovskiy N.V. Biosphera I chelovechestvo // Himiya I jijn. 1987, № 7. S. 20–25.
12. Kondratyev K. A. Luchistaya energiya solntsa. L. Gidrometeoizdat, 1954. 600 p.