

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 626.81:620.91:536.75

doi: 10.31774/2712-9357-2024-14-2-55-73

Основы энерго-энтропийной методологии в классе природно-технических систем «природная среда – объект деятельности – население»

Владимир Леонидович Бондаренко¹, Аллаберды Ильясович Ылясов²,
Елгуджа Демурович Хецуриани^{3,4}, Мария Ивановна Штавакер¹,
Максим Сергеевич Хохрин³

¹Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета, Новочеркасск, Российская Федерация

²Филиал Westport Trading Europe Limited (WTL) (США) в Азии, Москва, Российская Федерация

³Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова, Новочеркасск, Российская Федерация

⁴Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Автор, ответственный за переписку: Владимир Леонидович Бондаренко, nimi.TViP@yandex.ru

Аннотация. Цель: разработка основ энерго-энтропийной методологии, базирующейся на результатах системной взаимосвязи фундаментальных понятий «энергия» и неотъемлемой ее тени – «энтропии» в классе природно-технических систем (ПТС) «природная среда – объект деятельности – население» по использованию водных ресурсов в отраслях хозяйственной и иной деятельности. **Материалы и методы.** Исходя из единства действий Природы и проводимой хозяйственной деятельности, рассматриваются методологические основы энерго-энтропийного подхода в оценке эффективности использования водных ресурсов, где центральным базовым понятием является «энергия», она в системном рассмотрении остается постоянной величиной, но в процессах использования меняет свою форму, а неотъемлемой тенью ее является «энтропия». Если принять речную бассейновую геосистему за элементарную часть биосферы Земли, понятие «энтропия» исходит из термодинамической специфики, где при естественных изменениях в системе возрастает, а при противоестественных темпы роста ее снижаются. Такое понимание отражает второе начало термодинамики в формулировках Р. Клаузиуса. **Результаты.** Взаимосвязь понятий «энергия» и «энтропия» в использовании водных ресурсов в технологических процессах на орошаемых землях обуславливает упорядочение в процессах системного взаимодействия трех компонентов с входящими в них элементами в составе ПТС, что дает возможность оценки энерго-энтропийной эффективности использования водных ресурсов на орошаемых землях. **Выводы.** Разработаны энерго-энтропийные основы функционирования объекта деятельности в составе ПТС, использующих речной водный сток, формируемый за счет потоков солнечной энергии и преобразований форм энергии в процессах взаимосвязи, взаимодействия и взаимоотношения между компонентами в составе ПТС, где энтропия отражает количественную меру связанной части энергии, не способной выполнять любые виды работ и изменений в упорядоченности между компонентами с входящими в них элементами в составе ПТС.

Ключевые слова: энергия, энтропия, речная бассейновая геосистема, энерго-энтропийная методология, природно-техническая система

Для цитирования: Основы энерго-энтропийной методологии в классе природно-технических систем «природная среда – объект деятельности – население» / В. Л. Бондаренко, А. И. Блясов, Е. Д. Хецуриани, М. И. Штавдакер, М. С. Хохрин // Мелиорация и гидротехника. 2024. Т. 14, № 2. С. 55–73. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2024-14-2-55-73>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Fundamentals of energy-entropy methodology in the class of natural engineering systems “Natural Environment – Object of Activity – Population”

Vladimir L. Bondarenko¹, Allaberdy I. Ylyasov², Elguja D. Khetsuriani^{3,4},
Maria I. Shtavdaker¹, Maksim S. Khokhrin³

¹Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute – branch of the Don State Agrarian University, Novocherkassk, Russian Federation

²Westport Trading Europe Limited (WTL) Branch (USA) in Asia, Moscow, Russian Federation

³M. I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russian Federation

⁴Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Corresponding author: Vladimir L. Bondarenko, nimi.TBiP@yandex.ru

Abstract. Purpose: to develop the fundamentals of an energy-entropy methodology based on the results of a systemic relationship between the fundamental concepts of “energy” and its integral shadow – “entropy” in the natural engineering systems (NES) “Natural Environment – Object of Activity – Population” class for the use of water resources in economic and other branches of activities. **Materials and methods.** Based on the unity of actions of nature and ongoing economic activities, the methodological fundamentals of the energy-entropy approach in assessing the use of water resource efficiency, where the central basic concept is “energy”, are considered, it remains a constant value in a systemic consideration, but while using, it changes its form, and its integral shadow is “entropy”. If we take the river basin geosystem as an elementary part of the Earth’s biosphere, the concept of “entropy” comes from thermodynamic specificity, where its growth rate increases with natural changes in the system, and decreases with unnatural changes. This understanding reflects the second law of thermodynamics in R. Clausius formulations. **Results.** The relationship between the concepts of “energy” and “entropy” in the use of water resources in technological processes on irrigated lands determines the ordering of systemic interaction processes of three components with their constituent elements as part of the NES, which makes it possible to assess energy-entropy efficiency of using water resources on irrigated lands. **Conclusions.** The energy-entropy fundamentals for the functioning of an object of activity as part of a NES has been developed, using river flow formed by solar energy flows and transformations of energy forms in the processes of interconnection, interaction and relationships between components in the NES, where entropy reflects a quantitative measure of the connected part of the energy, unable to perform any types of work and changes in the ordering between components with their constituent elements as part of the NES.

Keywords: energy, entropy, river basin geosystem, energy-entropy methodology, natural engineering system

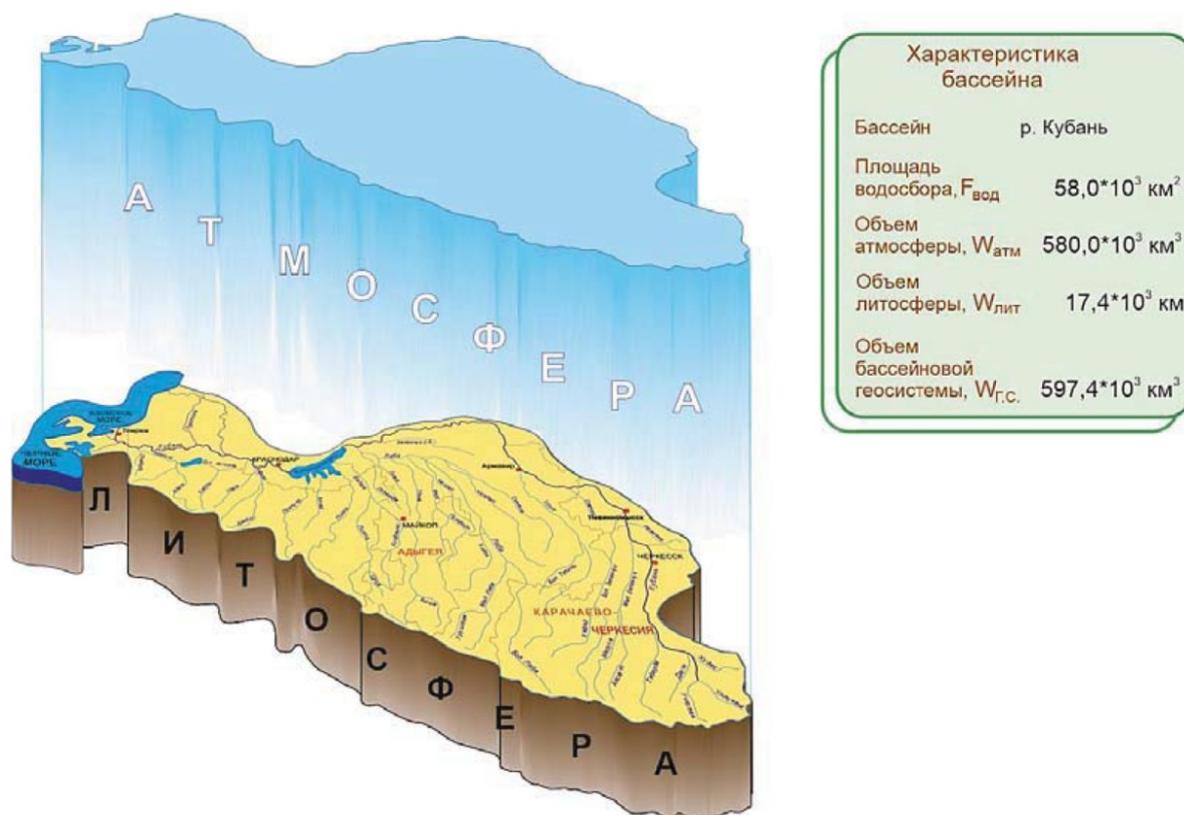
For citation: Bondarenko V. L., Ylyasov A. I., Khetsuriani E. D., Shtavdaker M. I., Khokhrin M. S. Fundamentals of energy-entropy methodology in the class of natural engi-

neering systems “Natural Environment – Object of Activity – Population”. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2024;14(2):55–73. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2024-14-2-55-73>.

Введение. Исходили из единства действий Природы в пространственных пределах биосферы Земли ($W_{6.3.} = 10^{10}$ км³) и хозяйственной и иной деятельности, неотъемлемо связанной с использованием водных ресурсов в технологических процессах, формирование которых происходит за счет непрерывно поступающих потоков *энергии* от первоисточника – Солнца. По оценкам, суммарная величина потоков солнечной *энергии*, достигающих поверхности большого плоского круга планеты Земля, составляет $1,73 \cdot 10^{17}$ Вт. *Энергия* приливов оценивается в $3 \cdot 10^{12}$ Вт. Поток *энергии* из недр Земли составляет $32 \cdot 10^{12}$ Вт с плотностью $0,063$ Вт/м², а площадь поверхности Земли составляет $510,1 \cdot 10^6$ км². Из суммарного количества *энергии*, достигающей земной поверхности, солнечная энергия как первоисточник для Земли составляет 99,98 %, из нее 23 % ($40000 \cdot 10^{12}$ Вт) расходуется в цикле глобального влагооборота (397,9 ТВт). В пространственных пределах речных бассейновых геосистем Российской Федерации ($W_{пр.п.} = 176112$ тыс. км³) формируется, по среднемноголетним данным, порядка $8950,13$ км³, или 0,3046 % от общих запасов водных ресурсов (2938221 км³), из них речной сток составляет $4,25$ тыс. км³. В рассматриваемых речных бассейновых геосистемах рек Кубани, Нижнего Дона, Терка как части глобального влагооборота формируется водный сток (поверхностный, подземный), который, по среднемноголетним данным, составляет $52,3$ км³, на него расходуется $40,35$ ТВт солнечной *энергии*.

Целью исследования является разработка основ энерго-энтропийной методологии, базирующейся на результатах системной взаимосвязи фундаментальных понятий *энергия* и неотъемлемой ее тени – *энтропии* в классе природно-технических систем «природная среда – объект деятельности – население» (ПТС «ПС – ОД – Н») по использованию водных ресурсов в отраслях хозяйственной и иной деятельности.

В речных бассейновых геосистемах доминирующую роль играют неустойчивость и неравномерность, в таких системах формируются количественные и качественные показатели водных ресурсов, а их использование как особый вид хозяйственной деятельности связано с затратами *энергии* на формирование влагооборота как на глобальном, так и на локальном уровне речных бассейновых геосистем, например, рек Кубани (рисунок 1), Нижнего Дона и Терека, в которых функционирует ПТС «ПС – ОД – Н» по обеспечению водопользователей и водопотребителей расчетными расходами (Q , м³/с) воды [1, 2].



**Рисунок 1 – Бассейновая геосистема р. Кубани
(автор В. Л. Бондаренко)**

Figure 1 – Basin geosystem of the Kuban river (author V. L. Bondarenko)

Затраты *энергии* в действующих и создаваемых ПТС «ПС – ОД – Н» обуславливают необходимость в разработке основ энерго-энтропийной методологии, в которой базовыми понятиями являются *материя, энергия, энтропия, время, работа* и др. [3–5]. Представление об *энтропии* развивает-

ся совместно с представлением об *энергии* как об основе естествознания в развитии энерго-энтропийной методологии класса ПТС «ПС – ОД – Н».

Формирование водного стока (поверхностного, подземного) [6] в пространстве и времени в пределах водосборной территории речной бассейновой геосистемы (см. рисунок 1) как части глобального влагооборота (577 тыс. км³) осуществляется за счет поступающих непрерывных потоков солнечной энергии (радиации), эквивалентной $1,73 \cdot 10^{17}$ Вт, из которых 23 % ($40000 \cdot 10^{12}$ Вт) расходуется на процессы глобального гидрологического влагооборота и только около 1 % на процессы фотосинтеза [7]. В системном рассмотрении речная бассейновая геосистема представляет собой в составе биосферы Земли малую вселенную, где понятие *энтропия* обуславливается исходя из термодинамической специфики, в которой при естественных изменениях в природном и социальном компонентах возрастает, а при противоестественных темпы роста снижаются, что отражает второе начало термодинамики в формулировках Р. Клаузиуса¹ [8]. Использование водных ресурсов в пространстве и времени речной бассейновой геосистемы неотъемлемо взаимосвязано с центральным базовым понятием *энергия*, которая в количественном и системном рассмотрении остается постоянной величиной (первый закон термодинамики), но в процессах использования изменяет свою форму, а *энтропия* является своеобразной неотъемлемой ее тенью. Взаимосвязь понятий *энергия* и *энтропия* в классе ПТС «ПС – ОД – Н» по использованию водных ресурсов с энергетической точки зрения определяется энергетическим уравнением:

$$E_{\text{пол}} = E_{\text{свб}} + E_{\text{свз}},$$

в котором полная энергия ($E_{\text{пол}}$) на входе в систему делится на свободную часть энергии ($E_{\text{свб}}$), используемую для выполнения необходимых видов

¹Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979. 440 с.

работ, и связную часть энергии ($E_{\text{свз}}$), не способную к выполнению никаких видов работ, в итоге она превращается в устойчивую форму – тепловую и рассеивается в окружающем пространстве речной бассейновой геосистемы. Состояние ПТС «ПС – ОД – Н», как установлено исследованиями [9], определяется уровнем *энтропии* (S) в балансовом соотношении частей энергии $E_{\text{свб}}$ и $E_{\text{свз}}$. Динамика энерго-энтропийных изменений в рассматриваемой системе представлена на рисунке 2.

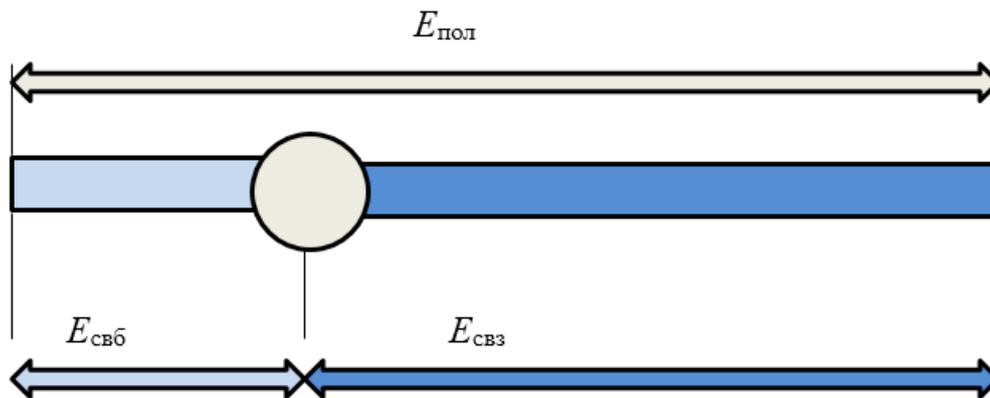


Рисунок 2 – Энергетический баланс в природно-технических системах «природная среда – объект деятельности – население» (автор В. Л. Бондаренко)

Figure 2 – Energy balance in natural engineering systems “Natural Environment – Object of Activity – Population” (author V. L. Bondarenko)

Неотъемлема взаимосвязь *энергии* и *энтропии* в рассматриваемом классе ПТС «ПС – ОД – Н», где *энтропия* не может уничтожаться, но темпы роста ее в процессах функционирования системы могут приобретать устойчивую тенденцию к снижению благодаря совершенствованию конструктивных элементов в составе объекта деятельности (ОД) и упорядочению в процессах регулирования и использования водного стока в пространственных пределах речной бассейновой геосистемы.

Если исходить из термодинамической специфики взаимосвязи *энергии* и *энтропии* и использовать аналогию с растительным и животным миром (в случае лишения его содержащейся *энтропии* в ПС прекратятся изменения генов, порождающие новые биологические виды), в процессах

функционирования ПТС «ПС – ОД – Н» по аналогии на действующих и создаваемых ОД прекратятся процессы их конструктивного совершенствования и упорядочения в пространственных пределах речной бассейновой геосистемы [10].

Следовательно, понятие *энтропии* как тени *энергии* неотъемлемо связано не только с хаотичным движением молекул нагретой воды и изменением генов. В действующих ПТС «ПС – ОД – Н» происходит упорядочение в процессах взаимосвязи, взаимодействия и взаимоотношения (ВВВ) элементов природного (ПС), социального (население) компонента, элементов техногенного компонента в виде напорного фронта водохранилищного гидроузла, рыбозащитных устройств, берегозащитных сооружений и др. в пространственных пределах зон влияния ОД речной бассейновой геосистемы, где формируются количественные и качественные показатели водных ресурсов под действием поступающих потоков солнечной *энергии*.

Материалы и методы. Статья отражает системный подход в оценке энерго-энтропийного подхода к процессам формирования и использования водных ресурсов в пределах речных бассейновых геосистем на действующих ПТС «ПС – ОД – Н».

На иерархическом уровне локальных речных бассейновых геосистем (см. рисунок 1), как элементарных частей биосферы Земли, естественный порядок в природном компоненте ПС с входящими в него биотическими и абиотическими элементами определяется накопленной информацией, в которой гидрологическая информация о процессах формирования водного стока (поверхностного, подземного) за многолетний период является важной в хозяйственной и иной деятельности, связанной с использованием водных ресурсов, в частности на оросительных системах. Установлено, что на формирование 1 км^3 речного стока как части глобального влагооборота в пределах биосферы Земли (577 тыс. км^3) на водосборных территориях рек

Кубани, Нижнего Дона, Терека затрачивается 0,385 ТВт *энергии*, поступающей от первоисточника – Солнца.

Использование водных ресурсов в технологических процессах оросительных систем неотъемлемо связано, как установлено исследованиями, с процессами преобразования форм *энергии*, что неотъемлемо формирует естественную тенденцию роста *энтропии* в процессах ВВВ ОД с компонентами и входящими в них элементами в составе действующих ПТС «ПС – ОД – Н» в пределах речных бассейновых геосистем, являющихся приемниками потоков солнечной *энергии*. Изменение *энтропии* в зонах влияния ОД речной бассейновой геосистемы в обобщенном понимании отражает прошлое (до строительства), настоящее (период эксплуатации) и будущее (завершение эксплуатации), и вернуться в начальное состояние согласно второму закону термодинамики будет невозможно, что реально подтверждается на примерах действующих ПТС в пределах рассматриваемых речных бассейновых геосистем рек Кубани, Нижнего Дона и Терека.

В обобщенном рассмотрении энерго-энтропийного подхода *энтропия* – мера связанной *энергии* ($E_{свз}$), которая недоступна для использования и выражает меру упорядоченности в процессах ВВВ компонентов с входящими в них элементами в составе ПТС «ПС – ОД – Н». В природном компоненте ПС важной термодинамической характеристикой входящих в нее элементов (биотических, абиотических) является естественная способность создавать и поддерживать необходимый уровень упорядоченности и, соответственно, низкий темп роста *энтропии* путем рассеивания легко используемой *энергии* (солнечной радиации, пищи) и превращения ее в стабильную форму – тепло.

Формирование необходимой упорядоченности в процессах ВВВ ОД с природным ПС и социальным (население) компонентами с входящими в них элементами обуславливает необходимость применения энерго-энтро-

пийного подхода в оценке функциональной приемлемости ОД в составе ПТС «ПС – ОД – Н» исходя из КПД (η) использования водных ресурсов, формируемых в пространственных пределах речной бассейновой геосистемы, за счет потоков солнечной *энергии*. Важно отметить, что второй закон термодинамики не постулирует монотонного разупорядочения и увеличения связной части энергии ($E_{свз}$) и допускает возникновение упорядоченности и усложнение системообразующих взаимосвязей между компонентами с входящими в них элементами в рассматриваемом классе ПТС «ПС – ОД – Н». Подтверждением этому являются системы любого иерархического уровня от живой клетки до мощного двигателя корабля, речной бассейновой геосистемы и др., где происходят подобные процессы преобразования форм *энергии* с определенным КПД ($\eta < 1$).

Результаты и обсуждения. Действующие ПТС «ПС – ОД – Н» в хозяйственной деятельности по использованию водных ресурсов, количественные и качественные показатели которых формируются в пространственных пределах речных бассейновых геосистем, занимают около 29 % от пространственных пределов биосферы Земли (5250 млн км³), например, пространственные пределы бассейновой геосистемы р. Дон составляют 4,23 млн км³, р. Кубани – 0,591 млн км³.

Теоретической и методологической основой системных моделей для ПТС «ПС – ОД – Н» являются базовые понятия – *материя, энергия, энтропия, время* и др.

Существует различие между «полезным» обменом *энергией* и диссипативной *энергией*, теряемой необратимо, определяющей фундаментальное понятие *энтропия*, введенное Клаузиусом в 1865 г., представление о ней развивается совместно с понятием *энергии* как фундаментальной основой естествознания в логическом развитии термодинамики Карно и, соответственно, в развитии энерго-энтропийной методологии использования водных

ресурсов в классе ПТС «ПС – ОД – Н». Проблема *энтропии* в классе ПТС «ПС – ОД – Н» в практическом и теоретическом плане мало изучена, что обуславливает актуальность и необходимость исследования этой проблемы, важность которой определяется динамичностью балансового соотношения свободной части *энергии* ($E_{\text{свб}}$), выполняющей различные виды работ, и связанной диссипативной части *энергии* ($E_{\text{свз}}$), не способной выполнять работу (см. рисунок 2). Например, можно отметить, что в 1 л горячей воды значение *энтропии* выше, чем в 1 л холодной воды. *Энтропия* системы неотъемлемо связана с энергетическим состоянием рассматриваемой ПТС «ПС – ОД – Н» в пространственных пределах речной бассейновой геосистемы, а изменение состояния под воздействием хозяйственной или иной деятельности, природных факторов и т. п. приводит к энергетическим изменениям и, соответственно, к изменению тенденции формирования *энтропии*. В рассматриваемом классе систем по использованию водных ресурсов *энтропия* обуславливает направленность протекающих процессов преобразования форм *энергии*, которые в системном понимании являются необратимыми в соответствии с принципом: «Тепло не пойдет от холодного тела к нагретому телу» [10].

Системный анализ процессов ВВВ между компонентами ПТС «ПС – ОД – Н» и входящими в них элементами, исходя из понятия *энергии* как количественного показателя движения и взаимодействия вещества, энергии и информации (ВЭИ) в компонентах системы, показывает, что формируемый уровень *энтропии* характеризует условия запасания и хранения *энергии*.

Так, на действующих ПТС «ПС – ОД – Н» на основе результатов системных комплексных мониторинговых исследований (СКМИ) в бассейнах рек Кубани, Нижнего Дона и Терека установлено, что тенденция роста уровня *энтропии* является характерным показателем доминирования есте-

ственных процессов запасаения *энергии* в компонентах с входящими в них элементами, например, действующих водохранилищ и т. п.

Эффективность функциональной работы с оценкой энергетического состояния в зонах влияния ОД в составе ПТС «ПС – ОД – Н», как показывают многолетние исследования, зависит от процессов ВВВ между компонентами и входящими в них элементами, определяется универсальным показателем – *энтропией*, представляющей собой в системном понимании создаваемую упорядоченность в процессах регулирования или перераспределения водного стока на речной гидрографической сети, отбора части стока на технологические процессы оросительных систем и другие виды использования.

Энтропия как количественная мера связной части *энергии* ($E_{\text{свз}}$) характеризуется мерой изменения порядка упорядоченности между компонентами системы с входящими в них элементами, в которых собственно и происходит преобразование форм *энергии*, например, на речной гидрографической сети регулирование водного стока путем создания водохранилищ, водозаборов, оросительных систем, систем водоснабжения и т. п. Считаю важным отметить, что на действующих ПТС «ПС – ОД – Н» в пространственных пределах речных бассейновых геосистем, где формируются количественные и качественные показатели водных ресурсов за счет потоков солнечной *энергии*, *энтропия* всегда стремится к росту, но при этом в процессах преобразования форм *энергии*, поступающей от первоисточника – Солнца, качество получаемой *энергии* в технологических процессах ухудшается, что необходимо учитывать в процедуре проведения оценки воздействия на природный и социальный компоненты (ОВОС).

В энерго-энтропийной методологии при изучении класса ПТС «ПС – ОД – Н» в качестве *энергии* между компонентами и входящими в них элементами рассматриваются и количественно измеряются физические формы

движения и взаимодействия поверхностного и подземного водного стока в зонах влияния ОД в пределах речной бассейновой геосистемы, где *энтропия* характеризует меру упорядоченности, которая проявляется в процессах регулирования водного стока, защиты ихтиофауны в речной гидрографической сети и т. п.

Энтропия – что скрывается под этим понятием? Людвиг Больцман предложил вероятностную форму физического смысла в понятии *энтропия*: царица мира – это *энергия*, а ее воображаемой тенью является *энтропия*, которая неотъемлемо следует за ней. С появлением научных направлений, связанных с кибернетикой, теорией информации, понятие *энтропии*, связанное с хаотичным движением молекул нагретого газа и воды, стало включать в себя изменение генов и взаимодействие структурных образований в рассматриваемых системах, например, в ПТС «ПС – ОД – Н» в пространственных пределах речных бассейновых геосистем, где формируются количественные и качественные показатели водных ресурсов, используемых практически во всех отраслях хозяйственной и иной деятельности. Следует отметить, что энтропийностью обладает любой творческий процесс, например, создание новых или совершенствование имеющихся конструктивных решений в гидротехнических сооружениях, входящих в состав ОД, что способствует созданию современных технологий использования водных ресурсов на оросительных системах.

Функция *энтропии* была введена в науку Р. Клаузиусом в 1865 г. в виде простой по физиологическому содержанию формулы:

$$S = \frac{Q}{T},$$

где S – функция *энтропии*;

Q – количество сохраняемого телом тепла, Дж;

T – абсолютная температура физического тела, К.

В термине *энтропия* приставка «эн», по предложению Клаузиуса, имеет родство с понятием *энергия*, а корень «тропо» определяет превращение одних форм *энергии* в другие, например, *энергии* водного потока в электрическую на ГЭС, ГАЭС и т. п. Анализ превращения одних форм *энергии* в другие рассеял иллюзии получения полезной работы «задаром» – «вечный двигатель» невозможен согласно и первому, и второму закону термодинамики. Следует отметить, что с введением понятия *энтропия* термодинамика стала стройной и завершенной теорией.

На основе результатов анализа действующих ПТС «ПС – ОД – Н» в пределах речных бассейновых геосистем рек Кубани, Нижнего Дона и Терека было установлено, что *энтропия* как физическая величина, которая не измеряется, но вычисляется, обуславливает скорость (интенсивность) процессов преобразования форм *энергии*, обеспечивающих, например, влагооборот в пределах рассматриваемой речной гидрографической сети до технологических процессов использования, например, на оросительной системе по обеспечению норм подачи оросительной воды к корневой системе орошаемых культур (кукуруза, рис, томаты и др.).

Динамика *энтропии* в неравновесных системах определяется известным уравнением И. Пригожина:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{deS}{dt} + \frac{diS}{dt},$$

где dS – полное изменение *энтропии* в системе за период времени dt ;

deS – *энтропия*, импортированная из окружающей внешней среды;

diS – изменение *энтропии*, обусловленное необратимыми процессами внутри системы или производством *энтропии*.

Исходя из второго закона термодинамики, diS всегда положительна, deS может быть и положительной, и отрицательной величиной (рисунок 3).

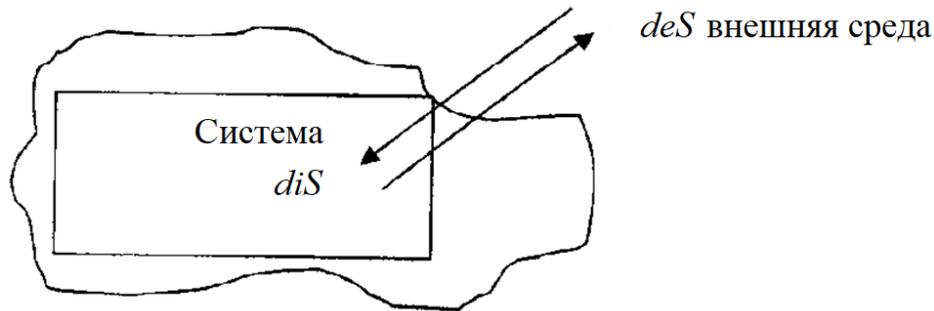


Рисунок 3 – Схема взаимодействия природно-технических систем «природная среда – объект деятельности – население» в пространственных пределах речных бассейновых геосистем (автор В. Л. Бондаренко)

Figure 3 – Scheme of interaction of natural engineering systems “Natural Environment – Object of Activity – Population” within the spatial boundaries of river basin geosystems (author V. L. Bondarenko)

В общем случае необратимое изменение diS в пределах зон влияния ОД в пространственных пределах речных бассейновых геосистем связано с потоками dx в виде солнечной энергии, вещества dN (водного, твердого, ионного стока и т. п.) за время dt .

Изменение энтропии в рассматриваемой системе можно представить в виде выражения:

$$diS = F \cdot dx,$$

где F – обобщенная (термодинамическая) сила, которая выражается в виде функций переменных – температуры, концентрации, действующего напора и т. п., H .

В ПТС «ПС – ОД – Н» суммарные необратимые процессы выражаются как сумма всех изменений, вызванных потоками dx , определяются системными комплексными экологическими мониторинговыми исследованиями (СКЭМ) на стадии проведения процедуры ОВОС в периоды проектирования, строительства и эксплуатации ОД и могут быть представлены выражением:

$$diS = \sum F \cdot dx \geq 0 \text{ или } \frac{diS}{dt} = \sum \frac{dx}{dt} \cdot F \geq 0.$$

Состояние компонентов с входящими в них элементами в составе действующей ПТС «ПС – ОД – Н» определяется уровнем *энтропии* (S), выражаемым балансовым соотношением свободной ($E_{\text{свб}}$) и связанной ($E_{\text{свз}}$) частей *энергии* (см. рисунок 2). Функциональная эффективность ПТС «ПС – ОД – Н» определяется коэффициентом КПД (η), исходя из балансового соотношения (см. рисунок 2):

$$\eta = E_{\text{свб}} / E_{\text{пол}} \leq 1.$$

В пространственных пределах локальной речной бассейновой гео-системы, где формируются и используются водные ресурсы, в технологических процессах на оросительных системах происходит преобразование форм *энергии* к базовым видам *энергии*:

- солнечная *энергия*, поступающая из космоса;
- кинетическая и потенциальная *энергия* водного потока, которая формируется на водосборной территории речной гидрографической сети при отсутствии водного стока и при наличии регулирующих гидротехнических сооружений (водохранилищ, водозаборов и т. п.);
- кинетическая *энергия* водного потока в процессах транспортирования взвешенных и донных наносов в речной сети, водотранспортирующих каналах;
- потенциальная *энергия* водного потока в водотранспортирующих каналах и на внутрисистемных регулирующих сооружениях.

Энтропия на действующих ПТС «ПС – ОД – Н» проявляется на всех стадиях создания и эксплуатации системы:

- инженерно-экологические изыскания, где принимаются предварительные решения об использовании водных ресурсов на оросительных системах;
- проектирование ОД в составе создаваемой ПТС «ПС – ОД – Н». На этой стадии выполняется процедура ОВОС, в процессе которой определяется допустимый уровень производимой *энтропии*.

Выводы. На основе результатов исследований системной взаимосвязи понятий *энергия* и *энтропия* в классе ПТС «ПС – ОД – Н» разработаны основы энерго-энтропийной методологии использования водных ресурсов в технологических процессах хозяйственной и иной деятельности, что позволяет объективно отражать преобразование форм *энергии* в процессах взаимосвязи, взаимодействия и взаимоотношения между природным (ПС), техногенным (ОД) и социальным (население) компонентами с входящими в них элементами.

1 Использование водных ресурсов неотъемлемо взаимосвязано как с преобразованием форм *энергии* и *вещества*, поступающих в пространственные пределы речной бассейновой геосистемы извне, так и с выводом из системы во внешнюю среду потоков низкокачественной части *энергии* ($E_{\text{свз}}$) и в итоге превращением в стабильную форму *энергии* – тепло.

2 Снижение темпов роста *энтропии* в ПТС «ПС – ОД – Н» оценивается в сравнении с фоновым состоянием пространственных пределов речной бассейновой геосистемы, должно определяться на стадии инженерно-экологических изысканий для строительства намечаемого ОД.

3 Создание ПТС «ПС – ОД – Н» в пределах речной бассейновой геосистемы приводит к определенной упорядоченности между структурными образованиями в природном компоненте и в определенной мере в социальном компоненте путем управления естественными процессами формирования водного стока (поверхностного, подземного) на водосборной территории, руслоформирующими процессами, защитой от наводнений и подтоплений населенных пунктов, процессами жизнедеятельности речной ихтиофауны, трансформации солнечной *энергии* в водохранилищах, что не противоречит второму закону термодинамики.

Список источников

1. Научно-методические основы использования водных ресурсов в южных регионах России: территории бассейновых геосистем: монография / В. Л. Бондаренко, В. А. Во-

лосухин, А. И. Блясов, Е. А. Семенова, М. И. Штавдакер; под общ. ред. В. Н. Азарова; Новочеркас. инж.-мелиоратив. ин-т им. А. К. Кортунова ФГБОУ ВО Донской ГАУ. Новочеркасск, 2021. 348 с.

2. Румянцев И. С., Кромер Р. Использование методов инженерной биологии в практике гидротехнического и природоохранного строительства / под ред. И. С. Румянцева. М.: Изд-во МГУЦ, 2003. 259 с.

3. Масютенко Н. П. Трансформация органического вещества в черноземных почвах ЦЧР и системы его воспроизводства: науч. изд. М.: Россельхозакадемия, 2012. 150 с. EDN: TMAMYH.

4. Дейвис Г. Р. Энергия для планеты Земля // В мире науки. 1990. № 11. С. 7–16.

5. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. М.: Мир, 1990. 425 с.

6. Россия: речные бассейны / под ред. А. М. Черняева; РосНИИВХ. Екатеринбург: Агроэкология, 1999. 356 с.

7. Entropy weight ensemble framework for yield prediction of winter wheat under different water stress treatments using unmanned aerial vehicle-based multispectral and thermal data / S. Fei, M. A. Hassan, Y. Ma, M. Shu, Q. Cheng, Z. Li, Z. Chen, Y. Xiao // *Frontiers in Plant Science*. 2021. Vol. 12. 730181. DOI: 10.3389/fpls.2021.730181.

8. К вопросу об использовании понятия «энтропия» в агролесомелиорации / К. Н. Кулик, В. В. Бородычев, Ю. И. Васильев, С. Н. Крючков // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. 2019. № 4(56). С. 42–47. DOI: 10.32786/2071-9485-2019-04-4. EDN: SVANJA.

9. Использование универсальной энтропийной модели для оценки экологического состояния территорий сельских поселений / И. И. Косинова, И. М. Игнатенко, О. В. Базарский, А. А. Курышев, В. А. Бударина // *Региональные геосистемы*. 2022. Т. 46, № 4. С. 574–584. DOI: 10.52575/2712-7443-2022-46-4-574-584. EDN: QXKLQS.

10. Nuppenau E. A. Contribution of peri-urban land use and agriculture to entropy and food of mega-cities: On sustainability, planning by control theory and recycling of organics // *PLOS One*. 2023. Vol. 18, № 8. e0290747. DOI: 10.1371/journal.pone.0290747. EDN: OUPZWS.

References

1. Bondarenko V.L., Volosukhin V.A., Ylyasov A.I., Semenova E.A., Shtavdaker M.I., 2021. *Nauchno-metodicheskie osnovy ispol'zovaniya vodnykh resursov v yuzhnykh regionakh Rossii: territorii basseynovykh geosistem: monografiya* [Scientific and Methodological Basis for the Use of Water Resources in the Southern Regions of Russia: Territories of Basin Geosystems: monograph]. Novochoerkassk Engineering and Land Reclamation Institute of the Don State Agrarian University, Novochoerkassk, 348 p. (In Russian).

2. Rumyantsev I.S., Kromer R., 2003. *Ispol'zovanie metodov inzhenernoy biologii v praktike gidrotekhnicheskogo i prirodookhrannogo stroitel'stva* [The Use of Engineering Biology Methods in the Practice of Hydrotechnical and Environmental Construction]. Moscow, MGUTS Publ., 259 p. (In Russian).

3. Masyutenko N.P., 2012. *Transformatsiya organicheskogo veshchestva v chernozemnykh pochvakh TSCHR i sistemy yego vosproizvodstva: nauch. izdanie* [Transformation of Organic Matter in Chernozem Soils of Central Chernozem Region and Systems of Its Reproduction: scientific ed.]. Moscow, Rosselkhozakademiya Publ., 150 p., EDN: TMAMYH. (In Russian).

4. Davis G.R., 1990. *Energiya dlya planety Zemlya* [Energy for Planet Earth]. *V mire nauki* [In the World of Science], no. 11, pp. 7-16. (In Russian).

5. Nikolis G., Prigozhin I., 1990. *Poznanie slozhnogo* [Complex Cognition]. Moscow, Mir Publ., 425 p. (In Russian).

6. Chernyaev A.M. (ed.), 1999. *Rossiya: rechnye basseyny* [Russia: River Basins]. RosNIIVH, Ekaterinburg, Agroecology Publ., 356 p. (In Russian).

7. Fei S., Hassan M.A., Ma Y., Shu M., Cheng Q., Li Z., Chen Z., Xiao Y., 2021. Entropy weight ensemble framework for yield prediction of winter wheat under different water stress treatments using unmanned aerial vehicle-based multispectral and thermal data. *Frontiers in Plant Science*, vol. 12, 730181, DOI: 10.3389/fpls.2021.730181.

8. Kulik K.N., Borodychev V.V., Vasilyev Yu.I., Kryuchkov S.N., 2019. *K voprosu ob ispol'zovanii ponyatiya "entropiya" v agrolesomeliorsii* [To the question of using the term "entropy" in the agroforestry reclamation]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovniye* [Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education], no. 4(56), pp. 42-47, DOI: 10.32786/2071-9485-2019-04-4, EDN: SVANJA. (In Russian).

9. Kosinova I.I., Ignatenko I.M., Bazarsky O.V., Kuryshv A.A., Budarina V.A., 2022. *Ispol'zovanie universal'noy entropiynoy modeli dlya otsenki ekologicheskogo sostoyaniya territoriy sel'skikh poseleniy* [Use of a universal entropy model to assess the ecological state of the rural settlements territories]. *Regionalnye geosistemy* [Regional Geosystems], vol. 46, no. 4, pp. 574-584, DOI: 10.52575/2712-7443-2022-46-4-574-584, EDN: QXKLQS. (In Russian).

10. Nuppenau E.A., 2023. Contribution of peri-urban land use and agriculture to entropy and food of mega-cities: On sustainability, planning by control theory and recycling of organics. *PLOS One*, vol. 18, no. 8, e0290747, DOI: 10.1371/journal.pone.0290747, EDN: OUPZWS.

Информация об авторах

В. Л. Бондаренко – профессор кафедры техносферной безопасности и природообустройства, доктор технических наук, профессор, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт Донского государственного аграрного университета, Новочеркасск, Российская Федерация, nimi.TBiP@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-2345-5943;

А. И. Блясов – доктор технических наук, профессор, филиал Westport Trading Europe Limited (WTL) (США) в Азии, Москва, Российская Федерация, allaberdi_il@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-7865-5697;

Е. Д. Хецуриани – профессор, доктор технических наук, доцент, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова, Новочеркасск, Российская Федерация; профессор, доктор технических наук, доцент, Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация, goodga@mail.ru;

М. И. Штавакер – аспирант кафедры техносферной безопасности и природообустройства, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт Донского государственного аграрного университета, Новочеркасск, Российская Федерация, shtawkader.marya@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-6345-7222;

М. С. Хохрин – магистр кафедры водного хозяйства, инженерных сетей и защиты окружающей среды, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова, Новочеркасск, Российская Федерация, макс.khokhrin@mail.ru.

Information about the authors

V. L. Bondarenko – Professor of the Department of Technosphere Safety and Environmental Management, Doctor of Technical Sciences, Professor, NovoCherkassk Engineering and Land Reclamation Institute – branch of the Don State Agrarian University, NovoCherkassk, Russian Federation, nimi.TBiP@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-2345-5943;

A. I. Blyasov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Westport Trading Europe Limited (WTL) Branch (USA) in Asia, Moscow, Russian Federation, allaberdi_il@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-7865-5697;

E. D. Khetsuriani – Professor, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, M. I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), NovoCherkassk, Russian Federation; Profes-

sor, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation, goodga@mail.ru;

M. I. Shtavdaker – Postgraduate Student of the Department of Technosphere Safety and Environmental Management, Novochoerkassk Engineering and Land Reclamation Institute – branch of the Don State Agrarian University, Novochoerkassk, Russian Federation, shtawkader.marya@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-6345-7222;

M. S. Khokhrin – Master of the Department of Water Management, Network Engineering and Environmental Protection, M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novochoerkassk, Russian Federation, maks.khokhrin@mail.ru.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.*

*Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 19.02.2024; одобрена после рецензирования 01.04.2024;
принята к публикации 23.04.2024.
The article was submitted 19.02.2024; approved after reviewing 01.04.2024; accepted for
publication 23.04.2024.*