

Сравнение вариантов использования осадков очистных сооружений канализации на основе анализа жизненного цикла

Марцуль В.Н., заведующий кафедрой
промышленной экологии

Белорусский государственный технологический
университет

ВОДНАЯ ГАРМОНИЯ ЕВРАЗИЯ II

Гармонизация обучения и педагогических подходов высшего образования в водной сфере

Постановка проблемы

- Экономический рост сопровождается пропорциональным, а иногда и опережающим ростом количества отходов. Темпы роста объемов использования большинства отходов значительно ниже темпов их образования.
- Решение проблемы отходов является приоритетным направлением деятельности в области ресурсосбережения и охраны окружающей среды.
- Попытки ее решения без детального эколого-экономического анализа возможных вариантов обращения с отходами часто приводит к принятию решений, последствия реализации которых негативно сказываются на окружающей среде.

Постановка проблемы

Не всегда выбор наилучшего варианта обращения с отходами очевиден, так как используемые методики оценки эколого-экономической эффективности природоохранных мероприятий далеки от совершенства.

Общепризнанной методологией, позволяющей провести комплексный анализ продукции и производственных процессов, использования ресурсов с учетом экологических последствий является анализ жизненного цикла (Life cycle Analysis – LCA).

Оценка жизненного цикла

- Идея комплексного анализа жизненного цикла продукции впервые была реализована для решения практических задач, связанных с охраной окружающей среды, в конце 60-х годов прошлого столетия. Особенностью такого анализа была ориентация на количественную оценку воздействий на окружающую среду, связанных как с потреблением всех видов ресурсов, так и с эмиссией загрязняющих веществ

Оценка жизненного цикла

Общепризнанной методологией, позволяющей провести комплексный анализ продукции и производственных процессов, использования ресурсов с учетом экологических последствий является анализ жизненного цикла (Life cycle Analysis – LCA).

Методология АЖЦ и методики выполнения отдельных ее этапов активно развивалась и в 90-е годы 20 столетия сформировались как перспективное направление научных исследований и практической деятельности в области охраны окружающей среды.

Оценка жизненного цикла

- В настоящее время активно разрабатываются методики АЖЦ, дополненные экономической оценкой входных и выходных потоков для исследуемой системы (Economic Input-Output Life Cycle Analysis – EIO-LCA).
- Метод использует информацию о межпроизводственных и межотраслевых материальных потоках для оценки общего объема выбросов, сбросов и отходов по всей цепочке поставок (базируется на EN ISO 14051:2011 **Управление окружающей средой. Учет стоимости материальных потоков. Общая структура**)

Оценка жизненного цикла

- Основные результаты исследований по методологии, методикам и практике применения АЖЦ представляются в журналах с высоким импакт фактором:
- [The International Journal of Life Cycle Assessment](#)
- [Journal of Industrial Ecology](#)
- [Journal of Cleaner Production](#)
- [Integrated Environmental Assessment and Management](#)
- [Progress in Industrial Ecology](#)

- В конце 90-х годов прошлого столетия в составе стандартов ИСО серии 14000 были разработаны и введены в действие стандарты по анализу жизненного цикла (ISO 14040, ISO 14041, ISO 14042, ISO 14043 и др.), определяющие принципы и структуру LCA, основные этапы его проведения.

ISO 14040

- **ISO 14040** Управление окружающей средой. Оценка жизненного цикла. Принципы и структурная схема.
- Дает обзор практики применения и ограничения на применение ОЖЦ для широкого круга потенциальных пользователей и заинтересованных сторон.
- Структурная схема (основные этапы оценки жизненного цикла представлены ниже).

Структурная схема (основные этапы оценки жизненного цикла)

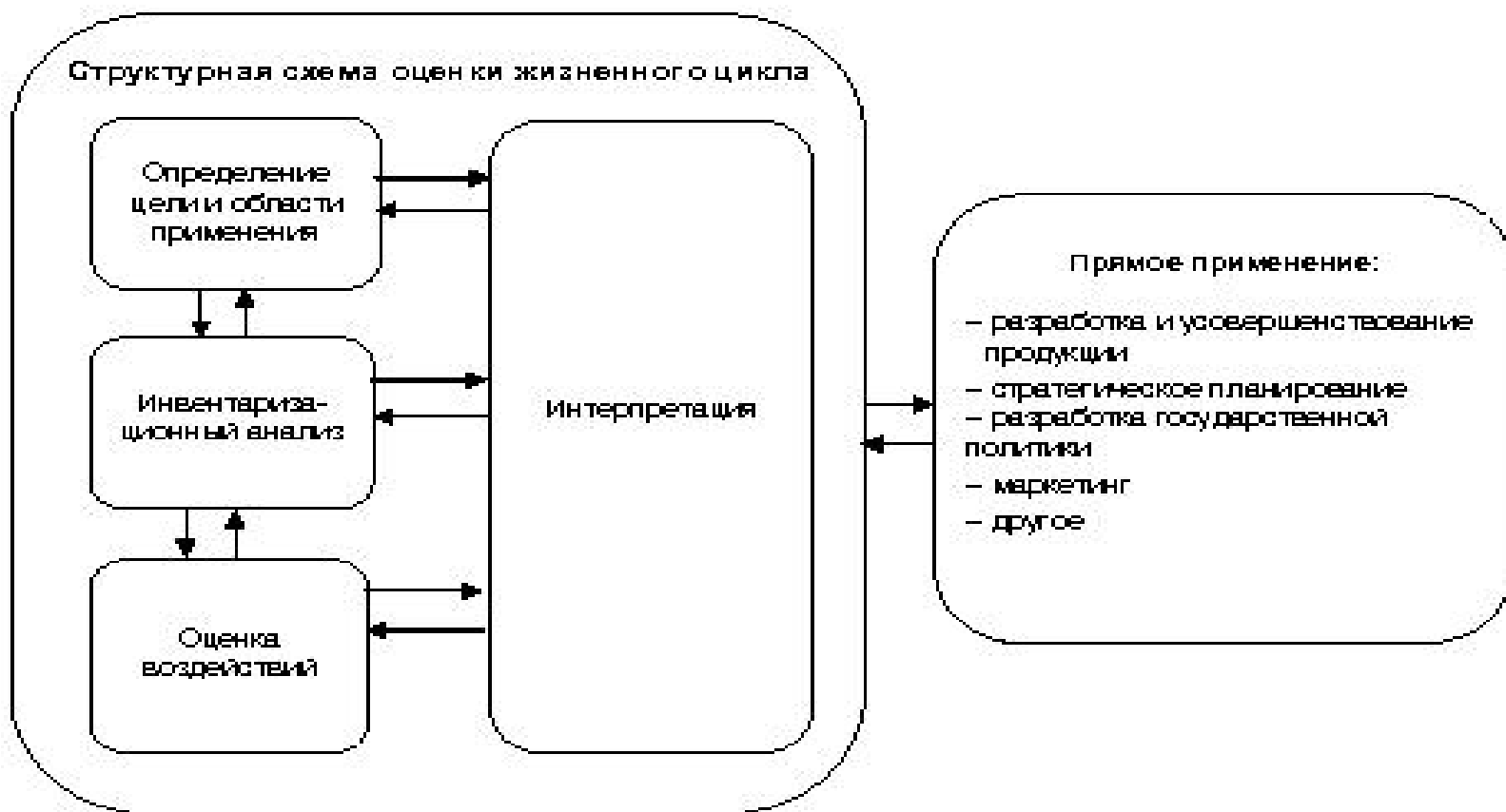


Рисунок 1 – Этапы ОЖЦ

Основные этапы ОЖЦ

- ОЖЦ включает:
- определение и области (границ) оценки жизненного цикла (ОЖЦ);
- сбор информации, инвентаризационный анализ жизненного цикла (ИАЖЦ) с количественной оценкой входных (ресурсы, энергия, энергоносители) и выходных (выбросы, сбросы, отходы) потоков для оцениваемого объекта (процесса) на всех этапах ЖЦ;
- оценку воздействия ЖЦ (ОВЖЦ);
- интерпретацию результатов оценки жизненного цикла.

ISO 14041

- **ISO 14041 Управление окружающей средой. Оценка жизненного цикла. Параметрический анализ жизненного цикла**
- Стандарт рассматривает две фазы АЖЦ – цель и область исследования, а также инвентаризационный анализ жизненного цикла (ИАЖЦ).
- Цель и область исследования устанавливаются, для чего выполняется АЖЦ и описывают систему и категории данных, подлежащие исследованию. ИАЖЦ включает сбор данных, необходимых для исследования, а также инвентаризацию входных и выходных потоков.
- Цель исследования может быть пересмотрена из-за появления непредвиденных обстоятельств и ограничений или в результате получения дополнительной информации.

СТБ ИСО/ТО 14049-2007

- **ISO/TO 14049-2007** - Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Применение ISO 14044 для инвентаризационного анализа жизненного цикла.
- Стандарт содержит примеры применения на практике инвентаризационного анализа жизненного цикла (ИАЖЦ), базирующегося на рекомендациях ИСО 14041.

ISO 14042

- **ISO 14042** Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Оценка воздействия жизненного цикла.
- Стандарт содержит описание и общую структуру фазы оценки воздействия жизненного цикла (ОВЖЦ) оценки жизненного цикла, особенности и соответствующие ограничения. Стандарт определяет требования к выполнению фазы ОВЖЦ и взаимосвязям между ОВЖЦ и другими фазами ОЖЦ.
- Цель ОВЖЦ состоит в оценке данных инвентаризационного анализа жизненного цикла продукционной системы для лучшего понимания их экологической значимости.

ISO 14042

- При создании моделей фазы ОВЖЦ выбираются экологические проблемы, называемые категориями воздействий, и используются показатели категорий для представления и объяснения результатов ИАЖЦ.
- Показатели категорий должны отражать агрегированные выбросы (сбросы) или использование ресурсов для каждой категории воздействия. Эти показатели категорий представляют собой потенциальные экологические воздействия.

ISO 14043

- **ISO 14043** Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Интерпретация жизненного цикла.
- Описывает заключительную фазу оценки жизненного цикла, процедуру, в которой результаты инвентаризационного анализа жизненного цикла и оценки воздействий (на протяжении) жизненного цикла, если таковая проводится, или обеих этих фаз вместе обобщаются и обсуждаются в качестве основы для заключений, рекомендаций и принятия решений в соответствии с целями и областью исследований.

ISO 14044

- **ISO 14044.** Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Требования и рекомендации
- Содержит рекомендации для подготовки и проведения критического обзора результатов инвентаризационного анализа жизненного цикла, результатов оценки воздействия, а также характера и качества собранных данных.

Оценка воздействия жизненного цикла

- Оценка воздействия ЖЦ, как стадия LCA, позволяет системно представить экологические и ресурсные проблемы одной или большего числа производственных систем.
- В процессе ОВЖЦ результат ИАЖЦ переводятся в категории воздействия.
- Для каждой категории воздействия выбирают показатель категории, и определяют его количественное значение.
- Совокупность значений показателей воздействия позволяет количественно охарактеризовать воздействие на окружающую среду, связанное с потреблением ресурсов, и выходными потоками производственной системы.

Оценка воздействия жизненного цикла

- Особенностью ОВЖЦ является то, что она предполагает использование так называемой функциональной единицы для сравнения различных продукционных систем, продукции.
- При оценке воздействия используются процедуры нормализации и взвешивания показателей воздействия

Оценка жизненного цикла- проблемы

- Несмотря на то, что методология LCA достаточно проста для понимания и выглядит логичной и обоснованной, ее практическое применение часто связано с рядом трудностей, в первую очередь касающихся недостатка или неприемлемого качества информации.
- Проблемы, связанные с практической реализацией методологии LCA, по-разному решаются в различных методиках. Все известные методики выполнения основных этапов LCA и интерпретации его результатов имеют ряд общих черт, но и по ряду существенных признаков различаются.
- Отличия касаются методик и моделей, которые используются для перевода результатов инвентаризации в показатели воздействия.
- Оценка жизненного цикла является хорошим инструментом для оценки экологических характеристик процессов и продукции, и широко используется в практике проектирования и создания новых видов продукции и услуг, однако весьма трудоемка и дорогостояща.

Impact Assessment Methods

ReCiPe

BEES

Eco-indicator 99

Eco-indicator 95

CML 92

CML 2 (2000)

EDIP/UMIP

EPS 2000

Ecopoints 97

Impact 2002+

TRACI

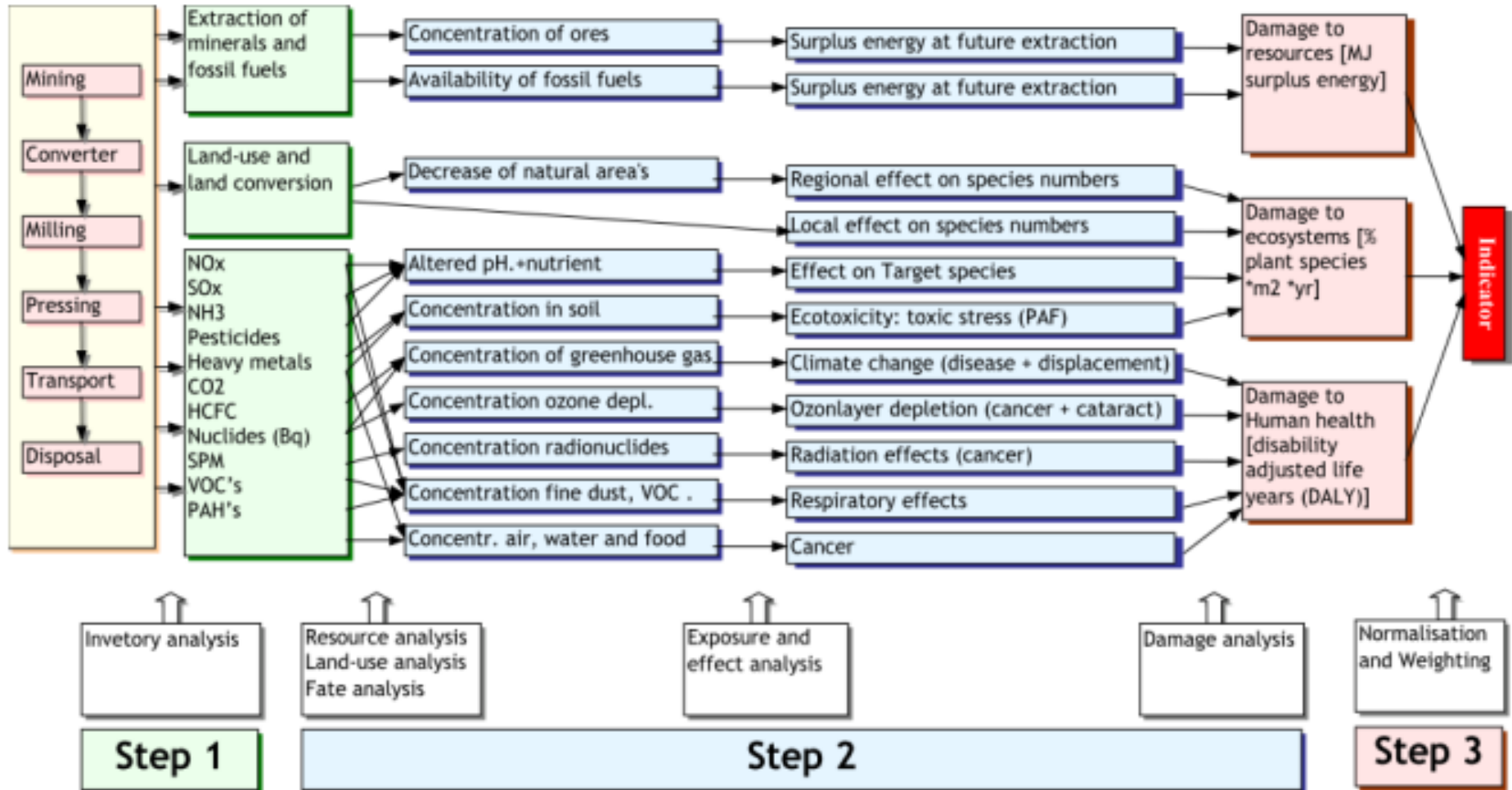
EPD method

Cumulative Energy Demand

IPCC Greenhouse gas emissions



Экоиндикатор 99



Экоиндикатор 99

- При оценке воздействия жизненного цикла учитывается девять основных процессов, причиняющих вред здоровью людей и ущерб экосистемам, причем каждому из этих процессов приписывается определенный весовой коэффициент

Экоиндикатор 99

Процессы	Весовые коэффициенты	Критерии выявления
Обеднение озонового слоя	100	Вероятность одной смерти в год на 10^6 жителей
Действие пестицидов	25	5%-я деградация экосистемы
Действие канцерогенных веществ	10	Вероятность одной смерти в год на 10^6 жителей
Повышение кислотности водных объектов	10	5%-я деградация экосистемы
Эвтрофикация	5	5%-я деградация экосистемы
Действие тяжелых металлов	5	Учитывается концентрация кадмия – основного экотоксиканта среди тяжелых металлов
Действие зимнего смога Действие летнего смога	5 2,5	Учет жалоб в период действия смога, особенно со стороны астматиков и пожилых людей
Парниковый эффект	2,5	Повышение температуры на $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ каждые 10 лет, 5%-я деградация экосистем

Экоиндикатор 99

Комплексный характер экоиндикаторов обусловлен тем, что они учитывают три компонента ущерба:

- - здоровье людей;
- - качество экосистем;
- - природные ресурсы.

Экоиндикатор 99

- Ущерб здоровью людей выражается так называемым приведенным количеством потерянных лет (DALYs – disability adjusted life years). Термин «приведенное количество» означает, что суммируются как потерянные годы жизни (YLL – years of life lost), так и годы прожитые в состоянии инвалидности (YLD – years lived disabled), и полученная сумма делится на число жителей Европы. показатели ущерба здоровью людей, наносимого основными воздействиями, рассчитанные на одного жителя Европы.

Значения комплексных экоиндикаторов, некоторых промышленных продуктов и процессов.

- производство металлов (на 1 кг):
- медь.....85 усл.ед.;
- алюминий.....18 усл.ед.;
- нержавеющая сталь.....17 усл.ед.;
- сталь.....4,1 усл.ед.;
- производство пластических материалов (на 1 кг):
- полиуретан.....14 усл.ед.;
- поликарбонат.....13 усл.ед.;
- полипропилен.....3,3 усл.ед.;
- производство бумаги (на 1 кг).....3,3 усл.ед.;
- производство стекла (на 1 кг).....2,1 усл.ед.;
- производство электроэнергии и тепла:
- электроэнергия низкого напряжения (на 1 кВт.ч).0,67 усл.ед.;
- электроэнергия высокого напряжения (на 1 кВт.ч).0,57 усл.ед.;
- тепловая энергия от сжигания нефти (на 1 МДж тепла)..0,15 усл.ед.;
- тепловая энергия от сжигания газа (на 1 МДж тепла)....0,063 усл.ед.;
- перевозка грузов (на 1 т км):
- грузовики 28 тонн.....0,34 усл.ед.;
- суда-контейнеровозы.....0,056 усл.ед.;
- товарные поезда.....0,043 усл.ед.

EDIP

- В настоящее время используется методика EDIP2003, которая отличается от первого варианта EDIP97 более глубоким анализом вторичных воздействий (больше причинно-следственных связей, более полные цепочки «причина-следствие»).
- Уточнены процедуры нормализации и взвешивания показателей воздействия, что позволяет легче интерпретировать воздействие с позиций ущерба окружающей среде.
- Для нормализации и взвешивания в EDIP2003 используются эквивалентные значения, рассчитанные на одного человека.

ECO-SCARCITY

- Методика Eco-scarcity (Швейцария) впервые опубликована в 1990 году.
- Метод Eco-scarcity (экологического дефицита) позволяет путем взвешивания и агрегирования различных показателей оценивать воздействие на окружающую среду.
- Метод предназначен для экологических оценок «стандартных» продуктов или процессов. Кроме того, он часто используется как элемент системы экологического менеджмента (СЭМ) компаний, для оценки экологических аспектов организации.

SOFT

- Для выполнения практических работ по LCA разработано программное обеспечение, которое обеспечивает выполнение необходимых расчетов с использованием моделей, управление базами данных.
- Среди наиболее известных программных продуктов, позволяющих анализировать все стадии жизненного цикла – SimaPro, EcoLab, GaBi, TEAM,, WWLCAW и др.

Распространённые программные пакеты

AUDIT / APCC

LEGEP

Boustead Model 5.0

NIRE-LCA

CEDA OGIP

CMLCA REGIS

EcoScan life

SimaPro Analyst

EIME

SimaPro Compact

EIO-LCA SimaPro Developer

EMIS SIMBOX

EPS 2000

GaBi

TEAM Web Simulator

GEMIS

TRACI

JEMAI-LCA

Umberto

KCL-ECO

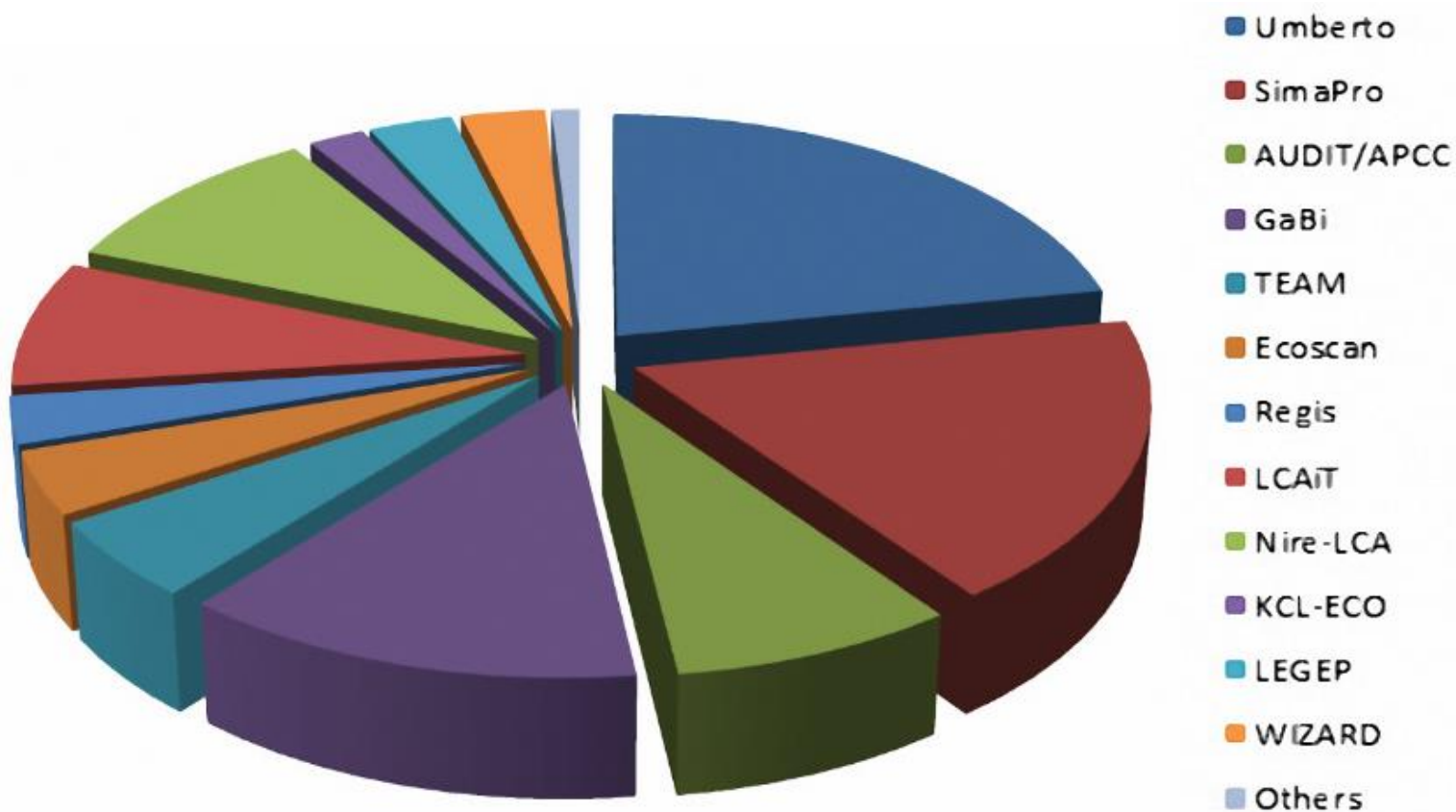
WISARD

LCAiT

WWLCAW



Диаграмма распределения по количеству реализованных лицензий



SimaPro

- полное семейство продуктов с SimaPro в пакете для любых нужд;
- интуитивно понятный интерфейс соответствующий ISO 14040;
- простое моделирование, с мощными вспомогательными функциями, готовыми оказывать вам помощь;
- параметризованные моделирования сценарного анализа;
- гибридная LCA с интегрированными базами данных ввода-вывода;
- прямые ссылки на Excel или базы данных ASP;
- прямые оценки воздействия на расчеты на каждой стадии



Базы данных

- Выполнение практических работ по LCA невозможно без наличия баз данных по процессам, продукции, которые содержат информацию о всех входах и выходах для рассматриваемых производственных процессов, продукции и услуг, показателях, используемых для нормализации и взвешивания и др.
- Примерами таких баз данных являются Ecoinvent Data (Швейцария), IVAM LCA Data (Голландия) и др.

Базы данных интегрированные в SimaPro 7

- Dutch Input Output Database 95;
- Ecoinvent system processes;
- Ecoinvent unit processes;
- European Life Cycle Database;
- EU & DK Input Output Database;
- Industry data 2.0;
- Introduction to SimaPro 7;
- LCA Food DK;
- Methods;
- Tutorial with wood example;
- USA Input Output Database 98;
- USLCI.



Осадки сточных вод

- В последнее время для выбора возможных вариантов обращения с отходами применяется методология оценки жизненного цикла. Это прежде всего касается углеродсодержащих отходов, для которых могут быть предложены различные варианты обработки и использования. Много работ выполнено по анализу вариантов обращения с осадками сточных вод (ОСК).

Сценарии

Сценарий обработки	Конечный продукт	Способ обращения с конечным продуктом
Обезвоживание	Иловый кек, 20 % сухих веществ, без изменения массы	захоронение
Обезвоживание → известкование	Иловый кек, 30 % сухих веществ, увеличение массы на 15 %	сельское хозяйство, производство цемента
Мезофильное анаэробное сбраживание → обезвоживание	Иловый кек, 20 % сухих веществ, уменьшение массы на 29 %	сельское хозяйство
Аэробная обработка → обезвоживание	Иловый кек, 20 % сухих веществ, уменьшение массы на 29 %	сельское хозяйство
Обезвоживание → термическая сушка → компостирование	Компост, 57 % сухих веществ, увеличение массы на 32 %	сельское хозяйство
Обезвоживание → термическая сушка	Иловый кек, 36 % сухих веществ, без изменения массы	производство цемента
Мезофильное анаэробное сбраживание → обезвоживание → термическая сушка	Иловый кек, 43 % сухих веществ, уменьшение массы на 29 %	производство цемента
Аэробная обработка → обезвоживание → термическая сушка	Иловый кек, 43 % сухих веществ, уменьшение массы на 29 %	производство цемента
Обезвоживание → сжигание во взвешенном слое	Зола, уменьшение массы на 70 %	Производство цемента, кирпича

Выбросы в атмосферу и потребление энергии (на 1т)

	Обезвоживание	Известкование	Анаэробное сбраживание (без известкования)	Анаэробное сбраживание (с известк.)	Анаэробное сбраживание	Термическая сушка / компостирование	Термическая сушка	Анаэробное сбраживание (без известкования) / сушка	Анаэробное сбраживание / термическая сушка	Сжигание во взвешенном слое (NG)	Сжигание во взвешенном слое (уголь)
SO ₂ , кг	0,1	0,3	-6,1	-6,0	4,9	0,5	0,1	-2,7	4,9	-6,9	45
CO, кг	0,1	1,2	-2,0	-1,6	2,5	0,3	0,3	-0,4	2,5	-3,0	29
NO _x , кг	0,1	0,2	0,1	0,2	0,7	1,2	1,5	1,8	1,9	-0,9	5
ЛОС, кг	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PM ₁₀ , кг	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
ППП, кг CO ₂	12	550	-280	-57	210	260	340	-120	210	2100	300
Эл. эн, кВт·ч	19	81	-920	-890	730	70	19	-400	760	-100	-100
Топливос (MJ)	92	3500	65	1500	65	4300	5900	33	4800	23000	23000

Сокращение выбросов и энергозатрат при использовании осадков (на 30 тыс. тонн осадка по а.с.в., 21 тыс. тонн сброженного осадка, 9 тыс. тонн золы)

	Осадок вносится как удобрение	Термически высушенный осадок используется в пр-ве цемента	Сброженный и термически высушенный осадок используется в пр-ве цемента	Зола используется в пр-ве цемента	Зола используется в пр-ве кирпича
SO ₂ , кг	$-2,0 \cdot 10^3$	$-6,8 \cdot 10^3$	$-2,4 \cdot 10^3$	$-4,6 \cdot 10^1$	$-1,4 \cdot 10^0$
CO, кг	$-8,4 \cdot 10^3$	$-4,2 \cdot 10^3$	$-2,0 \cdot 10^3$	$-8,3 \cdot 10^2$	$-1,8 \cdot 10^2$
NO _x , кг	$-1,3 \cdot 10^3$	$-9,7 \cdot 10^2$	$-3,9 \cdot 10^2$	$-8,5 \cdot 10^1$	$-1,4 \cdot 10^1$
Летучие органические в-ва, кг	$-1,5 \cdot 10^3$	$-7,1 \cdot 10^1$	$-7,1 \cdot 10^1$	$-7,1 \cdot 10^1$	$-1,4 \cdot 10^1$
PM ₁₀ , кг	$-4,5 \cdot 10^2$	$-1,0 \cdot 10^1$	$-1,0 \cdot 10^1$	$-1,0 \cdot 10^1$	$-2,8 \cdot 10^{-1}$
GWE, кг CO ₂	$-2,4 \cdot 10^6$	$-4,4 \cdot 10^5$	$-2,3 \cdot 10^5$	$-1,2 \cdot 10^5$	$-2,7 \cdot 10^3$
Электричество ^b , кВт·ч	$-5,9 \cdot 10^8$	$-2,2 \cdot 10^3$	$-2,2 \cdot 10^3$	$-2,2 \cdot 10^3$	0
Топливо ^c (МДж)	$-4,8 \cdot 10^7$	$-3,4 \cdot 10^6$	$-1,2 \cdot 10^6$	$-9,4 \cdot 10^4$	$-1,9 \cdot 10^4$

Экологический и экономический анализ вариантов обращения с осадками сточных вод

Экономический анализ			Экологический анализ			
Способ обработки	Способ обращения с конечным продуктом	Относительные затраты	SO ₂ , кг	ПГП, кг CO ₂	Электроэнергия, кВт·ч	Топливо (МДж)
Обезвоживание	захоронение	1,0	4,0·10 ³	3,8·10 ⁵	5,7·10 ⁵	2,8·10 ⁶
Известкование	Внесение в почву	1,34	8,7·10 ³	1,5·10 ⁷	-5,9·10 ⁸	5,8·10 ⁷
Анаэробное сбраживание (без известкования)	Внесение в почву	1,19	-1,9·10 ⁵	-1,1·10 ⁷	-6,2·10 ⁸	-4,6·10 ⁷
Анаэробное сбраживание (с известкованием)	Внесение в почву	1,34	-1,9·10 ⁵	-4,2·10 ⁶	-6,2·10 ⁸	-2,9·10 ⁶
Термическая сушка + компостирование	Внесение в почву	3,1	1,2·10 ⁴	5,6·10 ⁶	-5,9·10 ⁸	8,3·10 ⁷
Термическая сушка	Цементное производство	3,6	-2,6·10 ³	1,0·10 ⁷	5,7·10 ⁵	1,8·10 ⁸
Анаэробное сбраживание (без известкования) + термическая сушка	Цементное производство	1,9	-8,4·10 ⁴	-4,1·10 ⁶	-1,2·10 ⁷	-2,0·10 ⁵
Анаэробное сбраживание (с известкованием) + термическая сушка	Цементное производство	2,3	-8,1·10 ⁴	2,9·10 ⁶	-1,2·10 ⁷	4,5·10 ⁷
Сжигание во взвешенном слое	Кирпичное/цементное	7,3	-2,1·10 ⁵	6,5·10 ⁷	-3,2·10 ⁷	7,1·10 ⁸

Выводы

- Анаэробная обработка с последующим использованием осадка в качестве удобрения является наилучшим вариантом, даже при использовании извести для стабилизации
- Если осадок не может использоваться в качестве удобрения, то наилучшим вариантом является анаэробное сбраживание с последующей сушкой и использованием при производстве цемента.