

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ РОСТА
ЕСТЕСТВЕННЫХ ДРЕВОСТОЕВ**
THERMODYNAMIC SUBSTANTIATION OF THE MODEL OF GROWTH DYNAMICS
OF NATURAL STANDS

Лисицын В.И., кандидат физико-математических наук, доцент, профессор ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия.

Lisitsyn V.I., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Professor FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russia.

Матвеев Н.Н., доктор физико-математических наук, профессор, профессор ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия.

Matveev N.N., DrSc in Physics and Mathematics, Professor, Professor FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russia.

Евсикова Н.Ю., кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей и прикладной физики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия.

Evsikova N.Yu., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Head of department FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russia.

Камалова Н.С., кандидат физико-математических наук, доцент, доцент ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия.

Kamalova N.S., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Associate professor FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russia.

Внукова С.В., кандидат физико-математических наук, доцент ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия.

Vnukova S.V., PhD in Physics and Mathematics, Associate professor FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russia.

Аннотация: В работе проанализировано изменение производства энтропии открытой термодинамической лесной экосистемы, в которой могут реализовываться процессы, связанные с поступлением в нее отрицательного потока энтропии. На примере компьютерного моделирования динамики эффективного удельного производства энтропии для однопорядкового древостоя впервые показано, что удельное производство энтропии как функция времени соответствует принципу Пригожина-Гленсдорфа, а время достижения стационарного состояния совпадает с экспериментальными значениями из лесоводческих таблиц.

Ключевые слова: производство энтропии, лесная экосистема, биомасса, древостой.

Abstract: The paper analyzes the change in the entropy production of an open thermodynamic forest ecosystem, in which processes associated with the entry of a negative entropy flow into it can be realized. Using the example of computer modeling of the dynamics of effective specific entropy production for a single-pedigree stand, it is shown for the first time that the specific entropy production as a function of time corresponds to the Prigogine-Glensdorf principle, and the time to reach a stationary state coincides with experimental values from forestry tables.

Keywords: entropy production, forest ecosystem, biomass, tree stand.

В открытых термодинамических системах, типичным примером которых является лесная экосистема, могут реализовываться процессы поглощения коротковолнового солнечного излучения (процесс дифференциации) и общего роста биомассы (расход ресурса на дыхание и конкуренцию), вследствие чего в систему поступает отрицательный поток энтропии, а в самой системе производится положительная энтропия. С течением времени в процессе роста древостоя биомасса достигает максимального значения, что соответствует стационарному состоянию экосистемы [1]. При этом удельное производство энтропии принимает минимальное положительное значение в соответствии с принципом (теоремой) Пригожина для открытой системы [2-4]. Дальнейшее увеличение возраста древостоя приводит к эволюции открытой термодинамической системы от стационарного состояния к равновесному, наблюдается уменьшение биомассы насаждения, а энтропия в соответствии со вторым законом термодинамики стремится к максимальному значению, т.е. происходит распад экосистемы.

Цель работы – показать, что модели динамики роста древостоев, применяемые в современном лесоводстве, соответствуют принципу Пригожина-Гленсдорфа, который указывает направленность необратимых процессов в открытой системе.

Изменение энтропии для открытой термодинамической системы (см., например, [2]):

$$dS = d_e S + d_i S, \quad (1)$$

где $d_e S = (q_{in}^S - q_{out}^S) dt$ – внешний экзогенный вклад окружающей среды; q_{in}^S и q_{out}^S – внутренний и наружный притоки и оттоки энтропии; $d_i S$ – внутренний эндогенный вклад, обусловленный процессами внутри системы, который всегда должен быть положительным в соответствии со вторым законом термодинамики.

При этом для баланса энтропии возможны три ситуации.

1) Производство энтропии положительно:

$$\frac{dS}{dt} > 0. \quad (2)$$

Система в соответствии со вторым законом термодинамики стремится к состоянию равновесия, при котором прекращаются любые термодинамические процессы.

2) Поток энтропии отрицателен и могут идти процессы упорядочения:

$$\frac{dS}{dt} < 0. \quad (3)$$

В этом случае создание порядка в системе должно быть связано с большим потоком энтропии из, а не в нее ($q_{in}^S < q_{out}^S$), т.е. система должна быть открытой или, по крайней мере, неизолированной.

3) Случай, когда производство энтропии

$$\frac{dS}{dt} = 0 \quad (4)$$

соответствует стационарной ситуации, для описания которой используют уравнения баланса энергии и энтропии.

Согласно теореме Пригожина, которую можно рассматривать как критерий эволюции системы в линейной области, когда система приближается к стационарному состоянию, силы и потоки меняются таким образом, что производство энтропии постоянно снижается, постепенно приближаясь к своему минимальному положительному постоянному значению [3]. Иллюстрация теоремы Пригожина на примере производства тепла оплодотворенной яйцеклеткой амфибии показана на рисунке 1 [2].

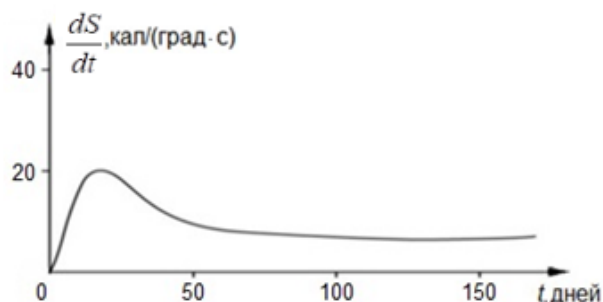


Рисунок 1 – Зависимость производства энтропии на примере производства тепла оплодотворенной яйцеклеткой амфибии [2]

Критерий направленности необратимых процессов в открытой системе в нелинейной области был сформулирован Гленсдорфом и Пригожиным [4]. В этом случае изменение производства энтропии, вызванное колебаниями сил, либо отрицательно, либо равно нулю.

Проведем анализ для древостоя, имеющего общую биомассу M . Основной вклад в изменение энтропии вносят два процесса: общий рост биомассы и деление клеток. Для разделения этих эффектов рассмотрим изменение удельной энтропии – энтропии, приходящейся на единицу биомассы $\sigma = \frac{S}{M}$:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{S}{M} \right) = \frac{1}{M} \frac{dS}{dt} - \frac{1}{M} \left(\frac{S}{M} \right) \frac{dM}{dt} \Rightarrow \frac{dS}{dt} = M \frac{d\sigma}{dt} + \sigma \frac{dM}{dt}. \quad (5)$$

Процесс дифференциации приводит к снижению удельной энтропии, так как порядок в системе увеличивается, в то время как рост биомассы соответствует положительности производной $\frac{dM}{dt}$. Следовательно, изменение энтропии организма определяется сочетанием отрицательного $d_e S$ и положительного $d_i S$ показателей.

Для расчета производства энтропии в процессе роста древостоя рассмотрим уравнение (3), которое с учетом (1) и (5) примет вид

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d_i S}{dt} - \left| \frac{d_e S}{dt} \right| = M \frac{d\sigma}{dt} + \sigma \frac{dM}{dt}. \quad (6)$$

Предположим, что

$$\frac{d_i S}{dt} = \alpha M \quad \text{и} \quad \frac{d_e S}{dt} = \beta F, \quad (7)$$

где α и β – функции времени; F – площадь поверхности древостоя.

Величина

$$\alpha = \frac{1}{M} \frac{d_i S}{dt} \quad (8)$$

имеет смысл удельного производства энтропии.

Площадь и биомасса связаны соотношением общего вида $\Phi(F, M) = 0$. Явный вид этой зависимости для моделей древостоя [1] следующий:

$$F = gm^q N^{q_1}, \quad (9)$$

где g , q и q_1 – аллометрические параметры модели; m – среднее значение биомассы отдельного дерева; N – число деревьев на 1 га.

Для функции $\alpha(t)$, используя (6-9), получим

$$\alpha(t) = \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{M} \frac{dM}{dt} + \beta g \frac{m^q N^{q_1}}{M}. \quad (10)$$

Определим функцию

$$\delta_\sigma(t) = \alpha(t) - \frac{d\sigma}{dt}, \quad (11)$$

имеющую смысл эффективного удельного производства энтропии. В момент достижения стационарного состояния, когда биомасса максимальна, $\frac{d\sigma}{dt} = 0$, а функция $\alpha(t)$ достигает минимального значения в соответствии с принципом Пригожина. Тогда $\delta_\sigma(t_{st}) \equiv \alpha(t_{st})$.

Рассмотрим удельную энтропию σ как параметр функции $\delta_\sigma(t)$, которая определяется в результате вычислительного эксперимента по динамике роста древостоя в рамках обоснованной в работе [1] модели. На рисунке 2 представлены результаты компьютерного моделирования динамики эффективного удельного производства энтропии для однопорядкового древостоя. Расчеты проводились на примере полных (нормальных) сосновых насаждений «1б» бонитета.

Величина эффективного удельного производства энтропии достигает минимума при $t = 200$ лет, что согласуется с максимальным значением общей биомассы в этот момент времени [5], при этом значение удельной энтропии $\sigma = 2$ Дж/(К·т). Если $\sigma > 2$ Дж/(К·т), то удельное производство энтропии α становится отрицательным (что противоречит второму закону термодинамики и не имеет физического смысла). В случае, когда $\sigma < 2$ Дж/(К·т), минимум не достигается, что противоречит принципу Пригожина. Ход графика на рисунке 2 подобен части, соответствующей периоду времени после достижения максимума экспериментальной кривой, приведенной на рисунке 1.

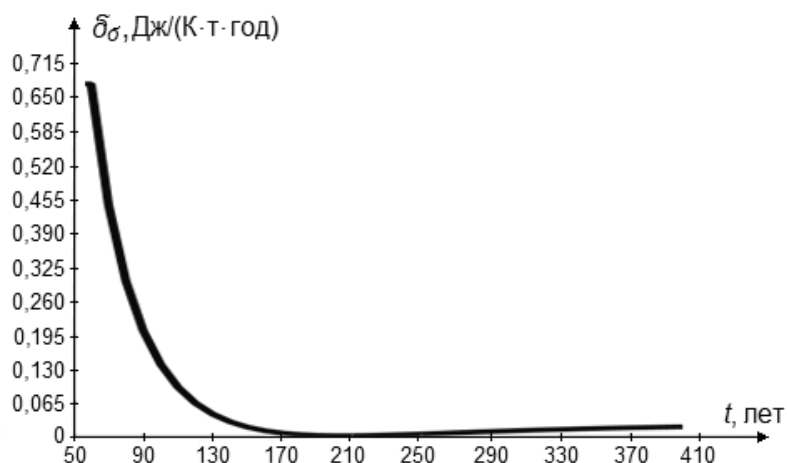


Рисунок 2 – Динамика эффективного удельного производства энтропии для однопородного древостоя

Таким образом, в работе впервые показано, что удельное производство энтропии, рассчитанное для однопородного древостоя, как функция времени соответствует принципу Пригожина-Гленсдорфа. При этом время достижения стационарного состояния совпадает с соответствующими экспериментальными значениями из лесоводческих таблиц [5]. Следовательно, модели динамики роста естественных древостоев, применяемые в современном лесоводстве, имеют термодинамическое обоснование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lisitsyn, V.I. Ecological and physiological modelling of mixed stand dynamics / V.I. Lisitsyn, N N. Matveev, V.V. Saushkin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Voronezh, 09–10 сентября 2021 года. – Voronezh, 2021. – P. 12042.
2. Jorgensen, S.E. Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems / S.E. Jorgensen, Y.V. Svirezhev. – Oxford: Elsevier, 2004. – 366 p.
3. Prigogine, I. Etude thermodynamique des phénomènes irréversibles / I. Prigogine. – Thèse d'agrégation présentée en 1945 à l'Université Libre de Bruxelles. Desoer, Liège, 1947. Académie Royale de Belgique. Bulletin de la Classe des Sciences, 31, 600.
4. Glansdorff, P. Thermodynamics of Structure, Stability and Fluctuations / P. Glansdorff, I. Prigogine. – London: Wiley-Interscience, 1971. – 306 p.
5. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии: нормативно-справочные материалы / А.З. Швиденко, Д.Г. Щепаченко, С. Нильсон, Ю.И. Булуй. – 2-е изд., доп. – Москва: Федеральное агентство лесного хозяйства Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, 2008. – 886 с.