

# ЭМЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД (НА ПРИМЕРЕ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ с. КАРГАСОК ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ)

О.С. Полякова<sup>1\*</sup>, С.Ю. Семенов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт биологии и биофизики и

<sup>2</sup> Биологический институт Томского государственного университета, г. Томск, Россия

\* Эл. почта: oksanochka84@list.ru

Статья поступила в редакцию 19.01.2022; принята к печати 25.04.2022

Оценка эффективности создания и функционирования производственных и биоинженерных систем необходима для планирования хозяйственной жизни, так как позволяет осознать целесообразность возводимого объекта уже на этапе проектирования и минимизировать ресурсные издержки при его эксплуатации. В настоящее время такую оценку делают по стоимостным и энергетическим показателям, которые не отражают реальное воздействие объекта на природу. Эмергетический анализ как отрасль энергетического анализа позволяет учесть воздействие объекта на природную среду. В настоящей работе с использованием эмергетических индексов оценены три системы обработки сточных вод в с. Кargasок Томской области: традиционные канализационные сооружения интенсивной очистки и две очереди их дополнения фитокартой первой и затем второй. По результатам анализа, минимальную нагрузку на окружающую среду оказывает законченный комплекс биоинженерных сооружений, а максимальное воздействие исходит от интенсивной части очистки. Кроме общепринятых эмергетических индексов в работе использован параметр «эмергетическая экологическая эффективность» (EEE – *emergy ecological efficiency*). Он характеризует снижение нагрузки на биосферу за счет строительства очистных сооружений. Первая очередь реконструкции обеспечила положительный эффект в +41,2%, а вторая – только +3%. Рассмотрены и гипотетические варианты обработки стоков. Например, наиболее радикальный способ дистилляция дает экологический эффект –286%. Горячее водоснабжение населения поселка дает экологический эффект +58,5%.

*Ключевые слова:* эмергетический анализ, канализационные очистные сооружения, сточные воды, экологическая эффективность.

## EMERGY ANALYSIS OF BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT SYSTEMS EXEMPLIFIED WITH TREATMENT FACILITIES IN KARGASOK VILLAGE (TOMSK REGION OF THE RUSSIAN FEDERATION)

O.S. Polyakova<sup>1\*</sup>, S.Yu. Semyonov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Research Institute of Biology and Biophysics and <sup>2</sup> Biological Institute, Tomsk State University, Tomsk (Russia)

\*E-mail: oksanochka84@list.ru

Evaluation of the efficiency of construction and functioning of production and bioengineering facilities is necessary in economic planning as it allows to assess the expedience of a project at the planning stage and to minimize its operation costs. Currently, such evaluations are based primarily on costs and energy expenditures, which do not reflect the environmental impacts. The emergetic analysis, which is a branch of energy analysis, provides for assessing such impacts. In the present work this analysis was applied to three wastewater treatment systems in the village Kargasok of Tomsk Region (the Russian Federation): the conventional intensive treatment plant and two stages of its supplementation with constructed wetlands. The analysis suggests that the completed complex of treatment facilities has the minimum impact on the environment, whereas the maximum impact is produced by the initial intensive treatment facility. In addition to the traditional emergetic indices (EYR, ELR and ESI), the parameter EEE (*emergy ecological efficiency*) was used. This parameter was introduced because wastewater is a highly valuable resource. This is currently not generally recognized by society (wastewater is mostly neutralized, not disposed of), and thus is not considered in developing of wastewater treatment technologies. EEE characterizes the extent of a decrease in load on the biosphere due to the development of a treatment facility. The first wetland plot constructed positive for a beneficial effect of +41.2%, which was increased by only 3% due to the second plot. Some hypothetical options for wastewater treatment were also considered. For example, the most radical method of wastewater treatment is their distillation, which produces an adverse environmental effect of – 286%. The best option for wastewater management seems to provide hot water supply to residential premises, which makes a beneficial environmental effect amounting to 58.5%.

*Keywords:* emergy analysis, sewage treatment facilities, wastewater, environmental efficiency.

## Введение

Канализационные очистные сооружения (КОС) предназначены для защиты окружающей среды от загрязнения сточными водами [2]. Экологическую эффективность работы КОС в настоящее время оценивают по степени достижения нормативов допустимого сброса загрязняющих веществ и микроорганизмов со сточными водами в приемный водный объект [1]<sup>1</sup>. Такой подход не учитывает, что очистные сооружения, выполняя обработку стоков, являются в то же время прямыми или косвенными источниками других отходов, выбросов и сбросов загрязняющих веществ в окружающую среду, а также потребителями возобновляемых и не возобновляемых природных ресурсов [4]. Следовательно, для адекватной оценки экологической эффективности очистных сооружений необходимо учитывать не только качество очищенной воды, но и ущерб, наносимый природе созданием и функционированием КОС. Такое положение все более отчетливо понимается экологами [6, 14–16].

Наиболее остро проблема экологической эффективности стоит в отношении традиционных КОС для малолетних источников – малых населенных пунктов, небольших предприятий сферы обслуживания, пищевой промышленности и др. В сравнении с аналогичными системами для обработки сточных вод крупных населенных пунктов они требуют значительно больших удельных капитальных и эксплуатационных затрат [9, 15]. Кроме этого, в подавляющем большинстве случаев такие объекты не обеспечивают качества очищенных стоков, требуемого законодательством и нормативными документами Российской Федерации. Перспективным направлением поисков способов решения указанных проблем является новая область исследований и практики – экологическая инженерия, включающая в себя, в частности, конструирование природно-антропогенных экосистем для очистки сточных вод (constructed wetlands) [8] и инструмент для анализа проектируемых и реализованных решений – эмергетический анализ (emergy accounting) [11].

Термин «эмергия» был введен в конце 1990-х в употребление Говардом Одумом (H. Odum) для обозначения баланса всех использованных и произведенных при получении конкретного результата или продукта видов энергии, приведенных к единой размерности [10–12]. В отечественной практике такой подход, рассмотренный авторами в обзоре [4], для анализа природоохраненных объектов практически никогда не использовался.

В настоящей статье представлены результаты эмергетического анализа трех системы обработки сточных вод: 1) традиционные КОС; 2) очистные сооружения, дополненные фитокартой первой (ФК1); 3) очистные

сооружения с фитокартой первой (ФК1) и фитокартой второй (ФК2). ФК1 представляет собой мелководный пруд с высшей водной растительностью (ВВР). ФК2 выполнена в виде ботанической площадки (слоя щебня глубиной 30 см с высаженной на нем ВВР).

В Российской Федерации эмергетический анализ канализационных очистных сооружений сделан впервые.

## Материалы и методики исследования

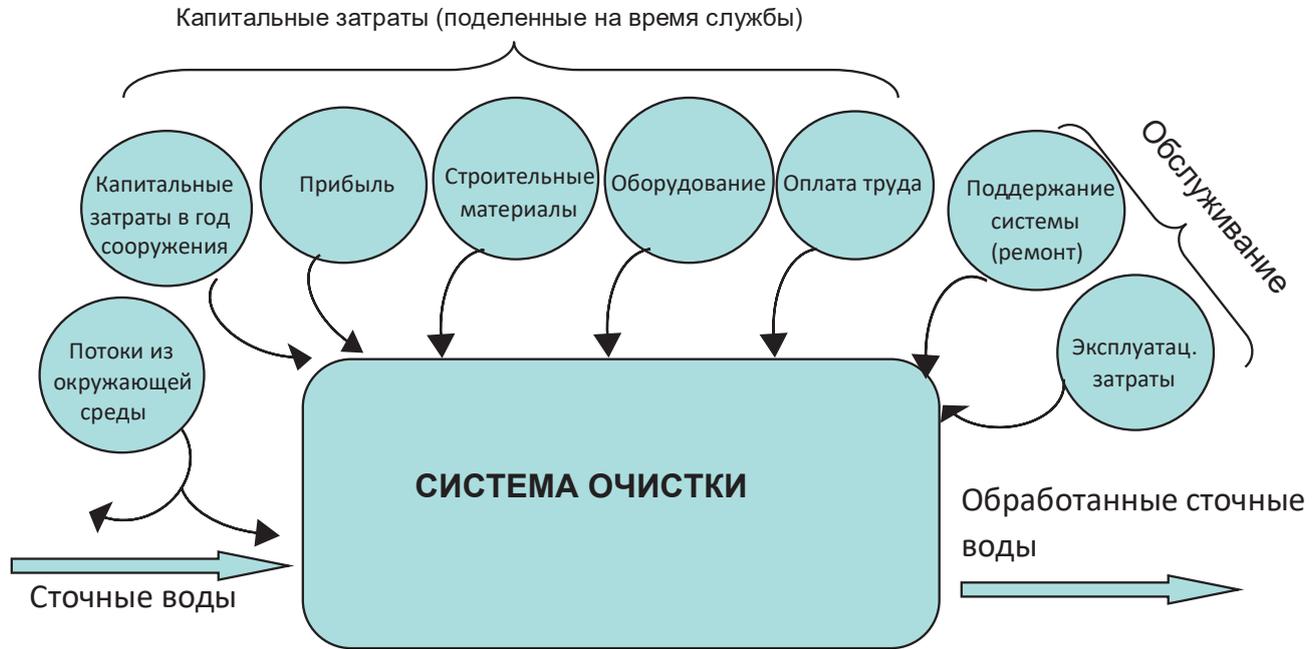
Исследованы канализационные очистные сооружения в с. Каргасок на севере Томской области (среднегодовая температура  $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Население поселка составляют 7896 человек (2012 год)<sup>2</sup>. В 2005 году была осуществлена первая очередь реконструкции очистных сооружений с устройством фитокарты первой (ФК1) и иловой площадкой первой; в 2011 году биоинженерное сооружение было дополнено фитокартой второй (ФК2) и иловой площадкой второй. Оценка функционирования была проведена для трех систем: 1) традиционные очистные сооружения (интенсивная часть очистки), 2) интенсивная часть + ФК1 и 3) полный комплекс очистки, включающий в себя интенсивную часть очистки, ФК1 и ФК2. Для оценки этих систем биологической очистки сточных вод использован эмергетический анализ.

Процедура эмергетического анализа начинается с определения потоков (природных, материальных, финансовых), поступающих в систему, преобразующихся в ней и исходящих из системы [14]. Все это отражается в энергетической системной диаграмме, которая дает общее представление о системе (рис. 1). По сути, такая схема является реализацией диаграммы Исикавы (графическое отображение причинно-следственных связей в системе и их последствия) [15]. После составления энергетической диаграммы вычисляются натуральные величины потоков, поступающих в систему.

При составлении диаграммы для интенсивной части очистки учитывались потоки из окружающей среды, амортизационные отчисления, эксплуатационные затраты, а также эмергия сточных вод, поступающих на обработку, и эмергия обработанной сточной воды. На канализационных очистных сооружениях отсутствовала проектная документация, поэтому эмергоемкость строительных материалов рассчитывалась путем проведения замера геометрических параметров объектов. Параметры оборудования вычислялись на основании инвентаризационных актов, а оплата труда – это 30% всей зарплаты, электричества и поддержания системы.

<sup>1</sup> Федеральный закон от 10 января 2002 года № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды».

<sup>2</sup> Реестр административно-территориальных единиц и поселений Томской области. URL: <http://www.http://tomsk.gov.ru/> (дата обращения: 31.10.2018).



**Рис. 1.** Диаграмма Исикавы для энергетических потоков очистных сооружений. Вклад капитальных затрат на сооружение существующих традиционных очистных сооружений не учитывается

Для примера можно привести расчет некоторых натуральных величин, поступающих на канализационные очистные сооружения с. Каргасок. Площадь аэротенков, вторичных отстойников, воздуходувки и операторской на интенсивной части очистки составляет 2024 м<sup>2</sup>. По данным СНиП 23-01-99 величина ежегодного солнечного излучения для анализируемой территории в расчете на 1 м<sup>2</sup> равна  $5,3E + 09$  Дж, и, соответственно, инсоляция на интересующей территории есть произведение двух рассмотренных величин и составляет  $10,7E + 12$  Дж. При определении энергии ветра использовалась формула, в которой присутствуют плотность воздуха, скорость ветра, коэффициент рассеивания и высота пограничного слоя. Результующим значением описываемой формулы выступает величина  $45$  Кал/м<sup>2</sup>/год, для преобразования которой в Дж использовался коэффициент перевода  $4186$  Дж/Ккал. После этого искомое значение энергии ветра в расчете на 1 м<sup>2</sup> стало равным  $1,8E + 05$  Дж/м<sup>2</sup>/год, а для анализируемой площади ( $2024$  м<sup>2</sup>) –  $3,64E + 08$  Дж. Следующим представляющим интерес потоком из окружающей среды является дождь. При этом отдельно идут расчеты по определению геопотенциала дождя, химического потенциала дождя и кинетического воздействия дождя. Формула, по которой вычисляется геопотенциальная энергия дождя, была предложена П. Кангасом в 2002 году [7]. В соответствии с принятой формулой необходимо знать мас-

су ливня/год, силу тяжести и высоту падения. Таким образом геопотенциальная энергия дождя составляет  $1,15$  Кал/м<sup>2</sup>/год. Коэффициент перевода калорий в джоули идентичен используемому при определении энергии ветра. После произведенного перевода геопотенциал дождя равен  $4,81E + 03$  Дж/м<sup>2</sup>/год. Это произведение справедливо для 1 м<sup>2</sup> площади, а в анализируемой ситуации это значение увеличивается до  $9,74E + 06$  Дж/год. Формула для расчета химического потенциала дождя, также предложенная П. Кангасом [7], представляет собой произведение газовой постоянной, абсолютной температуры, водосодержание дождя, водосодержание полученной воды, массы осадков за год. В результате проведенного расчета химический потенциал дождя составил  $1,32$  Кал/м<sup>2</sup>/год, чему соответствует  $5,53E + 03$  Дж/м<sup>2</sup>/год. В расчете на занимаемую системой площадь получается  $1,12E + 07$  Дж/год. При определении кинетического воздействия дождя необходимо знать массу дождя/год и скорость дождевых капель и перемножить значения этих показателей. В размерности «калории» вычисленный показатель составляет  $3,4$  Кал/м<sup>2</sup>/год, а в Джоулях –  $1,42E + 04$  Дж/м<sup>2</sup>/год. Совокупная энергия кинетического воздействия дождя с учетом площади, занимаемой системой, равна  $2,87E + 07$  Дж/год. Представленный выше расчет натуральных величин, поступающих в систему потоков, – это только часть всех расчетов, необходимых для полноценного анализа.

Эмергетическая таблица для потоков из внешней среды на интенсивную часть очистки

Показатель	Количество в год	Солнечная трансформированность (сэДж/единица измерения)	Солнечная эмергия (сэДж)
Солнечная радиация	10,7E + 12 Дж	1 [7, 11]*	10,7E + 12
Ветер	3,64E + 08 Дж	1496 [7, 11]	5,45E + 11
Геопотенциал дождя	9,74E + 06 Дж	10488 [7, 11]	1,02E + 11
Химический потенциал дождя	1,12E + 07 Дж	18199 [7]	2,04E + 11
Кинетическое воздействие дождя	2,87E + 07 Дж	238000 [7, 10]	6,83E + 12

\* Примечание: в квадратных скобках указаны литературные источники.

После вычисления всех потоков, поступающих в каждую из трех анализируемых систем, были составлены эмергетические таблицы для каждой системы, что является вторым этапом эмергетического анализа [3]. В таблицы вносятся данные по натуральным величинам потоков и величины трансформированности для каждого потока [7, 10, 11], а эмергией потока является произведение натуральной величины потока и трансформированности. Иллюстративная табл. 1 представляет собой только часть одной из трех полных эмергетических таблиц, представленных в приложении<sup>3</sup>. В Российской Федерации эмергетический анализ применяется для оценки функционирования действующих или проектируемых объектов не так широко, как в Западной Европе, Китае, США. Информация для доработки инструментария данного анализа (трансформированности) с учетом региональной специфики (геохимические процессы в почве, величина солнечного излучения) полностью отсутствует. Поэтому в работе используются показатели трансформированности, рассчитанные Г. Одумом [10–12] для мира в целом, а представленные в табл. 1 величины эмергии считаются справедливыми для всей территории нашей страны. Корректировка величин трансформированности для России является работой на будущее.

### Результаты и обсуждение

Результаты расчетов процентных вкладов разных потоков в общий эмергетический баланс даны в табл. 2.

В связи с тем, что при функционировании системы «интенсивная часть очистки + ФК1» были отключены воздухоудовки, снижение совокупной эмергии входящих потоков более чем в три раза в первую очередь сказалось на эмергии эксплуатационных затрат, которая сократилась более чем в два раза в сравнении с предыдущей системой. Это перераспределение

эмергетических потоков в системе произошло таким образом, что увеличилась доля капитальных затрат. Соответственно, наибольшее количество эмергии приходится на строительные материалы (увеличение больше чем в три раза). Потоки, поступающие из окружающей среды, возросли на порядок.

Строительство ФК2 привело к тому, что эмергетический вклад обслуживания стал наименьшим при сравнении всех трех рассматриваемых систем, но вклад капитальных затрат остался наибольшим. Это соответствует тому, что при строительстве ФК2 использовались эмергоемкие материалы (щебень гравийный, минеральная часть грунта). Таким образом, несмотря на желание приблизиться к созданию природных экосистем, построенное сооружение является техногенным объектом, и для снижения эмергетической доли строительных материалов необходимо заменить их на биологические аналоги, например щебень заменить на дерн или на корневую систему мискантуса.

Анализ полных эмергетических таблиц (см. сноску 3) для трех систем обработки сточных вод приводит к следующим заключениям.

Максимально эмергосодержащим потоком является электроэнергия, что приводит к значительным эмергетическим затратам на обслуживание канализационных очистных сооружений (интенсивной части очистки) в целом. Следующим по рангу выступает эмергетический поток от строительных материалов. Минимальная доля эмергии приходится на потоки из окружающей среды. Следует заметить, что если вычислять необходимую эмергию на обслуживание на основании только выплачиваемых населением тарифов, а не опираться на материальные потоки, то такой расчет покажет величину, в три раза меньшую существующего потока. Таким образом, канализационные очистные сооружения являются весьма дотационными, на что указывает разница между эмергией, заключенной в материальных потоках, и эмергией, оцененной финансово. Необходимо подчеркнуть, что все натуральные величины потоков, поступающих

<sup>3</sup> Полные таблицы доступны как вложение к файлу pdf электронной версии статьи на сайте журнала «Биосфера»: <http://21bs.ru>.

## Вклады энергетических потоков в общий энергетический баланс очистных сооружений

Энергетические потоки	Доля в энергетическом балансе (%)		
	Интенсивная часть очистки	Интенсивная часть очистки + ФК1	Интенсивная часть очистки + ФК1 + ФК2
Потоки из среды	0,003	0,02	0,01
Капитальные затраты/время службы	17,03	58,34	86,04
<i>Капитальные затраты в год создания</i>	–	2,41 (2005 г.)	68,10 (2011 г.)
<i>Прибыль</i>	2,09	6,88	2,21
<i>Стройматериалы</i>	11,44	37,58	12,05
<i>Оборудование</i>	0,01	0,02	0,01
<i>Оплата труда</i>	3,49	11,45	3,67
Обслуживание	80,71	41,6	13,34
<i>Поддержание системы (ремонт)</i>	0,68	2,25	0,72
<i>Эксплуатационные затраты</i>	80,03	39,35	12,62

на интенсивную часть очистки, нами вычислены именно так, как это предполагает полный энергетический анализ (по каждому поступающему в систему потоку).

На основании вычисленных энергий поступающих потоков можно рассчитать основные энергетические индексы (табл. 3): коэффициент энергетического выхода (EYR – energy yield ratio), коэффициент нагрузки на окружающую среду (ELR – environmental loading ratio) и индекс энергетической устойчивости или обеспеченности (ESI – energy sustainability index) [3, 11].

EYR – это отношение суммы энергий возобновляемых (R), невозобновляемых (N) и закупленных (F) ресурсов к энергии приобретенных ресурсов. Оно характеризует энергетическую целесообразность создания и функционирования рассматриваемой системы в конкретных условиях. Система, имеющая более высокие значения EYR, является экономически предпочтительной.

ELR определяется как отношение суммы невозобновляемой и закупленной энергии к возобновляемой энергии. Оно характеризует степень использования невозобновляемых ресурсов в технологии (системе). Предпочтительными являются более низкие значения индекса.

ESI, равный частному от деления EYR на ELR, определяет степень жизнеспособности объекта.

В целом три рассмотренных параметра дают наиболее общую, «эскизную» характеристику производственного объекта и являются, как отмечено выше, более объективными показателями в сравнении с такими стоимостными параметрами, как рентабельность, общая ресурсоемкость и степень независимости от платных ресурсов (рынка) [3].

Анализ полученных значений индексов позволяет заключить, что минимальную нагрузку на окружа-

ющую среду оказывает система «интенсивная часть очистки + ФК1», строительство ФК2 не привело к дальнейшему снижению нагрузки на окружающую среду, как предполагалось. Максимальная нагрузка на природные экосистемы создается интенсивной частью очистки. Устойчивость системы противоположна понятию нагрузки, и, соответственно, наивысшей устойчивостью обладает система «интенсивная очистка + ФК1». Индекс энергетического выхода у всех трех систем – единица или чуть выше, что свидетельствует об их конкурентоспособности (рентабельности).

Кроме традиционных энергетических индексов, был вычислен параметр «энергетическая экологическая эффективность» (energy ecological efficiency, EEE) [3]<sup>4</sup>. Для типовых канализационных очистных сооружений он является отрицательным (–43,6%), что указывает на возрастание экологической нагрузки как на локальном, так и на биосферном уровнях от их строительства и функционирования. Реконструкция канализационных очистных сооружений (ввод в эксплуатацию первой очереди ФК1) позволила снизить нагрузку на окружающую среду на 84,8%, обеспечив положительный экологический эффект существования КОС в размере 41,2%. Строительство ФК2 увеличило экологический эффект в сравнении с созданием ФК1 незначительно (на 3%). Такой низкий эффект обусловлен нарушением проектных рекомендаций при строительстве, что не позволило обеспечить теплоизоляцию и аэрацию корневой зоны выс-

<sup>4</sup> Полные процедуры вычисления индекса для разных условий описаны во вложении в файл pdf статьи, доступный на сайте журнала «Биосфера».

Эмергетические индексы для трех систем очистки

Индекс	Интенсивная часть очистки	Интенсивная часть + ФК1	Интенсивная часть + ФК1 + ФК2
ELR	3,24E + 04	4,55E + 03	7,3E + 03
EYR	1,02	1	1
ESI	3,14E-05	2,19E-04	1,37E-04

шей водной растительности в морозный период и на ФК1, и на ФК2 с соответствующей эффективностью очистки.

Кроме того, при помощи параметра ЕЕЕ были оценены гипотетические (возможные) мероприятия по обработке сточных вод. Так, при дистилляции сточных вод электричеством параметр «эмергетической экологической эффективности» составляет –286%, что подтверждает абсолютную недопустимость использования такого метода обращения со стоками с эгоцентрических позиций. При подогреве стоков от 7 до 15 °С (электричеством) на входе в очистные сооружения индекс имеет уже положительное значение в 31,86%. При дистилляции стоков газом величина индекса ЕЕЕ не уходит в «минус», но значение его минимально – это всего 7%, а при подогреве (газом) значение индекса возрастает в 7 раз (52%). Из рассмотренных вариантов обеззараживания сточных вод наилучший результат дает наличие горячего водоснабжения в домах, так как температура сточных вод, поступающих на очистку, является наиболее важным фактором, влияющим на протекание биохимических реакций, что, в целом, сказывается на эффективности обработки стоков. При таком способе обработки сточных вод индекс ЕЕЕ составляет более 58%.

### Заключение

Представленное здесь исследование является первой работой в России по оценке природоохранного объекта (КОС) с использованием эмергетического анализа. Этот опыт может быть распространен и на другие природоохранные объекты, что позволит оценивать нагрузку на окружающую среду с эгоцентрических позиций. При этом необходимо заметить, что в работе выполнены все этапы анализа, и это делает ее уникальной и в своем роде единственной в нашей стране. Эмергетический анализ численно подтвердил то, что эмпирически знают специалисты, а именно – что исключительно техногенный объект (КОС) наносит больше вреда окружающей среде, чем биоинженерное сооружение. Так, максимальную нагрузку на природу оказывает интенсивная часть очистки, а минимальную – система, включающая в себя канализационные очистные сооружения и ФК1. Эмергетический анализ позволил численно доказать, что строительство ФК2 не приводит к дальнейшему снижению

нагрузки на природу, хотя изначально на это был сделан расчет. Такой результат получился, потому что при строительстве ФК2 были использованы эмергетические материалы, такие как щебень. Таким образом, по результатам эмергетического анализа оптимально остановиться на функционировании системы «интенсивная часть очистки + ФК1». Рассчитанный нами параметр ЕЕЕ «эмергетическая экологическая эффективность» коррелирует с таким выводом. Так, величина ЕЕЕ минимальна для интенсивной части очистки, а она максимальна для законченной системы. При этом разница между системой, включающей в себя ФК1, и системой с ФК 1 + ФК2 незначительна, всего 3%, а это значит, что нужно находить баланс между затратами и прибылью, а в нашем случае прибыль – это уменьшение ущерба природе. Поэтому целесообразно остановиться на системе «интенсивная часть очистки и ФК1».

Кроме этого, показалось интересным рассмотреть другие возможные варианты обработки стоков, начиная от самых экстремальных (дистилляция) до социально значимых (горячее водоснабжение в домах). При дистилляции сточных вод индекс ЕЕЕ за счет использования большого количества электричества оказывается на порядок ниже, чем при обработке стоков на традиционных канализационных очистных сооружениях, что показывает несостоятельность такого метода обработки стоков. Наилучший численный результат дает горячее водоснабжение в домах, повышающее температуру стоков и, соответственно, интенсивность реакций, происходящих при обработке стоков. Результат оказывается даже на 10% лучше, чем при работе системы с ФК1. Таким образом, улучшение качества жизни людей сочетается с природосберегательными технологиями.

**Благодарности.** Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (**проект № FSWM-2020-0019**). Авторы выражают искреннюю благодарность коллективу лаборатории экологии, генетики и охраны окружающей среды НИИ биологии и биофизики Томского государственного университета за помощь в написании статьи, за конструктивную критику и ценные советы.

## Литература

### Список русскоязычной литературы

1. Барышникова НВ, Павлова МА, Моисеева РИ, Макаревич ЕВ. Биологическая очистка сточных вод на канализационных очистных сооружениях Мурманской области. Успехи современного естествознания. 2011;(8):21-2.
2. Воронов ЮВ, Яковлев СВ. Водоотведение и очистка сточных вод. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов; 2006.
3. Полякова ОС, Семенов СЮ. Энергетический анализ и опыт его использования для оценки антропогенных и природных систем. Принципы экологии. 2021;(2):4-20.
4. Чижов СГ. Как изменилась очистка сточных вод в России за последние 10 лет? Россия в окружающем мире. 2008;(11):97-119.

### Общий список литературы/Reference List

1. Baryshnikova NV, Pavlova MA, Moiseeva RI, Makarevich YeV. [Biological wastewater treatment at sewage treatment plants in Murmansk region]. Uspekhi Sovremennogo Yestestvoznaniya. 2011;(8):21-22. (In Russ.)
2. Voronov YuV, Yakovlev SV. Vodootvedeniye i Ochistka Stochnykh Vod. [Water Disposal and Wastewater Treatment]. Moscow: Izdatelstvo As-sotsiatsii Stroitelnykh Vuzov; 2006. (In Russ.)
3. Polyakova OS, Semenov SYu. [Emergy analysis and experience of its use for assessing anthropogenic and natural systems]. Printsity Ekologii. 2021;(2): 4-20. (In Russ.)
4. Chizhov S. G. [How has wastewater treatment changed in Russia over the past 10 years?] Rossiya v Okruzhayuschem Mire. 2008;(11):97-119. (In Russ.)
5. Buranakarn V. Evaluation of recycling and re-use of building materials using the emergy analysis method. Dissertation. University of Florida, Gainesville, 1998.
6. Chen B, Chen ZM, Zhou Y, Zhou JB, Chen GQ. Emergy as embodied energy-based assessment for local sustainability of a constructed wetland in Beijing. Commun Nonlinear Sci Numer Simulat. 2009;14:622-35.
7. Kangas PC. Folio # 5: Emergy of Landforms. Handbook of Emergy Evaluation: A Compendium of Data for Emergy Computation Issued in a Series of Folios. Gainesville, FL: Center for Environmental Policy, University of Florida; 2002.
8. Mitsch W, Gosselink J, Anderson C, Zhang L Wetland Ecosystems. New-York: Wiley, 2009.
9. Nelson M, Odum HT, Brown MT, Alling A. "Living off the land": Resource efficiency of wetland wastewater treatment. Adv Space Res. 2001;27:1547-56.
10. Odum HT. Emergy evaluation. In: International Workshop on Advances in Energy Studies: Energy Flows in Ecology and Economy. Porto Venere, Italy; 1998.
11. Odum HT. Environmental Accounting, Emergy, and Environmental Decision Making. NY: Wiley; 1996.
12. Odum HT. Environment, Power and Society. NY: John Wiley; 1971.
13. Polyakova OS, Semenov SY. Emergy analysis of wastewater treatment technology. In: Eur Proc Soc Behav Sci. Tomsk; 2017. P. 784-71.
14. Vassallo P, Paoli C. Emergy required for the complete treatment of municipal wastewater. Ecol Engineering. 2009;35:687-94.
15. Ishikawa K. What is Total Quality Control? The Japanese Way. London, Prentice Hall, 1985.
16. Zhou JB, Jiang MM, Chen B, Chen GQ. Emergy evaluations for constructed wetland and conventional wastewater treatments. Commun Nonlinear Sci Numer Simulat. 2009;14:1781-9.