



Получена: 30.04.2020 г.

Приета: 05.06.2020 г.

ОТНОСНО ПРИЛОЖИМОСТТА НА ЗАКРИТИ РЕАКТОРИ СЪС СУСПЕНДИРАНА БИОМАСА ОТ МИКРОАЛГИ ЗА ПРЕЧИСТВАНЕ НА ОТПАДЪЧНИ ВОДИ

Д. Вълчев¹

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

РЕЗИЮМЕ

Пречистването на отпадъчни води с микроалги се определя като една от технологиите на бъдещето поради възможността за едновременно отстраняване на биогенните елементи от отпадъчната вода и инкорпорирането им в биомаса с висока калоричност. Въз основа на широк литературен обзор статията съпоставя трите основни вида закрити реактори (фотобиореактори) със суспендирана биомаса от микроалги, както помежду им, така и с групата на откритите биореактори. Анализът показва, че фотобиореакторите позволяват по-добър контрол над системата и по-постоянни резултати от откритите реактори. Но твърде сложната и скъпа експлоатация, огромната необходима площ и трудностите при отделянето на суспензията от микроалги от вече пречистената отпадъчна вода ограничават приложението на технологията. Това прави закритите системи по-често приложими при култивирането на чисти култури от микроалги с цел извличане на полезни вещества от тях, отколкото за целите на пречистването на отпадъчни води, където откритите биореактори затвърждават все повече присъствие.

1. Въведение

През последните години интересът към масовото култивиране на микроалги и оползотворяването им се увеличава значително поради възможността за получаването на изходни суровини за производство на множество полезни вещества в различни направ-

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

ления [1]. Бързото им нарастване в отпадъчни води (като евтина среда за култивирането на алгите) позволява постигането на двоен ефект – отстраняване на биогенни елементи от отпадъчната вода и синтезиране на биомаса с високо качество. Най-разпространените приложения на утайките от микроалги, получени при пречистване на отпадъчни води, са: 1) Производство на трето поколение биогорива (метан, етанол и бутанол, биодизел, растителни масла) [2 – 6]; 2) Производство на биоторове (за обогатяване на почвите с биогенни елементи като въглерод, азот и фосфор или за подпомагане на азотфиксацията с някои определени видове алги) [3, 7, 8].

Научните публикации относно биореактори за пречистване на отпадъчни води с микроалги показват, че най-предпочитани и ефективни по отношение на пречиствателен ефект на води от пречиствателни станции за отпадъчни води (ПСОВ) са технологиите, използващи суспендирана биомаса от алги [9]. Възможните конструкции на този тип системи се класифицират в две общи направления – открити (HRAP) и закрити (Photobioreactors – PBRs).

За да бъдат разрешени основните проблеми на откритите биореактори със суспендирана биомаса от микроалги, а именно: 1) Трудното поддържане на всички компоненти и параметри на системата (достатъчно CO_2 , оптимално огряване на всички части от реактора, контрол на температурата); 2) Високият риск от замърсяване на използваната чиста култура микроалги; 3) Използването на ниски концентрации биомаса и бавно протичане на процесите; възниква идеята за използването на закрити фотобиореактори [1, 9].

Статията представя основните конструкции и технологични параметри на закритите биореактори, сравнителен анализ на трите им основни разновидности, както и сравнителен анализ между тях и групата на откритите биореактори. Като източник на информация са използвани над 55 съвременни публикации.

2. Видове закрити реактори за пречистване на отпадъчни води със суспендирана биомаса от микроалги

Закритите реактори със суспендирана биомаса от микроалги са прозрачни и са познати в литературата като фотобиореактори (Photobioreactors – PBRs). Те могат да бъдат циклични или проточни. В тях, също както при откритите реактори, се осъществява интензивно нарастване на биомасата от микроводорасли, която под действието на слънчевата светлина фотосинтезира и чрез жизнените си процеси отстранява различни видове замърсители от отпадъчната вода. Самите системи са херметически затворени с контролирани условия и параметри, в които допълнително от външен източник се вкарва CO_2 чрез аерация, а движението на водата се осъществява най-често чрез помпа. При тях предпоставките за развитие на микроалги и респективно отстраняване на замърсители са значително по-добри, но срещат трудности при прилагането си в по-голям мащаб – реални ПСОВ, поради твърде високите капитални вложения и експлоатационни разходи и по-сложното си за експлоатация устройство [10 –12].

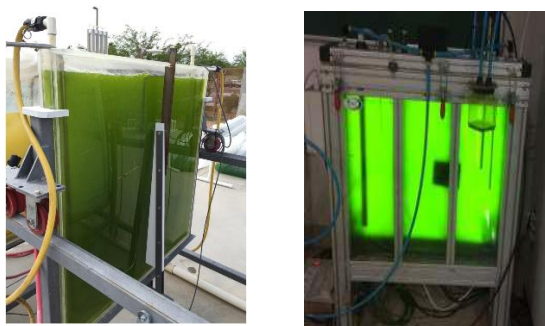
Малките размери на използваните микроалги (най-често под 30 μm), близката плътност на алгите до тази на водата (1,08 – 1,13 kg/L) и отрицателният заряд на клетките, изразен най-силно в експоненциалната фаза на растеж на биомасата, са фактори, които пречат микроалгите да бъдат лесно отстранени от водата след процесите на пречистване [2, 11]. Самите технологии за отделяне на биомасата включват: химични (чрез коагуланти и флокуланти), механични (цетрофуги, мембрани и флотация), физични (електрофореза и ултразвук) и биологични (автофлокулация и биофлокулация) методи. Всяка от изброените технологии за отстраняването на алгите от водата обаче все още не дава

достатъчно добри и постоянни резултати (твърде зависими от специфичните особености на системата) или е твърде икономически неизгодна за прилагането ѝ в реални условия (високи разходи за реагенти и електроенергия), като това се явява един от основните проблеми на реакторите, използващи суспендирана биомаса от микроалги [2, 11, 13 – 15].

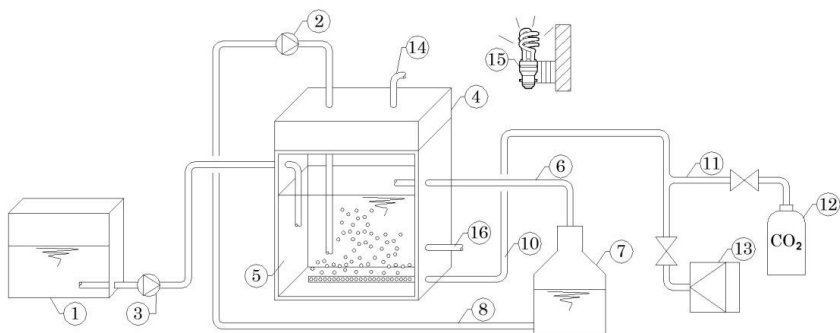
Съществуват множество вариации на конструкции от затворените фотобиореактори, но всички те могат да бъдат сведени до 3 основни типа – панелни, тръбни и цилиндрични [16].

2.1. Панелни фотобиореактори

Лабораторни установки с такива реактори са показани на фиг. 1, а примерно устройство е показано на фиг. 2.



Фиг. 1. Лабораторни установки на панелни фотобиореактори [17, 18]



Фиг. 2. Устройство и принципна схема на работа на панелни фотобиореактори.
Сборна схема, изработена по подобие на тези в [9] и [19]

При този тип реактори светлинният приемник (същинската прозрачна част на реактора, където се осъществяват процесите на фотосинтеза и съответно пречистване) представлява затворена система от плоски панели, която се аерира на дъното с тръбни дифузори, а светлинният източник може да бъде както изкуствен (LED лампа с бяла светлина при закрит монтаж), така и естествен (слънце при монтаж на открито). Флотиралата биомаса е само част от цялото количество алги в системата, за това тя се рециркулира обратно в панела, а самото същинско отделяне на микроводораслите от водата след съответния времепрестой се осъществява чрез допълнително съоръжение (центрофуга, мембрана или други физични и химични методи).

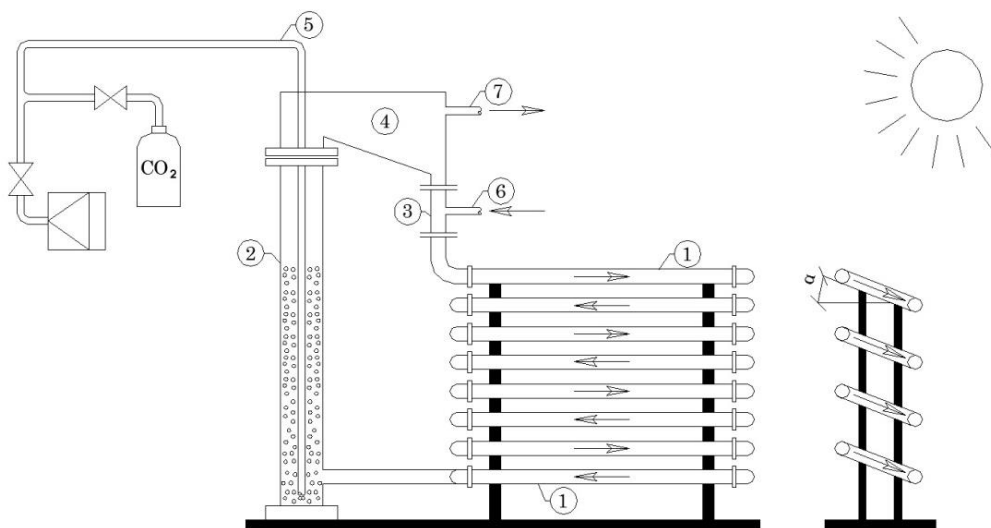
Панелните фотобиореактори са най-опростеният вид реактори от закритите типове. Те могат да функционират като проточни или циклични системи. Като ключов параметър при оразмеряването им се явява хидравличният времепрестой, поради нарастващата концентрация на биомасата и намаляващото проникване на светлина във вътрешността на реактора (алгите се концентрират в близост до прозрачните стени, където има по-голяма светлинна радиация). Съществуват и конструкции, които се справят с този проблем чрез инсталирането на втори светлинен източник – плоскост от LED лампи вътре в самата среда на реактора, за да се получи по-високо съотношение осветена повърхнина към обем [9, 16].

2.2. Тръбни фотобиореактори

Лабораторни установки с такива реактори са показани на фиг. 3, а примерно устройство е показано на фиг. 4.



Фиг. 3. Лабораторни установки на тръбни фотобиореактори [9, 20]



Фиг. 4. Устройство и принципна схема на работа на тръбни фотобиореактори. Сборна схема, изработена по подобие на тези в [9]

При тези системи слънчевият приемник се явява система от свързани помежду си прозрачни тръби, през които водата протича гравитачно. След достигане на суспензията от алги и отпадъчна вода в най-долната част на реактора се осъществява едновременно обогатяване на водата с CO_2 и тласкането ѝ в началото на системата чрез прозрачна ерлифт колона. Отделянето на биомасата от вече пречистената вода се осъществява в следващо съоръжение. При открит монтаж на реактора е необходимо да се съобрази азимута на слънцето на съответната географска ширина, за да може тръбите да бъдат ориентирани спрямо него. Това се налага, за да се получи оптимално осветяване на цялата повърхнина на слънчевия приемник.

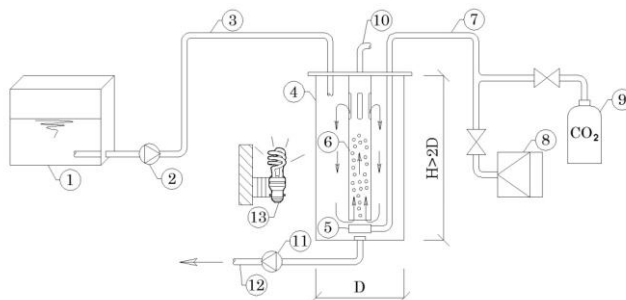
Тръбните фотобиореактори са най-широко прилаганият вид конструкции от закрития тип реактори поради по-лесния контрол на параметрите. Този тип системи постигат много добри резултати в отстраняването на показателите общ азот и общ фосфор (в някои случаи и до 100% ефект на пречистване), но основните проблеми, при тези фотобиореактори, са свързани с обрастването на стъклената тръбна част, чрез концентриране на алгите в частта с най-силно греене. Друга трудност при експлоатацията се явява температурният контрол. Много често при лятно време и силна слънчева радиация се получава твърде висока температура във вътрешността на системата и се налага допълнително оборудване за охлаждане, монтирана към ерлифта [9, 16].

2.3. Цилиндрични фотобиореактори

Този вид фотобиореактори има две разновидности на конструкции – „кипяща колона” (bubbling column) и ерлифт фотобиореактор. Вторият тип е по-широко приложим и неговото устройство е разгледано в тази подточка (фиг. 5). Също така и някои лабораторни установки са представени на фиг. 6.



Фиг. 5. Лабораторни установки на цилиндрични фотобиореактори [21, 22]



Фиг. 6. Устройство и принципна схема на работа на ерлифт фотобиореактори. Сборна схема, изработена по подобие на тези в [9]

Принципът на действие не се различава от този на панелните фотобиореактори, с тази разлика, че вместо прозрачна плоскост, слънчевият приемник представлява светло пропусклив цилиндър. Разбъркването и аерацията отново се осъществява чрез система от дифузори на дъното, а алгите се отделят в последващо съоръжение.

Предимството на този тип реактори е, че не са скъпи, имат сравнително просто устройство, добро съотношение околна осветена повърхнина към обем (постигнато с $H > 2D$ на цилиндъра) и добър масов пренос. Тези системи трудно се разширяват в по-голям мащаб поради намаляването на преминалата светлина към вътрешността на реактора с увеличаването на диаметъра на цилиндричната колона [9, 16].

3. Основни технологични параметри на закритите реактори със суспендирана биомаса от микроалги

От анализа на наличните литературни данни, свързани с фотобиореакторите, става ясно, че технологичните параметри от литературните данни са само ориентировъчни и не могат да бъдат приети за единни, които да са оптимални за оразмеряването на реактори в практиката. Също както при откритите реактори, при закритите е необходимо да се осигури достигането на максимално количество светлина до всички слоеве на системата и достатъчно добър масов и газов обмен между клетките на алгите и водната среда. При конструирането на закрити реактори трябва да се следват следните съображения, обобщени в табл. 1 [9, 18, 23 – 29].

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

Параметър	Препоръчителни стойности	Съображения
Съотношение околна (осветена) повърхнина към обем на реактора (Sf/V)	$H = 20 - 200 \text{ m}^{-1}$	<i>Колкото по-голямо е това съотношение, толкова по-добре достига светлината до всички точки на реактора, но прекомерното му увеличаване предизвиква проблеми най-вече от гледна точка на хидравличния режим и площта на реактора.</i>
Количество на подавания въздух	$1 - 8 \text{ L/min}$	<i>Количеството зависи от конструкцията на самия реактор и се контролира от гледна точка на това, да не се създават твърде големи сръзваци напрежения в клетките на алгите, но и да не се създават условия за утаяване в някои части на реактора.</i>
Хидравличен времепрестой	$HRT = 1 - 15 \text{ d}$ (най-често около $4 - 6 \text{ d}$)	<i>В зависимост от културата алги, климата в района и състава на отпадъчната вода</i>

Параметър	Препоръчителни стойности	Съображения
Концентрация на биомасата в системата	0,6 – 1,8 g/L	Желателно е да се избягват твърде високи концентрации над 1,8 g/L (хиперконцентрации), заради взаимното засенчване, но закритите конструкции позволяват поддържането на концентрации в горната част на диапазона, особено при тези с по-високо съотношение S/V.
Интензивност на осветяване	150 – 850 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ (стандартно около 200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)	В зависимост от концентрацията на биомасата в системата – по-висока концентрация, съответно по-голяма интензивност и обратно.
pH на средата	pH = 7 – 9	Контролът на този параметър се осъществява чрез количеството на CO ₂ , който се подава в системата.
Концентрация на разтворен кислород	може да достигне до 200% върхнасищане	Възможна е токсичност от високи концентрации на разтворения кислород в системата. Поради тази причина всички конструкции са снабдени с обезвъздушителна система и слънчевите приемници се запазват максимално къси, за да не се получава акумулиране на кислород в определени зони и инхибиране на процесите на пречистване.
Температура	16 – 3 °C (оптимално около 25 °C)	При фотобиореакторите контролът на този параметър е труден, поради херметически затворената им конструкция.

4. Сравнителен анализ на трите вида закрити реактори с алги

В табл. 2 е представен сравнителен анализ по основни параметри на трите типа конструкции фотобиореактори [1].

Таблица 2. Сравнение на различните конструкции закрити реактори със суспендирана биомаса от микроалги, изготвено по подобие на [1]

Вид фотобиореактор	Предимства	Недостатъци
Панелни фотобиореактори	Високо съотношение S/V	Изискват голяма площ
	Подходящи за монтаж на открито	Възможно е инхибиране при интензивно огряване
	Интензивно нарастване на биомасата	Проблеми с образуването на тъмни зони
	Възможност за модулни конфигурации	Високи капиталовложения и експлоатационни разходи

Вид фотобиореактор	Предимства	Недостатъци
Цилиндрични фотобиореактори	<i>Добър масов пренос</i>	<i>За предпочитане е добавяне на втори източник на светлина (вътрешен)</i>
	<i>Ефикасно разбъркване</i>	<i>Ниско S/V</i>
	<i>Сравнително компактна система</i>	<i>Високи разходи за разбъркване</i>
	<i>По-добро задържане на газове (от гледна точка на CO₂)</i>	<i>С увеличаването на размерите на съоръжението се намалява и ефективността на огряване на системата в дълбочина</i>
	<i>Относително лесно за преминаване от лабораторни в пилотни условия</i>	
	<i>Малко проблеми с качеството и миризмите на водата на изхода</i>	
Тръбни фотобиореактори	<i>Високо съотношение S/V</i>	<i>По-трудни за преминаване от лабораторни в пилотни условия</i>
	<i>Относително лесно изграждане и поддръжка</i>	<i>Проблем с миризмите на изход</i>
	<i>Добър масов пренос</i>	<i>Прегряване</i>
	<i>Най-малка консумация на енергия от закритите реактори с алги</i>	<i>Високи експлоатационни разходи</i>

5. Сравнителен анализ на откритите и закритите реактори с алги

В табл. 3 е представен сравнителен анализ на двете големи групи биореактори – открити и закрити [9 – 11, 16, 28, 30]:

Таблица 3. Сравнителен анализ на откритите и закритите реактори със суспендирана биомаса от микроалги

Категория	Открити реактори със суспендирана биомаса от микроалги	Закрити реактори със суспендирана биомаса от микроалги
Устройство и експлоатация	<i>Просто устройство и улеснена експлоатация заради по-малкото компоненти на системата – основно предимство</i>	<i>Сложно устройство и съответно по-трудна експлоатация</i>

Категория	Открити реактори със суспендирана биомаса от микрoалги	Закрити реактори със суспендирана биомаса от микрoалги
Устройство и експлоатация	<i>По-ниска интензивност на процесите и неравномерно денонощно и сезонно нарастване на биомасата</i>	<i>По-бързо нарастване на биомасата и по-висока интензивност на процесите</i>
	<i>По-непостоянни резултати, отколкото при закритите</i>	<i>По-постоянни резултати, отколкото при откритите</i>
	<i>По-слаб контрол на параметрите</i>	<i>Добър контрол на параметрите на системата</i>
	<i>По-ниски експлоатационни разходи</i>	<i>По-високи експлоатационни разходи</i>
	<i>Твърде голяма заемана площ поради малката дълбочина и големия хидравличен времепрестой</i>	<i>Голяма заемана площ поради големия хидравличен времепрестой и необходимостта от високо съотношение Sf/V</i>
Проникване на светлина	<i>Относително равномерно в целия реактор, но сравнително ниско и зависимо от условията на средата</i>	<i>Високо съотношение Sf/V, което обуславя по-добро протичане на процесите</i>
	<i>Поддържане на ниски концентрации на водорасли, за да достига светлина, което забавя процесите (до 1,5 mg/L)</i>	<i>Възможност за поддържане на по-високи концентрации на водорасли, поради по-високото съотношение Sf/V (над 1,5 mg/L)</i>
	<i>Малката дълбочина обуславя проблеми с разбъркването и площта</i>	<i>Обрастване на стените, което окъпява и усложнява експлоатацията</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>По-скъпа и по-сложна експлоатация поради липсата на възможност за реарация от атмосферата с CO₂</i>
	<i>Труден контрол на точната концентрация на този параметър, дори и при системи с допълнително добавяне на CO₂</i>	<i>По-ефективно насищане на водата с CO₂ в сравнение с откритите реактори и съответно по-добър контрол на този параметър</i>
Разбъркване	<i>Евтино (изцяло чрез лопатков миксер с хоризонтална ос) и лесно, но с голям риск от образуването на мъртви зони. Слаб контрол</i>	<i>По-лесно се контролира, но е по-скъпо, отколкото при откритите системи (изцяло чрез системата за аерация)</i>
		<i>Трудно за оптимизиране (възможност за срязване на клетките или мъртви зони)</i>

Категория	Открити реактори със суспендирана биомаса от микрoалги	Закрити реактори със суспендирана биомаса от микрoалги
Замърсяване на използваната чиста култура от микрoалги с други видове водорасли	<i>Голяма вероятност за замърсяване и при по-агресивни култури на съответната географска ширина може да се получи изменение в параметрите на реактора</i>	<i>Значително редуциран риск от замърсяване на чистата култура, поради изолираността на системата от околната среда.</i>
	<i>Не е толкова проблемно при пречистването на отпадъчни води, тъй като много често не е необходима особена чистота на културата алги</i>	
Токсичност от високи концентрации на разтворен кислород	<i>Малко вероятно за настъпване поради слабата разтворимост на кислорода във вода и преминаването му в атмосферата при намаляване на греенето</i>	<i>Риск от кислородна токсичност при интензивно греене</i>
	<i>Трябва да се внимава в часовете с пикови осветявания, за да не се инхибират процесите, но рискът не е толкова голям, колкото при откритите</i>	<i>Контролира се частично със системата за обезвъздушаване</i>
Температура	<i>Труден контрол на този параметър. На някои географски ширини може да се наложи допълнително подгриване на реакторите, което оскъпява експлоатацията</i>	<i>Относително добра възможност за контрол на този параметър (при нужда от охлаждане то може да се осъществи през системата за аерация)</i>
	<i>Процесите остават стабилни дори и при вариации в температурата</i>	<i>Възможно е прегряване на реакторите, особено през летните месеци поради концентрирането на UV лъчи в реактора и закритата му конструкция</i>

4. Изводи

Закритите технологии със суспендирана биомаса от микрoалги предоставят възможност за по-прецизен контрол на параметрите на системата в сравнение с откритите системи. Това е и една от основните причини те да се прилагат по-скоро при култивирането на чисти култури от микрoалги за добив на полезни вещества (горива, багрила, биополимери, продукти за хранително-вкусовата промишленост и т.н.), отколкото за пречистване на отпадъчни води, където водещи все още са откритите биореактори с биомаса от микрoалги. Въпреки това, през последните години закритите системи претърпяват силно развитие и в това направление поради усъвършенстването на технологиите, свързани с отделните компоненти на реакторите (здравина и прозрачност на кор-

пуса, аерация и т.н.), което привлича научния интерес за продължаване на изследванията върху закритите фотобиореактори.

Направеният сравнителен анализ между двете големи групи биореактори – открити и закрити, основан на широк литературен обзор, показва, че:

- Закритите фотобиореактори се прилагат по-рядко от откритите системи за пречистване на отпадъчни води със суспендирана биомаса от микроалги, но намират по-широко приложение при култивирането на чисти култури микроалги за извличането на полезни вещества от тях.
- Тръбните фотобиореактори са най-предпочитаната конструкция от закрития тип реактори за пречистване на отпадъчни води със суспендирана биомаса от микроалги поради доброто си съотношение S/V , относително лесната си поддръжка и най-малката консумация на електроенергия в сравнение с другите конструкции закрити системи с алги.
- Точното специфициране на конкретните технологични параметри при закритите системи и критериите за избор на най-подходяща конструкция от този вид реактори остават все още неясни.
- До момента и за двата вида реактори със суспендирана биомаса от микроалги (открити и закрити) е докладвано в литературата прилагането им до лабораторно и пилотно ниво, като системите срещат трудности при опитите за интегриране в реални ПСОВ.
- Независимо, че контролът на параметрите на системата и факторите на околната среда е значително по-добър, отколкото при откритите реактори, вторите остават предпочитана конструкция за прилагане в системите за пречистване на отпадъчни води.
- Дори и при интензифицирането на процесите поради постигането на по-благоприятни условия в реактора, хидравличният времепрестой в системата и необходимостта от осигуряването на високо съотношение на околната (осветената) повърхнина на светлинния приемник към общия обем на реактора, обуславят необходимост от твърде голяма площ, заемана от закритите реактори със суспендирана биомаса от микроалги, съпоставима с тази при откритите системи. Това от своя страна е предпоставка за високи капиталовложения при проектирането и изграждането на реална ПСОВ, с който и да е от двата вида технологии със суспендирана биомаса от микроалги в схемата си, което се явява един от основните лимитиращи фактори за прилагането им в практиката.
- Закритите реактори със суспендирана биомаса от микроалги имат значително по-сложно устройство от откритите, като е необходимо добавянето на допълнително количество въздух към средата и допълнителна система за чистене на обрасналите части на светлинния приемник. Това значително увеличава експлоатационните разходи и усложнява работата със закритата система на място на станцията (от 3 до 10 пъти по-скъпи системи в сравнение с откритите реактори с алги).
- Закритата технология не решава основния проблем при системите със суспендирана биомаса от микроалги, а именно отделянето на алгите от водата след процесите на пречистване. Методите остават същите като при открити

тите реактори. Това стъпало е основният експлоатационен разход за електроенергия или реагенти на системите със суспензия от алги.

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. *Ngo, H. et al.* Advances of Photobioreactors in Wastewater Treatment: Engineering Aspects, Applications and Future Perspectives. Water and Wastewater Treatment Technologies, ISBN: 9780080523842, China, 2019.
2. *Hwang, J. et al.* Use of Microalgae for Advanced Wastewater Treatment and Sustainable Bioenergy Generation. // ENVIRONMENTAL ENGINEERING SCIENCE, 2016, 33.
3. *Udaiyappana, A. et al.* A review of the potentials, challenges and current status of microalgae biomass applications in industrial wastewater treatment. // Journal of Water Process Engineering, 2017, 20: 8–21.
4. *Khan, M. et al.* The promising future of microalgae: current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products. // Microbial Cell Factories, 2018, 17(1):36.
5. *Lage, S. et al.* Algal Biomass from Wastewater and Flue Gases as a Source of Bioenergy. // Energies, 2018, 11(3):664.
6. Oilgae Guide to Algae-based Wastewater Treatment, India, 2010.
7. *Priyadarshani I., Rath B.* Commercial and industrial applications of micro algae – A review. // Journal of Algal Biomass Utilization, 2012, 3(4): 89–100.
8. *Fernández, F. et al.* Recovery of Nutrients From Wastewaters Using Microalgae. // Frontiers in Sustainable Food Systems, 2018, 2:59.
9. *Ting, H. et al.* Progress in microalgae cultivation photobioreactors and applications in wastewater treatment: A review. // International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2017, 10(1): 1–29.
10. *Mata, T. et al.* Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14: 217–232.
11. *Christenson, L., Sims, R.* Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels and bioproducts. // Biotechnology Advances, 2011, 29: 686–702.
12. *Wang, H. et al.* The contamination and control of biological pollutants in mass cultivation of microalgae. // Bioresource Technology, 2013, 128: 745–750.
13. *Zhang, X. et al.* Harvesting algal biomass for biofuels using ultrafiltration membranes. // Bioresource Technology, 2010, 101: 5297–5304.

14. *Bilad, M. et al.* Harvesting microalgal biomass using submerged microfiltration membranes. // *Bioresource Technology*, 2012, 111: 343–352.
15. *Branyikova, I. et al.* Harvesting of Microalgae by Flocculation. // *Fermentation*, 2018, 93.
16. *Gupta, P. et al.* A mini review: photobioreactors for large scale algal cultivation. // *World J Microbiol Biotechnol*, 2015, 9:1409-17.
17. *Wang, J. et al.* A preliminary implementation of metabolic-based pH control to reduce CO₂ usage in outdoor flat-panel photobioreactor cultivation of *Nannochloropsis oceanica* microalgae. // *Algal Research*, 2016, 18: 288–295.
18. *Khichi, S. et al.* Mathematical Modeling of Light Energy Flux Balance in Flat Panel Photobioreactor for *Botryococcus braunii* Growth, CO₂ Biofixation and Lipid Production under Varying Light Regimes. // *Biochemical Engineering Journal*, 2018, 134.
19. *Sforza, E. et al.* Design of microalgal biomass production in a continuous photobioreactor: An integrated experimental and modeling approach. // *Chemical Engineering Research and Design*, 2013.
20. *Mayorga, C.* Cualidades Nutricionales del Alga *Dunaliella salina* como un Suplemento Alimenticio. Thesis at Universidad Tecnológica de Panamá, 2016.
21. *Satpati, G., Pal, R.* Microalgae- Biomass to Biodiesel: A Review. // *Journal of Algal Biomass Utilization*, 2018, 9(4): 11-37.
22. *Huo, S. et al.* Biomass Accumulation of *Chlorella Zofingiensis* G1 Cultures Grown Outdoors in Photobioreactors. // *Frontiers in Energy Research*, 2018, 6:49.
23. *Chiu, S. et al.* The air-lift photobioreactors with flow patterning for high-density cultures of microalgae and carbon dioxide removal. // *Engineering in Life Sciences*, 2009, 9(3): 254–260.
24. *Kommareddy, A. et al.* The Impact of Air Flow Rate on Photobioreactor Sparger/Diffuser Bubble Size(s) and Distribution. Conference paper: Kansas City, Missouri, July 21 – July 24, 2013.
25. *Kroumov, A. et al.* Analysis of Sf/V ratio of photobioreactors linked with algal physiology. // *Genetics & Plant Physiology*, 2013, 3.
26. *Pozza, C. et al.* A novel photobioreactor with internal illumination using Plexiglas rods to spread the light and LED as a source of light for wastewater treatment using microalgae. World Congress on Water, Climate and Energy, Dublin, Ireland, 2013.
27. *Karemore, A. et al.* Photobioreactors for Improved Algal Biomass Production: Analysis and Design Considerations. // *Algal Biorefinery: An Integrated Approach*, ISBN: 978-3-319-22813-6, India, 2015.
28. *Huang, Q. et al.* Design of Photobioreactors for Mass Cultivation of Photosynthetic Organisms. // *Engineering*, 2017, 3: 318–329.
29. *Rastegari, A. et al.* Prospects of Renewable Bioprocessing in Future Energy Systems. // *Biofuel and Biorefinery Technoloies*, 2019, 10.
30. *Вълчев, Д.* Открити реактори със суспендирана биомаса от микроалги: световни постижения и предизвикателства. // *Годишник на УАСГ*, 2020, 53 (1): 31-42.

ON THE APPLICATION OF THE ENCLOSED REACTORS WITH SUSPENDED ALGAE FOR WASTEWATER TREATMENT

D. Valchev¹

Keywords: algae, phosphorus, photobioreactors, enclosed algae systems, open algae systems, wastewater treatment

ABSTRACT

Algae-based wastewater treatment is considered one of the technologies of the future, because of the possibility of a simultaneous removal of biogenous elements from wastewater and their incorporation into a high caloric biomass. The present paper makes a comparison both between the three main types of enclosed suspended algae systems (Photobioreactors) and with the group of open microalgae bioreactors. The analysis displays that the photobioreactors provide better control over the systems and more consistent results. But the complicated and expensive operation, the huge area demand and the remaining hardship concerning the algae harvesting after the wastewater treatment process are limiting the application of the technology. This makes the enclosed systems applicable more often for the cultivation of pure cultures of microalgae for nutrients and valuable substances extraction, than for wastewater treatment, where the open systems still remain the best option.

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