ГОДИШНИК НА УНИВЕРСИТЕТА ПО АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ СОФИЯ

Том Volume 59 2026 Брой Issue 3

ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING AND GEODESY SOFIA

DOI: 10.71167/uaceg.2026.590303

Получена: 12.03.2026 г.
Приета: 08.04.2026 г.

КОМПЛЕКСНА ОЦЕНКА НА АЛТЕРНАТИВНИ ТЕХНОЛОГИИ ЗА ПРЕЧИСТВАНЕ НА ГРАДСКИ ОТПАДЪЧНИ ВОДИ – БАЗИРАНИ НА ПРИРОДАТА И ВДЪХНОВЕНИ ОТ НЕЯ

Д. Вълчев[1]

Ключови думи: *природнобазирани решения, пречистване на отпадъчни води, влажни зони, реактори с хранителна верига, аеробна гранулирана утайка, Organica, Nereda, оценка*

РЕЗЮМЕ

Оценени са три иновативни технологии за пречистване на градски отпадъчни води, базирани на природата или вдъхновени от нея, в контекста на нарастващите изисквания към ефективността и устойчивостта на ПСОВ. Изкуствените влажни зони се характеризират с много ниска енергийна консумация (0,28 – 11,56 kWh/ЕЖ·год.) и проста експлоатация, като могат да осигурят екосистемни ползи и частично възстановяване на биогенни елементи чрез растителна биомаса (2 – 4,9 g P/m²·год.). Основните ограничения са необходимостта от значителна площ и по-ниска гъвкавост при много ниски допустими концентрации на изход за N и P без допълнително стъпало. Най-подходящи са за агломерации до 10 000 ЕЖ, децентрализирани системи и допречистване. FCR-Organica предлага компактност (до 60 % по-малка площ), стабилни процеси (12 – 18 kg/m³ биомаса) и висока обществена приемливост (зелена интеграция в градската среда), но изисква по-сложно оборудване и квалифицирана експлоатация. Консумацията на енергия е 25,11 – 29,93 kWh/ЕЖ·год. (ПСОВ < 10 000 ЕЖ) и 17,58 – 29,96 kWh/ЕЖ·год. (ПСОВ от 10 000 до 100 000 ЕЖ). AGS-Nereda осигурява интензификация на процесите (до 75 % спестена площ), отстраняване на C, N и P в един реактор без вторични утаители (ISV < 50 mL/g) и енергия 17,80 – 22,26 kWh/ЕЖ·год. (ПСОВ от 10 000 до 100 000 ЕЖ) и 9,75 – 17,14 kWh/ЕЖ·год. (ПСОВ > 100 000 ЕЖ), но е чувствителна към режима на работа, стабилност на гранулите и изисква по-дълъг пусков период. И трите технологии са приложими в България при коректно съобразяване с местните особености и ограничения.

[1] Добрил Вълчев, гл. ас. д-р инж., Център за компетентност “Clean & Circle”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: dvalchev_fhe@uacg.bg

1. Въведение

Конвенционалните пречиствателни станции за отпадъчни води (ПСОВ), базирани основно на активна утайка (в различни модификации), са гръбнакът на градското пречистване в Европа и по света. Те са технологично доказали се, изследвани в дълбочина и достатъчно надеждни, за да могат да осигурят стабилно отстраняване на органично въглеродно замърсяване (под формата на биохимична потребност от кислород – БПК и химична потребност от кислород – ХПК), както и азот (N) и фосфор (P) [1, 2]. Въпреки тази масова застъпеност в глобален мащаб, днес те все по-често се оценяват като неефективни в по-широк смисъл – поради високите им енергийни разходи, значимите им газови емисии и генерираните количества излишни утайки, изискващи управление както на станцията, така и извън нея. Тези негативни ефекти се подсилват и водят до нарастващи разходи при настъпване на необходимост от достигане на по-високи емисионни и екологични стандарти [3 – 6]. Показателно е, че при оценките на консумацията на енергия Европейският Съюз (ЕС) изрично идентифицира отвеждането и пречистването на градските отпадъчни води като един от големите консуматори на енергия в публичния сектор, което усилва натиска към енергийна и емисионна оптимизация [7].

Паралелно с това, европейските изисквания към качеството на пречистената отпадъчна вода на изход ПСОВ и към енергийната ефективност на станциите стават по-строги. Преработената Директива за градските отпадъчни води разширява обхвата към по-малки агломерации и въвежда нови задължения – изграждане на канализационна система за събиране и най-малко вторично пречистване (отстраняване на БПК) за агломерации ≥ 1000 еквивалентни жители (ЕЖ) (с хоризонт до края на 2035 г.), по-строги изходни концентрации по N и P, допълнително (четвъртично) пречистване за микрозамърсители с финансиране на принципа „замърсителят плаща“, както и поетапно постигане на пълна енергийна неутралност до 2045 г. за всички ПСОВ над 10 000 ЕЖ (от 20 % използване на собствени енергийни източници до 2030 г. до достигане на 100 % неутралност до 2045 г.) [8]. На практика това стимулира внедряването на компактни и енергийно оптимизирани системи за пречистване на отпадъчни води. Нещо повече, Делегираният регламент на ЕС 2021/2139 (EU Taxonomy Climate Delegated Act) дава конкретни стойности за ефективно работещи ПСОВ, за да имат те съществен принос за смекчаване на изменението на климата – нетното енергопотребление на ПСОВ трябва да е равно или по-ниско от: 1) 35 kWh на ЕЖ за година (kWh/ЕЖ·год.) за ПСОВ с капацитет под 10 000 ЕЖ; 2) 25 kWh/ЕЖ·год. за ПСОВ с капацитет между 10 000 и 100 000 ЕЖ; 3) 20 kWh/ЕЖ·год. за ПСОВ с капацитет над 100 000 ЕЖ [9]. Освен това, в европейската рамка има ясна посока на стратегическо развитие в сферата на пречистването на отпадъчни води като се дава приоритет както на екстензивните природнобазирани решения (вкл. влажни зони и зелена инфраструктура), така и на оптимизирани интензивни технологии за пречистване, които са по-ефективни от гледна точка на консумация на енергия, намаляване на емисиите, генериране на излишни утайки и възможност за възстановяване на ресурси. Европейската зелена сделка поставя общия курс към климатична неутралност, кръгова икономика и възстановяване на екосистеми, което поставя акцента върху решения, които едновременно пречистват и възстановяват природни функции [10]. Стратегията на ЕС за биоразнообразието до 2030 г. изрично насърчава системното интегриране на зелена инфраструктура и природнобазирани решения в градското планиране и подчертава ролята на влажните зони [11]. Стратегията на ЕС за адаптация към климатичните промени (2021) и свързаните с нея ключови действия (Climate-ADAPT) поставят силен акцент върху природнобазираните решения и екосистемнобазирани мерки за управление на водните рискове и устойчивост, като стимулира инвестирането в тях и ги определя като път към постигането на целите на ЕС за устойчивост на климатичните промени [12].

България е пряко обвързана с тези завишени изисквания и стратегически политики на ЕС и с необходимостта от ускорено изграждане и/или модернизация на ВиК инфраструктурата в страната. Според официалните програмни документи, в данните от 2024 (последен пълен наличен доклад по чл. 15 и чл. 17 от Директива 91/271), докладвани към Европейската комисия (ЕК) от Министерството на околната среда и водите (МОСВ) – в България от общо 328 агломерации над 2000 ЕЖ 273 не са свързани с ПСОВ. Съгласно доклада 199 агломерации са в несъответствие, от които 1 е над 100 000 ЕЖ, 19 са в диапазона 10 000 до 100 000 ЕЖ и 179 са в диапазона 2000 до 10 000 ЕЖ [13, 14].

На този фон не е изненадващо, че в глобален мащаб се ускорява разработването и внедряването на технологии, които адресират слабостите на конвенционалните ПСОВ – както чрез оптимизиране на използваната площ в план и интензификация на биологичните процеси, така и чрез използване на природнобазирани решения, които облекчават и улесняват експлоатацията и намаляват разходите. В тази връзка, целта на настоящата статия е да запознае колегите ВиК инженери в България с три обещаващи, иновативни технологии за пречистване на отпадъчни води, които са базирани на природата (екстензивни) или вдъхновени от нея (интензивни) – влажни зони, FCR-Organica и AGS-Nereda, като същевременно извърши анализ и комплексна оценка на всяка от тях, разглеждайки технологичните им предимства и недостатъци в категориите: „Разходи и енергия“, „Експлоатация и утайки“, „Ефективност и нормативи“, „Хидравлика и площ“, „Климат и сезонност“. Анализът също представя и допълнителните ползи и тяхното евентуално възможно приложение в съществуващи и нови ПСОВ. Тази оценка би била изключително полезна в контекста на изпълнението на актуализираните директиви, документи, стратегии и изисквания на ЕС, които България предстои да изпълнява и обемът работа, който трябва да бъде свършен за в бъдеще, за да се постигне съответствие по тях.

2. Алтернативни технологии за пречистване на градски отпадъчни води – базирани на природата и вдъхновени от нея

2.1. Изкуствени влажни зони (CW)

2.1.1. Описание на технологията

Изкуствените влажни зони (CW) са екстензивни технологии за пречистване на отпадъчни води, които симулират и използват процесите в естествените влажни екосистеми (блата, мочурища, торфища, блата, тинести местности), намиращи се в топографски ниски места (депресии) или периодично наводнявани сухи речни корита [15].

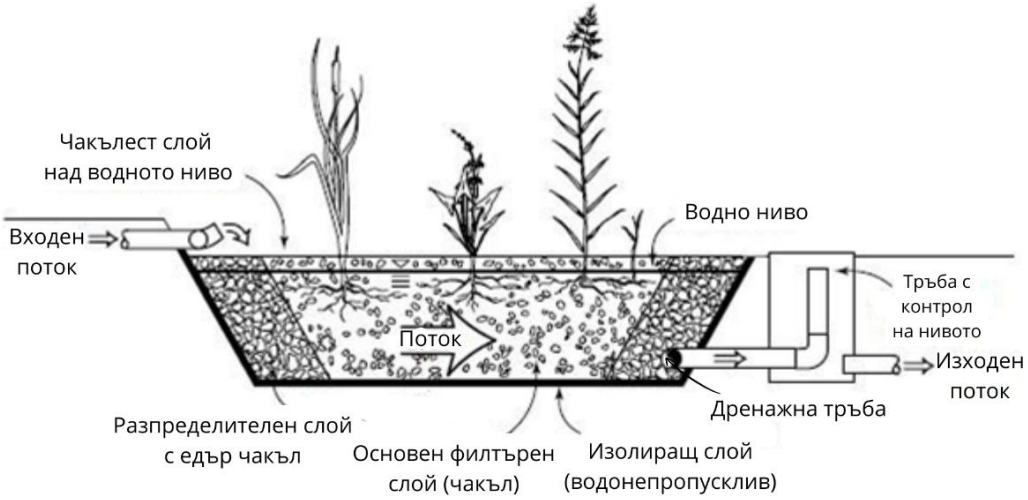
Процесът на пречистване в CW се осъществява чрез активни микроорганизми във водната среда, развитието на адаптирани влаголюбиви растителни видове (макрофити), проникването на естествена слънчева светлина и дълъг хидравличен времепрестой (HRT). Трите основни типа влажни зони са: 1) CW със свободна водна повърхност (CW-FWS); 2) CW с хоризонтален подповърхностен поток (CW-HSSF) и 3) CW с вертикален поток (CW-VF) [16].

Първият тип – със свободна водна повърхност (FWS), наподобява естествените блата и осигурява среда за диви животни. Към системата не се добавя филтриращ слой, а растителността плава в откритата вода. CW-FWS наподобяват естествените блата и обикновено привличат насекоми, мекотели, риби, земноводни, влечуги, птици и

бозайници, затова рядко се използват като вторичен процес на пречистване на отпадъчни води и няма да бъдат разгледани в тази статия [16].

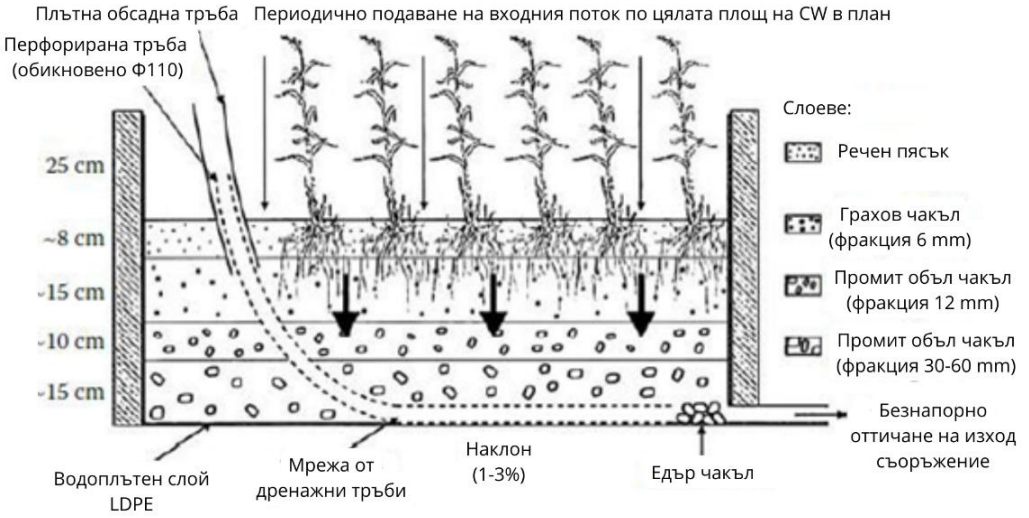
Във втория тип – влажни зони с хоризонтален подповърхностен поток (CW-HSSF) (фиг. 1), макрофитите се засаждат в чакълест или почвен слой (дълбочина на субстрата между 0,30 и 0,80 m). Отпадъчна вода на вход преминава през филтриращия материал, корените и ризомите на растенията и се пречиства. Водният поток остава под повърхността на влажната зона (0,05 – 0,15 m). Тъй като пречистената вода няма директен контакт с повърхността, рискът за здравето на дивите животни и хората е сведен до минимум и не се благоприятства размножаването на комари и други насекоми. Дъното на леглото е покрито с непропусклива геомембрана и е с наклон от 1 – 3 %, за да се улесни гравитационният поток към изхода на съоръжението [16, 17].

CW-HSSF влажните зони обикновено се използват за по-малки дебити и са по-скъпи от FWS системите поради необходимостта от закупуването на допълнителни материали, но могат да работят в по-сурови условия. По-студеното време има по-малко влияние върху процеса на пречистване, тъй като повърхностният слой може да бъде изолиран. Най-ефективното приложение на влажните зони от типа CW-HSSF е в пречистването на битови отпадъчни води. Отстраняването на органични (ОВ) и суспендирани вещества (НВ) се подобрява от наличието на растителни корени и прести среди, които благоприятстват образуването на биофилм [17]. CW-HSSF влажните зони намират най-широко приложение в Съединените американски щати (САЩ) и Европа [16 – 18].



Фиг. 1. Схема на CW-HSSF влажни зони (адаптирана по [16, 18])

Третият тип – CW с вертикален поток (CW-VF) (фиг. 2) са подобни на биореакторите с прикрепена биомаса (биофилтри) за пречистване на отпадъчни води. Езерото е запълнено със слоеве от филтриращ материал (пясък и чакъл), а макрофити са засадени на повърхността на езерото, проникващи до определена дълбочина. Отпадъчните води се разпръскват по цялата площ на реактора. Капацитетът за пренос на кислород е висок и CW-VF изискват по-малка площ – до 2 m^2 за ЕЖ в сравнение с CW-HSSF – обикновено 5 до 10 m^2 за ЕЖ [17].



Фиг. 2. Схема на CW-VF влажни зони (адаптирана по [16, 18])

Подобно на другите видове влажни зони, дъното е покрито с водонепропусклив слой (геомембрана, LDPE и др.) или може да е изработено от армиран бетон. CW-VF се използват главно в Европа – особено в Дания, Австрия, Германия, Франция и Обединеното кралство, но също и в Съединените щати и Китай [15, 19 – 21]. Те се използват главно за пречистване на отпадъчни води от битов и градски характер, както и за ретензия (задържане) на дъждовни води с цел облекчаване на канализацията, пречистване на дъждовния (при разделна канализация) или прелелия по време на дъжд (при смесена канализация) отток и постепенно натоварване на водоприемника.



а) *б)*

Фиг. 3. Практическо приложение на влажните зони по света

а) Benjakitti Forest Park, Банкок, Тайланд – влажна зона за задържане на дъждовни води [22]; б) The Arcata Marsh and Wildlife Sanctuary, Арката, Калифорния, САЩ – влажни зони и окислителни езера за вторично и третично пречистване на градски отпадъчни води [23]

При всички видове изкуствени влажни зони ефектът на пречистване по ОВ е значителен, но по азот (N) и фосфор (P) обикновено достига по-ниски нива, което ги прави подходящи за прилагане на места, където не се изисква отстраняването на N и P, които в българското законодателство включват агломерации между 2000 и 10 000 ЕЖ [17, 24].

Обикновено системите CW-FWS се използват главно в по-голям мащаб в сравнение с другите два вида (обичайният среден проектен дебит за CW-FWS е приблизително 1050 m^3/d; за CW-HSSF – приблизително 9,5 m^3/d и за CW-VF – приблизително 2,1 m^3/d) [16]. Когато се налага по-високо качество на изходния поток пречистена отпадъчна вода и условията го позволяват, трите вида CW, описани по-горе, могат да се комбинират в каскаta от последователно свързани влажни зони, например VF, последвана от HSSF или VF, последвана от HSSF плюс FWS и т.н. Също така са налични и модификации с аерирани влажни зони, които да осигурят по-интензивно протичане на процесите или хибридни системи, комбиниращи интензивно и екстензивно пречистване [25].

2.1.2. Предимства и недостатъци на влажните зони

Основните предимства и недостатъци на изкуствените влажни зони са обобщени в табл. 1. Използваните данни в таблицата са съгласно [9, 16, 26 – 35].

Таблица 1. Предимства и недостатъци на изкуствените влажни зони

Група	Предимства	Недостатъци
Разходи и енергия	Ниски CAPEX/OPEX*, минимален разход на енергия, без използване на аерация, помпи и/или реагенти. OPEX – 2 до 10 пъти по-ниски от конвенционалните технологии. По данни от реални пълномащабни инсталации за под 10 000 ЕЖ влажните зони имат разход на електроенергия в диапазона 0,28 до 11,56** kWh/ЕЖ·год., което означава, че попадат в оптималния диапазон за ефективност съгласно Делегирания регламент на ЕС 2021/2139.	Голяма необходимост от площ, което обуславя разходи за земя и дейностите, свързани с това (изкопни работи, облицовки, макрофити, пълнежи и т.н.).
Експлоатация и утайки	Изключително опростена експлоатация без нужда от персонал с висока квалификация. Малко механични компоненти, минимално генериране на утайки/биомаса, която след това няма усложнено управление. Възможност за локално прилагане.	Нужда от косене и изнасяне на биомаса. По-слабо „фино“ управление на процесите. Риск от натрупвания на биомаса и/или утайка, водещи до миризми и запушване.
Ефективност и нормативи	Ефективно отстраняване на органични вещества (БПК), суспензии и метали. Гъвкавост и самобалансиране; възможност за работа в проточен или цикличен режим. Възможно намаляване на N, P и патогени (в каскада или в хибридна система от реактори).	Риск от непълна денитрификация (наличие на NO_x в изходния поток) и неефективно пречистване при пикови натоварвания или строги изисквания по азот на изход ПСОВ.
Хидравлика и площ	Подходящи за децентрализирани решения на място, като CW-VF заемат най-малко площ от всички видове влажни зони.	Голяма необходимост от площ. Чувствителност към недобро разпределение на потока в тялото на CW. Риск от преминаване на потока по транзитни пътища при неправилно проектиране.

Климат и сезонност	Могат да функционират в топъл и студен климат при подходящо проектиране.	Възможни са сезонни колебания поради биологичните процеси. Риск от зимни спадове на кинетиката или локални хидравлични проблеми. Риск от комари при CW-FWS и щети по системата от диви животни.
Допълнителни ползи	Екосистемни ползи – създават растително биоразнообразие, защитават и произвеждат флора и фауна, могат да се интегрират в градска и крайградска среда, като създадат място за естетично, рекреационно, търговско и образователно използване от хората. Задържане на дъждовни/преливни води и частично пречистване преди постъпване във водоприемника. Липса на шумово замърсяване. Възможност за възстановяване на биогенни елементи (макрофитите могат да възстановят 2 – 4,9 g P/m^2·год.).	
Приложение	По света са известни хиляди обекти, в които се прилагат изкуствени влажни зони за пречистване или допречистване на отпадъчни води. Технологията е широко застъпена в държави като Франция (близо 20 % от общата бройка ПСОВ в страната), Австрия (над 5000 станции), Обединеното кралство, Чехия, Дания, САЩ, Канада, Австралия и др. Тя намира приложение като система за локално/децентрализирано пречистване за пречистване на отпадъчни води в малки ПСОВ – под 2000 ЕЖ; малки ПСОВ от 2000 до 10 000 ЕЖ; при средни и големи ПСОВ над 10 000 ЕЖ при условие, че има подходящи предпоставки (площ, възможност за каскада или комбинация от интензивни и екстензивни технологии и т.н.); като метод за допречистване и подобряване на естетическите условия преди заустване при ПСОВ от всякакъв вид.	

** Съкращения: CAPEX – капиталови разходи; OPEX – експлоатационни разходи.*
*** Стойностите са изчислени на базата на докладваните данни от литературата за годишната консумация на ПСОВ и нейния капацитет.*

2.2. Биореактори, базирани на хранителната верига (FCR-Organica или IFAS)

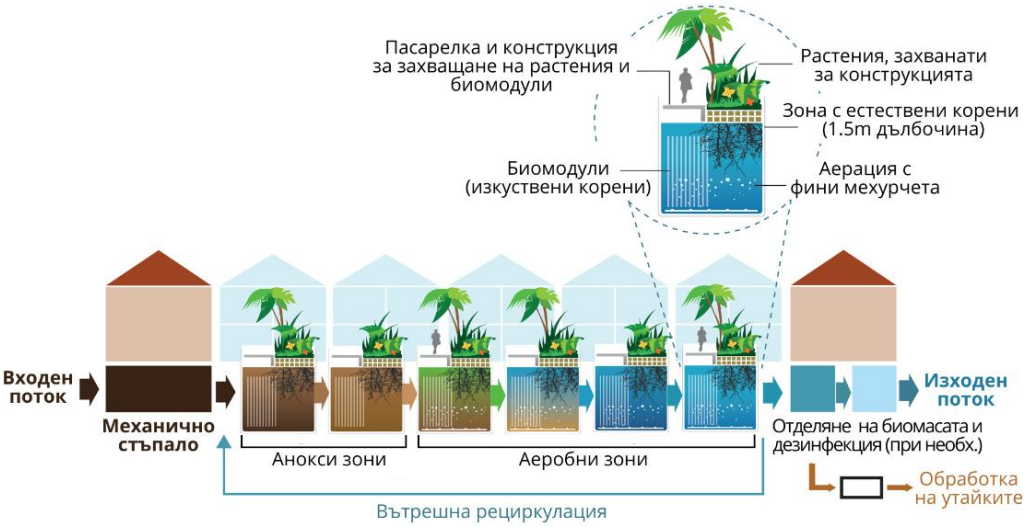
2.2.1. Описание на технологията

Технологията Organica – реактори с хранителна верига (Food Chain Reactor – FCR) или познати още като интегрирани системи с прикрепен биофилм и активна утайка (IFAS), е създадена, за да приспособи по-добре пречиствателните станции за отпадъчни води в градската среда. Тя не само изисква по-малко пространство от конвенционалните пречиствателни станции, но и има естетичен вид на оранжерия, като не произвежда неприятна миризма [36] (фиг. 4).

а)  *б)* 

Фиг. 4. Практическо приложение на FCR-Organica по света
а) Южна Пеща, Будапеща, Унгария – външен изглед на ПСОВ с капацитет 80 000 m^3/d;
б) Вусонг, Шанхай, Китай – изглед отвътре на ПСОВ с капацитет 40 000 m^3/d [36]

Биологичното пречистване на отпадъчните води във FCR системите се постига чрез каскада от реактори, разположени след стандартно механично пречистване (фиг. 5). Технологията се базира на принципа на хибридните биореактори като работи с потопена прикрепена и суспендирана биомаса, която е комбинирана с пречиствателните способности на корените на растенията (биомасата се прикрепя за корените, които осигуряват изключително висока специфична повърхност – 12 000 m^2 на m^3 реактор с до 3 cm дебелина на биофилма) [36, 37]. В допълнение на естествените корени на растенията, към този вид биореактори се добавят и биомодули със синтетични коренови системи, които осигуряват допълнителна повърхност за прикрепване на микроорганизмите [38]. По този начин се получава изключително висока специфична повърхност за захващане на микроорганизмите, което води интензивното им развитие и изключително високата им плътност – 12 до 18 kg/m^3, при стандартни стойности от 3 до 5 kg/m^3 при конвенционалните биобасейни с активна утайка. Това позволява формирането на значително биоразнообразие (над 3000 вида), което формира хранителна верига в последователните секции (каскади) на реактора, прерастващо от микро- към макрониво [36, 37]. Всяка следваща част от системата се заема от все по-висши организми, които използват като биохимичен субстрат останалите колоидни и разтворени замърсители, както и по-низшите организми. Съответно, третираната вода се избистря и плътността ѝ намалява с всяка следваща секция, което улеснява аерацията и намалява разхода на електроенергия [37]. В резултат на това, в FCR системите се получава изключително стабилен процес, който повишава ефективността на пречистване и позволява проектирането и изграждането на значително по-компактно биологично стъпало в ПСОВ в сравнение с широко разпространените конвенционални системи. Това води до повишена ефективност, по-голяма гъвкавост, по-нисък енергиен разход, както и по-малко количество утайка с по-голяма плътност. Отстраняването на утайката след процеса на пречистване се извършва с дискови филтри или вторични утаители, като няма нужда от рециркулация на активна утайка обратно в биореактора [36 – 38, 39].



Фиг. 5. Технологична схема на FCR-Organica система [36]

Системите FCR се разполагат в оранжерии, които от една страна спомагат развитието на макрофитите, а от друга – ограничават разпространението на неприятни

миризми и намаляват въглеродните емисии (поемат се от растенията) [36, 37, 39]. Самите биореактори са разположени под макрофитите (фиг. 5) и се състоят от 1) резервоар за събиране на отпадъчните води след стъпалото за механично пречистване; 2) коренова система от естествени растения (макрофити); 3) поддържаща система – биомодули (изкуствени корени и захванати за конструкцията на реактора); 4) аерационна система с мембранни дифузори; и 5) зона над реактора за експлоатация и поддръжка от персонала. Естествените корени на растенията достигат до 1,5 m дълбочина, докато другата част на реактора е запълнена с биомодули (синтетични корени). Основата на растението и горната част на биомодулите са прикрепени към конструкция, състояща се от метална решетка и насипни глинени материали, които се захващат за конструкцията на биореактора и позволяват лесно регулиране и изваждане за обслужване и профилактика [36 – 40].

2.2.2. Предимства и недостатъци на биореакторите, базирани на хранителната верига

Предимствата и недостатъците на технологията FCR-Organica/IFAS са представени в табл. 2, като са обобщени от [9, 24, 36 – 47].

Таблица 2. Предимства и недостатъци на FCR-Organica/IFAS

Група	Предимства	Недостатъци
Разходи и енергия	Ниски CAPEX – по-висока концентрация на биомасата и по-интензивни процеси, които редуцират необходимата площ. Тя е около 60 % по-малка в сравнение с конвенционалните ПСОВ, съответно и разходите за материали за изграждане на станцията са значително по-ниски. Ниски OPEX – 20 до 50 % по-нисък разход на електроенергия (ефективна аерация и липса на рециркулация на активна утайка) и 20 до 30 % по-малко генерирана излишна утайка в сравнение с конвенционалните ПСОВ. Няма нужда от изграждане на санитарно-охранителни зони (СОЗ) поради липсата на миризми и естетически вид. Общата дължина на канализационната мрежа се редуцира поради липсата на необходимост от изграждане на дълги главни колектори. По данни от реални пълномащабни ПСОВ, работещи с FCR-Organica под 10 000 ЕЖ – 25,11 – 29,93* kWh/ЕЖ·год., в диапазона 10 000 – 100 000 ЕЖ, ПСОВ има разход на електроенергия в диапазона 17,58 – 29,96* kWh/ЕЖ·год., което означава, че попадат в оптималния диапазон за ефективност съгласно Делегирания регламент на ЕС 2021/2139.	Независимо, че площта е по-малка, при интегриране в градска среда е възможно цените на имотите да са по-високи и законовите процедури усложнени. Допълнителни разходи за оранжерии, растения и биомодули. Някои видове високо ефективни биомодули са патентована технология, което ограничава възложителите при избор на доставчик на технологично оборудване на този вид станции.
Експлоатация и утайки	Автоматизирана експлоатация. Генериране на малко количество излишна утайка – до около 35 % по-малко от конвенционал-	Въпреки значителната степен на автоматизация. експлоатацията изисква квалифициран персонал,

	ните ПСОВ. Образуваната утайка се стабилизира в самия биореактор – възрастта на утайката достига до около 50 d, съответно, не е необходимо изграждане на допълнителни съоръжения за стабилизиране по пътя на утайките.	който е запознат с технологията. Нужда от поддръжка на растителността. Системата изисква по-дълъг пусков период в сравнение с конвенционалните ПСОВ заради времето за развитие на биофилма и макрофитите.
Ефективност и нормативи	Много гъвкави системи, които са устойчиви на значителни колебания в количеството и качеството на отпадъчните води на вход ПСОВ заради стабилността на прикрепената биомаса. Поради намаляването на плътността на водата във всяка следваща секция – подобрен пренос на кислород и по-лесно аериране (α = 0,90 – 0,95). Ефективно отстраняване на органични вещества (БПК), суспензии, азот и фосфор.	Възможно е на моменти да настъпи проблем с преноса на разтворен кислород в реактора при аерация в някои от секциите поради наличието на естествени и изкуствени корени във водния обем и необходимостта от дифузията на кислорода до биофилма. Това може да предизвика периоди с необходимост от по-интензивна аерация в сравнение с конвенционалната активна утайка.
Хидравлика и площ	FCR-Organica могат да функционират при много по-високо хидравлично и органично натоварване на вход при по-малки обеми на реакторите (съответно по-малка площ в план – до 3 пъти по-малки от конвенционалните реактори) поради по-интензивните процеси в биореакторите на технологията. Това ги прави изключително подходящи както за нови ПСОВ, така и за реконструкция на съществуващи ПСОВ, особено в случаите, когато липсва необходима площ.	Ако се използва различен пълнежен материал вместо биомодулите със синтетични корени, е възможно под действие на силата на течението да се получи отнасяне на част от флуидизирания пълнеж с изходния поток. При реконструкция на съществуващи станции може да се наложи подмяна на оборудването за разбъркване и/или аерационна система и промяна в режима на работата им.
Климат и сезонност	Не се влияят от климатичните условия на района поради затворения характер на реакторите (закрити оранжерии), съответно функционират ефективно в топъл и студен климат при подходящо проектиране.	Растителността трябва да се подбере целесъобразно, за да може едновременно да вирее в условията на оранжерийно отглеждане в съответната климатична зона и да има подходяща коренова система за процесите на пречистване. Парниците от своя страна изискват специфична поддръжка при смяна на температурата – вентилация, конденз, влажност, отопление и т.н., които могат да усложнят експлоатацията в дадени моменти.
Допълнителни ползи	Могат естетически да се интегрират директно в градската среда, като създадат място за рекреационно, търговско и образователно използване от хората. Увеличават растителното биоразнообразие. Липса на миризми и намалено шумово замърсяване поради закрития характер на технологията. Възможност за рециклиране на биогенни елементи чрез събиране на биомасата от растенията в реактора. Намаляват въглеродния отпечатък на станцията, защото растенията поемат значителна част от CO_2 емисиите, отделени в процеса на пречистване.	

Приложение	Тази технология има над 120 станции по целия свят, намиращи се в над 18 държави. Прилагат се пълномащабно в Унгария, Китай, Канада, Нова Зеландия, Индонезия, Испания, Франция, Индия, Египет и други. Подходящи са за малки, средни и големи градски ПСОВ в трите диапазона, нормирани в емисионните норми на Република България – от 2000 до 10 000 ЕЖ, от 10 000 до 100 000 ЕЖ и над 100 000 ЕЖ. Подходящи при реконструкция на съществуващи ПСОВ, без необходимост от изграждане на нови съоръжения.

** Стойностите са изчислени на базата на докладваните данни от литературата за годишната консумация на ПСОВ и нейния капацитет.*

2.3. Биореактори с аеробна гранулирана утайка (AGS-Nereda)

2.3.1. Описание на технологията и приложение

Технологията Nereda използва процес с аеробна гранулирана утайка, който прави ПСОВ много по-ефективна, икономична и компактна.



а) *б)*

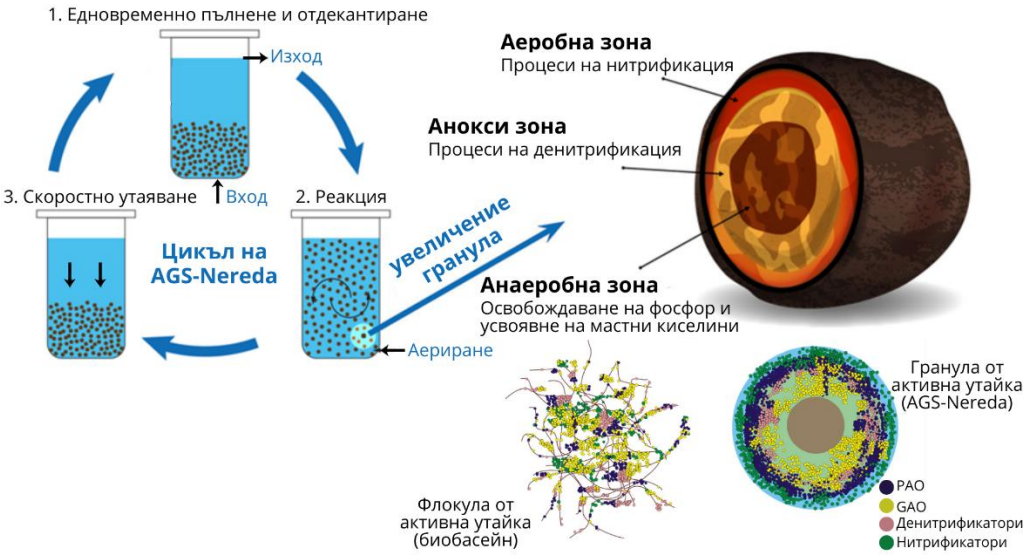
Фиг. 6. Практическо приложение на AGS-Nereda по света

а) Утрехт, Нидерландия – ПСОВ с капацитет 76 271 m^3/d (308 333 ЕЖ);
б) Кингарой, Австралия – ПСОВ с капацитет 450 m^3/d (10 001 ЕЖ) [48]

Системите Nereda работят в подобрен цикличен режим (оптимизиран SBR), който включва: 1) едновременно подаване на входящия поток отпадъчна вода и отдекантиране на изходящата пречистена вода; 2) едновременно биологично отстраняване на органичен въглерод (БПК), азот и фосфор; 3) изключително бърза фаза на утаяване [48, 49].

Процесът представлява комбинация между активна утайка и биофилм, които се комбинират в гранула, която се формира, без да се захваща биомасата за външен носител или филтърен пълнеж (фиг. 7). Напълно развитата работна биомаса в реактора е съставена от плътни гранули с размер от 0,2 до 16 mm, като разчита до голяма степен на създаването на специфични условия в реакторите, които да ограничат развитието на нишковидни микроорганизми, като същевременно създадат условия за интензивното развитие на фосфороакумулиращи организми (PAO) [52]. PAO са едни от най-тежките организми в системите с активна утайка и доминирането им в гранулите в комбинация с големия размер и гладка повърхност на гранулите води до подобрени утаителни способности – скоростта на утаяване е в диапазона 15 – 40 m/h с AGS, в сравнение с 1 m/h при конвенционалното пречистване със суспендирана биомаса в биобасейн и вторичен утаител [53, 54]. Индексът на утайката (ISV) е извънредно нисък, като петминутният

индекс (ISV_5 = 45 mL/g) е с почти същата стойност като трийстетминутния (ISV_{30} = 35 mL/g) [49]. Това показва изключително ефективно и бързо утаяване и не е необходима отделна, отнемаща време фаза на декантиране, както при конвенционалните SBR системи или отделен вторичен утаител, което прави технологията AGS-Nereda много компактна. Освен това всички биологични процеси на пречистване протичат едновременно в гранулите, като се изисква само един реактор (без зони или секции за денитрификация и нитрификация, както при конвенционалните системи с активна утайка). Всички необходими зони за пълно пречистване на отпадъчните води се намират в самата гранула и всички процеси протичат вътре в нея [48, 55, 56]. Това също така намалява значително общата нужда от помпи за рециркулация или изваждане на пречистени води (няма вътрешна и външна рециркулация), миксери, флоумейкъри и декантери (изходният поток просто прелива без специално устройство), което улеснява експлоатацията и поддръжката. Не са необходими допълнителни движещи се механични части, като декантери, тъй като отпадъчните води се изтласкват от резервоара вследствие на хидростатичното налягане (входният поток изтласква изходния и той прелива), което намалява разходите за придвижване на утайките и опростява експлоатацията [48, 56]. Тъй като Nereda използва специално разработени гранули вместо разпръсната в обема на реактора суспендирана биомаса, концентрацията на биомасата в реактора Nereda е много по-висока от тази в конвенционалните пречиствателни системи – над 8 kg/m^3, което води до значително по-интензивен процес за m^3 обем от реактора [49, 56, 57]. Това позволява по-малки ПСОВ да работят с по-високо хидравлично и органично натоварване на вход станция. Също така гранулираната биомаса (комбинация между активна утайка и биофилм) позволява по-голяма гъвкавост на биореактора и устойчивост на вариации в хидравличните параметри и замърсителното натоварване на вход ПСОВ [48, 50, 56].



Фиг. 7. Цикъл на работа и гранула в AGS-Nereda. Съкращения във фигурата – фосфороакумулиращи организми (PAO) и гликоген акумулиращи организми (GAO) [50, 51]

Утайките се обработват стандартно (уплътняване, стабилизиране и обезводняване), като се отделят по два начина – отделяне на остатъчната биомаса извън гранулите (т.нар. “selection spill”) и отделяне на гранулите. Първата се отделя на всеки цикъл (генериране на около 0,4 g утайка за 1 g ХПК) и също има подобрени утаителни способности (скорост

на утаяване около 4 m/h), независимо, че е флокулирана, а не гранулирана. Тя се отделя от реактора в рамките на около 10 – 15 min [56]. Това позволява използването само на гравитачни утайкоуплътнители (действащи и като изравнители), което премахва необходимостта от механични сгъстители и по този начин отново се облекчава експлоатацията. Друго предимство на този вид утайка е и това, че разградимостта ѝ е близка до тази на първичните утайки от конвенционалните ПСОВ, което подпомага процесите в метантанковете. Гранулираната утайка се отделя рядко и служи за инокулант за нови ПСОВ, като степента ѝ на стабилизация е по-висока от тази на утайките от биобасейните [56, 58].

2.3.2. Предимства и недостатъци на биореакторите с аеробна гранулирана утайка

Основните предимствата и недостатъците на технологията AGS-Nereda са синтезирани в табл. 3, съгласно [9, 24, 48 – 51, 55 – 57, 59 – 61].

Таблица 3. Предимства и недостатъци на AGS-Nereda

Група	Предимства	Недостатъци
Разходи и енергия	Значително редуцирани CAPEX – необходимата площ се намалява с близо 75 % в сравнение с конвенционалните ПСОВ (намалена площ и редуцирано оборудване). Понижени OPEX – разходите за енергия са до 50 % по-малко в сравнение с конвенционалните биобасейни поради намалените нужди за препомпване и аерация. Около 30 % от това се постига чрез намаляване на потребностите от въздух, поради разликата в поведението на бактериите между флокули и гранули (използване на субстрат и кислород). По данни от реални пълномащабни ПСОВ, работещи с AGS-Nereda в диапазона 10 000 – 100 000 ЕЖ, ПСОВ има разход на електроенергия в диапазона 17,80 – 22,26* kWh/ЕЖ·год., а за такива над 100 000 ЕЖ – 9,75 – 17,14* kWh/ЕЖ·год., което означава, че попадат в оптималния диапазон за ефективност съгласно Делегирания регламент на ЕС 2021/2139.	AGS-Nereda често намалява цялостно CAPEX, но може да прехвърли част от капиталовите разходи към автоматизацията – пълномащабните проекти разчитат на няколко реактора със или без изравнителни резервоари и множество сензори, които автоматично да контролират работата на станцията.
Експлоатация и утайки	Автоматизирана и опростена експлоатация, без рециркулационни потоци. Намаленото количество на технологичното оборудване улеснява експлоатацията и облекчава поддръжката. Също така, поради изцяло биологичното пречистване в AGS-Nereda, в биологичното стъпало не се използват реагенти. Флокулираната фракция от уайката се отделя лесно и	Основен недостатък е сложността на стартирането на реакторите – за достигането на желаното ниво на биомаса от около 8 kg/m^3 отнема около 9 месеца. Стабилността на гранулите е с известна уязвимост (риск от разпадане/връщане към флокули). Гранулиранта утайка се разгражда по-трудно от конвенционалната утайка, т.е. при увеличава-

	бързо. Гранулираната – много рядко и се използва за инокулант.	не на броя на AGS-Nereda станциите, необходимостта от гранулите като инокулант намалява, съответно, тяхната обработка на станцията ще изисква по-специфични условия.
Ефективност и нормативи	Изключително гъвкави системи, които позволяват работа при голяма вариация във входното натоварване по органичен въглерод, азот и фосфор, както и оптимизирана работа при значителни разлики във входящото водно количество (напр. ПСОВ Кингарой в Австралия работи при $Q_{сухо}$ = 450 m^3/d и $Q_{дъжд}$ = 6120 m^3/h). Без проблем достигат нормативните изисквания за изход ПСОВ по БПК, ХПК, суспендирани вещества, N и P.	Изисква се квалифициран персонал, който да познава технологията. Макар и да могат да работят при големи хидравлични натоварвания и вариации, „първият отток“ при дъжд може да доведе до по-къси цикли и да причини временни отклонения по N и P. Данните от някои пълномащабни ПСОВ изрично показват, че понякога при интензивни дъждове се налага компенсиране с химично отстраняване на P с коагуланти.
Хидравлика и площ	Подобреното утаяване, по-тежките гранули, по-интензивните процеси с гранулираната биомаса, премахването на необходимостта от отделни секции в биореактора и отделен вторичен утаител водят до значително намаляване на необходимата площ (до около 4 пъти в сравнение с конвенционалните ПСОВ) и разходите за технологично оборудване. Подобреният цикличен тип реактори позволява иновативна хидравлична работа на системата с едновременно пълнене и изпразване, което допълнително спестява площ.	Работата на цикли означава, че трябва да се осигури непрекъснатост на потока към серия реактори или към изравнителен резервоар, които трябва да бъдат внимателно координирани в случаите на интензивни дъждове, за да могат да се спазят нормативните прагове на азота и фосфора на изход ПСОВ.
Климат и сезонност	Технологията постига съответствие спрямо нормативните изисквания за БПК<25 mg/L TN<10 mg/L и TP<1 mg/L както през лятото, така и през зимата. Биореакторите AGS-Nereda притежават по-устойчива кинетика по отношение на температурата (вследствие на биофилма), защото ограниченията на дифузията и транспорта са по-малко зависими от температурата, отколкото растежът, така че се счита, че гранулираните системи са по-малко чувствителни към сезоните, отколкото системите със суспендирана биомаса.	На практика, инсталациите се справят с температурните разлики и сезонността чрез по-строга автоматизация (например, контрол на зададената стойност на DO и адаптивни циклични стратегии), но това също така засилва зависимостта от добри сензори/контрол, както и висока квалификация и компетентност на операторите.
Допълнителни ползи	AGS-Nereda дава възможност за възстановяване на ресурси като N, P и извънклетъчни полимерни вещества (EPS, алгинати и PHA) от излишната утайка. Емисиите на N_2O в AGS могат да бъдат редуцирани чрез оперативен контрол на станциите. Също така AGS не влошава определени показатели, като бактериалната резистентност например, които водят до вторични рискове.	

Приложение	Пречиствателните станции AGS-Nereda се използват в световен мащаб за пречистване на битови и промишлени отпадъчни води, като броят на действащите ПСОВ е над 100 в над 20 държави. Технологията се прилага в множество развити страни като Нидерландия, Обединеното кралство, Франция, Германия, Швеция, Швейцария, Полша, Португалия, САЩ, Бразилия, Австралия и др. Поради своята гъвкавост тази технология може да се прилага в широк диапазон от случаи – малки, средни и големи градски ПСОВ в трите диапазона, нормирани в емисионните норми на Република България – от 2000 до 10 000 ЕЖ, от 10 000 до 100 000 ЕЖ и над 100 000 ЕЖ. Изключително подходящи при разширение на съществуващи ПСОВ, особено когато не е налично свободно пространство за разширение или то е силно ограничено.

** Стойностите са изчислени на базата на докладваните данни от литературата за годишната консумация на ПСОВ и нейния капацитет.*

3. Изводи

Оценени са три от най-обещаващите иновативни технологии за пречистване на отпадъчни води, които са базирани на природата или вдъхновени от нея в контекста на постепенно увеличаващите се изисквания към ефективността на работа на ПСОВ.

Изкуствените влажни зони демонстрират изключително ниска енергийна консумация (0,28 до 11,56 kWh/ЕЖ·год.), проста експлоатация, добра устойчивост при хидравлични колебания и възможност за интеграция като природнобазирано решение с допълнителни екосистемни ползи и възстановяване на биогенни елементи чрез нарасналата растителна биомаса (2 – 4,9 g P/m^2·год.). Основните недостатъци обаче остават голяма необходима площ, зависимост от правилен хидравличен режим и сезонност (за някои видове растителност), както и ограничена гъвкавост при много ниски изходни лимити по N и P, без да се предвижда отделно стъпало за тяхното отстраняване. Най-приложими са за малки и средни агломерации (до 10 000 ЕЖ) за основно биологично пречистване или за допречистване преди заустване, вилни или туристически зони, децентрализирани решения (локално пречистване) и места с достатъчно налична земя.

От друга страна технологията FCR-Organica се характеризира с компактност (до 60 % по-малко необходима площ), по-ниски експлоатационни разходи (редукция с до 50 %) висока стабилност на биологичните и биохимичните процеси (биофилм/корени и концентрация на биомасата от 12 до 18 kg/m^3), изключително добра обществена приемливост, която позволява „зелено“ интегриране в градската инфраструктура със своя потенциал за по-ниски миризми, развита растителност и приветлив външен вид, подходящ за обособяване като парково пространство. Като основен недостатък обаче остава по-високата технологична сложност от конвенционалните технологии и нужда от квалифицирана експлоатация. Консумацията на енергията влиза в оптималния диапазон според актуалните документи на ЕС, като варира в диапазона 25,11 – 29,93 kWh/ЕЖ·год. за ПСОВ под 10 000 ЕЖ и в диапазона 17,58 – 29,96 kWh/ЕЖ·год. за ПСОВ от 10 000 до 100 000 ЕЖ. Подходяща е за малки, средни и големи градски ПСОВ, особено в случаите, в които има голям проблем с наличието на необходима площ, реконструкция на съществуващи ПСОВ и обекти, където социалната приемливост е от жизнено важно значение и е необходимо интегриране в градската среда.

AGS-Nereda също изисква много малка площ (до 75 % спестяване), постига високи скорости на пречистване и надеждно отстраняване на БПК, N и P в един реактор, често с по-ниска консумация на енергия и без вторични утаители (спестяване на до 50 % от енергийните разходи и работа при изключително нисък индекс на утайката от под

50 mL/g). В ПСОВ от 10 000 до 100 000 ЕЖ станцията има разход на електроенергия в диапазона 17,80 – 22,26 kWh/ЕЖ·год., а за такива над 100 000 ЕЖ – 9,75 – 17,14 kWh/ЕЖ·год. Основни недостатъци са все още слабо познатият по-сложен цикличен режим, рискът от проблеми със стабилността на гранулите в дългосрочен план и по-дългият пусков период. Най-приложима е за средни, до големи ПСОВ, особено при модернизация или увеличаване на капацитет на съществуващи ПСОВ при ограничена площ.

Трите разгледани технологии притежават изключително висок потенциал за оптимизиране на процесите на пречистване на градски отпадъчни води и приложение в България, като всички са с достатъчно висока степен на технологична готовност и се прилагат в световен мащаб – в Европа, Азия, Северна и Южна Америка.

Благодарности

Авторът благодари на проект №BG16RFPR002-1.014-0015: „Чисти технологии за устойчива околна среда – вода, отпадъци, енергия за кръгова икономика“, финансиран от българската програма „Изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“, съфинансирана от Европейския съюз, в рамките на който е подготвено настоящото проучване.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. *Roman, M. D. et al.* Biological Activated Sludge from Wastewater Treatment Plant before and during the COVID-19 Pandemic. // Int. J. Environ. Res. Public Health, 2021, **19**(18): 11323, https://doi.org/10.3390/ijerph191811323.

2. *Jenkins, D., Wanner, J.* Activated Sludge – 100 Years and Counting. IWA Publishing, 2014, ISBN 9781780404943.

3. *Eastern Research Group, Inc.* 2023 Revision to Life Cycle and Cost Assessments of Nutrient Removal Technologies in Wastewater Treatment Plants. United States Environmental Protection Agency (EPA), 2023, EPA 832-R-21-006A.

4. *Jamaludin, M. et al.* Modeling and Control Strategies for Energy Management in a Wastewater Center: A Review on Aeration. // MDPI, Energies, 2024, **17**(13): 3162, https://doi.org/10.3390/en17133162.

5. *de Haas, D., Andrews, J.* Nitrous oxide emissions from wastewater treatment – Revisiting the IPCC 2019 refinement guidelines. // Environmental Challenges, 2022, **8**: 100557, https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100557.

6. *Đurđević, D. et al.* Sustainable Sewage Sludge Management Technologies Selection Based on Techno-Economic-Environmental Criteria: Case Study of Croatia. // Energies, 2022, **15**(11): 3941, https://doi.org/10.3390/en15113941.

7. *Council of the EU*. Urban wastewater: Council adopts new rules for more efficient treatment. 2024, https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2024/11/05/urban-wastewater-council-adopts-new-rules-for-more-efficient-treatment/ poseten na 09.03.2026.

8. DIRECTIVE (EU) 2024/3019 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 27 November 2024 concerning urban wastewater treatment (recast).

9. COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2021/2139 of 4 June 2021.

10. COM (2019) 640 final. The European Green Deal. 2019.

11. European Commission. EU Biodiversity Strategy for 2030 Bringing nature back into our lives. 2021. ISBN 978-92-76-36472-6.

12. European Commission. Forging a climate-resilient Europe - the new EU Strategy on Adaptation to Climate Change. 2021, COM (2021) 82 final.

13. Ministerstvo na okolnata sreda i vodite (MOSV). Doklad za 2024g. po chl. 15 i chl. 17 na Direktiva 91/271/EIO, https://www.moew.government.bg/bg/vodi/opazvane-na-vodite-ot-zamursyavane/kanalizacionni-sistemi/dokladi/ poseten na 09.03.2026.

14. Council Directive 91/271/EEC of 21 May 1991 concerning urban waste-water treatment. Official Journal of the European Communities, 30.05.1991.

15. *Lin, Z. et al.* Constructed wetlands for wastewater treatment and reuse: Two decades of experience from China. // Environmental Research, 2025, **279**: 121781, https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121781.

16. *Kadlec, R., Wallace, S.* Treatment Wetlands, 2nd edition, 2009. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781420012514.

17. *Stefanakis A. et al.* Vertical Flow Constructed Wetlands, Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment. // Elsevier Publishing, 2014. https://doi.org/10.1016/C2012-0-01288-4.

18. *Fabris, L.* The influence of vegetation distribution on wetland efficiency. 2013 Thesis for Master's in Environmental Engineering.

19. Standard DWA-A 262 – Principles for Dimensioning, Construction and Operation of Wastewater Treatment Plants with Planted and Unplanted Filters for Treatment of Domestic and Municipal Wastewater. 2017.

20. *Arias, A. et al.* Effects of effluent recycle on treatment performance in a vertical flow constructed wetland. // Ecological Engineering, 2022, **180**: 106675. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106675.

21. *Engstler, E. et al.* Evaluating the Performance of Small Wastewater Treatment Plants. // Frontiers in Environmental Science, 2022, **10**: 948366. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.948366.

22. https://worldlandscapearchitect.com/benjakitti-forest-park-transforming-a-brown-field-into-urban-nature/?v=5523c88dd347, poseten na 09.03.2026.

23. https://www.appropedia.org/Arcata_Marsh, poseten na 09.03.2026.

24. NAREDBA № 6 ot 9.11.2000 g. za emisionni normi za dopustimoto sadarzhanie na vredni i opasni veshtestva v otpadachnite vodi, zaustvani vav vodni obekti.

25. *Pascual, A. et al.* Horizontal flow aerated constructed wetlands for municipal wastewater treatment: The influence of bed depth. // Science of the Total Environment, 2024, **908**: 168257, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168257.

26. *Solano M. et al.* Constructed Wetlands as a Sustainable Solution for Wastewater Treatment in Small Villages. // Biosystems Engineering, 2004, **87(1)**, 109 – 118 doi:10.1016/j.biosystemseng.2003.10.005.

27. *Mannino, I. et al.* A Cost-Effectiveness Analysis of Seminatural Wetlands and Activated Sludge Wastewater-Treatment Systems. // Environmental Management, 2008, **41**, 118 – 129, doi:10.1007/s00267-007-9001-6.

28. *Gikas G., Tsihrintzis V.* Municipal wastewater treatment using constructed wetlands. // Water Utility Journal, 2014, **8**, 57-65.

29. https://www.encyclopedie-environnement.org/en/zoom/filters-planted-with-reeds/ poseten na 09.03.2026.

30. *Langergraber, G., Weissenbacher, N.* Survey on number and size distribution of treatment wetlands in Austria. // Water Science and Technology, 2017, **75(10)**, 2309 – 2315, https://doi.org/10.2166/wst.2017.112.

31. *Cooper, P.* The Constructed Wetland Association UK database of constructed wetland systems. // Water Science and Technology, 2007, **56(3)**, https://doi.org/10.2166/wst.2007.490.

32. *Vymaza, J.* The Historical Development of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. // In Land, 2022, **11(2)**, https://doi.org/10.3390/land11020174.

33. *Albold, A. et al.* Constructed Wetlands Sustainable Wastewater Treatment for Rural and Peri-Urban Communities in Bulgaria. (2011). WECF, 2011, https://www.wecf.org/case-study-constructed-wetland-in-vidrare-bulgaria/, poseten na 09.03.2026.

34. *Syndicat de Traitement des Eaux d'Ambérieu et Son Agglomération* Système d'assainissement des filtres plantés de roseaux des Allymes et de Breydevent. Rapport Annuel 2021-Syndicat de Traitement des Eaux d'Ambérieu et Son Agglomération. https://www.steasa.fr/, poseten na 09.03.2026.

35. *Gajewska, M. et al.* Pre-feasibility study for treatment wetland application for wastewater treatment in dispersed development. // Journal of Ecological Engineering, 2016, **17(3)**: 79 – 86, https://doi.org/10.12911/22998993/63479.

36. https://www.organicawater.com/, poseten na 09.03.2026.

37. *Organica* Treating, Conserving, and Recycling Wastewater. Report, 2016 https://vancuaphai.com/wp-content/uploads/2023/09/Giai-phap_636722627072507033.pdf, poseten na 09.03.2026.

38. *Sari, Y., Rifai, A.* Innovative Solutions for Sewage using Food Chain Reaction (FCR) in Indonesia. // Journal of Physics: Conference Series, 2020, **1655(1)**: 012117, https://doi.org/10.1088/1742-6596/1655/1/012117.

39. *STOWA* VERKENNING ZUIVERENDE KASSEN 2017. ISBN 978.90.5773.772.5 www.stowa.nl, poseten na 09.03.2026.

40. *Wikaningrum, T., Hakiki, R.* Key performance indicators (KPIs) comparison of food chain reactor and conventional oxidation ditch technology in industrial waste treatment. // J. environ. eng. waste manag., 2020, **5(1)**: 15 – 29, https://doi.org/10.33021/jenv.v5i1.969.

41. https://www.hydrofluxepco.au/solutions/advanced-biological-processes/organica/, poseten na 09.03.2026.

42. *Brentwood Industries* Integrated Fixed Film/Activated Sludge (IFAS) Technology. Design and application report, 2009, https://sswm.info/, poseten na 09.03.2026.

43. *Rosso, D. et al.* Oxygen transfer and uptake, nutrient removal, and energy footprint of parallel full-scale IFAS and activated sludge processes. // Water Research, 2011, **45(18)**, 5987 – 5996, https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.08.060.

44. https://nei-organica.com/patented-process/, poseten na 09.03.2026.

45. *Boltz, J. et al.* Overcoming Hydraulic Limitations of the Integrated Fixed-FilmActivated Sludge and Moving Bed Biofilm Reactor Process. // Florida Water Resources Journal, 2012.

46. *Zhao, Y. et al.* A fancy eco-compatible wastewater treatment system: Green Bio-sorption Reactor. // Bioresource Technology, 2017, **234**: 224 – 232, https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.037.

47. Rapport sur le Prix et la Qualité de Service (RPQS) assainissement 2024 Commune nouvelle Le Lude Organica Le Lude Lagune Dissé. https://www.ville-lelude.fr/wp-content/uploads/2026/01/6-RPQS-Assainissement-2024.pdf, poseten na 09.03.2026.

48. https://nereda.haskoning.com/en/projects/, poseten na 09.03.2026.

49. *Pronk, M. et al.* Full scale performance of the aerobic granular sludge process for sewage treatment. // Water Research, 2015, **84**: 207 – 217. https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.07.011.

50. https://aqua-aerobic.com/biological/aerobic-granular-sludge/, poseten na 09.03.2026.

51. *Winkler, M. et al.* Microbial diversity differences within aerobic granular sludge and activated sludge flocs. // Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, **97(16)**: 7447 – 7458, https://doi.org/10.1007/s00253-012-4472-7.

52. *Kazimierowicz, J., Dębowski, M.* Aerobic Granular Sludge as a Substrate in Anaerobic Digestion–Current Status and Perspectives. // Sustainability, 2022, **14(17)**: 10904, https://doi.org/10.3390/su141710904.

53. *Yu, C., Wang, K.* Continuous flow aerobic granular sludge: recent developments and applications. // Water Science and Technology, 2024, **89(5)**: 1156 – 1178, https://doi.org/10.2166/wst.2024.055.

54. https://www.essde.com, poseten na 09.03.2026.

55. *Hamza, R. et al.* A review of the state of development of aerobic granular sludge technology over the last 20 years: Full-scale applications and resource recovery. // Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 2022, **5**: 100173, https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100173.

56. *TU Delft* Aerobic Granular Sludge Technology for Wastewater Treatment. Online course, 2024.

57. *Bahgat, N. et al.* Integrated resource recovery from aerobic granular sludge plants. // Water Research, 2023, **234**: 119819, https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119819.

58. *Ortega, S., van den Berg, L., Pronk, M., de Kreuk, M.* Hydrolysis capacity of different sized granules in a full-scale aerobic granular sludge (AGS) reactor. // Water Research X, 2022, **16**: 100151, https://doi.org/10.1016/j.wroa.2022.100151.

59. *van Dijk, E. et al.* Nitrous oxide emission from full-scale municipal aerobic granular sludge. // Water Research, 2021, **198**: 117159, https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117159.

60. *Otten, A., Zilverentant, A.* Worldwide Nereda Variants and Applications. Capability Statement. Royal HaskoningDHV, 2018.

61. *Giesen, A.* Addressing the Energy Water Nexus through R&D Planning and Policies. Efficient wastewater plants the case of Nereda. 2018, https://iea.blob.core.windows.net/assets/imports/events/63/Session414Giesen_WAIVER_RECEIVED_Final_WEB.pdf, poseten na 09.03.2026.

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF ALTERNATIVE TECHNOLOGIES FOR URBAN WASTEWATER TREATMENT – NATURE-BASED AND NATURE-INSPIRED

D. Valchev[1]

Keywords: *nature-based solutions, wastewater treatment, wetlands, food chain reactors, aerobic granular sludge, Organica, Nereda, assessment*

ABSTRACT

Three innovative technologies for treating urban wastewater, based on or inspired by nature, have been evaluated in the context of growing demands for the efficiency and sustainability of WWTPs. Constructed wetlands are characterized by very low energy

[1] Dobril Valchev, Assist. Prof. Dr. Eng., Centre of Competencies "Clean&Circle", Dept. "Water Supply, Sewerage, Water and Wastewater Treatment", Faculty of Hydraulic Engineering, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: dvalchev_fhe@uacg.bg

consumption (0,28 – 11,56 kWh/p.e.·year) and simple operation and can provide ecosystem benefits and partial recovery of biogenic elements through plant biomass (2 – 4,9 g P/m²·year). The main limitations are the need for a significant area and lower flexibility at very low permissible output concentrations for N and P without an additional treatment stage. They are most suitable for agglomerations of up to 10 000 p.e., decentralized systems, and post-treatment. FCR-Organica offers compactness (up to 60 % smaller footprint), stable processes (12 – 18 kg/m³ biomass in the bioreactors), and high public acceptance (green integration into the urban environment), but requires more complex equipment and skilled operation. Energy consumption is 25,11 – 29,93 kWh/p.e.·year (for WWTP < 10 000 p.e.) and 17,58 – 29,96 kWh/p.e.·year (for WWTP from 10 000 to 100 000 p.e.). AGS-Nereda provides process intensification (up to 75 % space savings), removal of C, N, and P in a single reactor without secondary clarifiers (ISV < 50 mL/g), and energy consumption of 17,80 – 22,26 kWh/p.e.·year (for WWTPs from 10 000 to 100 000 p.e.) and 9,75 – 17,14 kWh/p.e.·year (for WWTPs > 100 000 p.e.), but it is sensitive to operation mode, granules stability, and requires longer start-up period. All three technologies are applicable in Bulgaria when properly adapted to local characteristics and constraints.