

ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНИВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА БАЗЕ ТЕОРИИ ПРИРОДНОГО КАПИТАЛА

Статюха Г.А., д.т.н., профессор,

Джигирей И.Н., к.т.н.,

Комаристая Б.Н.

Национальный технический университет Украины «КПИ»

Розглянуто питання стійкості технологічних систем у вигляді циклів природних ресурсів. Запропоновано математичний апарат розрахунку коефіцієнта стійкого ресурсоспоживання на основі аналізу життєвого циклу. Наведено оцінювання стійкості ресурсних циклів на прикладі водоочисних систем.

The problem of sustainability of technological systems as natural resources cycles is considered. Mathematical apparatus of calculation of the sustainable resource consumption coefficient is proposed on the basis of life cycle assessment. Estimation of resource cycle sustainability illustrated by examples of water treatment systems is shown.

Введение. Ряд последних работ в направлении усовершенствования методологии измерения устойчивого развития раскрывают многообещающие возможности применения здесь теории природного капитала. Последнюю связывают с книгой П. Хокена, Э. Ловинса, Х. Ловинса [3]. Ключевым элементом теории является идея, что экономика сдвигается от упора на человеческую продуктивность к радикальному увеличению ресурсной продуктивности. Этот сдвиг мог бы обеспечить более значимую оплату семейного труда, лучшие мировые стандарты жизни для тех, кто в этом нуждается и существенное снижение воздействия человека на окружающую среду.

В теории *природного капитала* выделяют три основных вида капитала: *запасы возобновляемых и невозобновляемых ресурсов, земля и*

экосистемы. Каждый из них вносит разный вклад в развитие человека и испытывает разное воздействие деятельности человека.

Для оценки связей переменных природного капитала – переменных запаса, потоков и состояния – следует представить, как они связаны. Одно из наиболее глубоких исследований в этом направлении принадлежит Д.И. Люри, развившему идею ресурсных циклов [4]. Под ними здесь понимаются квазизамкнутые круговороты используемых человеком материалов по типу "ресурс-отход-ресурс". В результате добычи и последующей переработки в продукт все ресурсы рано или поздно превращаются в отходы, которые полностью или частично восстанавливаются обратно в ресурсы посредством природных или антропогенных механизмов (рис. 1).

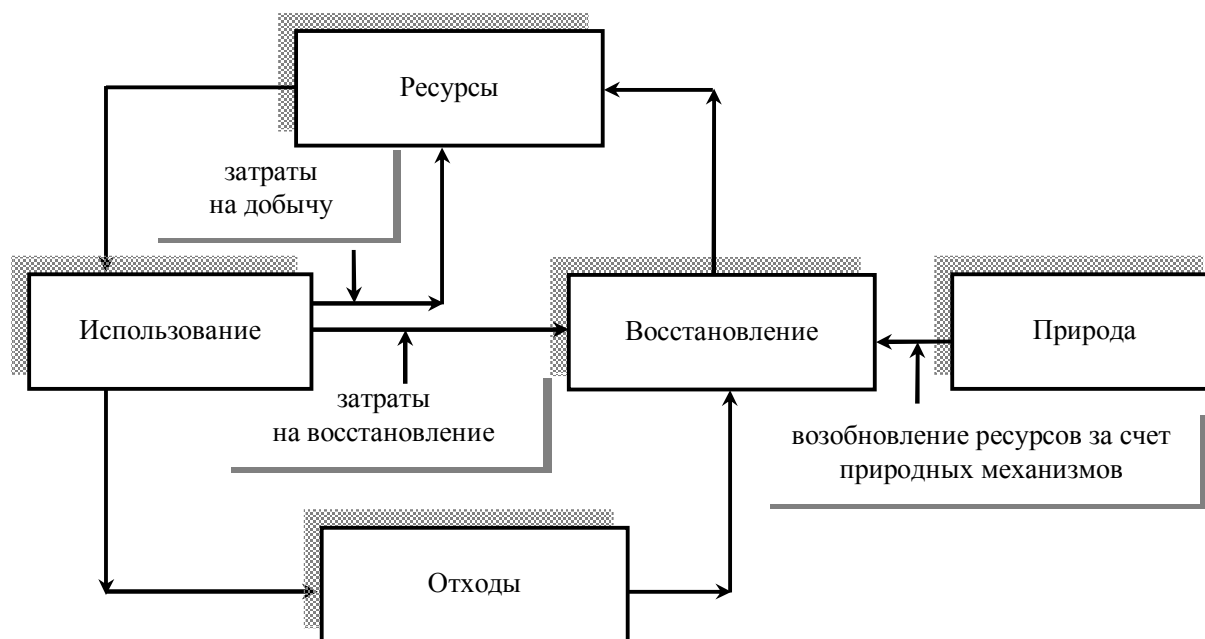


Рис. 1. Взаимодействие общества и природы в процессе ресурсопользования при технологиях типа «природа - мать» (A + B – возобновление ресурсов осуществляется только за счет природных механизмов), «природа – соратник» (A + B + B – возобновление ресурсов идет как за счет естественных, так и за счет антропогенных механизмов)

Д.И. Люри рассматривает два реальных способа взаимодействия природы и общества, закономерно сменяющие друг друга по мере повышения материальных потребностей цивилизации (см. рис. 1), и один гипотетический, когда возобновление ресурсов идет полностью за счет общества, т.е. оно обеспечивает все ресурсные циклы.

Рассмотрение процессов в обществе в виде циклов «потребление – восстановление» ресурсов природы открывает перед нами перспективу построения приближённой, но идеологически выдержанной модели «круговорота» компонентов природных ресурсов в некоей подсистеме и возможность построения индекса устойчивости технологических систем, с помощью которого можно управлять процессом устойчивого развития производством.

Цель данной работы: продемонстрировать возможности предложенной в работе [5] оценки устойчивых ресурсных циклов технологических систем применительно к системам очистки бытовых сточных вод.

Оценка ресурсных циклов технологических систем с помощью коэффициента устойчивого ресурсопотребления. Баланс потоков системы на первом этапе удобнее всего оценить с помощью единой метрики – экономической (затраты в денежном эквиваленте).

Анализируя рис. 1 и пояснения к нему и пользуясь предложениями работы [5], можно построить коэффициент устойчивого ресурсопотребления η , который будет характеризовать способность системы восстанавливать использованные у нее ресурсы, а также компенсировать взятые ранее ресурсы:

$$h = \frac{\sum_i Q_{испол,i}}{\sum_j Q_{восст,j}}, \quad (1)$$

где $Q_{испол,i}$ – затраты на использование сырья (добыча, транспорт и т.п.), на изготовление и использование продукта (производство продукта, доставка потребителю и т.д.); $Q_{восст,j}$ – затраты на переработку отходов, на утилизацию продукта, на технологию природной очистки, на исправление ранее нанесенного природе ущерба.

Несложно отметить, что при рассчитанной оценке $\eta > 1$ система, с точки зрения сохранения её потенциала, будет неустойчивой: потребление природных ресурсов происходит интенсивнее, чем их восстановление. При $\eta = 1$ – система находится на границе устойчивости; при $\eta < 1$ – система устойчива: восстановление ресурсов природы идёт опережающим темпом.

Очевидно, что все технологические решения должны быть таковы, чтобы добиваться значения $\eta \leq 1$, как за счет снижения затрат ресурсов и совершенствования технологий производства продуктов, так и за счет увеличения затрат на восстановление и пополнение ресурсов.

Анализ жизненного цикла. Расчет значения коэффициента устойчивого ресурсосбережения удобно проводить на основе оценки жизненного цикла (ОЖЦ) продукционной системы. А именно, путем построения жизненного цикла (ЖЦ) продукта, с учетом возобновления ресурсов, в том числе, и за счет антропогенных механизмов, и детального анализа управления запасами ЖЦ или инвентаризационного анализа, который является вторым этапом ОЖЦ согласно ИСО 14040 «Управление окружающей средой. Оценка жизненного цикла. Принципы и структура» (рис. 2).

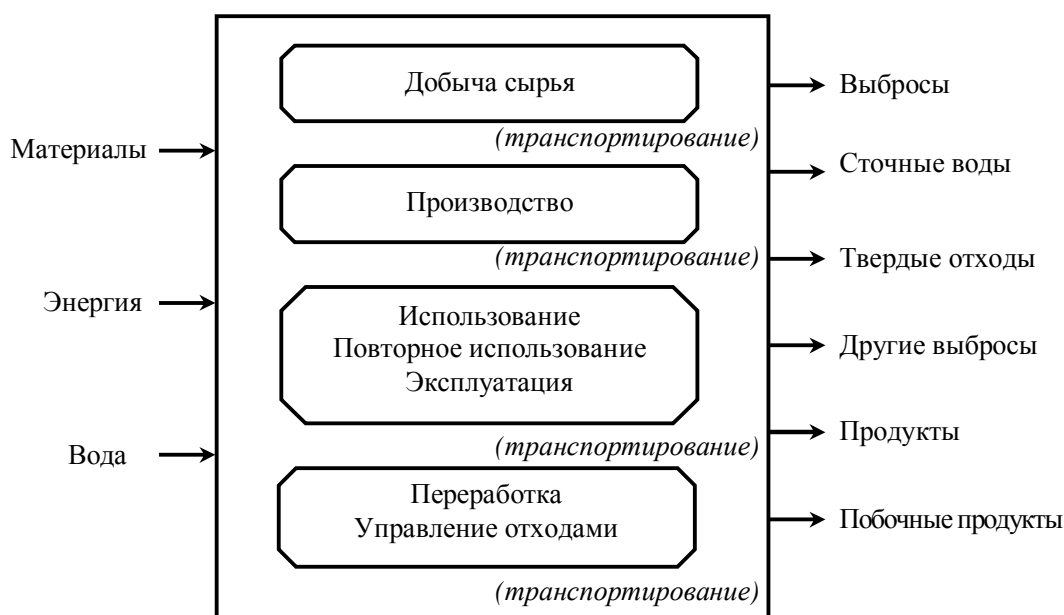


Рис. 2. Анализ управления запасами жизненного цикла

Инвентаризационный анализ включает в себя процедуры сбора и расчета данных с целью количественного определения соответствующих входных и выходных потоков данных производственной системы. Процесс инвентаризационного анализа является итерационным. По мере сбора данных и изучения системы могут быть установлены новые требования к ней или новые ограничения, что потребует изменения в процедурах сбора данных для достижения цели исследования. Использование инвентаризационного анализа, наряду с получением полного жизненного цикла продукта с учетом исправления нанесенного ранее ущерба, позволяет получить коэффициент устойчивого ресурсосбережения, характеризующий данную систему.

Расчет коэффициента устойчивого ресурсопотребления для различных водоочистных систем. Для подтверждения работоспособности предложенной оценки эффективности различных систем ресурсосбережения на базе предложенного выше коэффициента устойчивого ресурсопотребления (1), был взят пример (скорее гипотетический, но хорошо оснащенный фактическим материалом) из работы [7].

В этой работе рассматривались две схемы очистки «серой» воды, т.е. малозагрязненных бытовых сточных вод, например, после душевой, посудомоечных и стиральных машин. Первая схема (назовем ее искусственной) состоит из установки механико-химической обработки сточных вод, использующей хлорид железа для осаждения вредных примесей в воде.

Вторая схема, назовем ее естественной, включает заболоченную территорию, которая служит естественным биологическим и механическим фильтром (рис. 3). Очевидно, что, пройдя фильтрацию, вода очищается и попадает в определенные слои подземных вод, откуда может вновь использоваться для бытовых нужд. Предварительно сточные воды обрабатываются в септик-тэнке, а образовавшийся отстой транспортируют для дальнейшей очистки, после чего очищенный шлам направляется на сельскохозяйственные земли.

Общие положения.

Жилая зона имеет 50 зданий с тремя людьми в каждом доме.

Водопотребление – 160 л·чел./день.

Расстояние до сети городской канализации – 500 м.

Естественная система очистки (см. рис. 3).

Септик-тэнки очищают каждые 5 лет.

Площадь искусственного болота составляет 15 м² на дом.

Септик-тэнк имеет объем 3.5 м³ на два здания.

Расстояние транспортировки отстоя от домов до очистной станции – 20 км.

Расстояние транспортировки отстоя от станции очистки до сельскохозяйственных угодий – 50 км.

Одно искусственное болото приходится на два дома.

Вода поступает из скважин.

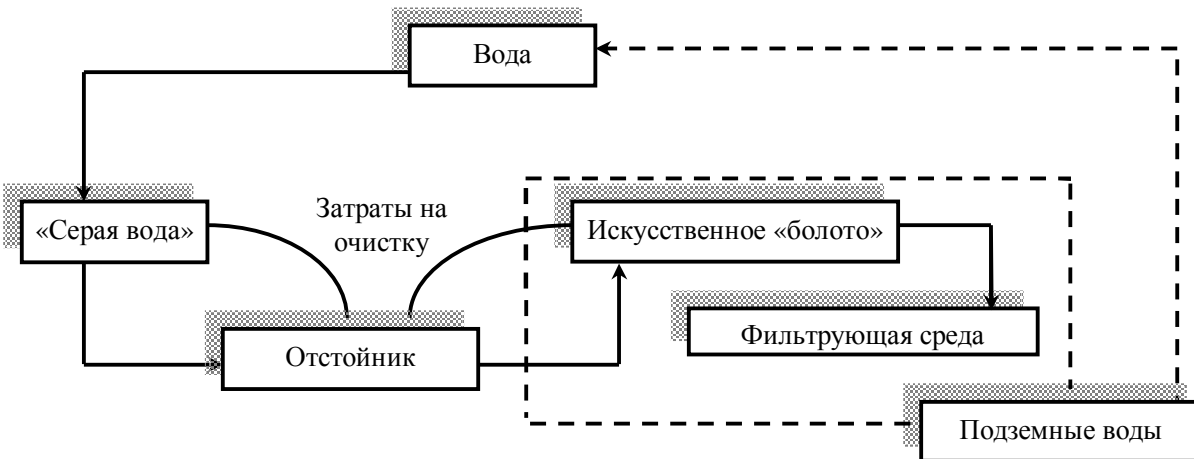


Рис. 3. Естественная схема очистки малозагрязненных бытовых сточных вод

Искусственная система очистки (рис. 4).

Для каждого дома необходимо 21 м труб для магистрального канализационного коллектора и 15 м соединительных труб.

Утечки из труб питьевой воды составляют 100 л/(чел·день).

Магистральный канал эквивалентен 3,75 м³/м вырытого материала и соединительные

каналы – 2,16 м³/м.

Потери сточной воды составляют 5 %.

Коэффициент удаления соединений фосфора системой очистки сточных вод – 95 %.

Воспользуемся частью данных по материальным потокам, представленным в статье [7] – табл. 1.

Расчет альтернатив.

$$h = \frac{Q_R + Q_M}{Q_{WT} + Q_{DM} + Q_{NT} + Q_{AN}}, \quad (2)$$

где Q_R – затраты на использование сырья (добыча, транспортировка и т.д.); Q_M – затраты на изготовление и использование продукта (производство продукта, доставка потребителю и т.д.);

Q_{WT} – затраты на переработку отходов; Q_{DM} – затраты на утилизацию продукта; Q_{NT} – затраты на технологию природной очистки; Q_{AN} – затраты на исправление ранее нанесенного природе ущерба (возобновление ресурсов за счет антропогенных механизмов).

Таблица 1

Характеристики систем канализации

Параметр	Искусственная альтернатива	Естественная альтернатива
<i>Использование источников</i>		
Электричество, кВт/(чел.·год)	24.5	63.7
Дизельное топливо, л/(чел.·год)	0.87	0.13
Фосфор, неиспользуемый на сельхозугодьях, % общего количества	9.8	1.8
Использование хлорида железа на водоочистой станции, кг/(чел.·год)	30	0
Использование полимера на водоочистой станции, кг/(чел.·год)	0.05	0
Территория занятая под очистные сооружения, м ² /чел.	0.3	6

Расчет затрат на подготовку и подведение к объекту воды для обеих схем одинаков (данные из табл. 2):

$$Q_R + Q_M = 58.4 \cdot 1.48 + (500 \cdot 22.98) / (10 \cdot 150) = 94 \text{ грн}/(\text{чел.} \cdot \text{год})$$

Искусственная система очистки (табл. 2, 3).

$$Q_{WT} + Q_{DM} + Q_{NT} + Q_{AN} = 0.87 \cdot 5 + 0.55 + 30 \cdot 312 + 0.05 \cdot 60 + 0.24 \cdot 24.5 = 9373 \text{ грн}/(\text{чел.} \cdot \text{год})$$

Таблица 2

Расчетные параметры систем канализации

Параметр	Значение
Водопотребление, м ³ /(чел.·год)	58,4
Цена воды, грн/м ³	1,48
Расстояние до сети городской канализации, м	500
Трубопроводы, грн/м	22.98
Амортизация, лет	10
Количество жильцов, чел.	150

Рассчитываем затраты на восстановления ресурсов по искусственной схеме (см. рис. 4).

Значение коэффициента ресурсопотребления для искусственной системы: $\eta = 94/9373 = 0.01$.

Естественная система очистки (табл. 2, 3).

Рассчитываем затраты на восстановления ресурсов по естественной схеме (см. рис. 3).

$$Q_{WT} + Q_{DM} + Q_{NT} + Q_{AN} = 0.55 + 0.13 \cdot 5 + 63.7 \cdot 0.24 = 16.4 \text{ грн}/(\text{чел.} \cdot \text{год})$$

Таблица 3

Дополнительные данные для расчета искусственной схемы очистки сточных вод

Параметр	Значение
Топливо (бензин), грн/л	5
Расход хлорида железа, кг/(чел.·год)	30
Хлорид железа, грн/кг	312
Расход полимера, кг/(чел.·год)	0.05
Полимер, грн/кг	60

Значение коэффициента ресурсопотребления для естественной системы:

$$\eta = 94/16.4 = 5.7.$$

Обсуждение. Итак, были получены два различных коэффициента устойчивого ресурсопотребления: $\eta_{иск} = 0.01$ и $\eta_{ест} = 5.7$. Ранее постулировалось, что при $\eta < 1$ мы имеем право утверждать, что предложенная искусственная технология системы очистки является превосходной (много средств затрачено на восстановление ресурса), а схема естественная – не очень хороша ($\eta > 1$). Хотя очевидно, что с прагматической точки зрения схема на рис. 3 много выгоднее, поскольку характеризуется меньшими затратами. На самом деле проблема в том, что классический экономический подход не учитывает «стоимость» вклада природы в очистку выбросов: этот подарок природы мы принимаем как должное, сегодня еще не заботясь о степени нанесенного природе ущерба (здесь – земле).

Возможно, отношение $\eta_{ест}/\eta_{иск} = 600$ будет более полно характеризовать вклад природы в дело очистки. Кстати, при формировании этого отношения устраняется неопределенность в затратах на приготовление бытовой воды, затратах на эксплуатацию и т.п. (табл. 4).

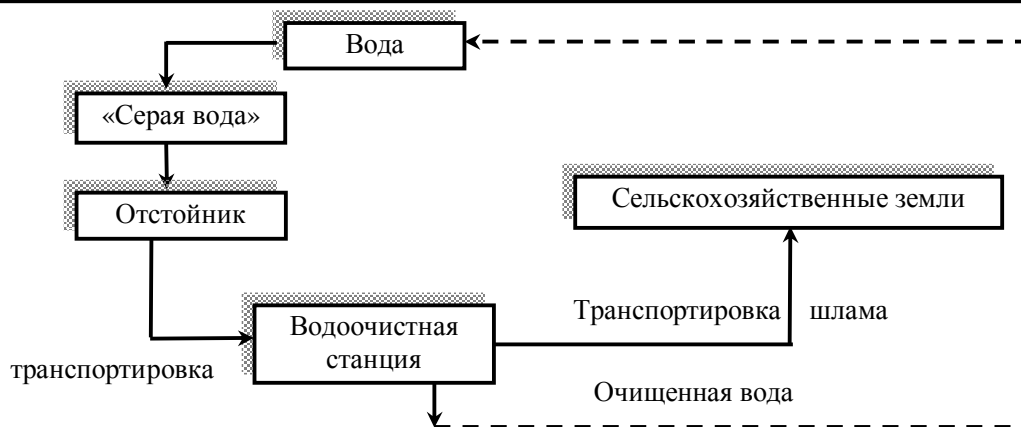


Рис. 4. Искусственная схема очистки малозагрязненных бытовых сточных вод

Таблица 4

Учет затрат на очистку сточных вод

Учтено	Неучтено
Стоимость трубопроводов	Фосфор (выбросы в водные объекты)
Стоимость транспортировки (бензин)	Оплата площади, занимаемой очистными сооружениями
Стоимость электричества	Влияние использования хлорида железа, полимера на окружающую среду
Стоимость хлорида железа	Потери воды
Стоимость подготовки воды (озонирование)	Затраты на эксплуатацию трубопроводной сети и очистных сооружений, в т.ч. зарплата
Стоимость использования полимера при очистке сточных вод	Оплата площади занимаемой рукотворными болотами
Стоимость подготовки воды (стоимость воды как ресурса)	Затраты на отстаивание и фильтрацию

Заключение. Если предположить, что наше предложение использовать коэффициент устойчивого ресурсопотребления η для управления устойчивым развитием технологических схем является логичным и непротиворечивым, то естественно возникает вопрос, как мы можем его рассчитывать для предприятия? Ответ одновременно и прост и сложен. Во-первых, следует организовать глубокий мониторинг производства (включая социальные, экономические показатели), окружающей среды (показатели состояния воздуха, воды, земли) и мониторинг состояния ресурсов (запасы и темп их расходования), а также мониторинг состояния экосистем, участвующих в очистке выбросов и восстановлении природных ресурсов. Простота ответа в том, что мы знаем *что* делать. Сложность же в том, что мы часто не знаем, *как* это делать. В частности, как оценить самовосстанавливающиеся возможности экосистем. Но даже без этой, еще не до конца изученной науки области, реализация мониторинга по четырём группам индикаторов экономической, социальной, экологической и природной – представляет сложную методологическую, организационную и, наконец, финансовую проблему. Особую сложность представляет измерение

природных показателей. Несмотря на то, что часть из них физически существует (например, запасы природных ресурсов оцениваются даже по рыночным ценам), природные показатели, тем не менее, рассеяны по различным ведомствам и бывают труднодоступны. Другие, например запасы отдельных экосистем, измеряются в узких кругах специалистов, измеряются редко и неточно, а к таким показателям природного капитала как, например «получение эстетического удовольствия от природы» вряд ли кто-нибудь знает, как подступиться. И тем не менее, мы надеемся, что предложенный подход открывает новые перспективы в оценке устойчивого развития производств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Згуровский М.З., Панкратова Н.Д. Системный анализ: проблемы, методология, приложения. – К.: Наукова думка. – 2005. – 743 с.
2. Згуровский М.З., Статюха Г.А. Роль инженерной науки и практики в устойчивом развитии общества // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2007. – № 1. – С.19 - 38.
3. Хокен П., Ловинс Э., Ловинс Х. Естественный капитализм. Грядущая промышленная революция. – М., 2003.
4. Люри Д.И. Развитие ресурсопользования и экологические кризисы. – М.: Дельта, 1997. – 238 с.
5. Згуровский М.З., Статюха Г.А. Системный подход к оценке и управлению устойчивым развитием общества // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2007. – №3. – С. 7–27.
6. Edwin K.L. Tam. Challenges in using environmental indicators for measuring sustainability practice // J. Environmental Eng. Sci. – 2002. – №1. – P. 417–425.
7. Lindholm O. et al. Comparison of methods for calculation of sustainability indices for alternative sewerage systems – theoretical and practical considerations // Ecological indicators. – 2007. – №7. – P. 71–78.

Статюха Г.О., д.т.н., профессор, завідувач кафедри кібернетики хіміко-технологічних процесів Національного технічного університету України «КПІ».

Джигирей І.М., к.т.н., асистент кафедри кібернетики хіміко-технологічних процесів Національного технічного університету України «КПІ».

Комариста Б.М., аспірант кафедри кібернетики хіміко-технологічних процесів Національного технічного університету України «КПІ».