

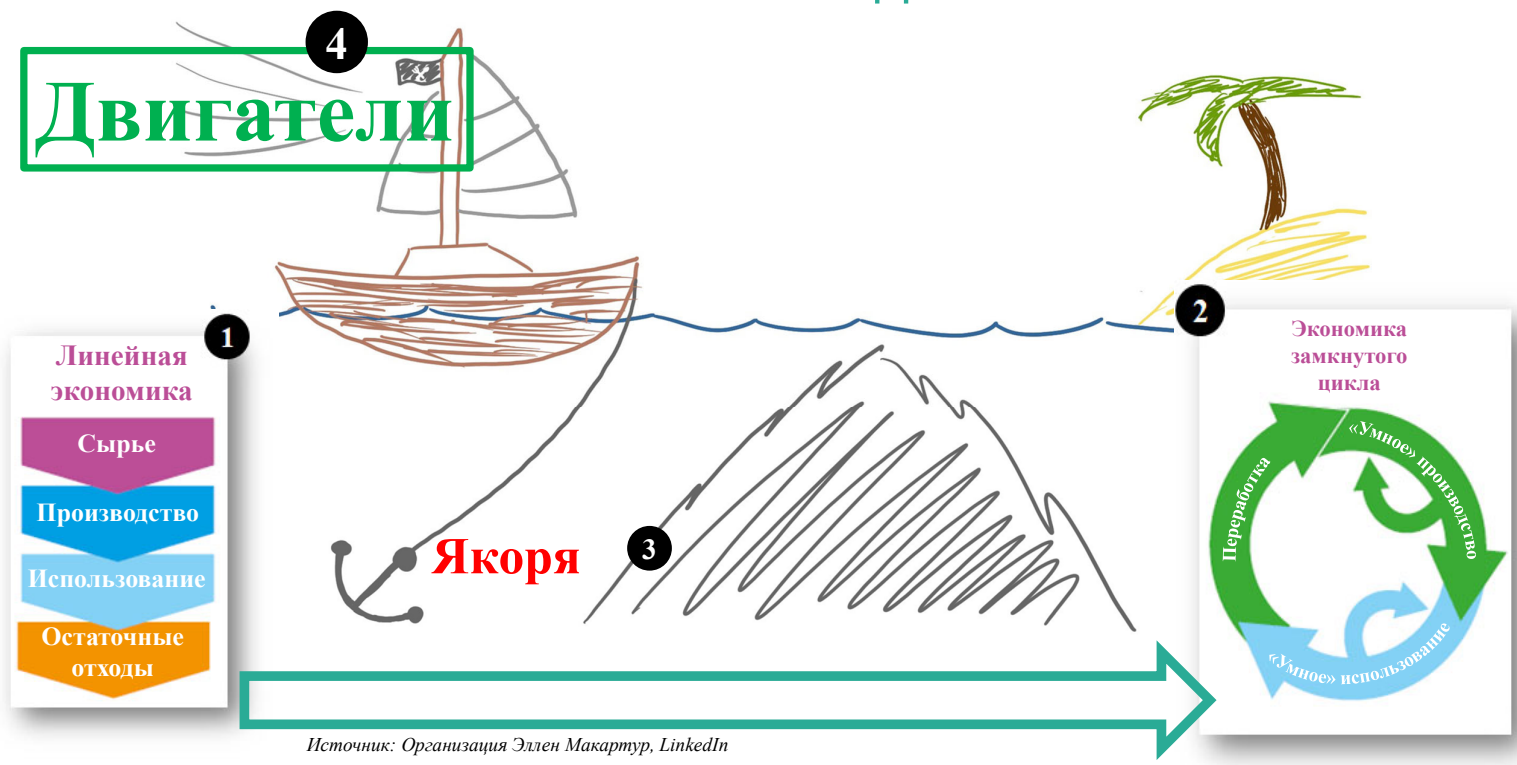


ВОДООРИЕНТИРОВАННАЯ ЭКОНОМИКА ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА

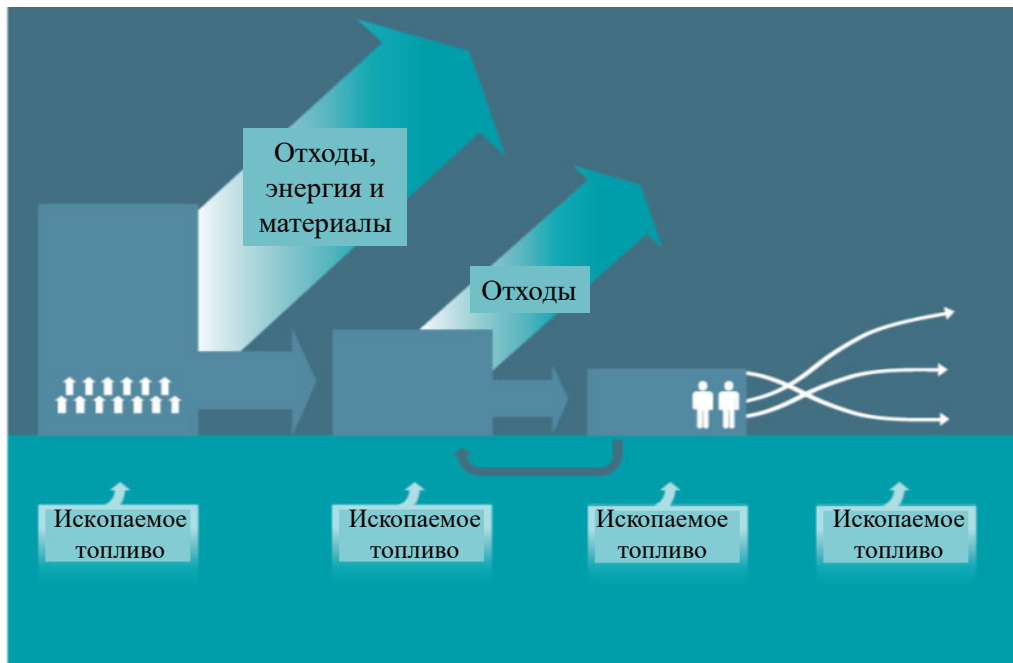
ОБЗОР ПЕРЕДОВЫХ МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ

Захар Малецкий
9 июня 2021

СОДЕРЖАНИЕ



ЛИНЕЙНАЯ ЭКОНОМИКА



Источники: Организация Эллен Макартур и Проект ЕС Nextgenwater



3

Линейная экономика
рациональна, когда есть
**много ресурсов которые
можно взять и среда,
которая может принять
ОТХОДЫ**
Так ли это?



4



Сельское хозяйство



ГОРОДА И ПРОМЫШЛЕННОСТЬ



ВОДА И ЭНЕРГИЯ



ЭКОСИСТЕМА

70%

от всего забора воды приходится на сельскохозяйственный сектор.

60%

увеличение производства продуктов питания будет необходимо к 2050 году, чтобы не отставать от потребностей растущего населения.

55%

увеличение мирового спроса на воду к 2050 году, в основном в городах.

400%

увеличение спроса на воду в производственном секторе к 2050 году (по сравнению с базовым уровнем 2000 года).

15%

от забора пресной воды в мире приходится на производство электроэнергии.

5-30%

от общей стоимости эксплуатации водопроводных и канализационных систем приходится на потребление энергии.

\$20 trillion

ежегодные потери в сфере экосистемных услуг из-за загрязнения и изменения в землепользовании

\$125 trillion

экономическая ценность экосистемных сервисов для мировой экономики в 2011 г.

Источники: Проект EC Nextgenwater, Белая книга по циркулярной экономике



5

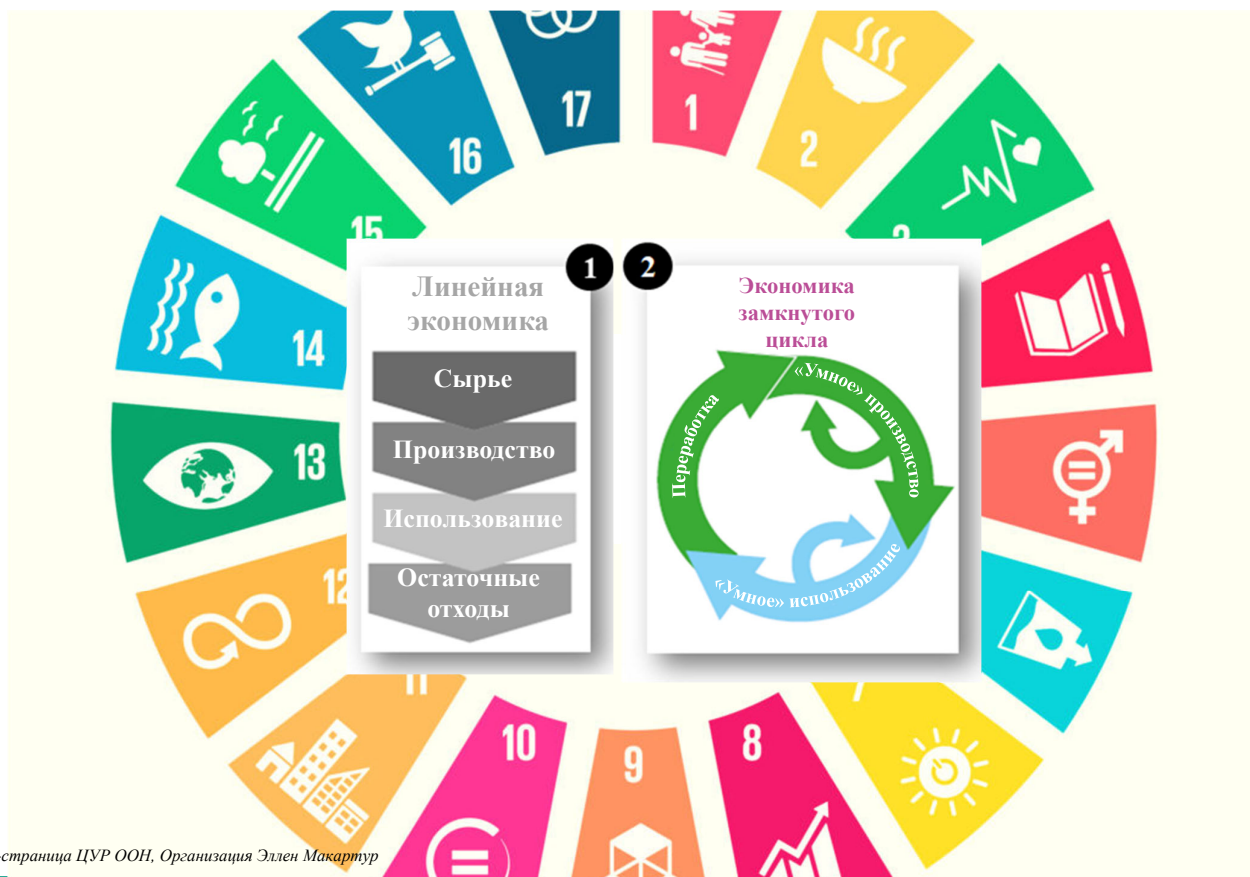
Источники: веб-страница ЦУР ООН



Линейная экономика неустойчива



6



Источники: веб-страница ЦУР ООН, Организация Элен Макартур



7

ЭКОНОМИКА ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА



Источники: Организация Элен Макартур и Проект ЕС Nextgenwater



8

Что это значит для водного сектора?



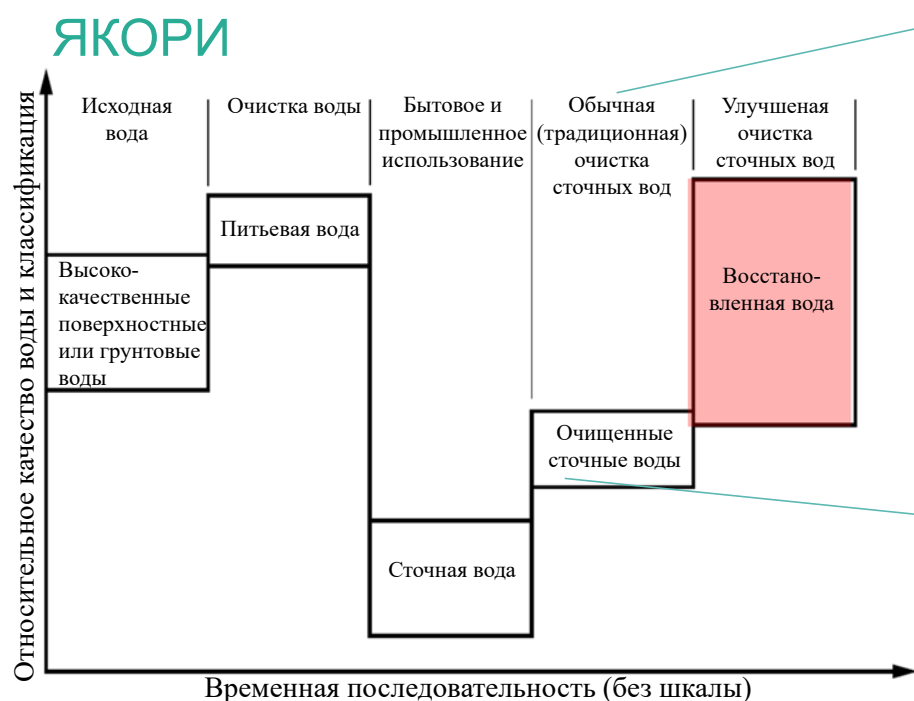
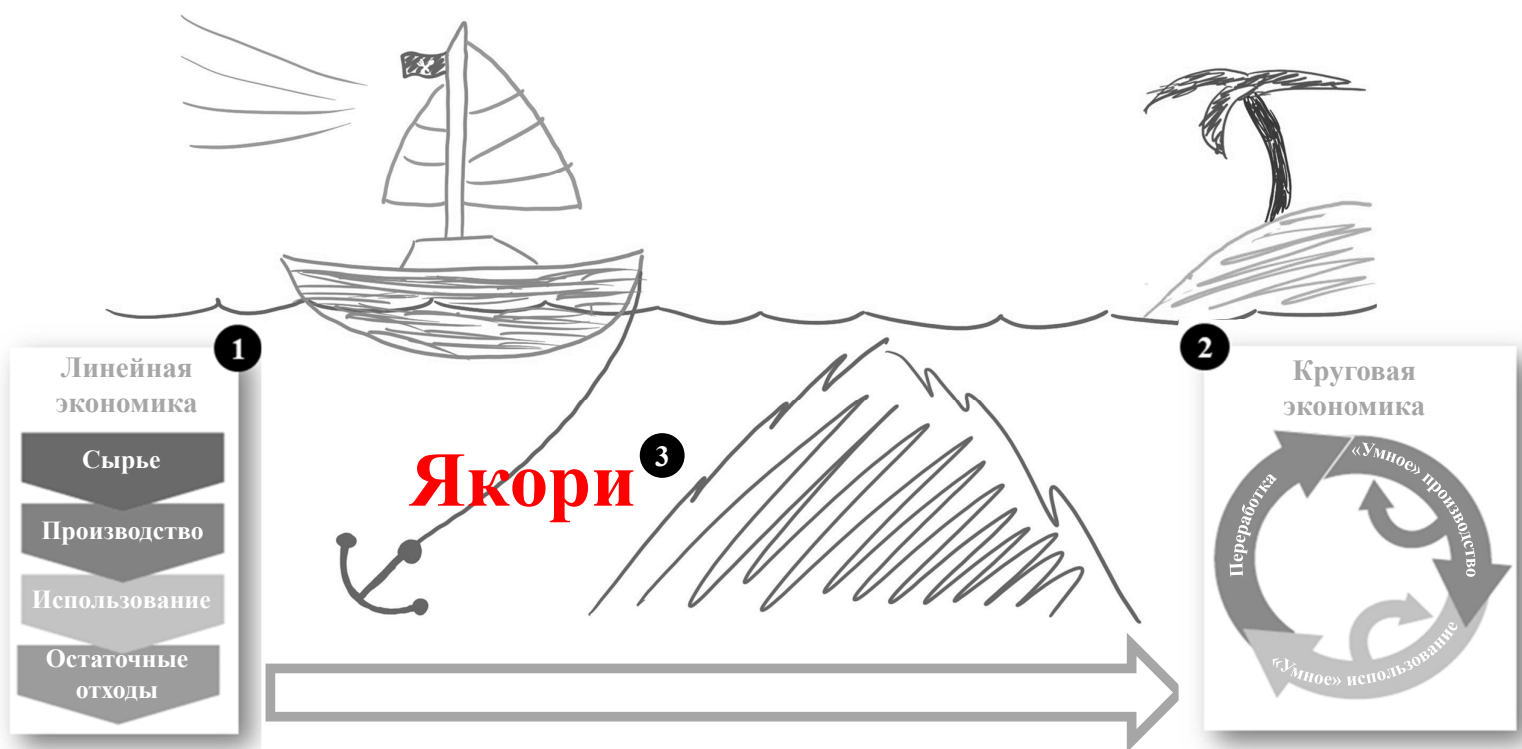
9



Источники: Повторное использование воды в Европе 2017



10



Предназначен для удаления и утилизации питательных веществ и других компонентов, не для восстановления и повторного использования

Причины беспокойства:

- Твердые частицы;
- Органика;
- Микроорганизмы...

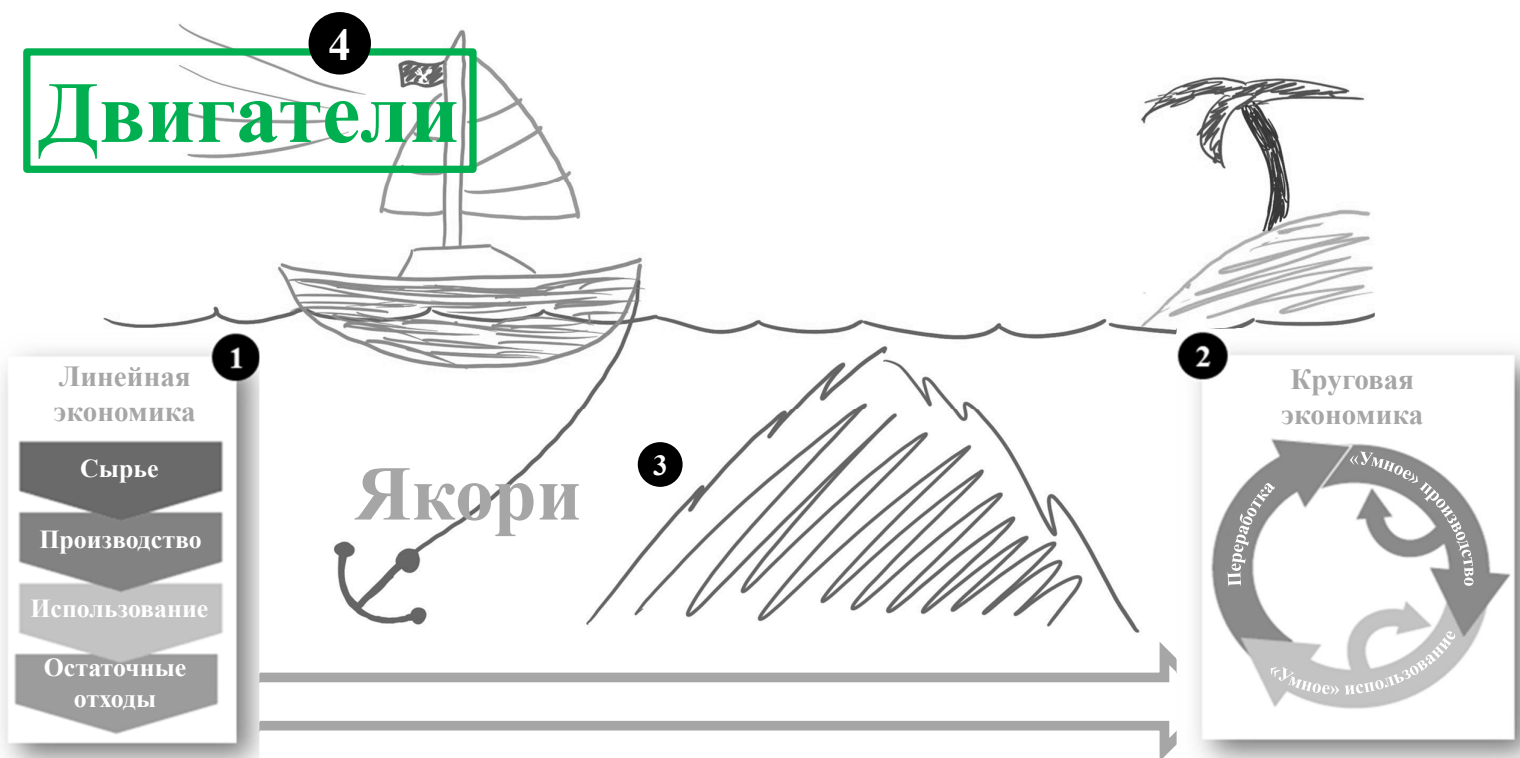
Источники: S.Judd, The MBR book

Нормативные требования, экономика, общественное мнение

ЯКОРИ: Причины беспокойства



Двигатели



ДВИГАТЕЛИ

Политика



Бизнес



Аналитические онлайн-инструменты и быстрый мониторинг
→ Оцифрование

Методы очистки сточных вод:

- Биологические
- Физические: напр. мембранные методы
- Химические: напр. улучшенный процесс окисления
- Основанные на природных процессах

Комбинированные

Предварительная обработка

Главная обработка

Постобработка



От удаления загрязнений до восстановления ресурсов

Передовые методы и технологии

Credits: UN Water, WWDR 2017



17

СТОЧНЫЕ ВОДЫ: недооцененный ресурс, UN 2017

Сточные воды

Повторное
использование воды

Повторное
использование
питательных веществ

Другие
ценные вещества

Повторное
использование
органических
веществ

Энергия



18

ПОВТОРНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДЫ

Методы получения высококачественной воды для повторного использования



19

ПОВТОРНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДЫ: Комбинации методов



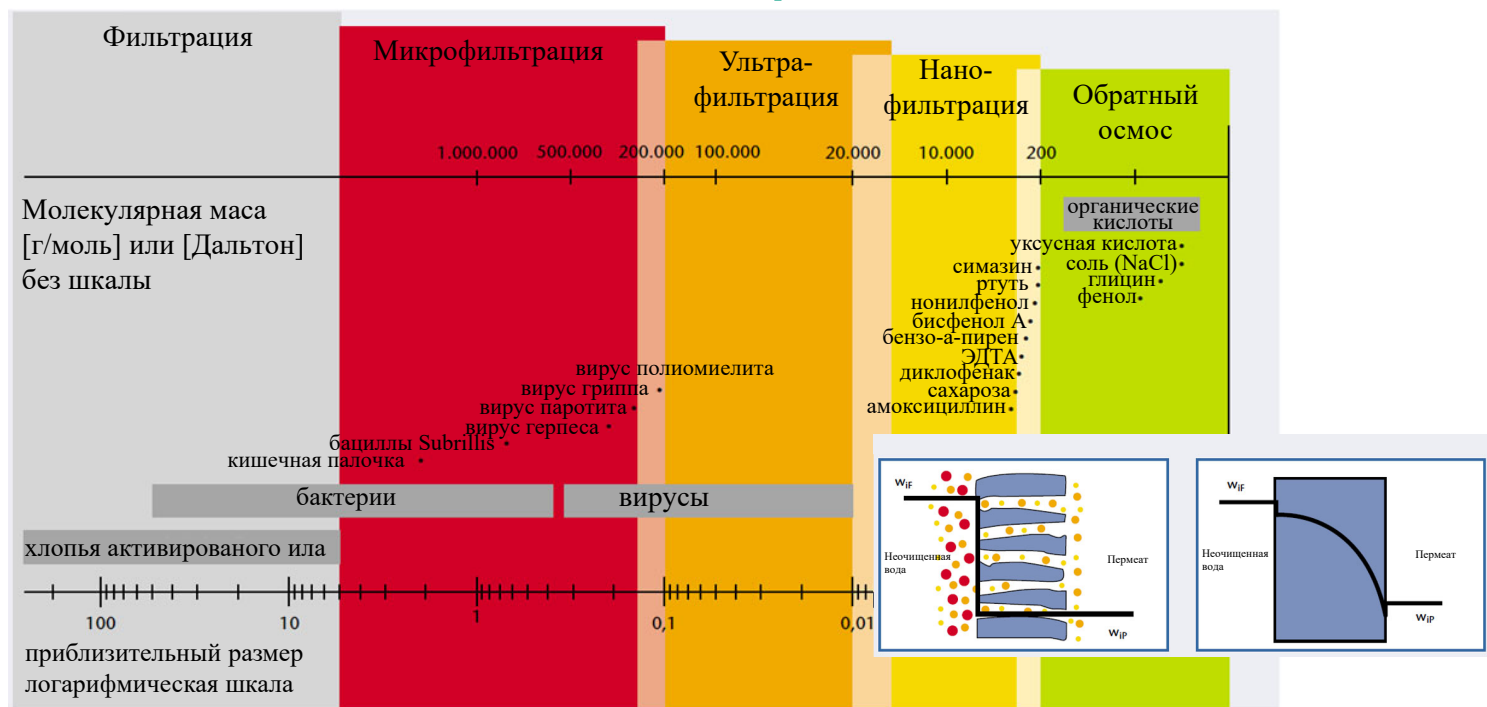
Источники: Инновационные технологии очистки сточных вод и восстановления ресурсов, J.Lema, S.Suarez



20

МЕМБРАННЫЕ МЕТОДЫ: обзор

Источники: MT for WWT, Achen, eBook

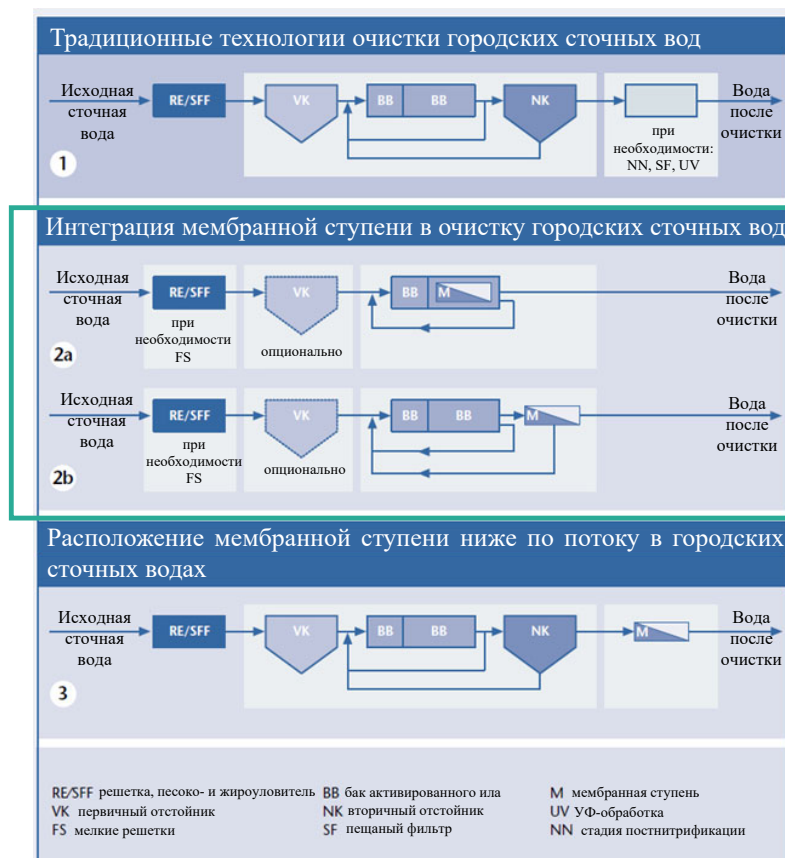


Цены на мембраны упали на 80% с 1990 года, а энергоэффективность повысилась.



21

МЕМБРАННЫЕ МЕТОДЫ Интеграция



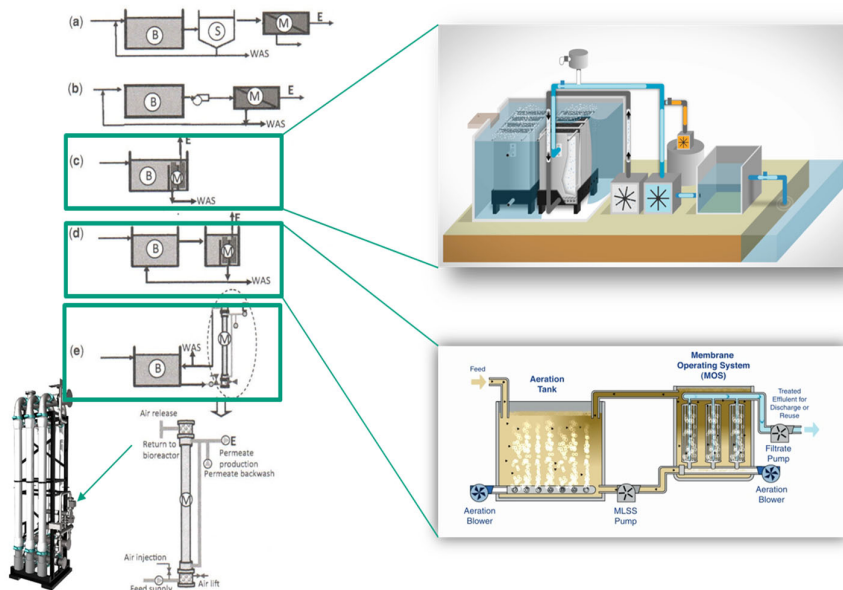
Источники: MT for WWT, Achen, eBook

Мембранные биологические реакторы (МБРы)



22

МЕМБРАННЫЕ БИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕАКТОРЫ: Плюсы и минусы



	AS ³	MBR ⁴
MLSS ¹ , g/L	< 5	< 20
SS ² , mg/L	10-15	< 0,1
ХПК, mg/L	40-50	< 30
Микробиологическое качество	Тревожное	Пригодно для купания
Потребление энергии, кВтч /м ³	0,2-0,4	0,7-1,5

- 1- MLSS - Взвешенные твердые частицы смешанного раствора
- 2- SS – Взвешенные частицы
- 3- AS – Активированный ил
- 4- MBR – Мембранный биореактор

Источники: Microdyn Nadir, BioCel MBR
MBR: Технология и применение, H. Lee

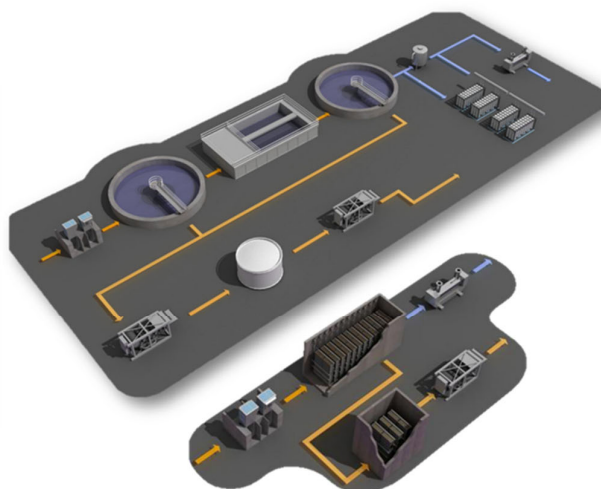
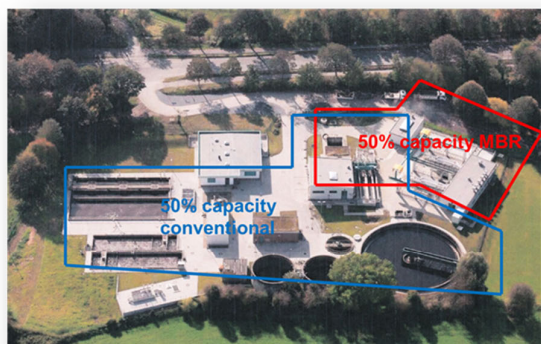


23

МЕМБРАННЫЕ БИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕАКТОРЫ: СЛЕД (РАЗМЕРЫ СИСТЕМЫ)

Повышение мощности

Новая система



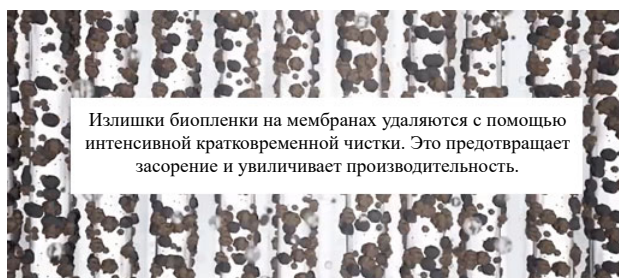
Источники: Microdyn Nadir, BioCel MBR
MBR: Технология и применение, H. Lee



24

МЕМБРАННЫЙ АЭРАЦИОННЫЙ РЕАКТОР БИОПЛЕНКИ (МАРБ)

1. МАРБ создает среду для поддержки очень устойчивой биопленки, которая может выдерживать гидравлические удары и технологические сбои.
2. Биопленка поглощает и потребляет загрязнители на основе углерода и азота.



Постепенное увеличение мощности биологической очистки до 50%

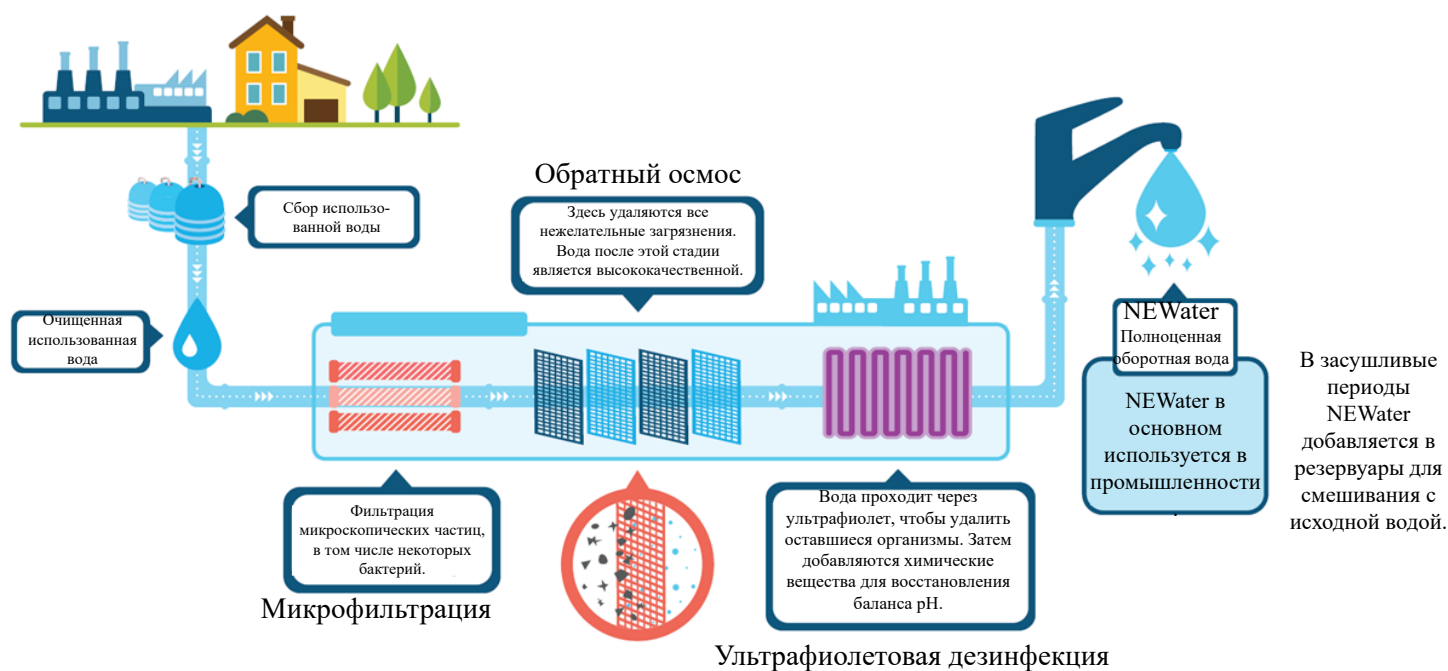


Снижение энергопотребления до 75% за счет дополнительной емкости



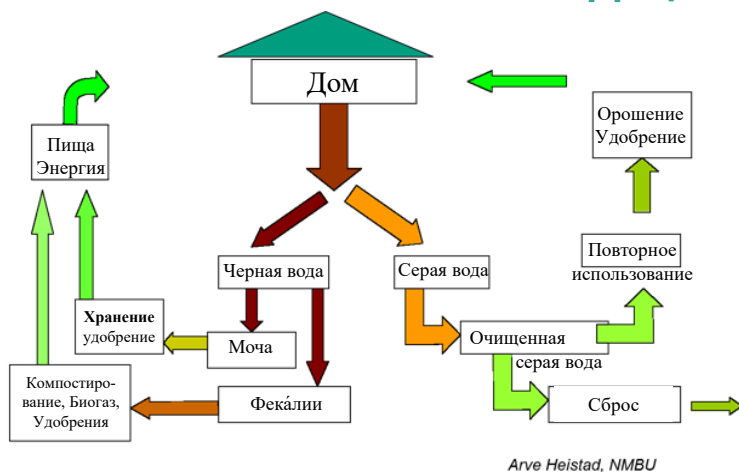
Снижение образования осадка до 50%
Благодаря возрасту ила и слоям биопленки МАРБ

ПРИМЕР ИЗ ПРАКТИКИ: Сингапур



Source: Courtesy of Singapore's National Water Agency (PUB).

ПРИМЕР ИЗ ПРАКТИКИ: Децентрализованное применения



- * 90 % N
- * 80 % P
- * 80 % K
- * 40-75 % Органического вещества

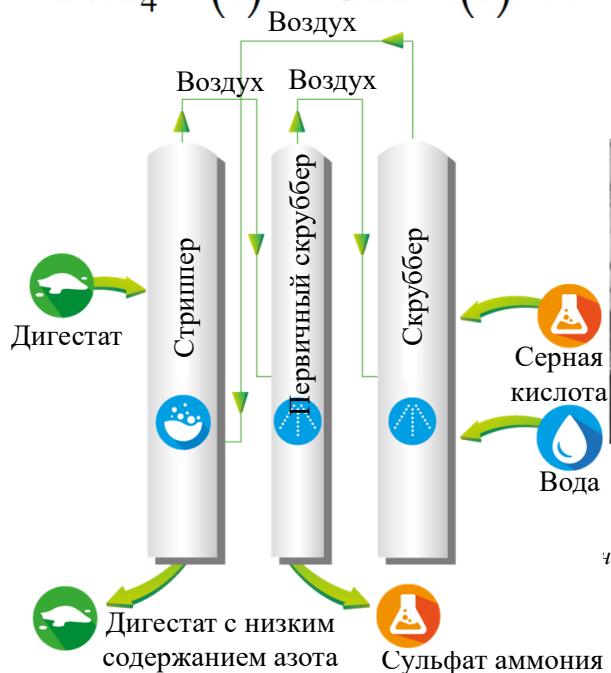
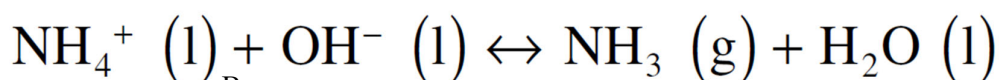
Источники: Арве Хейстад, маркетинговые материалы Newterra, онлайн



27

ПИТАТЕЛЬНЫЕ ВЕЩЕСТВА МЕТОДЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА И ФОСФОРА

ВОССТАНОВЛЕНИЕ АМИАКА: Отдувка



- Проверенная технология, уже широко используется
- Простой процесс и дизайн
- След (розмеры)
- Накипь и обрастание
- Температурное влияние

ые технологии очистки сточных вод и восстановления ресурсов, J.Lema, S.Suarez

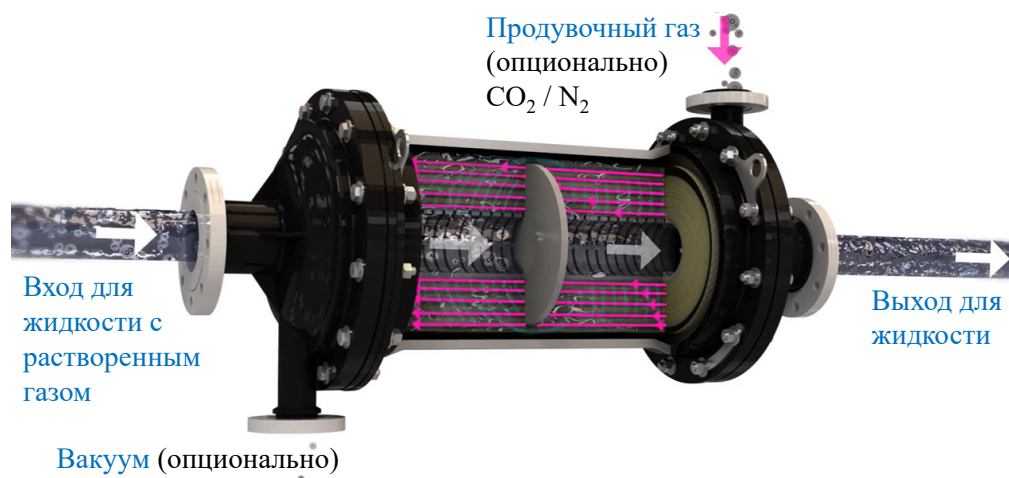
Другая модификация:
паровая очистка



29

ВОССТАНОВЛЕНИЕ АМИАКА: Мембранные процессы

Контакторы с полыми волоконными мембранами



- Загрязнение мембраны, периодическая замена мембраны
- Требуется система контроля
- **Без химикатов**
- **95% очистка**

Применимо для децентрализованных систем

Источники: 3M LiqTech webpage

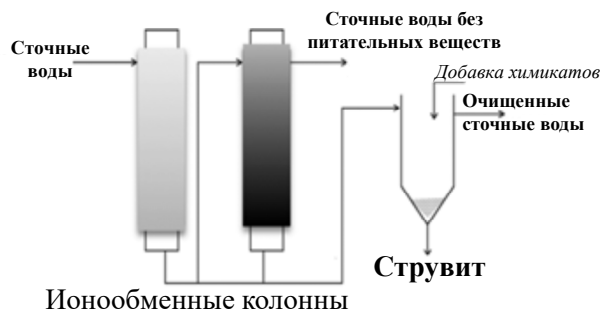


30

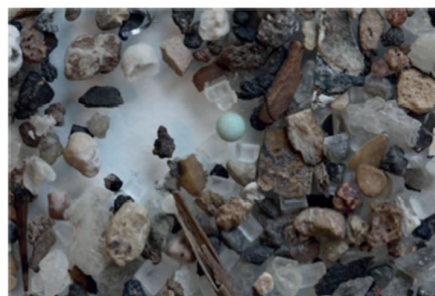
ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФОСФОРА: Струвит



зарождение и рост кристаллов



Ионный обмен



Струвит



Струвит

Переработка

Реакторы с мешалкой

Источники: Инновационные технологии очистки сточных вод и восстановления ресурсов, J.Lema, S.Suarez



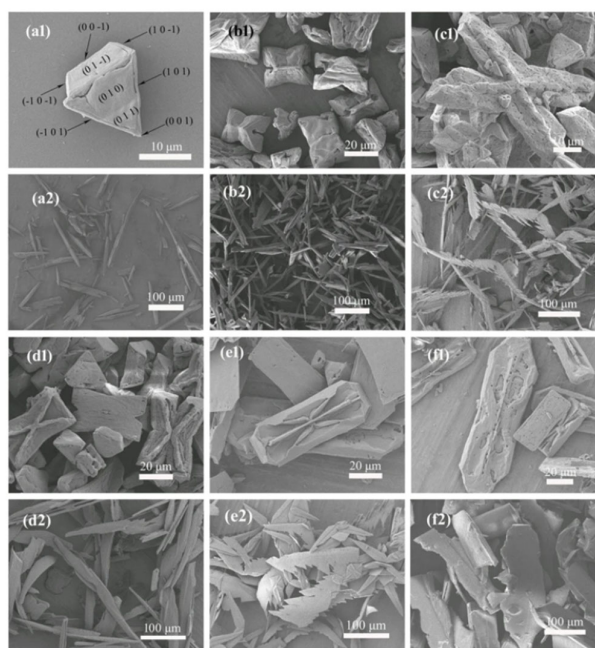
31

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФОСФОРА: Био-струвит

Биоминерализация

как побочный продукт метаболизма определенных бактерий
которые можно часто найти в окружающей среде
напр. *Brevibacterium antiquum*

- Кинетика
- Контроль процесса и качества продукции



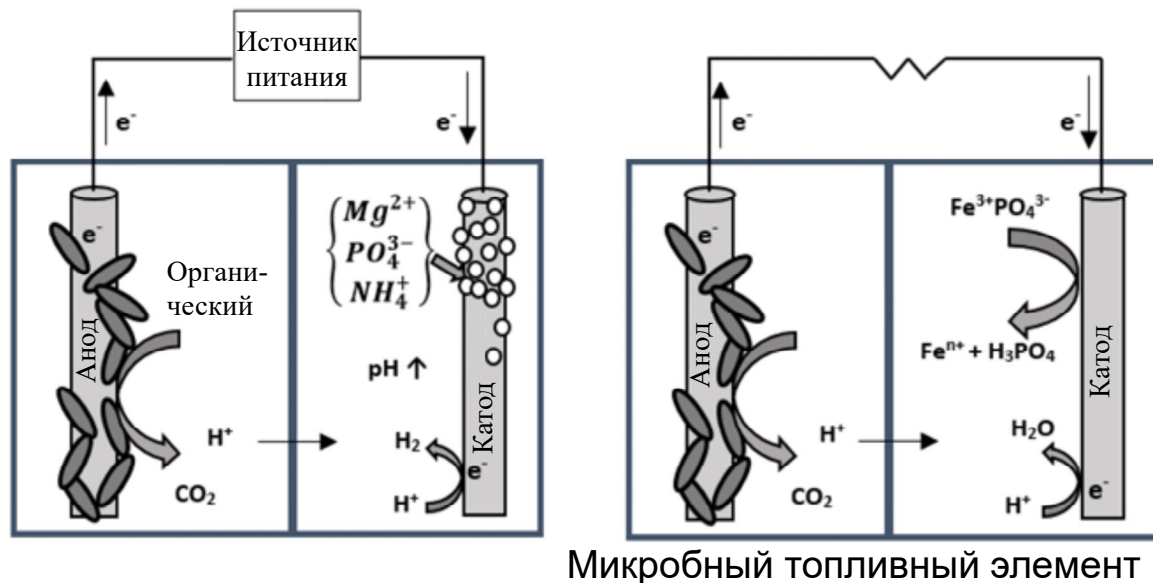
Источники: Инновационные технологии очистки сточных вод и восстановления ресурсов, J.Lema, S.Suarez



32

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФОСФОРА: Струвит

Био-электрохимическое восстановление



ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФОСФОРА: Другие химические формы

Калий-струвит $\text{MgKPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Фосфат кальция и гидроксиапатит



- Добавление кальция к ионообменным регенерантам или рассолам
- Низкоэнергетический процесс
- Очень хорошая очистка от Р (до 90%) и высокое качество продукции
- Небольшой след
- **Нуждается в добавлении кислоты для удаления щелочи**
- **Нуждается в добавлении химикатов (кальция)**



ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФОСФОРА: СТРУБИАС



JRC SCIENCE FOR POLICY REPORT

Technical proposals for selected new fertilising materials under the Fertilising Products Regulation (Regulation (EU) 2019/1009)

Process and quality criteria, and assessment of environmental and market impacts for precipitated phosphate salts & derivatives, thermal oxidation materials & derivatives and pyrolysis & gasification materials

Huygens D, Saveyn HGM, Tonini D, Eder P, Delgado Sancho L

2019



- Материалы компонентов
- Технические предложения
- Возможная дополнительная стоимость
- Объем и названия материала кандидата
- Риски утилизации загрязнителей
- Система менеджмента качества
- Рыночный спрос и торговля
- Управление ресурсами и охрана здоровья и окружающей среды
- Экономические выгоды и проблемы



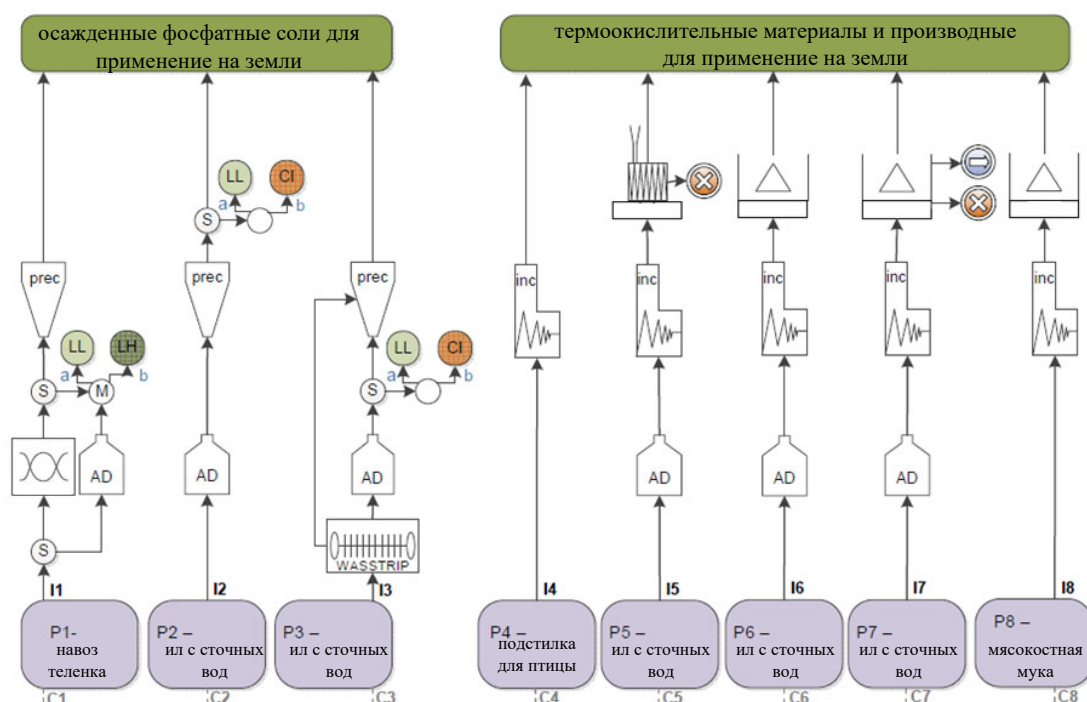
35

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФОСФОРА: СТРУБИАС

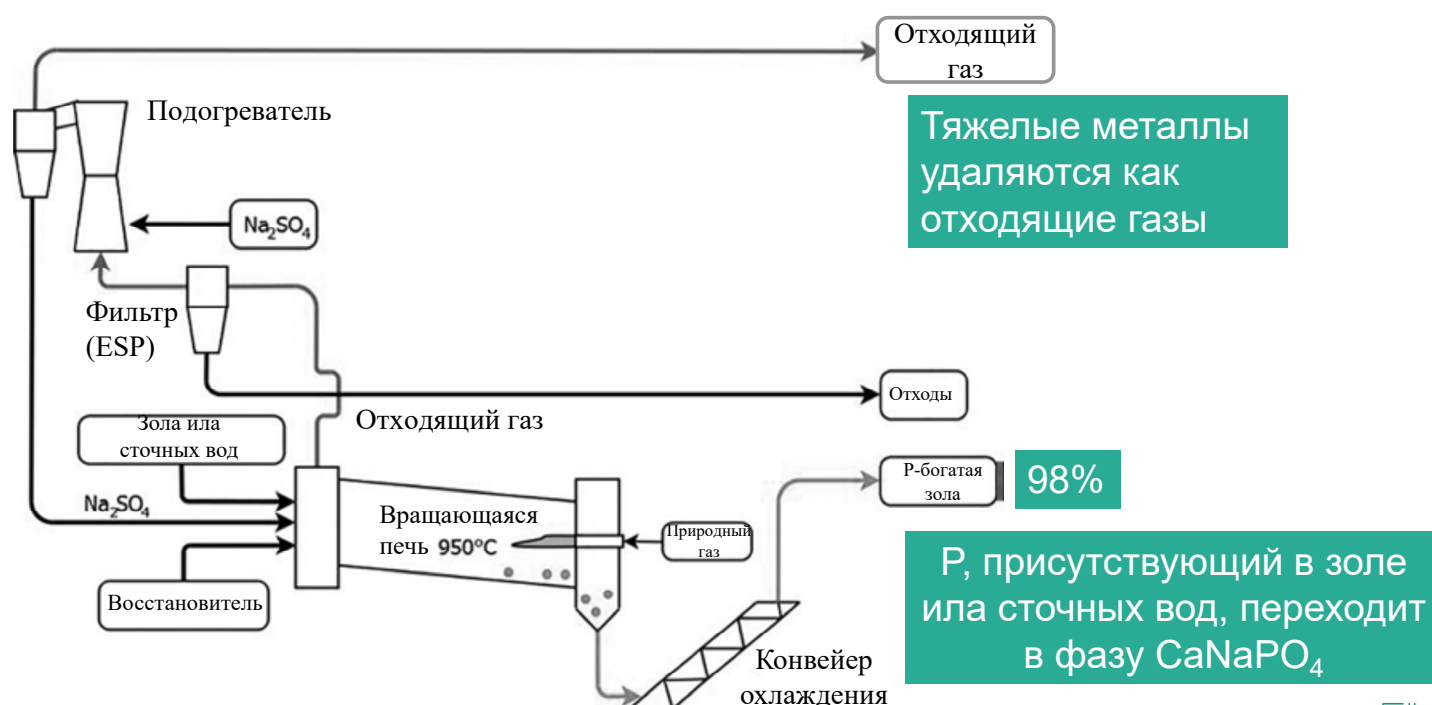


36

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФОСФОРА: СТРУБИАС



ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФОСФОРА: Осадок золы



Источники: Инновационные технологии очистки сточных вод и восстановления ресурсов, J.Lema, S.Suarez



ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФОСФОРА: ЕВРОПЕЙСКАЯ ПЛАТФОРМА УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ



- Швейцария:
2016: Р-восстановление обязательно к 2026 году (сточные воды, побочные продукты животного происхождения)
- Германия:
2017: Р-восстановление обязательно в течение 12/15 лет
(все очистные сооружения сточных вод > 50 000 п. е., если осадок сточных вод $P > 2\%$ СВ)
- ХЕЛКОМ: Стратегия переработки питательных веществ до 2020 г.
- Швеция:
2018: Правительство начало “расследование” постановления о переработке фосфора



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und nukleare Sicherheit



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra



Government Offices of Sweden



39

Источник: ESPP presentation at LinkedIn

ПИТАТЕЛЬНЫЕ ВЕЩЕСТВА: Итоги

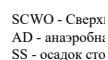
- Во многих из этих процессов **используются химические вещества**, реагенты и методы, которые обычно используются в химической промышленности, поэтому требуются **определенные активы**.
- Количество установок по извлечению питательных веществ во всем мире быстро растет, поскольку технологические достижения происходят быстрыми темпами.
- Тем не менее, по-прежнему существует **важная задача** - **сделать эти процессы экономически целесообразными**.



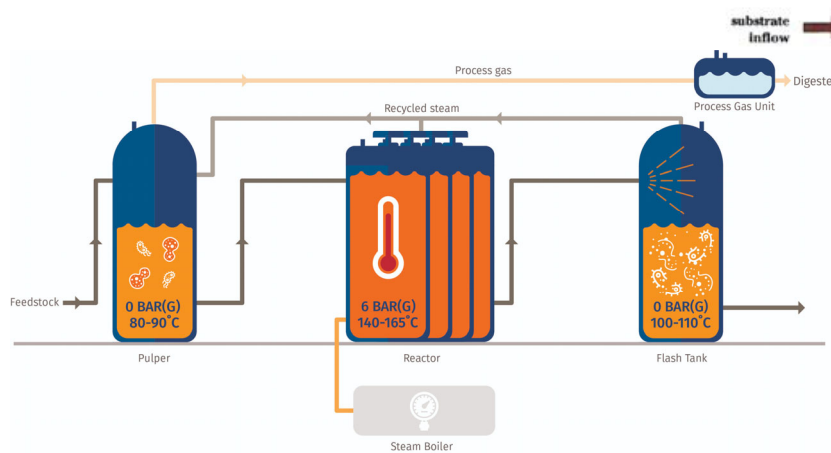
40

Методы получения энергии в процессах ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

SCWO - Сверхкритическая водная окислительная технология
AD - анаэробная дигестия
SS - осадок сточных вод

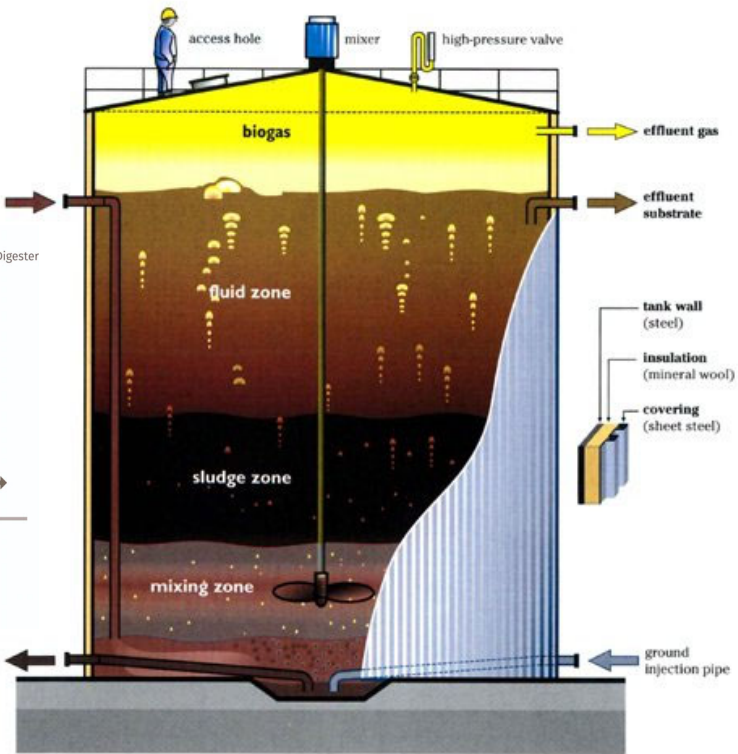


АНАЭРОБНОЕ СБРАЖИВАНИЕ

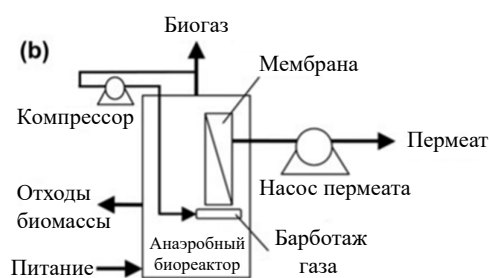


Существуют различные конфигурации реакторов.

Источники: маркетинговые материалы THP Cambi, онлайн



АНАЭРОБНЫЕ МЕМБРАННЫЕ БИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕАКТОРЫ

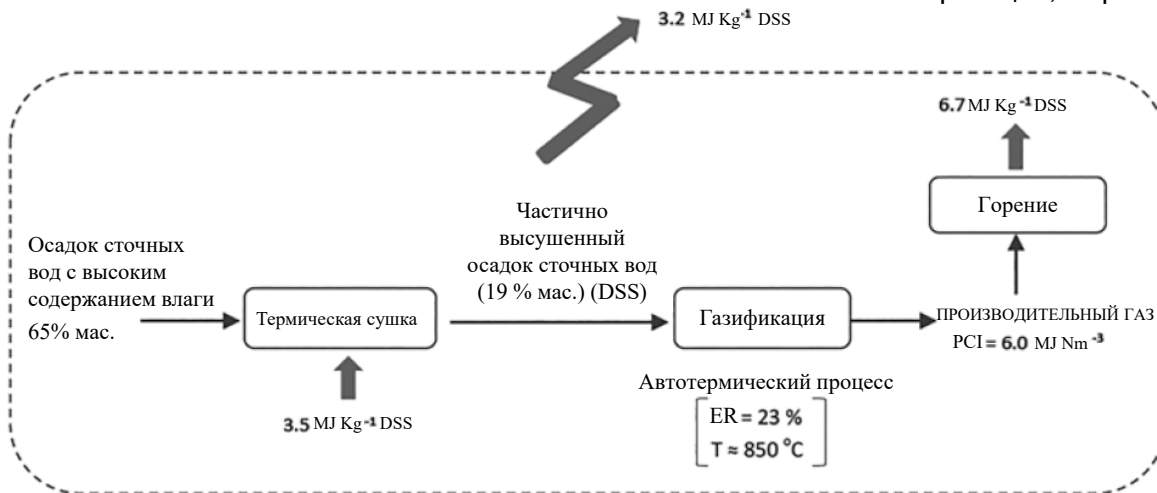


- Не требуется выращивать бактерии в гранулах → сокращает время запуска биореактора
 - Флотация растворенного воздуха (ФРВ) как стадия предварительной обработки не требуется в анаэробном МБР
 - Во многих случаях дополнительная последующая обработка не требуется
 - Увеличивается восстановление биогаза
- Поскольку на этапах предварительной очистки «теряется» меньше органических материалов, из тех же сточных вод можно производить больше биогаза.**
- Повышение качества сточных вод

Источники: Инновационные технологии очистки сточных вод и восстановления ресурсов, J.Lema, S.Suarez

ДРУГИЕ МЕТОДЫ Био-сушка

На термической основе Газификация, Пиролиз...



- Более высокие капитальные затраты
- Этап газоочистки
- Со-субстраты

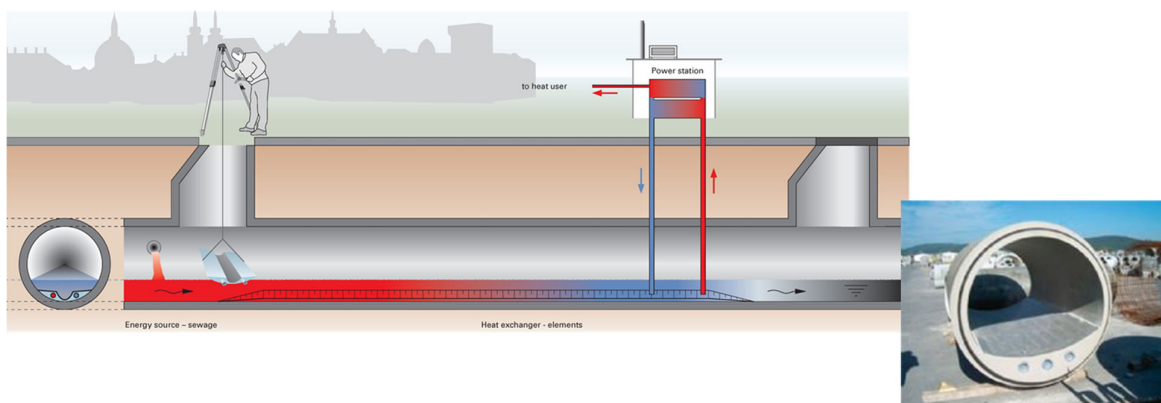
Источники: Инновационные технологии очистки сточных вод и восстановления ресурсов, J.Lema, S.Suarez



45

РЕКУПЕРАЦИЯ ЭНЕРГИИ ИЗ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

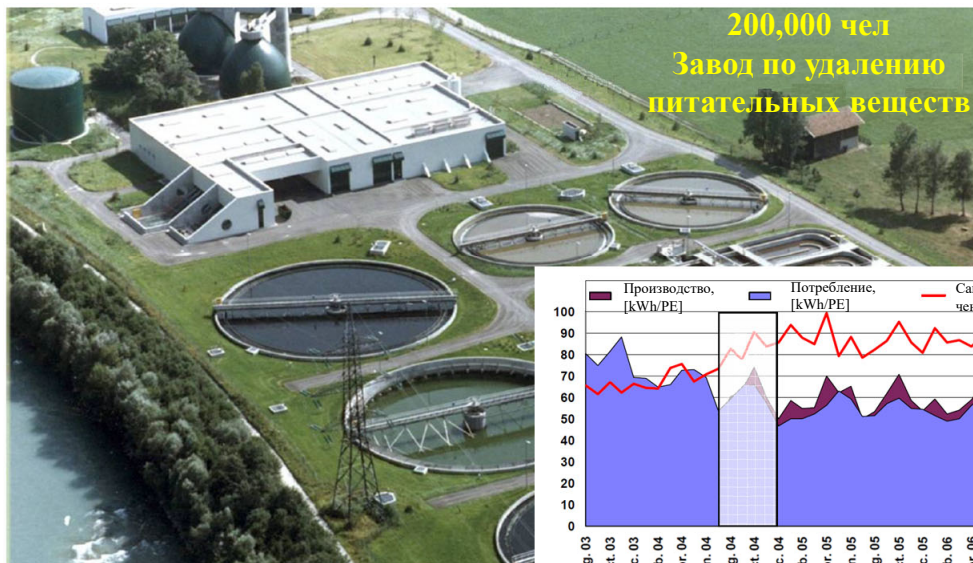
- Zerorex из Норвегии: Технология Difgen: система понижения давления, вырабатывающая электрическую энергию за счет падения давления в жидкостях. Используемый вместо традиционного редукционного клапана (PRV), он сочетает в себе регулирование давления с помощью дроссельных заслонок и выработку электроэнергии с помощью гидротурбин.



46

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ САМООБЕСПЕЧЕННОСТЬ

Станция очистки сточных вод Starss, Австрия



8% в национальную сеть



47

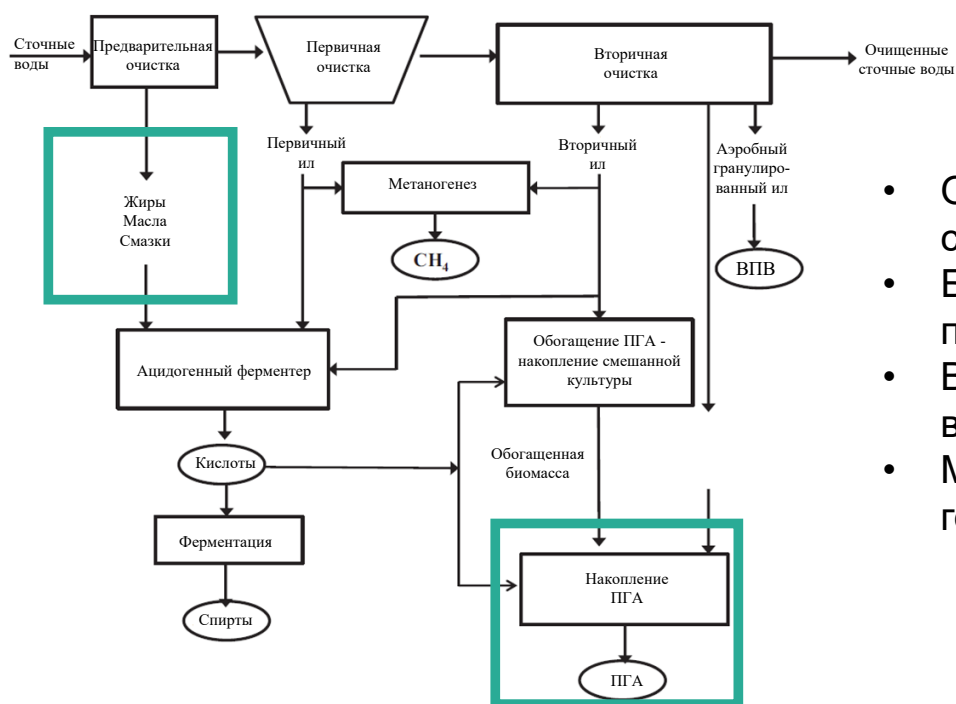
ОРГАНИКА

Методы извлечения органических продуктов



48

ЧТО И ГДЕ МОЖЕТ БЫТЬ ИЗВЛЕЧЕНО?



- Органические кислоты и спирты
- Биопластики: полигидроксиалканоаты (ПГА)
- Внеклеточные полимерные вещества (ВПВ)
- Может использоваться в геополимерах

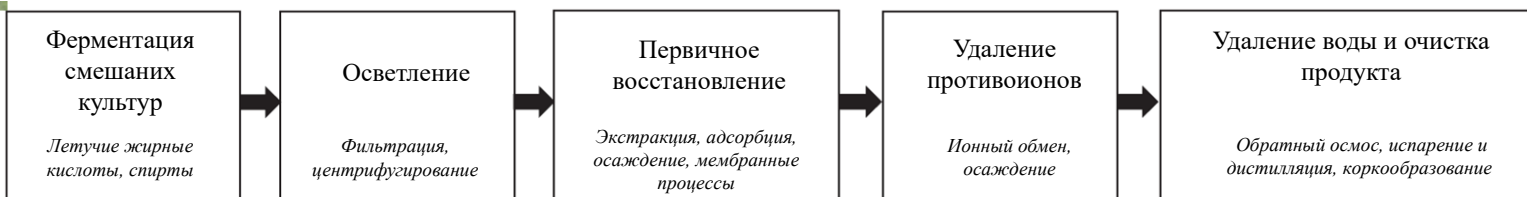
Источники: Инновационные технологии очистки сточных вод и восстановления ресурсов, J.Lema, S.Suarez



49

МЕТОДЫ

Производство и восстановление летучих жирных кислот



Биопластики(ПГА)

Отработанный субстрат



Источники: Инновационные технологии очистки сточных вод и восстановления ресурсов, J.Lema, S.Suarez

1 - VFA - Летучие жирные кислоты



50

ОРГАНИКА: Итоги

- На данный момент отсутствуют данные об экологическом, экономическом и техническом воздействии систем производства биополимеров из сточных вод.
- Технологии, основанные на этих процессах, являются **новыми**, и нет доступных применений промышленного масштаба для получения этих данных.



ДРУГИЕ ЦЕННЫЕ ВЕЩЕСТВА

Методы восстановления металлов



ЧТО И ГДЕ МОЖЕТ БЫТЬ ВОССТАНОВЛЕНО?

Тип осадка	Zn	Cr	Cu	Ni	Pb	Fe	Mn	References
Анаэробно сброженный осадок	663	255	622	57	72200	nil	nil	Wong <i>et al.</i> (2004)
Анаэробный осадок сточных вод	nil	300	200	180	nil	400	400	Lombardi <i>et al.</i> (2001)
Анаэробно сброженный осадок	181	256	47	88	64400	nil	nil	Wong <i>et al.</i> (2002)
Анаэробно сброженный осадок сточных вод	79.2 128	153 111	nil	nil	nil	nil	nil	Gu <i>et al.</i> (2004)
Анаэробно сброженный осадок сточных вод	85.6							
Осадок сточных вод	nil							
Кожевенный шлам	nil							
Осадок сточных вод	nil							
Навоз свиней	10.3							
Анаэробный ил	10.4							
Свиной навоз	10.41							
Осадок сточных вод	nil							

Металл	Среднее содержание металлов Mg / кг сухого вещества	Максимальное содержание металла Mg / кг с.в.	Осадок, тонна с.в. / год	Относительный потенциал годовой прибыли на основе среднего содержания металла и средней цены (в долл. США) на металл (в течение 2005-2015 гг.)	Относительный годовой потенциал прибыли, основанный на максимальном содержании металла и наивысшей цене на металл (\$) (в течение 2005-2015 гг.)
Cu	285	1050	8580	18,706	108,966
Ni	29	66	8580	7962	29,446
Al	16,885	30,500	8580	314,946	2,170,740
Zn	910	2330	8580	23,540	88,761
Ag	7	108	8580	45,516	1,162,272

(2013)

Zhu *et al.* (2013)

Источники. инновационные технологии очистки сточных вод и восстановления ресурсов, J.Lema, S.Suarez



МЕТОДЫ

Химическое
выщелачивание - КИСЛОТЫ

Осаждение
Адсорбция

Биовыщелачивание

$Fe^{2+} + H^+ + O_2 \text{ (bacteria)} \rightarrow Fe^{3+} + H_2O$

$Metal-X + Fe^{3+} \rightarrow M^{2+} + Fe^{2+}$

$Metal-S + O_2 \text{ (bacteria)} \rightarrow M^{2+} + SO_2$

$Metal-O + 2H^+ + SO_4^{2-} \rightarrow Me^+ + SO_4^{2-} + H_2O$

$S^0 + O_2 + H_2O \text{ (Bacteria)} \rightarrow H^+ + SO_4^{2-}$

Разделение металлов

- Жидкостно-жидкостная экстракция
- Электродиализ
- Мембранная фильтрация

Восстановление металлов

- Электролитический (электролиз)
- Биоэлектрохимические методы



ВОССТАНОВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ: Итоги

- Наиболее экономичные металлы, извлекаемые из осадка: (1) Al (2) Ag (3) Cu (4) Zn (5) Ni
- Годовой доход по Al, не принимая во внимание эксплуатационные расходы и при условии полного восстановления составляет 2,170,740 \$
- Существующие методы сложны и основаны на выщелачивании (химическом или биологическом), разделении металлов и извлечении металлов.



55

ДРУГИЕ МЕТОДЫ



56

ПРЯМОЙ ОСМОС

Мембраны ПО также исследуются в сочетании с другими технологиями, такими как использование в МБР, использование с мембранной дистилляцией и в сочетании с биоэлектрохимическими системами, которые используют микробные взаимодействия для достижения восстановления биоэнергии из органических соединений.



Источники: Forward Osmosis in Adv. In MT and Application, 2017 57

ЕСТЕСТВЕННЫЕ (ПРИРОДНЫЕ) МЕТОДЫ (NBS)

Photo: © SyrnX/Shutterstock.com



Источники: UN Water, WWDR 2019

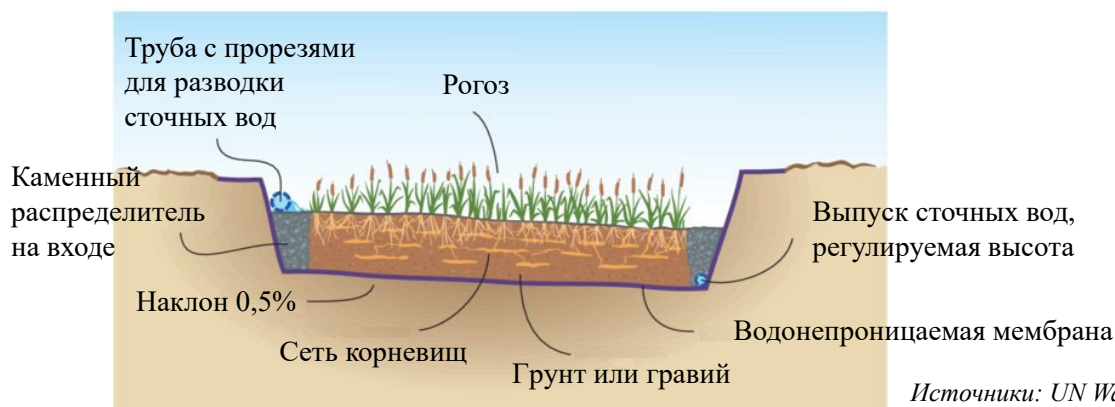
6.4 Существенно повысить эффективность водопользования во всех секторах и обеспечить устойчивое потребление и снабжение пресной водой для решения проблемы нехватки воды и значительного сокращения числа людей, страдающих от нехватки воды.	Очень высокий	NBS, которые улучшают доступность воды в почве для богарных культур (например, ресурсосберегающее земледелие и т. д.)	Очень высокий 6.1, 6.3, 6.6
	Высокий	Сбор воды, совместное использование подземных и поверхностных вод, усиление пополнения запасов подземных вод за счет улучшения землепользования, городская зеленая инфраструктура (например, проницаемые тротуары, устойчивая городская дренажная система)	Высокий 6.1, 6.3, 6.6

ЕСТЕСТВЕННЫЕ (ПРИРОДНЫЕ) МЕТОДЫ

Построенные водно-болотные угодья

Сточные воды обрабатывают с помощью комбинации биологических и физических механизмов, в том числе седиментации, фильтрации, биологической деградации, адсорбции и осаждения.

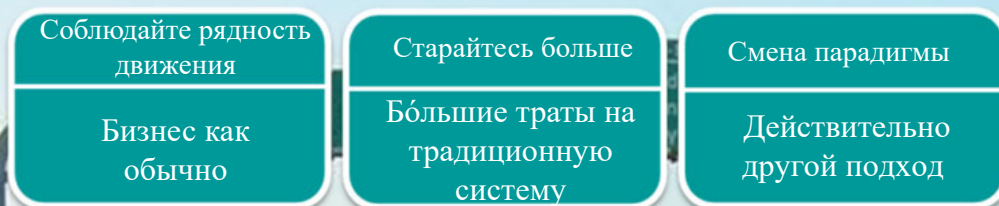
Они способны на выходе производить воду подходящего качества для защиты окружающей среды, для орошения, а также для различных городских нужд.



Источники: UN Water, WWDR 2019



59

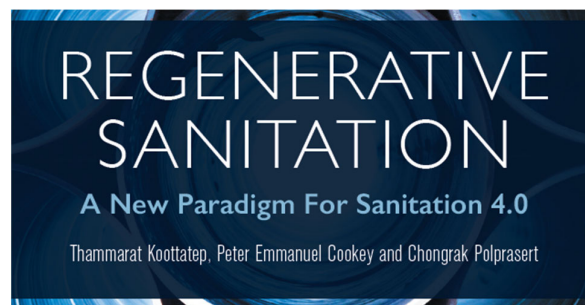
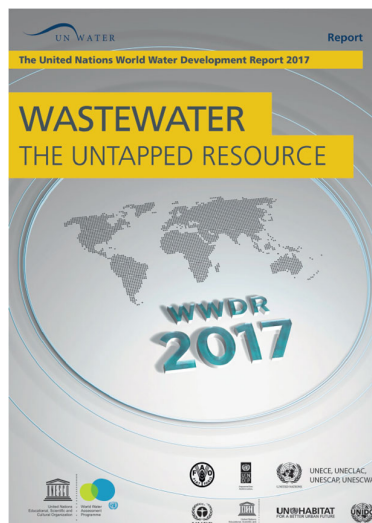
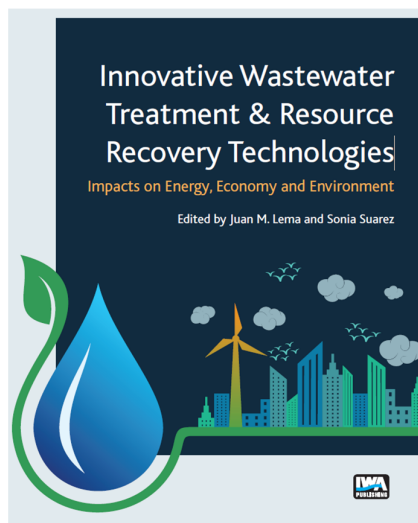


Ожидается, что будущие очистные сооружения будут доставлять **восстановленные ресурсы** и **высококачественную воду** для повторного использования в различных секторах, будучи при этом рентабельными и самодостаточными с точки зрения энергии. UN-Water, 2017



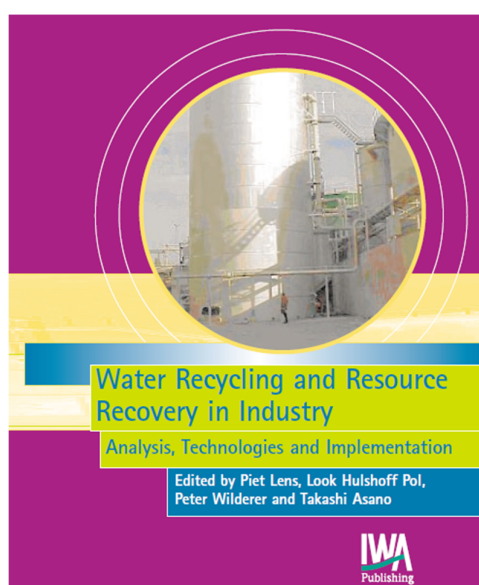
60

ЛИТЕРАТУРА



61

ЛИТЕРАТУРА



62