Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Том 53, №1, 2026.
Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. Vol.53, No.1, 2026.
http://vestnik.dgtu.ru/ ISSN (Print) 2073-6185 ISSN (On-line) 2542-095X

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 519.722

DOI: 10.21822/2073-6185-2026-53-1-56-63 Оригинальная статья/ Original article

Энтропия А. Реньи как обобщение базовых процессов

А.С. Дулесов, Д.Б. Байыр, И.А. Бычкова
Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова,
Инженерно-технологический институт,
655017, г. Абакан, ул. Ленина 92/1, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является обоснование возможности применения энтропии А. Реньи в задаче анализа аддитивных и мультипликативных процессов роста, относящихся к сложным техническим системам. **Метод.** Предложена модель Реньи, включающая обобщение свойств присущих элементам сложной системы, и необходимая для анализа процессов роста. Модель включает математические выражения вычисления вероятностей аддитивных и мультипликативных процессов роста, а также обобщенное уравнение в универсальной форме, позволяющее связать оба типа роста. **Результат.** Подкрепленный примером анализ показывает важность полученных значений энтропии Реньи в зависимости от параметра a модели, связанного с процессами роста. Выполненные вычисления энтропии Реньи показали, что изменение параметра a позволяет расширить круг применяемых мер однородности. Если значение параметра принимается близким единице, следовательно, рассматриваются чувствительные процессы, характеризующиеся тонкими различиями в распределениях вероятностей состояний объектов. Увеличивая a уменьшается чувствительность оценки, позволяя выделить наиболее масштабные отклонения при распределении вероятностей. Вариация параметра a возможна при условии выделения различных уровней чувствительности и является неотъемлемой частью изменения структуры исследуемого множества объектов. **Вывод.** Применимость энтропии Шеннона ограничена аддитивными процессами, тогда как для исследования сложных систем и процессов применима энтропия Реньи. Это эффективный инструмент анализа процессов роста, наделенный гибкостью в применении характеристик чувствительности в оценке изменений роста. Изменяя параметр a, аналитику предоставлена возможность выполнять оценку неоднородности вероятности распределения на множестве состояний объектов с различной степенью детализации. Применение энтропии Реньи эффективно для анализа состояния не только технических, но и экономических, биологических и других систем.

Ключевые слова: обобщенные процессы роста, энтропия А. Реньи, энтропия К. Шеннона, анализ состояния систем, аддитивные и мультипликативные процессы

Для цитирования: А.С. Дулесов, Д.Б. Байыр, И.А Бычкова. Энтропия А. Реньи как обобщение базовых процессов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(1):56-63. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-56-63.

A. Renyi's Entropy as a generalization of Basic Processes

A.S. Dulesov, D.B. Bayyr, I.A.Bychkova
Katanov State University, Institute of Physics and Technology,
92/1 Lenin St., Abakan 655017, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to substantiate the possibility of applying A. Renyi's entropy to the problem of analyzing additive and multiplicative growth processes related to complex technical systems. **Method.** The Renyi model is proposed, which includes a generalization of the properties inherent in the elements of a complex system and is necessary for the analysis of growth processes. The model includes mathematical expressions for calculating the probabilities of additive and multiplicative growth processes, as well as a generalized equation in a universal form that links both types of growth. **Result.** The analysis shows the importance of the obtained values of Renyi entropy depending on the parameter *a* of the model associated with the growth processes. The performed calculations of the Regnal entropy showed that changing the parameter a makes it possible to expand the range of applied uniformity measures. If the parameter value is assumed to be close to one, therefore, sensitive processes are considered, characterized by subtle differences in the probability distributions of the states of objects. By increasing a, the sensitivity of the estimate decreases, making it possible to identify the largest deviations in the probability distribution. Variation of parameter a is possible provided that different sensitivity levels are selected and is an integral part of changing the structure of the studied set of objects. **Conclusion.** The applicability of Shannon entropy is limited to additive processes; Renyi entropy is applicable to the study of complex systems and processes. It is an effective tool for analyzing growth processes, endowed with flexibility in applying sensitivity characteristics in assessing growth changes. By changing the parameter *a*, it is possible to estimate the heterogeneity of the probability distribution on a set of states of objects with different levels of detail. In particular, the use of The use of Renyi entropy is effective for analyzing the state of technical, economic, and biological systems.

Keywords: generalized growth processes, A. Renyi entropy, K. Shannon entropy, system state analysis, additive and multiplicative processes

For citation: A.S. Dulesov, D.B. Bayir, I.A. Bychkova. A. Renyi's Entropy as a generalization of Basic Processes. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):56-63. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-56-63.

Введение. Одним из основополагающих факторов анализа состояния системы можно считать информацию. Она призвана отражать множество разнообразных процессов, связанных с движением энергий, свойствами материи [1], наличием массы тел [2]. Несмотря на сложность такого рода анализа, не остаются без внимания вопросы измерения информации, среди которых используются вероятности и энтропия. Применение энтропии в анализе состояния системы оговаривается рядом условий: соответствует ли система термодинамическим процессам и законам термодинамики, а также свойствами, согласно которых их относят к изолированным, закрытым и открытым системам [3].

Рассматриваемые системы обмениваются с окружающей средой энергией и веществом, наделены большим объемом разнообразной информации и статистических данных, что свидетельствует о их сложности и открытости. Состояние данных систем описывается совокупностью параметров и функций. Чтобы измерить информацию, обладающую неопределенностью, востребована величина плотности распределения вероятностей $p(x)$ случайных значений измеряемой величины x с дальнейшим вычислением энтропии $H(x)$. Существует ряд известных методов и моделей вычисления информационной энтропии, ознакомится с которыми можно, например, в работах [4, 5].

Постановка задачи. Сложность процессов, протекающих в открытых системах, вынуждает отойти от конкретики и перейти к понятию «обобщение» энтропии. Обобщенная энтропия вычисляется через логарифм количества разнообразных состояний системы при условии сохранения ее структуры для независимых элементов. Тем самым в расчетах мы освобождаемся от каких-либо условных вероятностных представлений, а систему можно рассматривать с любым количеством элементов. Результат обобщения при рассмотрении случайного процесса, приводит нас к выполнению опытов не только в численном выражении, но и к возможности привязать энтропию к некоторой функции времени.

Обратимся к анализу процессов (явлений), наделенных такими типами роста как аддитивный и мультипликативный. Они наделены классическими математическими операциями: сложение и умножение. В частности, если рассматривать систему, то можно предположить, что мультипликативный рост (операция умножения) не приводит к изменению ее структуры, тогда как аддитивный рост (операция сложения) сопровождается структурными изменениями. Стохастический аддитивный рост рассматриваемого множества становится явным тогда, когда вероятности прироста каждого элемента множества будут равны между собой. Стохастический мультипликативный рост прослеживается согласно правила: элемент i тем вероятнее прирастает, чем выше его величина x_i в общей массе всего множества X. К этим фундаментальным типам роста относят: аддитивное уменьшение или деградация; мультипликативную деградацию, которой соответствует операция - деление.

Таким образом, в анализе состояния системы востребованы эффективные инструменты вычисления энтропии. Они, путем обобщения энтропии Шеннона, могли бы за счет наличия семейства функционалов оценивать неопределённости или случайности системы с рассмотрением аддитивных и мультипликативных процессов.

Методы исследования. Анализируя данные о состоянии системы к одной из моделей можно отнести правило: в каждый момент времени рассматриваемое множество элементов не возрастает на одну единицу, а только теряет ее. При этом применяемы уравнения вычисления вероятности не меняют своей формы. Тогда можно дистанцироваться от уравнений вероятности прироста, а довольствоваться вероятностью события на элементе i.

Сравнивая между собой уравнения прирост на одну единицу или наоборот, потерю одной единицы, уравнение вероятности события на элементе i в аддитивном процессе имеет вид:

$$p_i = 1/k, \tag{1}$$

где k - множество элементов или событий.

В мультипликативном процессе вероятность определяется по выражению:

$$p_i = x_i \, / \sum_{i=1}^{k} x_i \ . \tag{2}$$

Представим (2) в универсальном виде, позволяющее связать оба типа роста:

$$p_i = x_i^a \, / \sum_{i=1}^{k} x_i^a \ . \tag{3}$$

Параметр a для всех x_i в (3) одинаков, что соответствует обобщенному уравнению. Параметр может принимать любые значения, даже отрицательные. Данное выражение примет аддитивный вид для вычисления вероятности при a=0, тогда как для a=1 – мультипликативный. В случае a>1 рассматриваются процессы, в которых разница в относительной доле x_i увеличивается, то есть когда множество X растет. С другой стороны, при a<0 имеем процессы, в которых элементы множества X становятся малоразличимы не только относительных, но и в абсолютных соотношениях.

Рассматривая данный спектр параметра a, более понятным и удобным для целей анализа процессов можно считать, что этот параметр должен лежать в диапазоне от 0 до 1. Тем не менее множество систем отвечают условиям, при которых параметр лежит за пределами диапазона. Это характерно для сложных систем, среди которых следует признать технические, с требованиями необходимого анализа структурной и функциональной надежности.

Из вышеизложенного становится очевидным: применение теории информации востребовано для связи базовых процессов с энтропией растущего множества k элементов. Что касается аддитивного роста, он увеличивает энтропию в зависимости от k равновероятных состояний. Мультипликативный рост не изменяет энтропии множества X, что означает неизменность структуры системы.

Энтропия может рассматриваться как мера беспорядка в системе (например, ознакомившись с работой [6]). Рост энтропии в системе, в зависимости от задачи анализа, не всегда будет выглядеть как рост беспорядка, но и как рост упорядоченности. В качестве примера рассмотрим техническую систему, состояние которой (согласно надежности) под воздействием случайных факторов соответствует росту энтропии. Её величина будет означать ухудшение состояния системы, характерное как возрастание хаоса. Во избежание снижения уровня надежности системы, согласно графика работ выполняются ремонты и замена оборудования (включая ликвидацию аварий). Тем самым устраняется неопределенность информации в системе и как фактор – ее возвращение к порядку.

Рассматривая разные процессы роста (аддитивные, мультипликативные или обобщенные), мы связываем их с массой, размерами, то есть с изменением величин x_i, полагая, что они случайны. В данном случае, если принять меру однородности в качестве традиционной, то становится естественным обратиться к использованию энтропии. Классической формулой расчёта энтропии является формула, предложенная Шенноном [7]:

$$H = -\sum_{i=1}^{k} p_i \ln p_i \,. \tag{4}$$

Выражение (4) имеет связь с усредненной энтропией Больцмана для подсистем и термодинамической энтропией Гиббса [8]. Справедливость данной формулы соответствует соблюдению условия нормировки $\sum_i p_i = 1$ и хорошо работает для аддитивных обобщенных систем. Возможности в применении этого выражения представлены в работе [9] и кроме этого нашло свое широкое применение, например, в анализе состояния технических систем [10].

Следует отметить тот факт, что модель Шеннона имеет свои ограничения в анализе сложных систем, например, технических. Выражение (4) – среднестатистическая величина частных энтропий и справедливо для нормального распределения плотности вероятности случайных величин. Поэтому не в полной мере согласуется с наблюдаемыми процессами мультипликативного роста. Одним из камней преткновения, согласно [11], можно считать отсутствие возможности учета степенных распределений.

Представим пример, относящийся к данной ситуации. Одним из показателей надежности технической системы является параметр потока отказов $\omega(t)$: отношение числа отказавших элементов в единицу времени к числу исправных элементов (при выходе из строя подлежащих замене новыми или отремонтированными). В случае $x(t) = x = const$ параметр потока отказов соответствует интенсивности отказов $\lambda(t)$: $\omega(t) = \lambda(t) = x(t) = x$.

Обращаясь к рассмотрению жизненного цикла технической системы, его можно условно представить в обобщенной форме как типичную зависимость интенсивности отказов от времени $\lambda(t)$ с наличием трех периодов: приработки и отказов некачественных изделий; нормальной эксплуатации, когда $\lambda(t) = const$; старения.

В первом и третьем периодах рост интенсивности имеет степенной вид и отличается от аддитивного роста, что не гарантирует точности измерения энтропии по Шеннону. Второй период является продолжительным по времени эксплуатации системы и применение классической шенноновской энтропии здесь уместно.

Принимая во внимание измерение состояния системы, с позиции анализа надежности, востребован учет двух противоположных состояний элемента: работоспособное и неработоспособное (отказ). Вероятность первого из них – p_1, второго – p_2=1-p_1.

Рассчитывая энтропию по формуле (4), для разных p_1 можно получить величину энтропии H. Её максимальная величина достигается в точке p_1=p_2=0,5, когда состояния максимально вероятностно однородны. Если разница между p_1 и p_2 максимальна, энтропия H=0, означает стремление неоднородности в системе к бесконечности. Однако эти два крайних состояния, имеющих отношение к анализу надежности, практически не рассматриваются. Поскольку для сложных систем в практике эксплуатации не рассматриваются противоположные состояния с вероятностями $p_1 \approx p_2$, постольку при этом она не способна выполнить в достаточном объеме заданные функции (установленные регламентом). В реалии ей свойственно состояние неоднородности в пользу работоспособного состояния.

Аналогично можно оценивать неоднородность состояний двух объектов. При этом для вычисления p_1 и p_2 возьмем величины x_1 и x_2 как доли множества X. Пусть множество будет состоять из двух объектов с элементами x_1 и x_2, а вероятности определятся как $p_1 = x_1/(x_1+x_2)$ и $p_2 = x_2/(x_1+x_2)$. Когда x_1=x_2, энтропия объектов будет максимальна.

Если вести речь об однородности или неоднородности, то в качестве величины x, для примера, можно взять интенсивность отказов λ. Она может служить основанием для вычисления энтропии Шеннона с целью оценки неоднородности множества.

Предложим к рассмотрению пример. В процессе эксплуатации находится два однородных технических объекта (с одинаковым сроком эксплуатации). В течение рассматриваемого периода времени интенсивность отказов первого объекта зафиксирована в два раза выше интенсивности второго объекта. Принято решение, выполнять восстановление объекта после каждого отказа так, чтобы мера однородности согласно интенсивности восстановления, оставалась постоянной. В качестве меры однородности взята энтропия Шеннона. Для ее сохранения был соблюден принцип: чем больше весовая доля интенсивности отказов в их суммарном весе, тем большую долю интенсивности восстановления получал объект. Тем самым просматривается стремление сохранить однородность частот. Однако данный принцип не отвечает некоторым свойствам надежности: для объекта с более высокой частотой отказов (по причине старения объекта) не избежать ее роста в большей степени, чем объект с малой частотой. В данном случае прослеживается неоднородность появления событий.

Если отойти от отмеченного выше принципа, когда вероятность вычислялась согласно (2), то возможно применение обобщенного правила вычисления вероятности по формуле (3). В ней a не равнялась бы единице, а была бы (согласно примеру) равной 1/2. Тогда становится очевидным, что шенноновская энтропия не будет постоянной, она возрастает. Чтобы избежать решения такого рода задач, можно рекомендовать к применению энтропию Реньи [12].

Обсуждение результатов. Энтропия Реньи является обобщением энтропии Шеннона и представляет собой семейство функционалов вычисления количественных значений разнообразия неопределенности или случайных состояний системы. Реньи доказал, что постулат аддититивности энтропии существенно ограничивает класс функций $f(x)$.

Реально возможны лишь два типа функций: $f(x) = d + c{\cdot}x$ и $f(x) = c{\cdot}exp(1\text{-}q)x$ (c и d - произвольные постоянные, q>0). Энтропия Реньи вычисляется по формуле:

$$H_a(X)=\frac{1}{1-\alpha}\ln\left(\sum_{i}^{k}p_i^{\alpha}\right), \tag{5}$$

где $a \geq 0$, $a \neq 1$.

Согласно требованию аддитивности, через коэффициент α можно измерять классы энтропий для статистически независимых систем при условии $\sum_i p_i = 1$. Согласно (5), если все вероятности p=1/k, то для различных α имеем частную энтропию $H_a = \ln k$. Увеличивая α энтропия убывают. При возрастании α энтропия Реньи в большей степени будет определена через рассмотрение высоких вероятностей событий. Низкие значения α, стремящиеся к нулю, определяют энтропию Реньи, которая в большей степени взвешивает все возможные события более равномерно, независимо от их вероятностей. Промежуточный случай α=1 дает энтропию Шеннона, которая обладает особыми свойствами. При α=0 максимально возможная энтропия Шеннона, ln$k$. Различные свойства энтропии Реньи рассмотрены в источниках[13-15]. Таким образом, в зависимости от значения α получаем разные меры однородности - от самых малочувствительных до сверхчувствительных.

Поясним это на примере с объектом, имеющим два противоположных состояния, характеризующиеся величинами x: x_1 уменьшается с шагом 1начиная с 11 до 1; x_2 увеличивается с 1 до 11. Согласно условия p_1+p_2 =1, вероятности получаем из выражений p_1= x_1/(x_1+x_2) и p_2 = x_2/(x_1+x_2) для всех 11 состояний.

Применяем формулу Реньи, вычисляя каждую энтропию i для всех 11 состояний:

$$H_{ia}=\frac{1}{1-\alpha}\ln\left(p_{1i}^{\alpha}+p_{2i}^{a}\right).$$

Вычисляя по каждому из коэффициентов a значения энтропии, получаем итоговый результат, представленный в табл.1.

Таблица 1. Результаты вычисления энтропии для различных значений коэффициента *a*
Table 1. Results of entropy calculation for different values of the coefficient a

Состояния States / Энтропия Entropy	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H_{1a}, a=0.05	0,664	0,679	0,686	0,690	0,692	0,693	0,692	0,690	0,686	0,679	0,664
H_{2a}, a=0.3	0,530	0,608	0,651	0,676	0,689	0,693	0,689	0,676	0,651	0,608	0,530
H_{3a}, a=3	0,130	0,269	0,413	0,549	0,653	0,693	0,653	0,549	0,413	0,269	0,130
H_{4a}, a=50	0,089	0,186	0,294	0,414	0,550	0,693	0,550	0,414	0,294	0,186	0,089

Для наглядности полученных результатов, данные в табл. 1 представим на рис. 1.

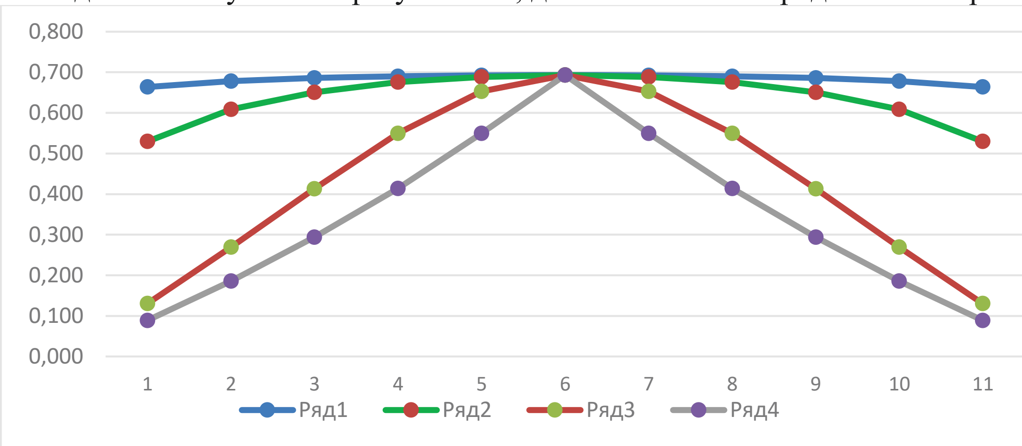

Рис. 1 – Диаграмма распределения энтропии Реньи для четырех коэффициентов *a*
Fig. 1 – Diagram of the distribution of the Renyi entropy for four coefficients a

С ростом параметра α, формула становится более чувствительнее к разнице между вероятностями p_1 и p_2. При малых значениях α, энтропия Реньи не претерпевает заметных изменений для широкого диапазона различий двух состояний. Принимая α=1 получаем энтропию по Шеннону. Рассмотрим случай, когда α=0. Тогда формула Реньи (5) будет выглядеть как $H_{a=0} = \ln k$. В такой формуле не учитывается разница вероятностями между состояниями x и величина энтропии зависит только от количества состояний k. Следовательно, не зависимо от того, сколько объектов эксплуатируется в систем (при условии постоянства их количества) и как бы мы не вкладывались ресурсами в поддержании надежности, получали бы одну и ту же энтропию системы. Фактическим нами рассматривается формула энтропии (количества информации) по Хартли [16], пригодная для равновероятных состояний (как частный случай энтропии Реньи). Представленные здесь научно обоснованные выкладки могут занять свое положение, например, в вопросах анализа социальных [17] и надежности технических систем [18-20].

Вывод. В качестве меры информации в анализе состояния системы можно считать обобщенную энтропию, вычисляемую через логарифм количества ее разнообразных состояний. Обращаясь к вопросу анализа процессов (явлений) роста, среди которых - аддитивный и мультипликативный, можно довольствоваться вероятностью события на элементе системы. Отличительной особенностью в определении вероятностей является параметр a. Его изменение определяет величину исходной вероятности в мультипликативном росте параметров системы при неизменности ее структуры.

Положительным фактором процесса роста (аддитивного, мультипликативного) является связь вероятностей с такими случайными величинами как масса, размеры, объем. Тем самым принятие в анализе меры однородности становится фактором перехода к вычислению и применению энтропии. Применение в данном анализе формулы Шеннона ограничено, например, при анализе структурной надежности сложных технических систем некоторые параметры не отвечают свойствам аддитивных процессов.

Предложение о применимости энтропии Реньи для анализа процесса роста можно считать наиболее перспективным, поскольку важным аспектом здесь является параметр a. Его значимость в определении энтропии Реньи для процессов аддитивного и мультипликативного роста обосновывается примером рассмотрения объекта, имеющим два противоположных состояния, характеризующиеся величинами измеряемого множества.

Изменяемая величина параметра a в формуле Реньи позволяет получать разные меры однородности - от самых малочувствительных до сверхчувствительных процессов роста. Автоматизируя процесс изменения параметра, например, средствами машинного обучения, можно отслеживать спектр от α=0 до бесконечности.

Библиографический список:

1. Robson B., Ochoa-Vargas G. Searching for the Principles of Less Artificial AI. Informatics in Medicine Unlocked, 2022, p. 101018. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235291482200005X (дата обращения: 23.11.2022)
2. Vopson M.M. Mass-Energy-Information Equivalence Principle. AIP Advances, vol. 9, no. 9, September 2019, pp. 095206. doi: 10.1063/1.5123794. URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.5123794 (дата обращения: 22.11.2022)
3. StudFiles. Свойства больших систем. Электронный ресурс. Доступ: https://studfile.net/preview/7400234/page:3/. (дата обращения: 25.03.2025)
4. Бекман И.Н. Идеи порядка и беспорядка в физической химии. Материалы семинара «Физическая химия: Quo vadis?» URL: https://profbeckman.narod.ru/poryadok/Doclad_poryadok.pdf (дата обращения: 05.04.2025)
5. Королев О.Л., Куссый М.Ю., Сигал А.В. Применение энтропии при моделировании процессов принятия решений в экономике: монография / под ред. А.В. Сигала. Москва: ИНФРА-М, 2022. 202 с. ISBN 978-5-16-018651-8. DOI: 10.12737/1865188.
6. Dionisdimetor. Правда и мифы об энтропии. Как работает второй закон термодинамики? Habr, 20 января 2024, 13:00. URL: https://habr.com/ru/articles/787724 (дата обращения: 10.04.2025)
7. Shannon C.E. Mathematical Theory of Communication. *Bell System Tech. Journal,* Vol. 27, No. 3, 1948, pp. 379–423.
8. Гиббс Дж.В. Термодинамика. Статистическая механика. Москва: Наука, 1982. 584с.
9. Хинчин А.Я. Понятие энтропии в теории вероятностей. УМН, №3(55), 1953, стр. 3–20.
10. Dulesov A.S., Karandeev D.Y., Konovalov A.A., Bayyr D.B., Dulesova N.V. Probability and Information Entropy in the Analysis of Reliability of Technical Systems. SMARTGREENS 2024 International Conference Proceedings. URL: https://doi.org/10.63550/iceip.2025.1.1.026 (дата обращения: 12.04.2025)
11. P. Bak. How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality. Springer-Verlag, New York, 1996.
12. Alfrped Rényi. On Measures of Entropy and Information. Proc. Fourth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, University of California Press, 1961, Vol. I, pp. 547–561. URL: https://projecteuclid.org/euclid.bsmsp/1200512181 (дата обращения: 17.06.2023)
13. Alfred Rényi. Probability Theory. North Holland Publishing Company, Amsterdam-London, 1970.
14. Beck C., Schlögl F. Thermodynamics of Chaotic Systems. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1993.
15. Климентович Ю.Л. Статистическая теория открытых систем. ТОО Янус, Москва, 1995.
16. Хартли Р.В.Л. Transmission of Information. *Bell System Technical Journal,* Vol. 7, 1928, pp. 535–63.
17. Грачев М.И. Модель автоматизации процессов управления вузом. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(4):60-70. https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-4-60-70
18. Кодацкий Н.М., Ревякина Е.А., Газизов А.Р. Системный анализ и обработка информации для задачи выявления поломки информационного накопителя компьютера. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(4):87-98. https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-4-87-98
19. Дровникова И.Г., Етепнев А.С., Рогозин Е.А. Основные виды уязвимостей и взаимосвязь компонентов безопасности при обосновании показателей надёжности системы защиты информации от несанкционированного доступа в автоматизированных системах // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2019. – No 3. – С. 59–64. – EDN VWGOHY
20. Ефимов А.О. Причины возникновения, классификация и критичность уязвимостей программного обеспечения информационных систем. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(2):98-106.https://doi.org/10.21822/2073-6185-2025-52-2-98-106

References:

1. Robson B., Ochoa-Vargas G. Searching for the Principles of Less Artificial AI. Informatics in Medicine Unlocked, 2022, p. 101018. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235291482200005X (date of request: 11/23/2022)
2. Vopson M.M. Mass-Energy-Information Equivalence Principle. AIP Advances, 2019;9(9) September pp. 095206.doi:10.1063/1.5123794.http://dx.doi.org/10.1063/1.5123794 (date of request: 11/22/2022)
3. StudFiles. Properties of large systems. An electronic resource. Access: https://studfile.net/preview/7400234/page:3/. (date of request: 03/25/2025)
4. Bekman I.N. Ideas of order and disorder in physical chemistry. Materials of the seminar "Physical Chemistry: Quo vadis?"https://profbeckman.narod.ru/poryadok/Doclad_poryadok.pdf(date of request: 04/05/2025)
5. Korolev O.L., Kussyi M.Yu., Sigal A.V. The use of entropy in modeling decision-making processes in economics: a monograph / edited by A.V. Sigal. Moscow: INFRA-M, 2022;202 p. ISBN 978-5-16-018651-8. DOI: 10.12737/1865188.
6. Dionisdimetor. The truth and myths about entropy. How does the second law of thermodynamics work? Habr, January 20, 2024, 13:00. URL: https://habr.com/ru/articles/787724 (accessed: 04/10/2025)
7. Shannon C.E. Mathematical Theory of Communication. *Bell System Tech. Journal.*1948;27(3):379-423.
8. Gibbs J.V. Thermodynamics. Statistical mechanics. Moscow: Nauka Publ., 1982. 584p.
9. Khinchin A.Ya. The concept of entropy in probability theory. UMN, No. 3(55), 1953, pp. 3-20.
10. Dulesov A.S., Karandeev D.Y., Konovalov A.A., Bayyr D.B., Dulesova N.V. Probability and Information Entropy in the Analysis of Reliability of Technical Systems. SMARTGREENS 2024 International Conference Proceedings. URL: https://doi.org/10.63550/iceip.2025.1.1.026 (date of access: 04/12/2025)
11. P. Bak. How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality. Springer-Verlag, New York, 1996.
12. Alfrped Rényi. On Measures of Entropy and Information. Proc. Fourth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, University of California Press, 1961, Vol. I, pp. 547–561. URL: https://projecteuclid.org/euclid.bsmsp/1200512181 (accessed: 06/17/2023)
13. Alfred Rényi. Probability Theory. North Holland Publishing Company, Amsterdam-London, 1970.
14. Beck C., Schlögl F.Thermodynamics of Chaotic Systems. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1993.
15. Klimentovich Yu.L. Statistical theory of open systems. Janus LLP, Moscow, 1995.
16. Hartley R.V.L. Transmission of Information. Bell System Technical Journal, 1928; 7: 535-63.
17. Grachev M.I. The model of automation of university management processes. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2024;51(4):60-70. (In Russ.) https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-4-60-70
18. Kodatsky N.M., Revyakina E.A., Gazizov A.R. System analysis and information processing to solve the problem of detecting breakdowns of computer information storage. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences.* 2024;51(4):87-98.(In Russ) doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-4-87-98
19. Drovnikova I.G., Etepnev A.S., Rogozin E.A. Main Types of Vulnerabilities and the Relationship of Security Components in Justifying Indicators of Information Protection System Reliability Against Unauthorized Access in Automated Systems. Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics. 2019; 3: 59–64. – EDN VWGOHY. (In Russ)
20. Efimov A.O. Causes, classification, and criticality of information system software vulnerabilities. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences.* 2025;52(2):98-106. (In Russ.) https://doi.org/10.21822/2073-6185-2025-52-2-98-106

Сведения об авторах:

Дулесов Александр Сергеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры цифровых технологий и дизайна; dulesov@khsu.ru; ORCID 0000-0001-6371-0171

Байыр Долаан Борисович, аспирант кафедры цифровых технологий и дизайна; dolaan.bayyr@mail.ru

Бычкова Ирина Александровна, магистрант кафедры цифровых технологий и дизайна; irina.bychkova.02@mail.ru; ORCID 0000-0003-1732-5947

Information about authors:

Alexander S. Dulesov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof., Department of Digital Technologies and Design; dulesov@khsu.ru; ORCID 0000-0001-6371-0171

Dolaan B. Bayyr, Postgraduate Student, Department of Digital Technologies and Design; dolaan.bayyr@mail.ru;

Irina A. Bychkova, Master's Student, Department of Digital Technologies and Design; iri-na.bychkova.02@mail.ru; ORCID 0000-0003-1732-5947

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 27.05.2025**.**

Одобрена после рецензирования/Reviced 04.11.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 15.01.2026.