

Перспективы использования культивируемых водорослей хлореллы при доочистке и обеззараживании сточных вод на очистных сооружениях

Михаил Вячеславович Карпов¹, Ольга Валерьевна Наумова², Андрей Анатольевич Жиздюк¹, Анна Александровна Малышева³

¹ ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия

² ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», г. Саратов, Россия

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

e-mail: uunaumov@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются перспективные возможности использования микроводорослей хлореллы на очистных сооружениях, на стадии обеззараживания и доочистки сточных вод до уровня соответствующего санитарным нормам Российской Федерации. Проведен анализ статистических данных связанных с использованием суспензии *Chlorella vulgaris* в качестве микробиологического и химического элемента биологической очистки сточных вод перед их сбросом в водный объект. Изучены перспективные направления создания энергосберегающих технологических комплексов, в том числе гидравлических (проточных), солнечных фотобиореакторов, способных обеззараживать сточную воду и культивировать, применяемые при обеззараживании и альголизации водных объектов, штаммы Хлореллы. Определена экономическая эффективность технологических комплексов, использующих штамм *Chlorella vulgaris* (ИФР № С-111 или BIN) на стадии доочистки и обеззараживания сточных вод.

Ключевые слова: сточная вода; обеззараживание; хлорелла; микроводоросли; очистные сооружения; биологическая очистка; солнечный фотобиореактор.

Для цитирования: Карпов М. В., Наумова О. В., Жиздюк А. А., Малышева А.А. Перспективы использования культивируемых водорослей хлореллы при доочистке и обеззараживании сточных вод на очистных сооружениях // Аграрный научный журнал. 2023. № 1. С. 150–154. <http://10.28983/asj.y2023i1pp150-154>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

Prospects for the use of cultivated algae chlorella in the purification and disinfection of wastewater, hydraulic, solar photobioreactors

Mikhail V. Karpov¹, Olga V. Naumova², Andrey A. Zhizdyuk¹, Anna A. Malysheva³

¹ Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

² Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

³ Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

e-mail: uunaumov@mail.ru.

Abstract. The article discusses the potential use of *Chlorella* microalgae in wastewater treatment plants, at the stage of disinfection and post-treatment of wastewater to the level corresponding to the sanitary standards of the Russian Federation. The analysis of statistical data related to the use of *Chlorella vulgaris* suspension as a microbiological and chemical element of biological wastewater treatment before its discharge into the water body is carried out. Studied promising areas of building energy saving technological complexes, including hydraulic (flow), solar photobioreactors, able to decontaminate waste water and to cultivate used in the disinfection and legalisatie water features, strains of *Chlorella*. The economic efficiency of technological complexes using *Chlorella vulgaris* strain (IGF № C-111 or BIN) at the stage of post-treatment and disinfection of wastewater is determined.

Keywords: waste water; disinfection; *Chlorella*; microalgae; treatment facilities; biological treatment; solar photobioreactor.

For citation: Karpov M. V., Naumova O. V., Zhizdyuk A. A., Malysheva A.A. Prospects for the use of cultivated algae chlorella in the purification and disinfection of wastewater, hydraulic, solar photobioreactors // Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal. 2023;(1):150–154. (In Russ.) <http://10.28983/asj.y2023i1pp150-154>.

Введение. В современном мире главным источником загрязнения водных объектов являются бытовые, промышленные и сельскохозяйственные сточные воды [1–7, 16, 17]. Для жизни и здоровья людей, проживающих возле рек и водоемов, может быть весьма опасным наличие в сточных





водах патогенных микроорганизмов, которые могут стать возбудителями болезней и эпидемий. К числу таких микроорганизмов можно отнести: палочку колифага, яйца гельминтов, а так же бактерии и вирусы, и при этом, наличие в воде разлагающихся отходов органического характера, может быть дополнительным элементом для стимулирования роста количества таких патогенных микроорганизмов [1, 2].

Очистные сооружения нацелены на очистку сточных вод от органических и биологических загрязнений [3–6].

Современные очистные сооружения эффективно осуществляют очистку сточных вод в аэротенках или биофильтрах, в которых органические примеси перерабатываются быстро и эффективно, но патогенная микрофлора преимущественно культивируется и сохраняется [5–7]. Именно поэтому системы обеззараживания сточной воды на стадиях доочистки в настоящее время как никогда актуальны.

Методика исследований. На современных станциях очистки сточных вод широко применяют ультрафиолетовое облучение и гипохлорит натрия NaClO [4] как безопасные и эффективные технологии.

Раствор гипохлорита натрия для очистки сточных вод можно получить несколькими способами: приготовить его электролитическим методом раствора поваренной соли (NaCl) или с помощью хлорирования молекулярным хлором (Cl_2) раствора едким натром (NaOH); можно получить из товарного агента. Полученный раствор смешивают в смесителе сточной воды, подают в резервуар, в котором определяется процентное содержание гипохлорита натрия в процентном соотношении при выдерживании в течение 5 мин до 1 ч и более.

Гипохлорит способен уничтожить 99,9 % всех известных бактерий при кратковременном воздействии на них. Достаточно использовать раствор в концентрации 8,5 % в течение 20–30 мин, чтобы полностью уничтожить патогенную микрофлору. Недостатком гипохлорита натрия является его быстрое разложение и невозможность длительного хранения, а также необходимость использовать сооружения с высокой коррозионной стойкостью.

Благодаря помещенным в специальные чехлы ультрафиолетовым лампам происходит обеззараживание сточных вод. В результате воздействия ультрафиолетовых ламп электромагнитным излучением на бактерии, происходит разрушение ДНК бактерий, РНК вирусов и патогенных простейших. Это воздействие также препятствует их дальнейшему размножению.

Поэтому эффективность применения ультрафиолетовых ламп и микробиологические показатели воды полностью соответствуют требованиям санитарно-гигиенических норм [8]. Преимущество заключается в отсутствии вредного воздействия на окружающую среду, простоте, экономичности, отсутствии химикатов. Недостаток данного метода – необходимость существенного расхода электроэнергии для ультрафиолетовых ламп, необходимость их периодической замены.

Затраты при обработке воды зависят от мутности воды и размеров установки [9]. На крупных сооружениях применяются системы обеззараживания работающие при низком ($30\% < \tau < 65\%$), среднем ($60\% < \tau < 80\%$), и высоком ($75\% < \tau < 98\%$) коэффициенте пропускания ультрафиолетового излучения [9].

Пример, установка DUV-7A500-N MST для обеззараживания сточных вод при потреблении мощности 3,7кВт имеет производительность в $150 \text{ м}^3/\text{ч}$ и коэффициенте пропускания ультрафиолетового излучения $\tau = 70\%$ и $130 \text{ м}^3/\text{ч}$ при коэффициенте пропускания ультрафиолетового излучения $\tau = 65\%$, соответственно. Текущие и эксплуатационные затраты на электроэнергию, замену ртутных и амальгамных ультрафиолетовых ламп и другие будут составлять около 10 копеек на кубический метр сточной воды.

Необходимо предусмотреть также дополнительные риски эксплуатации ртутных ламп, а именно техногенные аварии, в результате которых ртуть может попасть в сточную воду.

Обеззараживание и доочистка сточных вод применением химического и микробиологической добавки суспензии *Chlorella vulgaris*

Из разнообразия водорослей нами выбрана экологически чистая не токсичная одноклеточная зеленая водоросль *Chlorella vulgaris* – активный производитель биомассы, так называемая хлорелла.

Штамм хлореллы подразделяется на криофильные (для них благоприятна температура жизнедеятельности $10 \dots 15^\circ\text{C}$); мезофильные ($25 \dots 27^\circ\text{C}$); термофильные (с температурой для жизнедеятельности $35 \dots 37^\circ\text{C}$) [10].



Для очистки сточных вод нефтеперерабатывающих и химических заводов, свиноводческих комплексов и птицефабрик рекомендуем использовать биофильтры с водорослями хлореллы. Такие фильтры позволяют очищать воды от нефтепродуктов, фенольных примесей, неорганических и органических загрязнений, фосфатов и азотных компонентов и при этом стабилизируются и нормализуются гидробиологические параметры сточных вод. Так, в Российской Федерации рекомендуется применять темно-зеленые штаммы *Chlorella vulgaris* ИФР № С-111, и *Chlorella vulgaris* BIN [10], которые доказали в результате опыта их применения оптимальность и востребованность (см. таблицу).

Сравнительные характеристики водорослей *Chlorella vulgaris* из Пензенского водохранилища и штамма *Chlorella vulgaris* ИФР № С-111

Показатель	Аборигенный вид <i>Chlorella vulgaris</i>	Штамм <i>Chlorella vulgaris</i> ИФР № С-111
Размер клетки, мкм	3–6	4–9
Рост на питательной среде	удовлетворительный	хороший
Способность к осаждению	осаждается	не осаждается
Прилипание к стенкам сосуда	прилипает	не прилипает
Отношение к свету	не светолюбив	светолюбив

Также *Chlorella vulgaris* ИФР № С-111 и BIN проявляют планктонные свойства и равномерно распределяются в толще воды.

Опытным путем выявлено, что штаммы *Chlorella vulgaris* ИФР № С-111 и BIN за короткое время эффективно обеззараживают сточные воды [10, 11].

Chlorella vulgaris ИФР № С-111 и *Chlorella vulgaris* BIN успешно культивируются в средней полосе России под прямыми лучами солнца, так как лимитирующими факторами для них являются освещенность в течение 7–10 ч и температура 26...36°C.

Chlorella vulgaris BIN растет и культивируется в температурном диапазоне 20...40°C.

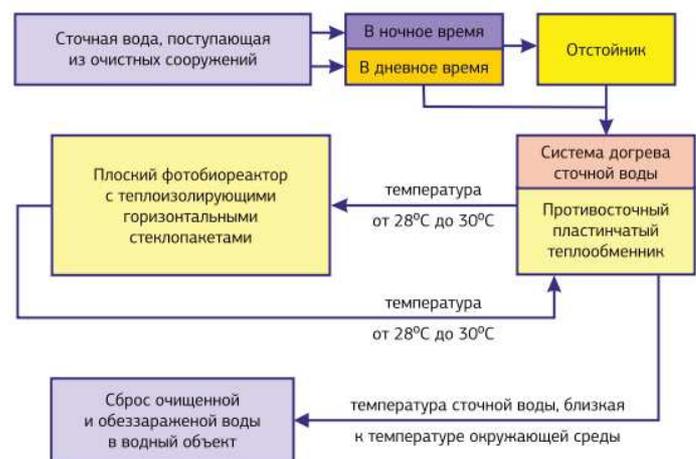
Средний температурный режим этих двух штаммов: 20...30°C.

Chlorella vulgaris очень быстро размножаются, невосприимчивы к фагам, являются антагонистами инфузорий и бактерий.

В сточных водах альгофлора растворяется за 4–8 ч, инфузории и бактерии погибают за 6–10 ч [11]. А при наличии в воде хлореллы концентрацией 40 млн./мл, обеззараживание происходит гораздо быстрее. Исходя из этого, становится возможным разработать технологические решения, способные кардинально поменять подход к обеззараживанию и очистке стоков. Технологическая схема процесса очистки и обеззараживания сточной воды представлена в виде блок-схемы на рисунке.

Результаты исследований. Таким образом, сточная вода проходит биологическую и механическую очистку. Для дальнейшего обезвреживания данную воду отправляют в отстойник на ночное время, а в утренние часы, смешивая с очищенной водой, постепенно откачивают ее, производят тепловой обмен в системе догрева для снижения температуры обеззараженной воды, и подогрев загрязненной воды до температуры 25...26 °С. Очищенная вода подается в водные объекты.

Далее требующую очистку теплую сточную воду подают в горизонтальный теплоизоляционный канал для смешивания с жидкой концентрацией хлореллы, где на смесь воздействуют солнеч-



Процесса обеззараживания и биологической переработки сточных вод биофильтра с помощью *Chlorella vulgaris* (С-111 и BIN) [15]

ным излучением (ультрафиолетовыми лучами). Хлорелла под воздействием солнечных лучей, за счет реакции фотосинтеза способна вырабатывать кислород и особые ферменты, необходимые для обеззараживания воды и уничтожения патогенных бактерий. Таким образом, от интенсивности и продолжительности воздействия ультрафиолетовых лучей, концентрации хлореллы и болезнетворных микроорганизмов в воде, зависит время обеззараживания и эффективность очистки стоков.

Производительность биофильтра может быть определена по следующей формуле:

$$G = (1 - k_1) \cdot H \frac{BL}{T} = (1 - k_1) \cdot H \frac{S}{T},$$

где G – расход сточной воды подаваемой на обеззараживание ($\text{м}^3/\text{с}$, или $\text{м}^3/\text{ч}$); k_1 – объемная доля суспензии хлореллы, которая отводится из очищенной воды после обеззараживания в фотобиореакторе; H – постоянная глубина фотобиореактора, м; B – ширина фотобиореактора, м; L – длина фотобиореактора; T – среднее время обеззараживания 1 м^3 сточных вод (выраженное в секундах или часах); S – площадь поверхности биофильтра, освещаемая солнцем, м^2 .

При этом объемная доля суспензии хлореллы k_1 определяется с учетом данных о развитии и культивировании клеток хлореллы в сточной воде и для концентрации клеток в 20 млн/мл, или более может быть принята как $k_1 0,4$, согласно данным [10–13]. Постоянная глубина корпуса фильтра H , может быть определена в диапазоне от 0,15 до 0,20 м с учетом интенсивности солнечного излучения и эффективности синтеза у штаммов хлореллы в мутной сточной воде, представленной в [10].

На последнем этапе обеззараживания вода с минимальным содержанием суспензии со штаммом хлореллы разделяется на выходе из гидравлического биофильтра с использованием нижеописанных решений:

- 1) благодаря изменению температуры происходит на поверхности воды концентрирование хлореллы;
- 2) хлорелла находится на поверхности воды и удаляется в отводной канал, а очищенная вода течет по другим трубам;
- 3) методом флотации происходит отделение хлореллы от очищенной сточной воды [11].

После того, как хлорелла будет отделена от обеззараженной воды, жидкая суспензия хлореллы попадет в отводной канал, а вода – в противоточный пластинчатый теплообменник.

Затраты на обеззараживание таким методом довольно таки низкие, составляют менее 0,05 руб. на 1 м^3 воды.

После выхода из теплообменника очищенная вода с малой концентрацией хлореллы сбрасывается в водный объект, оказывая положительное влияние на его санитарное состояние (предотвращается «цветение» воды, водный объект насыщается кислородом, разрушаются токсичные соединения, подавляется рост бактерий). Это все благотворно сказывается на дальнейшем использовании водного объекта.

Заключение. Применение суспензии *Chlorella vulgaris* (ИФР № С-111 или В1N) кардинально меняет в лучшую сторону процесс доведения воды до санитарных норм.

Благодаря попаданию в водный объект хлореллы, происходит подавление размножения бактерий, предотвращается «цветение» воды, разрушаются токсичные соединения, а также водный объект обогащается кислородом. Затраты на осуществление данной технологии достаточно малы: 0,05 руб. на 1 м^3 воды.

В зимнее время недостаток солнечного освещения успешно компенсируется искусственными системами ультрафиолетового излучения. А в летнее время, при большой патогенной нагрузке, ультрафиолетовые системы работают совместно с использованием природного солнечного излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ветошкин А.Г. Инженерная защита водной среды. СПб., 2014. 414 с.
2. Благодарумова А.М. Обработка и обезвоживание осадков городских сточных вод. СПб., 2014. 204 с.
3. Пугачев Е.А. Очистка городских сточных вод мегаполиса. М., 2013. 136 с.
4. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. ИТС 10-2015. Очистка





сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов. М., 2015. 377 с.

5. Ветошкин, А.Г. Процессы и аппараты защиты гидросферы. Пенза, 2004. 188 с.
6. Павлинова, И.И., Баженов В.И., Губий И.Г. Водоснабжение и водоотведение. М., 2016. 380с.
7. Луканин А.В. Процессы и аппараты биотехнологической очистки сточных вод. М., 2016. 242 с.
8. СанПиН 2.1.5.980-00 «Гигиенические требования к охране поверхностных вод». М., 2000.
9. НПО «ЛИТ». Технология ультрафиолетового обеззараживания воды. URL: <http://www.lit-uv.com/ru/technology/>.
10. Богданов Н.И. Биологическая реабилитация водоёмов. 3-е изд., доп. и перераб., Пенза, 2008. 126 с.
11. Богданов Н.И. Суспензия хлореллы в рационе сельскохозяйственных животных, 2-е изд. перераб. и доп. М., 2007. 48 с.
12. Дворецкий С.И., Пешкова Е.В., Темнов М.С. Экспериментальное исследование и моделирование роста микроводорослей штамма *Chlorella vulgaris* ИФР № С-111, Тамбов, 2015. 99 с.
13. Технология получения липидов из микроводорослей / Д.С. Дворецкий [и др.] // Вестник ТГТУ. 2014. Т. 20. С. 765–772.
14. Ксенофонтов Б.С. Очистка сточных вод: кинетика флотации и флотокомбайны. М., 2015. 256 с.
15. Исследование возможности использования микроводоросли *Chlorella vulgaris* в технологических процессах обеззараживания и доочистки сточных вод / Т. С. Король [и др.] // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2017. № 8(116). С. 34–40.
16. Кизяев Б. М., Мартынова Н. Б. Роль водных ресурсов в развитии агропромышленного комплекса России в условиях изменения климата // Развитие мелиорации в гармонии с природой. М., 2014. С. 169–178.
17. Кизяев Б. М., Мартынова Н. Б. Научно-техническое обеспечение выполнения ФЦП «развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения на 2014–2020 гг.» // Комплексные мелиорации – средство повышения продуктивности сельскохозяйственных земель: материалы юбилейной Междунар. науч.-практ. конф. М., 2014. С. 287–292.

REFERENCES

1. Vetoshkin, A.G. Engineering protection of the aquatic environment. Saint Petersburg, 2014. 414 p.
2. Razdorazumova A.M. Treatment and dewatering of urban sewage sludge. Saint Petersburg, 2014. 204 p.
3. Pugachev E.A. Purification of urban wastewater of the metropolis. Moscow, 2013. 136 p.
4. Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. ITS 10-2015. Wastewater treatment using centralized wastewater disposal systems of settlements, urban districts. Moscow, 2015. 377 p.
5. Vetoshkin A.G. Processes and devices for protecting the hydrosphere. Penza, 2004. 188 p.
6. Pavlinova I.I., Bazhenov V.I., Gubiy I.G. Water supply and sanitation. Moscow, 2016. 380 p.
7. Lukanin A.V. Processes and devices of biotechnological wastewater treatment. Moscow, 2016. 242 p.
8. SanPiN 2.1.5.980-00 “Hygienic requirements for the protection of surface waters”. Moscow, 2000.
9. NGO “LIT”. Technology of ultraviolet disinfection of water. URL: <http://www.lit-uv.com/ru/technology/>
10. Bogdanov N.I. Biological rehabilitation of reservoirs. 3 ed., additional and revised. Penza, 2008. 126 p.
11. Bogdanov N.I. Suspension of chlorella in the diet of farm animals, 2nd ed. and add. Moscow, , 2007. 48 p.
12. Dvoretzky S.I., Peshkova E.V., Temnov M.S. Experimental study and modeling of microalgae growth strain *Chlorella vulgaris* IGF No. S-111. Tambov, 2015. 99 p.
13. Technology of obtaining lipids from microalgae / D.S. Dvoretzky et al. *Vestnik TSTU*. 2014; 20: 765-772.
14. Ksenofontov B.S. Wastewater treatment: kinetics of flotation and flotation combines. Moscow, 2015. 256 p.
15. Investigation of the possibility of using *Chlorella vulgaris* microalgae in technological processes of disinfection and post-treatment of wastewater / T. S. et al. *Water treatment. Water treatment. Water supply*. 2017; 8(116): 34-40.
16. Kizyaev B. M., Martynova N. B. The role of water resources in the development of the agro-industrial complex of Russia in the conditions of climate change. *Development of land reclamation in harmony with nature*. Moscow, 2014: 169-178.
17. Kizyaev B. M., Martynova N. B. Scientific and technical support for the implementation of the Federal Target Program “Development of agricultural land reclamation for 2014-2020”. *Complex reclamation - a means of increasing agricultural land productivity*. Moscow, 2014: 287-292.

Статья поступила в редакцию 6.11.2022; одобрена после рецензирования 28.11.2022; принята к публикации 5.12.2022.

The article was submitted 6.11.2022; approved after reviewing 28.11.2022; accepted for publication 5.12.2022.