



Получена: 20.12.2019 г.

Приета: 22.01.2020 г.

ОТКРИТИ РЕАКТОРИ СЪС СУСПЕНДИРАНА БИОМАСА ОТ МИКРОАЛГИ: СВЕТОВНИ ПОСТИЖЕНИЯ И ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВА

Д. Вълчев¹

Ключови думи: алги, фосфор, открити реактори с алги, пречистване на отпадъчни води

РЕЗЮМЕ

С напредването на технологиите в сферата на пречистването на отпадъчни води, инженерните съображения в световен мащаб все повече и повече се основават на методи за постигане на целите на „кръговата икономика“, като избягват технологии, водещи до „линейното“ използване на природните ресурси и загубата им в санитарни депа за утайки. Една от технологиите, имаща потенциал да следва тези принципи, се основава на използване на микроалги за пречистване на отпадъчни води. В статията са анализирани актуалните литературни източници, дискутиращи най-широко прилаганите биореактори със суспендирана биомаса от алги – откритите (High rate algal ponds, Raceway ponds). Обобщени са резултатите по отношение на технологичните параметри, като са представени предимствата и недостатъците на технологията. В заключение, откритите реактори показват обещаващи резултати в лабораторни и пилотни установки, но приложението им в реални обекти все още не е докладвано в научната литература. Вероятните фактори за това забавяне са предизвикателствата пред технологията, състоящи се главно в отделянето на микроалгите от водата след процесите на пречистване, необходимата площ на реакторите, заразяването на използваните култури, стабилизирането на процесите от гледна точка на сезонната, денонощната и температурната неравномерност и др., които предстоят да бъдат преодолени в бъдеще.

¹ Добрил Вълчев, инж. докторант, кат. „Водоснабдяване, канализация и пречистване на водите“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: dobril.valchev@abv.bg

1. Въведение

Алги или водорасли (от лат. *Algae* – водорасло) са обобщаващи информативни термини за огромна и изключително разнообразна група организми, които не са задължително родствено свързани помежду си. Днес те се класифицират в различни групи на организмовия свят съобразно вижданията на отделните изследователи, но погледнати като цяло, водораслите се отнасят към растенията главно заради предимно автотрофното си хранене и способността да отделят кислород при фотосинтезата. Науката за водораслите се нарича „Алгология” или „Фикология”. Алгите са предимно еукариоти, но обхващат организми и от прокариотния свят. Поради голямото разнообразие във формата, размерите и устройството на водораслите, тяхната структурата се изучава от специализиран дял на алгологията, наречен „морфология”. Размерите на клетките могат да варират в широки диапазони – от 0,2 μm до 10 – 12 cm, а размерите на талусите им (вегетативните им тела) – от 0,2 μm до над 70 m. Водораслите са силно разпространени по целия свят. Тяхното местообитание зависи от множество екологични фактори – както абиотични, така и биотични. Независимо коя среда обитават водораслите, основните им необходими елементи са въглерод, азот, фосфор, калий, сяра, калций, магнезий, желязо, натрий, силиций. Алгите са най-общо приемани за фотоавтотрофни организми – за източник на въглерод те използват неорганичен биохимичен субстрат – CO_2 , а за източник на енергия – слънчевата радиация, като осъществяват фотосинтеза [1].

Поради ролята си на продуценти в природата, широкото разпространение на множеството видове и голямото разнообразие от вещества, които могат да произвеждат и съхраняват, алгите намират приложение в редица направления от всякакво естество. В статията ще бъде акцентирано върху използването на водораслите за целите на пречистване на отпадъчни води и възможните бъдещи приложения на генерираната биомаса при процесите.

2. История на технологията и приложението ѝ за пречистване на отпадъчни води

Отглеждането на микроалги в промишлени количества води началото си от края на 50-те години на XX век [19]. Първоначално идеята на масовото производство на биомаса от микроводорасли има за цел да намали или изцяло да премахне нуждата от използването на изкопаеми горива в САЩ и да се създаде енергийна самодостатъчност на страната в това отношение [34]. Поради интензивно настъпващата фотосинтеза, култивирането на алгите във води, обогатени с азот и фосфор, позволява оползотворяването на слънчевата енергия да се осъществи чрез натрупването ѝ в биомасата [26]. Акумулираната биомаса от своя страна, след обработка, представлява изходна суровина за производството на биогорива и по-конкретно в частност биодизел (поради високото липидно съдържание на клетките на микроводораслите от някои еволюционни линии) [6].

Масовото култивиране на микроалги обаче изисква твърде големи количества торове за обогатяване на водната среда с хранителни вещества в огромни обеми вода, разположени на голяма площ. Това води до допълнително неефективно изчерпване на природните ресурси, а също и до натрупването на допълнителни експлоатационни разходи в процеса [18]. Добавянето на обогатители във водната среда, в която се развиват микро-

алги, прави технологията икономически неизгодна и цената на биодизела, произведен от микроводорасли, твърде висока, за да бъде конкурентна на пазара на горивата. Вследствие на това съображение учените се насочват към идеята за отглеждането им в среди от битови, селскостопански и производствени отпадъчни води. Високото съдържание на двата основни биогенни елемента, необходими на микроалгите за живот – азот и фосфор, а също и богатото съдържание на въглероден диоксид във водата, вследствие на жизнената дейност на микроорганизмите при биологично пречистването на отпадъчни води, правят използването на отпадъчните води като среда за култивиране значително поевтина и екологична, в сравнение с изкуствено създадените среди за култивиране [16, 18]. Така се постигат едновременно основно три големи ефекта при използването на технологията – 1) Пречистване или допречистване на отпадъчните води; 2) Производството на утайка с висока калоричност, подходяща за производството на енергия от биомаса във вече съществуващите на станцията съоръжения за гниене; 3) Намаление на емисиите на парникови газове, генерирани при използването на горивата, вследствие на фотосинтезата при жизнената дейност на микроалгите [14, 15, 29, 35].

В момента технологията представлява голям интерес и се развива в множество напреднали държави като САЩ, Мексико, Австралия, Швейцария и т.н. поради икономическия си потенциал.

Въпреки множеството възможни приложения на микроалгите в сферата на пречистването на отпадъчни води (отстраняване на фосфор [27], азот [13], органично въглеродно замърсяване [7], патогенни микроорганизми [2], микрозамърсители [31] и тежки метали [24]), технологията намира най-широко приложение като биологичен метод за допречистване на отпадъчни води от биогенните елементи фосфор и азот като се осъществява симулирането на процесите на евтрофикация в контролирана среда от реактор с подходящо подбрани нетоксични култури микроалги [8].

3. Открити реактори за пречистване на отпадъчни води със суспендирана биомаса от микроалги

3.1. Видове реактори с алги

Пречистването на отпадъчни води с микроалги, във всичките си направления, се базира на жизнената дейност на алгите. В тази връзка, осигуряването на оптимални условия за протичането на фотосинтезата (достатъчно светлина, необходимото количество неорганичен въглерод в средата, а също и достатъчно голям времепрестой, за да се осъществят процесите в своята пълнота), определя и видовете конструкции реактори, с които да се осъществи най-ефективно пречистване на отпадъчни води [5, 15, 28].

Реакторите за пречистване на отпадъчни води с алги могат да бъдат подразделени на реактори със суспендирана, имобилизирана и прикрепена биомаса [28], като всеки от видовете разполага с няколко вариации на конструкции, целящи постигането на оптимални резултати. Биореакторите със суспендирана биомаса от микроалги са предпочитаният вид за целите на пречистването на отпадъчни води, тъй като експерименталните данни показват, че с тях се постигат по-добри резултати по отношение на битовите отпадъчни води от ГПСОВ [28]. Те от своя страна се подразделят на две големи групи според конструкцията – открити (познати още в чуждестранната литература като High Rate Algal Ponds – HRAP, Raceway ponds, Open Pond Systems) и закрити (познати още в чуждестранната литература като Photobioreactors – PBRs) [28].

3.2. Открити биореактори със суспендирана биомаса от микроалги

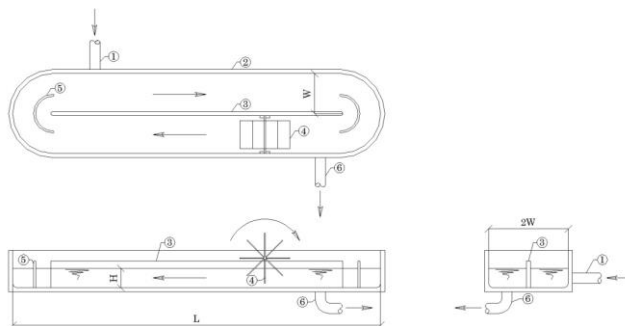
Откритите биореактори с микроалги са най-широко прилаганата конструкция при технологиите с алги. Те представляват дълги, изключително плитки открити легла, функциониращи проточно или циклично. Най-често използваната технология при тях наподобява биореактори тип „окислителен ров”, най-вече поради простата в устройството им и евтина експлоатация. Използват се главно като реактори за допречистване от азот и фосфор след биореакторите в ПСОВ или като основно биологично стъпало на станцията [32].

Основните конструкции на откритите реактори със суспендирана биомаса от микроалги са две – без допълнителна аерация с въздух, богат на CO_2 (HRAP_W) и с външен източник на CO_2 за системата (HRAP_E) [20].

- *Открити реактори без допълнителна аерация с въздух, богат на CO_2 (HRAP_W)* – Отпадъчната вода постъпва в системата и се смесва с наличната биомаса от микроалги като движението на потока се осъществява от лопатково колело с хоризонтална ос. След съответния оразмерителен времепрестой суспензията от водорасли и вече пречистена отпадъчна вода се подава към съоръжение за отделянето на двете фази. Тази конструкция на биореакторите с алги разчита изцяло на реаерацията с CO_2 от атмосферата за протичането на фотосинтезата. Малката дълбочина на съоръженията ($H = 0,15 - 0,50 \text{ m}$) позволява процеса да се осъществява по-лесно. Лабораторни и пилотни инсталации на описаните реактори са показани на фиг. 1, а принципната схема на работа е представена на фиг. 2:

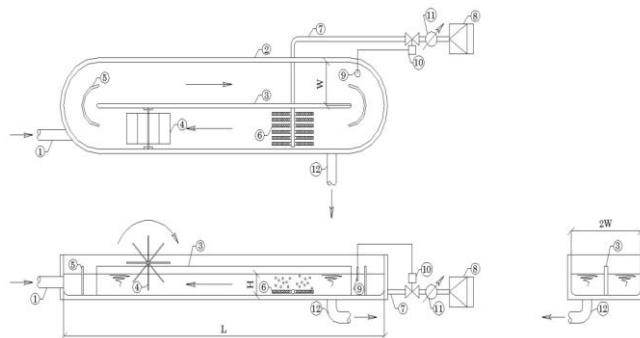


Фиг. 1. Лабораторни и пилотни инсталации на открити биореактори с алги, без допълнително аериране с въздух, богат на CO_2 [25]



Фиг. 2. Устройство и принципна схема на работа на открити реактори с алги, без допълнително аериране с въздух, богат на CO_2 . Изработена по подобие на схемите в [20, 25]

- *Открити реактори с допълнителна аерация с въздух, богат на CO_2 ($HRAP_w$)* – Принципът на работа и устройството не се различават особено от описаните в предишната подточка реактори. Единствената разлика е добавянето на изкуствен източник на CO_2 към водата (съдържание около 5 – 6% CO_2 в добавения въздух) чрез система от въздуходувки, бутилка с CO_2 и дифузори. Важно е самите дифузори да имат ниска височина на монтаж (най-често се прилагат тръбни мембранни), за да се избегне оголването им и компрометирането на процесите на аерация вследствие на изпарението и понижаването на водното ниво. Количеството на подавания въздух и продължителността на аерация се контролират от сензор за измерване на стойностите на pH на средата, който е свързан със спирателния кран на въздуховодите. При ниско pH (висока концентрация на CO_2) в средата, сензорът подава сигнал към датчик, монтиран на крана, и той се затваря, съответно обратният процес се осъществява при високи стойности на pH. След съответния оразмерителен времепрестой суспензията от водорасли и вече пречиствена отпадъчна вода се подава към съоръжение за отделянето на двете фази. Принципната схема на работа е представена на фиг. 3.



Фиг. 3. Устройство и принципна схема на работа на открити реактори с алги, с допълнително аериране с въздух, богат на CO_2 . Изработена по подобие на схемите в [11, 20]

По-широко прилаганият от двете конструкции открити реактори с алги е първият вид, без добавяне на въздух, обогатен с CO_2 в системата. Основна причина за неприлагане на втория вид реактори е недостатъчно ефективното обогатяване на водата с CO_2 , поради открития тип на реактора и слабата разтворимост на газовете във вода, което води до загубата му в атмосферата. Също така, подобна допълнителна аерационна система води до по-скъпа и усложнена експлоатация на станцията. Подобни системи до момента са прилагани в лабораторни и пилотни установки, но трудностите при прилагането им в реални условия ги правят все още недостатъчно икономически ефективни, за да бъдат използвани от градски ПСОВ [28].

3.3. Основни технологични параметри на откритите реактори със суспендирана биомаса от микроалги

Технологичните параметри за всички системи, използващи алги, са все още недостатъчно добре конкретизирани. Съществуват някои съществени разминавания в публикациите на различните автори. Литературните данни се обединяват около това, че

технологичните параметри за откритите реактори със суспендирана биомаса от микроалги са свързани с достигането на максимално количество светлина до всички слоеве на системата и достатъчно голямата водна повърхност, така че да се постигне оптимална реаерация от атмосферата с CO_2 . Така се осигуряват условия, даващи възможност за нормалното протичане на процесите на фотосинтеза и най-добро отстраняване на замърсителите от водата. В табл. 1 са представени обобщени данни от литературата по отношение на технологичните параметри, които могат да бъдат наречени по-скоро съображения при конструирането на откритите реактори [6, 9, 10, 17, 20 – 23].

Таблица 1. Основни технологични параметри на откритите реактори със суспендирана биомаса от микроалги

Параметър	Препоръчителни стойности	Съображения
Дълбочина (H)	$H = 0,20 - 0,80 \text{ m}$	При по-ниски стойности от 0,20 m – слабо разбъркване и бързо изчерпване на CO_2 При по-високи стойности от 0,80 m – взаимно засенчване на алгите и инхибиране на процесите
Съотношение дължина към ширина (L/W)	$L/W = 6 - 7$	Необходимо с цел по-добър хидравличен режим и избягване на засенчване на някои зони
Скорост на протичане на водата през коридорите на реактора	$v = 0,1 - 0,5 \text{ m/s}$ (оптимална около 0,3 m/s)	При $v < 0,1 \text{ m/s}$ – утаяване на алгите При $v > 0,5 \text{ m/s}$ – сръзвачи напрежения върху клетките
Хидравличен време-престой	$HRT = 1 - 15 \text{ d}$ (най-често около 4 – 6d)	В зависимост от културата алги, климата в района и състава на отпадъчната вода
Концентрация на биомасата в системата	0,1 – 1,8 g/L	Желателно е да се избягват концентрации над 1,5 g/L (хиперконцентрации), защото се получава взаимно засенчване
Осветеност	Насищане при $200 \mu\text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$	При открития монтаж за повечето алги са достатъчни и 8 – 10% от слънчевата енергия
pH и количество CO_2	$\text{pH} = 7 - 9$	При интензивна фотосинтеза и висока температура трябва да се внимава, защото стойностите на pH в някои случаи достигат до над 10, което може да предизвика изчерпването на азота и процесите да се инхибират
Концентрация на разтворен кислород	може да достигне до 200% свръхнасищане	В часовете с пиково слънчево греене е възможно да влоши процесите на пречистване поради токсичността при продължително излагане на високи концентрации кислород към алгите
Температура	10 – 40 °C (оптимален диапазон 28 – 32 °C)	Под 10 °C активността на алгите спада с около 50%

3.4. Отстраняване на нарасналата биомаса от микроалги от водата след процесите на пречистване

Отделянето на микроалгите от водата, след процесите на пречистване на отпадъчните води, се явява един от най-големите проблеми на технологиите за пречистване на отпадъчни води със суспендирана биомаса от микроалги. Това се дължи основно на три фактора: 1) малките размери на използваните микроалги (най-често под 30 μm); 2) близката плътност на алгите до тази на водата (1,08 – 1,13 kg/L); 3) отрицателния заряд на клетките, изразен най-силно в експоненциалната фаза на растеж на биомасата. Описаните фактори правят алгите изключително слабо податливи на свободно утаяване, а всички други технологии, използвани за отделяне на микроалгите от водата са все още недостатъчно икономически изгодни, за да бъдат приложени в реални условия [5, 12]. Методите за отделяне на биомасата от алги от водата могат да бъдат групирани в следните категории:

- *Химични методи чрез добавяне на коагуланти/флокуланти* – използват се стандартни коагуланти – $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ и FeCl_3 или органични биополимери (хитозан). Ефективни по отношение на отделянето на биомасата от пречистената вода, но водят до големи разходи за реагенти (особено при използването на хитозан) и до натрупване на тежки метали в утайките (при използването на метални соли), които пречат на оползотворяването на утайките [4, 12].
- *Механични методи* – включват центрофугиране, мембранна филтрация (най-често ултрафилтрация), флотация. Постигат добри резултати при отделянето на биомасата от водата, но значително увеличават капиталовите вложения и експлоатационните разходи на ПСОВ (за задвижване на мотора при центрофугите; за създаване на налягане и реагенти за обратна промивка при мембраните и за аерация при системите за флотация) [3, 5, 12, 33].
- *Физични методи* – осъществяват се чрез електрофореза или ултразвук. Електрофорезата се използва по-често при култивирането на морски култури алги поради по-високата концентрация на електролити във водата (при сладки води разходите за електроенергия са около 10 пъти по-високи и ефективността е по-ниска). И двата физични метода дават добри резултати и не изискват добавянето на външни реагенти, които да влошават качествата на крайния утайков продукт, но високите цени на електродите и експлоатационните разходи за електроенергия ги правят слабо приложими при реактори в по-голям от лабораторен мащаб [4].
- *Биологични методи* – използват се процесите автофлокуляция (процес, при който започва формирането на флокули без добавянето на допълнителни реагенти към системата при повишаване на рН или отделяне на извънклетъчни полимери) и биофлокуляция (чрез добавяне на флокулообразуващи микроорганизми). И двата метода не дават достатъчно надеждни резултати, а при използването на биофлокуляция често се налага и добавянето на външен източник на органичен биохимичен субстрат (ацетат, глюкоза, глицерин и др.), което осъществява експлоатацията на станцията [4].

3.5. Предимства и недостатъци на откритите реактори с алги

Основните предимства и недостатъци на този тип реактори са обобщени от литературните данни [5, 10, 15, 23, 30] и са представени в табл. 2.

Таблица 2. Обобщени предимства и недостатъци на откритите реактори със суспендирана биомаса от микроалги

Категория	Предимства	Недостатъци
Устройство	<i>Просто устройство – основно предимство пред другите реактори</i>	<i>Твърде голяма заемана площ поради малката дълбочина и големия хидравличен времепрестой</i>
Експлоатация	<i>Улеснена експлоатация – по-малко компоненти на системата</i>	<i>По-слаб контрол на параметрите</i>
Проникване на светлина	<i>Относително равномерно</i>	<i>Поддържане на постоянна малка дълбочина – проблеми с разбъркването и площта</i>
		<i>Поддържане на ниски концентрации на водорасли, за да достига светлина, което забавя процесите</i>
Концентрация на CO ₂ в системата	<i>По-често се прилагат реактори без добавяне на допълнително CO₂ в системата, което е по-евтино от гледна точка на експлоатацията</i>	<i>Труден контрол на точната концентрация, дори и при системи с допълнително добавяне на CO₂</i>
Разбъркване	<i>Евтино (изцяло чрез лопатков хоризонтален миксер)</i>	<i>Голям риск от образуването на мъртви зони. Слаб контрол</i>
Замърсяване на използваната чиста култура от микроалги с други видове водорасли	<i>Не е толкова проблемно при пречистването на отпадъчни води, тъй като много често не е необходима особена чистота на културата алги</i>	<i>Голяма вероятност за замърсяване и при по-агресивни култури на съответната географска ширина може да се получи изменение в необходимите параметри на реактора, за да функционира</i>
Токсичност от високи концентрации на разтворен кислород и рН на средата	<i>Малко вероятно за настъпване поради слабата разтворимост на кислорода във вода и преминаването му в атмосферата при намаляване на зеленето</i>	<i>Трябва да се внимава в часовете с пикови осветявания, за да не се инхибират процесите</i>
Температура	<i>Процесите остават стабилни дори и при вариации в температурата</i>	<i>Труден контрол. На някои географски ширини може да се наложи допълнително подгряване на реакторите, което оскъпява експлоатацията</i>

4. Изводи

Направеният обзор на литературните данни в статията относно откритите технологии за пречистване на отпадъчни води със суспендирана биомаса от микроалги (HRAP) показва, че:

1. Откритите системи са най-изследваните в областта и представляват съвременен интерес за сферата на пречистването на отпадъчни води.
2. Предпочитаната конструкция от открития тип реактори със суспендирана биомаса от микроалги е системата без допълнителното добавяне на въздух, предварително обогатен с CO₂, поради неефективната аерация, по-простото си устройство и най-евтина и опростена експлоатация.
3. Независимо от множеството изследвания и дългите проучвания на откритите конструкции, те все още не са достатъчно добре развити, за да бъдат приложени в реални пречиствателни станции. В литературата са докладвани единствено лабораторни и пилотни установки.
4. Процесите на пречистване са лимитирани от множество параметри, които могат да предизвикат инхибиране – фактори на околната среда (осветяване и температура); експлоатационни параметри (рН, концентрации на CO₂ и разтворен кислород във водата, наличие на биохимични субстрати) и биологични (заразяване с естествено виреещи в отпадъчната вода култури микроводорасли и изяждане на културите от зоопланктон). Слабият контрол на всички тези параметри е основна пречка пред разширяването на технологията. Необходими са още изследвания относно оптимизирането на работата на реакторите и определянето на конкретни технологични параметри на системите.
5. Голяма пречка пред прилагането на технологията в реални ПСОВ е твърде голямата необходима площ на реакторите, която обуславя сериозни капиталовложения.
6. Съществено разходно перо в технологиите със суспендирана биомаса от микроалги е и стъпалото за отделянето на биомасата от вече пречистената отпадъчна вода. Наличните методи са или недостатъчно надеждни, или все още икономически неизгодни.

Въпреки трудностите, които технологията среща при увеличаването на своя мащаб и практическото си приложение в реални ПСОВ, тя се явява една от малкото системи в света, която дава възможност за едновременното отстраняване от отпадъчните води и директното оползотворяване на изчерпаемия биогенен елемент фосфор. Изцяло биологичният начин, по който се постига това и множеството направления, в които е възможно използването на утайките от тази технология, провокират световния интерес към технологията като метод за постигането на принципите, заложи в основата на „кръговата икономика“.

Благодарности

Изказвам благодарност на ЦНИП при УАСГ за финансиране на експериментите (договор Д-105/2018) и на проект BG05M2OP001-1.002-0019: „Чисти технологии за

устойчива околна среда – води, отпадъци, енергия за кръгова икономика“ за финансиране на труда и за осъществяване на сътрудничество с БФ на СУ „Св. Климент Охридски“.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Стойнева-Гертнер, М., Узунов, Б.* Основи на систематиката на водорасли и гъби. Джей Ей Ем Джи, София, 2017.
2. *Abdel-Raouf, A. et al.* Microalgae and wastewater treatment. // Saudi Journal of Biological Sciences, 2012, 19: 257–275.
3. *Bilad, M. et al.* Harvesting microalgal biomass using submerged microfiltration membranes. // Bioresource Technology, 2012, 111: 343 – 352.
4. *Branyikova, I. et al.* Harvesting of Microalgae by Flocculation. // Fermentation, 2018, 93.
5. *Christenson, L., Sims, R.* Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels and bioproducts. // Biotechnology Advances, 2011, 29: 686 – 702.
6. *Craggs, R. et al.* (2013) Wastewater Treatment and Algal Biofuel Production. Algae for Biofuels and Energy. // Developments in Applied Phycology, 2013, 5.
7. *Cuellar-Bermudez, S. et al.* Nutrients utilization and contaminants removal. A review of two approaches of algae and cyanobacteria in wastewater. // Algal Research, 2016.
8. *Gonçalves, A. et al.* A review on the use of microalgal consortia for wastewater treatment. // Algal Research, 2016.
9. *Garcia, J. et al.* High rate algal pond operating strategies for urban wastewater nitrogen removal. // Journal of Applied Phycology, 2000, 12: 331 – 339.
10. *Griffiths, E.* Removal and Utilization of Wastewater Nutrients for Algae Biomass and Biofuels. Master Thesis at Utah State University, 2010.
11. *Hadiyanto, H. et al.* Hydrodynamic evaluations in high rate algae pond (HRAP) design. // Chemical Engineering Journal, 2012, 217: 231 – 239.
12. *Hwang, J. et al.* Use of Microalgae for Advanced Wastewater Treatment and Sustainable Bioenergy Generation. // ENVIRONMENTAL ENGINEERING SCIENCE, 2016, 33.
13. *Jia, H., Yuan, Q.* Removal of nitrogen from wastewater using microalgae and microalgal bacteria consortia. // Cogent Environmental Science, 2016.
14. *Lowrey, J.* Seawater, wastewater production of microalgae based biofuels in closed loop tubular photobioreactors. Thesis, California Polytechnic State University, 2012.
15. *Mata, T. et al.* Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14: 217 – 232.
16. *McShan, M.* Biological treatment of wastewater using algae and Artemia. // Water Pollution Control Federation, 2015, Vol. 46, No. 7: 1742 – 1750.

17. *Mehrabadi, A. et al.* Wastewater treatment high rate algal ponds (WWT HRAP) for low-cost biofuel production. // *Bioresource Technology*, 2014.
18. *Mobin, S., Alam, F.* Biofuel Production from Algae Utilizing Wastewater. 19th Australasian Fluid Mechanics. Conference at School of Aerospace, Mechanical and Manufacturing Engineering RMIT University, Melbourne, Australia, 2014.
19. *Oswald, W. et al.* Algae in Waste Treatment. // *Sewage and Industrial Wastes*, 1957, Vol. 29, No. 4: 437 – 457.
20. *Park, J., Craggs, J.* (2010) Wastewater treatment and algal production in high rate algal ponds with carbon dioxide addition. // *Water Science & Technology*, 2010, 61.3: 633 – 639.
21. *Park, J. et al.* Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. // *Bioresource Technology*, 2010 102: 35 – 42.
22. *Pawar, S.* Effectiveness mapping of open raceway pond and tubular photobioreactors for sustainable production of microalgae biofuel. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 62: 640 – 653.
23. *Rayen, F. et al.* Optimization of a raceway pond system for wastewater treatment: a review. // *Critical Reviews in Biotechnology*, 2019.
24. *Salama, E. et al.* Algae as a green technology for heavy metals removal from various wastewater. // *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2019, 35: 75.
25. *Satpati, G., Pal, R.* (2018) Microalgae- Biomass to Biodiesel: A Review. // *Journal of Algal Biomass Utilization*, 2018, 9(4): 11 – 37.
26. *Shen, Y.* Carbon Dioxide Bio-fixation and Wastewater Treatment 1 via Algae. Photochemical Synthesis for Biofuels Production. // *RCS Advances*, 2014, 91.
27. *Sindelar, H. et al.* Algae scrubbers for phosphorus removal in impaired waters. *Ecological Engineering*, 2015, 85: 144 – 158.
28. *Ting, H. et al.* Progress in microalgae cultivation photobioreactors and applications in wastewater treatment: A review. // *Int J Agric & Biol Eng*, 2017, 10(1): 1 – 29.
29. *Trent, J.* Offshore membrane enclosures for growing algae (OMEGA): A Feasibility study for wastewater to biofuels, NASA Ames Research Center, 2012.
30. *Wang, H. et al.* The contamination and control of biological pollutants in mass cultivation of microalgae. *Bioresource Technology*, 2013, 128: 745 – 750.
31. *Xiong, J. et al.* Review: Can Microalgae Remove Pharmaceutical Contaminants from Water? // *Trends in Biotechnology*, 2018, Vol. 36, No. 1.
32. *Young, P. et al.* Mini-review: high rate algal ponds, flexible systems for sustainable wastewater treatment. // *World J Microbiol Biotechnol*, 2017, 33: 117.
33. *Zhang, X. et al.* Harvesting algal biomass for biofuels using ultrafiltration membranes. // *Bioresource Technology*, 2010, 101: 5297 – 5304.
34. *Zhou, W. et al.* Environment-enhancing algal biofuel production using wastewaters. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 36: 256 – 269.

35. Zhu, L. et al. Nutrient removal and biodiesel production by integration of freshwater algae cultivation with piggery wastewater treatment. // Water Research, 2013, 47(13): 4294 – 4302.

REACTORS WITH SUSPENDED ALGAE BIOMASS: WORLD ACCOMPLISHMENTS AND CHALLENGES

D. Valchev¹

Keywords: algae, phosphorus, High rate algal ponds, Raceway algal ponds, wastewater treatment

ABSTRACT

With the advancements of the technologies in the sphere of wastewater treatment, the engineering considerations globally are based more and more on the use of methods that follow the principles of the circular economy. Technologies that lead to the linear use of the natural resources and their loss in landfills for excess sludge tend to be avoided. One of the technologies, which has potential to achieve these goals, is based on the use of microalgae for wastewater treatment. The recent scientific literature has been analyzed in the following paper discussing the most widely applied globally types of bioreactors with suspended algae biomass – open algae reactors (High rate algal ponds, Raceway ponds). The results are presented in regard to the technological parameters for the reactor designs, displaying the advantages and the disadvantages of the technology. In conclusion, open algae reactors display promising results at laboratory and pilot scale, but no data regarding their full scale application has been reported in the scientific literature. The possible factors for this delay are the many challenges that the technology is still facing, such as: algae harvesting after the wastewater treatment process, the huge required land area for the reactors, the contamination of the algae strains, the difficulties with the stabilization of the processes as a result of season, day and temperature fluctuations, and others that are yet to be overcome in the future.

¹ Dobril Valchev, Eng., PhD student, Dept. “Water Supply, Sewerage, Water and Wastewater Treatment”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: dobril.valchev@abv.bg