

Оригинальное исследование

DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-185-200

**И.В. Владимцева¹, И.В. Могилевская¹,
О.В. Колотова¹, В.Е. Древин²**

¹ Волгоградский государственный технический университет,
400005 г. Волгоград, Российская Федерация

² Волгоградский государственный аграрный университет,
400002 г. Волгоград, Российская Федерация

Магнитоуправляемые микроорганизмы для биологической очистки промышленных сточных вод

Микроорганизмы, иммобилизованные в магнитные носители, используются в биотехнологии для повышения эффективности и упрощения работы с микробными клетками. Целью данного исследования было получение магнитоуправляемых иммобилизованных форм экологически значимых микроорганизмов и изучение возможности их культивирования на искусственных питательных средах. В качестве объекта исследований использовали два бактериальных штамма рода *Bacillus*: *B. subtilis* ВГТУ05 и *B. species* ВГТУ06, перспективные для биологической очистки сточных вод промышленных производств. В работе провели иммобилизацию штаммов в магнитные альгинатные носители. Установлено, что иммобилизация бактериальных клеток не влияет на их жизнеспособность. Для проведения исследований был разработан экспериментальный прибор, создающий электромагнитное поле в бактериальной взвеси. Подобраны оптимальные параметры напряженности электромагнитного поля для выращивания штаммов в жидких питательных средах. Показано, что иммобилизованные в магнитные носители бактериальные штаммы-деструкторы дают прирост биомассы

© Владимцева И.В., Могилевская И.В., Колотова О.В., Древин В.Е., 2020

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License
The content is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



на 24,3–25,0% при культивирования их в электромагнитном поле. Полученные результаты могут быть использованы для разработки эффективной технологии биологической очистки промышленных сточных вод.

Ключевые слова: иммобилизация бактериальных клеток, магнитные носители клеток, воздействие электромагнитного поля на микроорганизмы, локальная биологическая очистка сточных вод, бактериальные штаммы-деструкторы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Магнитоуправляемые микроорганизмы для биологической очистки промышленных сточных вод / Владимцева И.В., Могилевская И.В., Колотова О.В., Древин В.Е. // Социально-экологические технологии. 2020. Т. 10. № 2. С. 185–200. DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-185-200

Original research

DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-185-200

**I.V. Vladimtseva¹, I.V. Mogilevskaya¹,
O.I. Kolotova¹, V.E. Drevin²**

¹ Volgograd State Technical University,
Volgograd, 400005, Russian Federation

² Volgograd State Agricultural University,
Volgograd, 400002, Russian Federation

Magnetically controlled microorganisms for the biological industrial wastewater treatment

Microorganisms immobilized on magnetic carriers are used in biotechnology to increase efficiency and simplify work with microbial cells. The aim of this study was to obtain magnetically controlled immobilized forms of the environmentally significant microorganisms and to study the possibility of their cultivation with artificial nutrient media. Two bacterial strains, identified as the genus *Bacillus*, were used as the research object: *Bacillus subtilis* ВГТУ05 and *B. species* ВГТУ06, promising for biological industrial wastewater treatment. The work carried out the immobilization of strains in magnetic alginate carriers. Established the bacterial cells' immobilization did not affect their vitality. The optimal parameters of the electromagnetic field

strength for growing strains in liquid nutrient media were selected. Shown the bacterial destructive strains immobilized into magnetic carriers gave the biomass increase of 24.3–25.0% during the cultivation in the electromagnetic field. The results could be used to develop the effective technology for local biological industrial wastewater treatment.

Key words: Immobilization of bacterial cells, magnetic carriers of cells, the electromagnetic field effect on microorganisms, local biological wastewater treatment, bacterial destructing strains

FOR CITATION: Vladimtseva I.V., Mogilevskaya I.V., Kolotova O.I., Drevin V.E. Magnetically controlled microorganisms for the biological industrial wastewater treatment. *Environment and Human: Ecological Studies*. 2020. Vol. 10. № 2. Pp. 185–200. (In Russ.) DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-185-200

Введение

Развитие промышленности и связанное с этим резкое увеличение количества промышленных стоков остро обозначило проблему поиска новых возможностей интенсификации биологической очистки сточных вод.

Иммобилизация – это прикрепление биологических объектов, например, клеток или их метаболитов, к нерастворимым носителям различной природы [Ткачук, 1978; Скрыбин, 1984; Гвоздяк, 1987; Иммобилизованные клетки микроорганизмов, 1994].

Бактериальные клетки, используемые в распространенных технологиях биологической очистки промышленных и бытовых сточных вод, являются иммобилизованной системой, т.к. находятся в прикрепленном состоянии на хлопьях активного ила в аэротенках или в биопленке на частицах загрузки биофильтров. Иммобилизованные на нерастворимых носителях микроорганизмы в различных по конструкции биореакторах, например, биофильтрах, используются уже более века. Однако только в последние десятилетия два направления – применение микроорганизмов-деструкторов и их иммобилизация на нерастворимых матрицах – произвели переворот в процессах биологической очистки сточных вод. Иммобилизованная на различных твердых носителях бактериальная микрофлора все шире применяется в научных исследованиях и промышленных технологиях для усовершенствования локальных методов биологической очистки сточных вод предприятий [Гвоздяк, 1985; Бухгалтер, 2003; Потапова, Владимцева, Колотова, 2005; Владимцева, Греков, Колотова, 2009; Кобызева, 2009; Герман, 2016].

Известно, что иммобилизованные клетки микроорганизмов имеют преимущества перед клетками суспензионной культуры:

- значительное упрощение разделения биологического объекта и среды по окончании процесса, что позволяет перейти от периодических технологий к более современным и производительным непрерывным схемам культивирования;
- в случае использования непрерывных процессов выращивания микроорганизмов появляется возможность более длительной эксплуатации микробных культур в иммобилизованном состоянии в отличие от однократного использования свободных клеток;
- увеличение эффективности превращения используемых при культивировании субстратов в конечные продукты в результате повышения концентрации биомассы в единице объема ферментера;
- снижение энергозатрат на процесс и упрощение процесса выделения и очистки целевых продуктов;
- повышение устойчивости клеток к действию различных неблагоприятных физико-химических факторов внешней среды, таких как температура, кислотность, концентрация токсических веществ [Скрябин, Кошечко, 1984; Форстер, Вейз, 1990].

В литературе описано значительное количество способов иммобилизации живых клеток, однако наиболее перспективным является включение этих биообъектов в нерастворимые полимерные гранулы. Преимущества данного метода – простота применяемой методики, возможность создания желаемой формы иммобилизованного препарата (гранулы, волокна, пленки), сохранение микробных клеток в жизнеспособном состоянии, высокая каталитическая активность микроорганизмов, возможность реализации непрерывных и многостадийных процессов [Скрябин, Кошечко, 1984; Burns, Kresitadze, Graves, 1985; Гвоздяк, 1987; Иммобилизованные клетки микроорганизмов, 1994].

Среди материалов, применяемых для иммобилизации живых микробных клеток, чаще всего используют альгинат, который является основным структурным полисахаридом бурых водорослей. Он состоит из связанных между собой остатков α -D-маннопиранозилуроната и α -L-гулопиранозилуроната. В присутствии двухвалентных катионов кальция этот полисахарид образует гель. Формирование геля происходит в мягких условиях, поэтому в нем можно иммобилизовать живые микробные клетки [Burns, Kresitadze, Graves, 1985].

Все большее внимание исследователей-экологов привлекают публикации, предлагающие использовать в локальной биологической очистке сточных вод микроорганизмы, иммобилизованные в магнитоуправляе-

мые носители [Потапова, 2006; Магнитные носители для иммобилизации, 2006; Герман, 2016]. Такие системы имеют преимущества перед обычными иммобилизованными формами бактериальных деструкторов загрязнений: простота управления объектами с помощью электромагнитного поля (ЭМП), быстрота отделения иммобилизованных клеток.

В случае применения магнитных носителей клеток встает задача исследовать воздействие ЭМП на используемый биологический объект. В научной литературе накоплен значительный материал о положительном влиянии этого энергетического поля на рост и накопление биомассы различных видов микроорганизмов. В частности, установлено, что под влиянием ЭМП изменяются некоторые свойства микробных клеток, например, химическая устойчивость, антибиотикорезистентность, термотолерантность, вирулентность. Воздействие ЭМП может изменить морфологические, культуральные, тинкториальные и биохимические свойства культур [Веркин, Бондаренко, Шеремет, 1976; Ткачук, 1978; Павлович, 1981; Гусев, Тамбиев, Кирикова, 1990; Билобров, Хиженков, 1993; Алавердян, Акопян, Чарян, 1996].

Цель и задачи исследования

Целью работы явилось получение и культивирование иммобилизованных в магнитные носители микроорганизмов, перспективных для очистки промышленных сточных вод.

Задачи:

- подобрать методику и осуществить иммобилизацию экологически значимых бактериальных культур, выделенных из сточных вод промышленных предприятий, в магнитные гранулы, проверить их жизнеспособность в иммобилизованной форме;
- определить оптимальные параметры ЭМП для интенсификации роста исследуемых микроорганизмов;
- изучить возможность культивирования в жидких питательных средах иммобилизованных форм микробных штаммов в ЭМП.

Материалы и методы

В качестве объекта исследований были выбраны две бактериальных культуры – штамм *Bacillus subtilis* ВГТУ05, изолированный из сточных вод кожевенного производства, и *B. species* ВГТУ06, выделенный из смыва с оборудования мясокомбината [Изоляция и исследование роста..., 2010]. Иммобилизацию микроорганизмов осуществляли методом включения в структуру гранулированного полимерного носителя

из альгината кальция с внесением в них частиц оксида железа, придающих гелевым гранулам свойство магнитоуправляемости.

Включение бактериальных клеток в полиакриламидные магнитные гранулы осуществляли в стерильных условиях следующим образом: сомомеры геля – 1,5 г акриламида и 0,5 г N,N¹-метиленбисакриламида растворяли в 7 мл физиологического раствора (0,89% NaCl), добавляли 0,3 г персульфата аммония и 1,5 г магнитного порошка. Раствор дегазировали в вакуумном шкафу в течение 10 мин. Отдельно готовили взвесь микроорганизмов с концентрацией в объеме 3 мл. В стерильный сосуд для полимеризации (цилиндр) наливали 150 мл органической фазы, например, растительного масла, вносили эмульгатор СПЭН-85 до 0,5% концентрации. При постоянном перемешивании путем барботаж азотом под давлением 0,2–2 атм по трубке диаметром 0,8–1,5 мм в сосуд вливали предварительно соединенные растворы ингредиентов полимеризации. После образования равномерной эмульсии «вода в масле» в реакционную смесь вносили 0,2 мл катализатора N,N,N¹,N¹-тетраметилэтилендиамина. После окончания полимеризации (10–15 мин), которое визуально определяли по помутнению эмульсии, в сосуд, не прекращая перемешивание, добавляли 50 мл 0,1% раствора Твин-20 для предотвращения агрегации гранул. Перемешивание продолжали еще 5 мин, микрогранулы отделяли от смеси, прикладывая к стенкам сосуда магнит, и тщательно промывали стерильным физиологическим раствором. Размер получаемых микрогранул: $83,7 \pm 6,7$ мкм.

Иммобилизацию культур в альгинатный магнитный носитель проводили в асептических условиях следующим образом: 0,08 г альгината натрия и 0,1 г оксида железа ресуспендировали в 1,9 мл фосфатного буферного раствора pH 7,2. Реагенты перемешивали на магнитной мешалке в течение 15 мин. Полученную взвесь стерилизовали кипячением в течение 20 мин. После охлаждения добавляли 0,1 мл взвеси культур с концентрацией 10^9 микробных клеток в 1 мл (кл./мл). После перемешивания получали альгинатные гранулы путем продавливания жидкости в 0,2 М раствор хлорида кальция через шприц объемом 1 мл с тонкой иглой. Осевшие на дно магнитные гранулы оставляли в растворе на 30 мин, после чего их тщательно отмывали на магнитной мешалке стерильным физиологическим раствором. Декантацию проводили, удерживая магнитные гранулы на дне пробирки с помощью постоянно магнита.

С целью изучения возможности культивирования микроорганизмов в иммобилизованном состоянии к альгинатным магнитным гранулам, содержащим микробные клетки, вносили 5 мл стерильной жидкой

питательной среды (производства ООО «Биокомпас», г. Углич). Среду готовили на дистиллированной воде и стерилизовали автоклавированием при 1 атм в течение 30–60 мин. Посевы инкубировали в течение 24 ч при 37 °С.

Изучение воздействия ЭМП различной напряженности на микроорганизмы проводили, используя экспериментальную установку, создающую соответствующее энергетическое поле в бактериальной взвеси. Принципиальная блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Разработанный прибор обеспечивает регулируемую напряженность электромагнитного поля внутри соленоида с внутренним диаметром 15 мм, в который помещается пробирка с бульонной культурой изучаемых микроорганизмов.

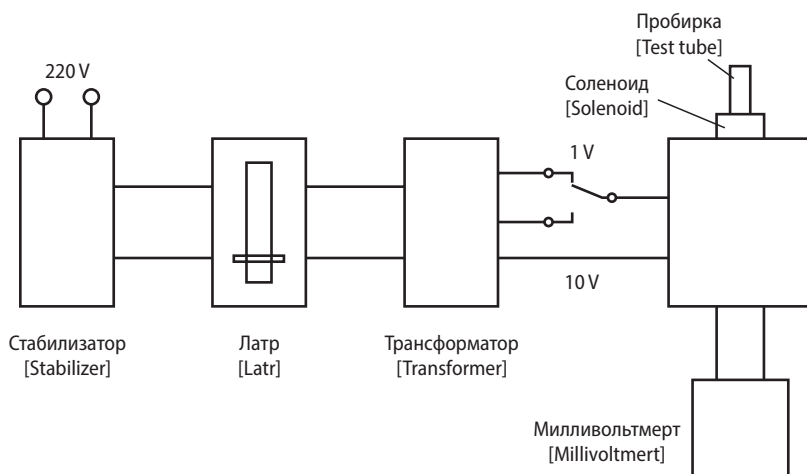


Рис.1. Блок-схема экспериментальной установки для изучения влияния ЭМП на микроорганизмы

Fig. 1. Block diagram of an experimental setup for studying the effect of electromagnetic fields on microorganisms

Концентрацию биомассы определяли оптическим методом на фотокориметре КФК-2-УХЛ-4.2 (ПО «ЗОМЗ», Россия) при длине волны 750 нм в кюветках с длиной оптического пути 5,065 мм. Для перевода условных единиц оптической плотности в единицы концентрации биомассы строили калибровочные графики для обеих микробиологических моделей. Приводимые результаты исследований являлись средними из трех параллельных измерений.

Результаты и их обсуждение

Для магнитного манипулирования микроорганизмами необходима разработка технологии иммобилизации живых бактериальных клеток в магнитные носители. В нашей работе был проведен анализ возможности применения для этих целей трех способов иммобилизации: включения бактериальных клеток в структуру полимерных сферических гранул, метода адсорбции на поверхность носителя и ковалентного метода прикрепления клеток с использованием химических реагентов. В качестве полимерных носителей были испытаны микрогранулированные гели на основе полиакриламида и альгината натрия.

Условия эмульсионной полимеризации при получении гранулированного полиакриламидного носителя отрицательно влияли на жизнеспособность живых микроорганизмов. Согласно литературным данным [Старостина, Луста, Фихте, 1985] некоторые ингредиенты этого носителя, в частности, акриламид, оказывают токсическое действие на живые бактериальные клетки. В результате проведенных экспериментов было установлено, что наиболее щадящие условия полимеризации полиакриламидного геля создаются при использовании в качестве органической фазы растительного масла. Однако методика приготовления полиакриламидных микрогранул, особенно в асептических условиях, является довольно трудоемкой, в связи с чем она, на наш взгляд, не перспективна для технологического использования.

Наиболее приемлемым для наших целей оказался способ включения микроорганизмов в магнитные альгинатные микрогранулы. Данный носитель образуется в более щадящих условиях и не требует диспергирования в гидрофобной фазе, поэтому перспективен для иммобилизации живых бактериальных клеток. Введение магнитного материала (оксида железа) в качестве компонента носителя придает иммобилизованной системе магнитоуправляемость, что значительно облегчает работу с ней. Методика проста, отличается быстротой выполнения и обеспечивает практически полное включение желаемого количества бактерий в альгинатный носитель.

В экспериментах были получены иммобилизованные формы бактериальных штаммов *Bacillus subtilis* ВГТУ05 и *B. species* ВГТУ06 на основе магнитных альгинатных носителей. Иммобилизованные формы этих микроорганизмов представляли собой шаровидные гранулы коричневого цвета диаметром 2–4 мм.

Для изучения жизнеспособности иммобилизованных форм бактерий гранулы помещали в стерильные жидкие питательные среды

и культивировали в течение суток при 37 °С. В качестве контроля использовали магнитные альгинатные гранулы, приготовленные без добавления бактериальных клеток. По истечении указанного времени в пробирках наблюдали рост биомассы, выражающийся в помутнении питательной среды. В табл. 1 представлены результаты изучения урожайности биомассы культур, иммобилизованных в магнитные гранулы.

Таблица 1

**Урожайность биомассы иммобилизованных микроорганизмов
в жидкой питательной среде
[Productivity of biomass of immobilized microorganisms
in a liquid nutrient medium]**

Наименование штамма [The name of the strain]	Оптическая плотность, усл. ед. [Optical density, conv. units]	Концентрация биомассы, ×10 ⁸ кл./мл [Biomass concentration, ×10 ⁸ cells/ml]
<i>Bacillus subtilis</i> ВГТУ05 Контроль	0,137 ± 0,01 0,000	7,0 0,0
<i>B. species</i> ВГТУ06 Контроль	0,142 ± 0,02 0,000	7,5 0,0

Данные, представленные в табл. 1, свидетельствуют, что оба штамма, иммобилизованные в магнитные гранулы, остались в жизнеспособном состоянии, росли и размножались в жидкой питательной среде. Контрольные гранулы, не содержащие бактериальную культуру, были стерильны.

Для реализации преимуществ использования иммобилизованных в магнитные гранулы клеток необходимо провести эксперименты по исследованию степени воздействия ЭМП на взятые в эксперимент бактериальные штаммы.

Микроорганизмы обладают различной чувствительностью к ЭМП, получаемый биологический эффект определяется особенностями каждого биологического объекта. В связи с этим универсальных параметров напряженности ЭМП, применимых к бактериальным клеткам, не существует.

Изучение влияния ЭМП на выбранные микробиологические модели проводили, помещая в экспериментальный прибор пробирки с жидкими питательными средами, засеянными исследуемыми бактериальными культурами. В качестве контроля использовали культивирование тех же штаммов в отсутствие ЭМП. Результаты эксперимента по исследованию воздействия ЭМП на штамм *Bacillus subtilis* ВГТУ05, перспективный для очистки сточных вод кожевенного производства, представлен на рис. 2.

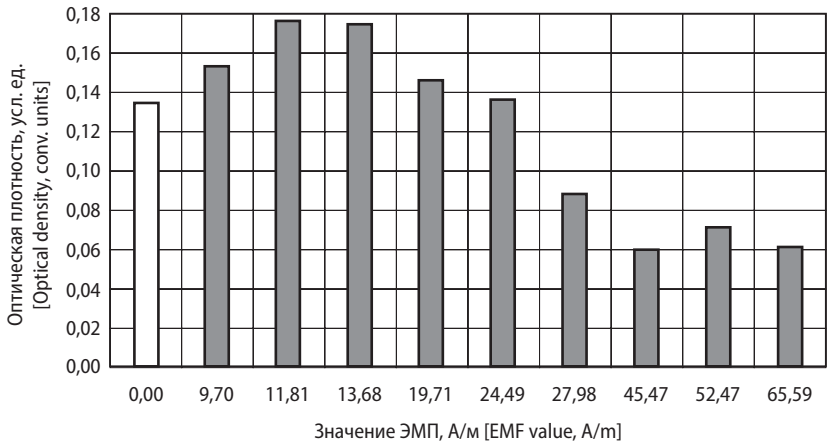


Рис. 2. Воздействие ЭМП на штамм *Bacillus subtilis* ВГТУ05.

В качестве контроля использовали культивирование тех же штаммов в отсутствие ЭМП

Fig. 2. The effect of EMF on the strain *Bacillus species* ВГТУ05.

Cultivation of the same strains in the absence of EMF was used as control

Полученные результаты свидетельствуют, что воздействие на культуру *Bacillus subtilis* ВГТУ05 ЭМП напряженностью 11,805 А/м было наиболее оптимальным, поскольку привело к увеличению урожайности этого штамма на 23,5% по сравнению с контролем.

На рис. 3 приведены результаты изучения влияния ЭМП различной напряженности на бактериальный штамм *B. species* ВГТУ06, перспективный для очистки сточных вод мясоперерабатывающего производства.

Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать вывод, что для культуры *B. species* ВГТУ06 наиболее оптимальным значением напряженности ЭМП является 13,675 А/м. В этих условиях урожайность исследуемого штамма увеличивается на 22,5% по сравнению с контрольным образцом.

Следующим этапом работы было культивирование иммобилизованных бактериальных штаммов в ЭМП оптимальной напряженности. В качестве контроля применяли интактные (неиммобилизованные) микроорганизмы, выращиваемые в той же питательной среде. В табл. 2 приведены результаты экспериментов по исследованию урожайности иммобилизованных культур в ЭМП.

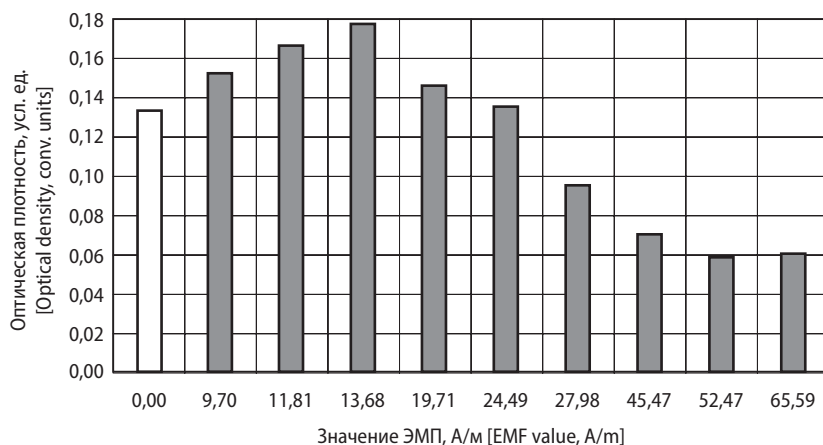


Рис. 3. Воздействие ЭМП на штамм *Bacillus species* ВГТУ06.

В качестве контроля использовали культивирование тех же штаммов в отсутствие ЭМП

Fig. 3. The effect of EMF on the strain *Bacillus species* ВГТУ06.

Cultivation of the same strains in the absence of EMF was used as control

Таблица 2

**Результаты культивирования в ЭМП
иммобилизованных бактериальных культур
[The results of cultivation in EMF immobilized bacterial cultures]**

Наименование штамма [The name of the strain]	Оптическая плотность, усл. ед. [Optical density, conv. units]	Концентрация биомассы, $\times 10^8$ кл./мл [Biomass concentration, $\times 10^8$ cells/ml]	Концентрация биомассы (контроль), $\times 10^8$ кл./мл [Biomass concentration (control), $\times 10^8$ cells/ml]	Прирост биомассы, % [The growth of biomass, %]
<i>Bacillus subtilis</i> ВГТУ05	0,175 \pm 0,04	9,2	6,9	24,3
<i>B. species</i> ВГТУ06	0,176 \pm 0,05	9,5	7,1	25,0

Данные, представленные в табл. 2, свидетельствуют, что при культивировании обоих иммобилизованных бактериальных штаммов произошло увеличение урожайности у штамма *Bacillus subtilis*

ВГТУ05 – на 24,3%, у культуры *Bacillus species* ВГТУ06 – на 25%. Прирост биомассы у обеих культур, по-видимому, связан со стимулирующим воздействием ЭМП.

Полученные в работе экспериментальные данные могут быть использованы для разработки эффективного метода локальной биологической очистки сточных вод с применением иммобилизованных магниточувствительных форм микроорганизмов-деструкторов в условиях оптимальной напряженности ЭМП.

Выводы

1. Получены иммобилизованные в магнитные альгинатные гранулы бактериальные клетки штаммов *B. subtilis* ВГТУ05 и *B. species* ВГТУ06, перспективные для использования в локальных сооружениях биологической очистки сточных вод.

2. Подобраны оптимальные параметры напряженности электромагнитного поля, интенсифицирующие рост микроорганизмов-деструкторов. Для культуры *B. subtilis* ВГТУ05 наиболее оптимальным значением напряженности электромагнитного поля являлось 11,805 А/м, а для штамма *B. species* ВГТУ06 – 13,675 А/м.

3. Показано, что иммобилизованные бактериальные штаммы *B. subtilis* ВГТУ05 и *B. species* ВГТУ06 дают прирост биомассы на 24,3 и 25,0% соответственно при культивировании их в ЭМП оптимальной напряженности.

Библиографический список / References

Алавердян Ж.Р., Акопян Л.Г., Чарян Л.М. Влияние магнитных полей на фазы роста и кислотообразующую способность молочнокислых бактерий // Микробиология. 1996. Т. 65. № 2. С. 241–244. [Alaverdyan Z.H., Akopyan L.G., Charyan L.M. The effect of magnetic fields on the growth phases and acid-forming ability of lactic acid bacteria. *Mikrobiologiya*. 1996. Vol. 65. No. 2. Pp. 241–244. (In Russ.)]

Билоборов В.М., Хиженков П.К. Об информационном и энергетическом влиянии электромагнитного излучения на бактериальные клетки // Электронная обработка материалов. 1993. № 2. С. 63–67. [Biloborov V.M., Khizhenkov P.K. *Elektronnaya obrabotka materialov*. 1993. No. 2. Pp. 63–67. (In Russ.)]

Бухгалтер Б.Л. Очистка сточных вод от нефтепродуктов с помощью иммобилизованных микроорганизмов: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2003. [Bukhgalter B.L. *Ochistka stochnykh vod ot nefteproduktov s pomoshhyu immobilizirovannykh mikroorganizmov* [Wastewater treatment from petroleum products using immobilized microorganisms]. PhD Diss. Moscow, 2003.]

Веркин В.И., Бондаренко С.И., Шеремет В.И. Влияние слабого магнитного поля на некоторые виды бактерий // Микробиология. 1976. Т. 45. № 6.

C. 1067–1070. [Verkin V.I., Bondarenko S.I., Sheremet V.I. The influence of a weak magnetic field on some types of bacteria. *Mikrobiologiya*. 1976. Vol. 45. No. 6. Pp. 1067–1070. (In Russ.)]

Владимцева И.В. Научно-методические аспекты получения и использования магнитоуправляемых микробиологических систем: Дис. ... д-ра биол. наук. Волгоград, 2002. [Vladimtseva I.V. Nauchno-metodicheskie aspekty polucheniya i ispolzovaniya magnitupravlyaemykh mikrobiologicheskikh system [Scientific and methodological aspects of obtaining and using magnetically controlled microbiological systems]. Dr. Hab. Diss. Volgograd, 2002.]

Владимцева И.В., Греков Л.И., Колотова О.В. Применение магнитных носителей биологических объектов в биотехнологии // Высокие технологии – стратегия XXI века: Материалы международной конференции, Москва, ЦВК «Экспоцентр», 21–24 апр. 2009 г. М., 2009. С. 638–639. [Vladimtseva I.V., Grekov L.I., Kolotova O.V. The use of magnetic carriers of biological objects in biotechnology. *Vysokie tekhnologii – strategiya XXI veka*. Moscow, 2009. Pp. 638–639. (In Russ.)]

Гвоздяк П.И. Имобилизованные клетки в биотехнологии. Пушкино, 1987. С. 56–61. [Gvozdyak P.I. Immobilizovannyye kletki v biotekhnologii [Immobilized cells in biotechnology]. Pushhino, 1987.]

Гвоздяк П.И., Дмитренко Г.Н., Куликов Н.И. Очистка сточных вод прикрепленными микроорганизмами // Химия и технология воды. 1985. Т. 7. № 1. С. 64–68. [Gvozdyak P.I., Dmitrenko G.N., Kulikov N.I. Wastewater treatment by attached microorganisms. *Khimiya i tekhnologiya vody*. 1985. Vol. 7. No. 1. Pp. 64–68. (In Russ.)]

Герман Н.В. Получение и применение бактериального биопрепарата для очистки сточных вод кожевенного производства: Дис. ... канд. биол. наук. Волгоград, 2016. [German N.V. Poluchenie i primenenie bakterial'nogo biopreparata dlya ochistki stochnykh vod kozhevennogo proizvodstva [Obtaining and using a bacterial biological product for wastewater treatment of leather production]. PhD Diss. Volgograd, 2016.]

Гусев М.В., Тамбиев А.Х., Кирикова Н.Н. Влияние электромагнитного излучения миллиметрового диапазона низкой интенсивности на рост цианобактерий // Микробиология. 1990. Т. 59. Вып. 2. С. 359–360. [Gusev M.V., Tambiev A.Kh., Kirikova N.N. The effect of low-intensity millimeter-wave electromagnetic radiation on the growth of cyanobacteria. *Mikrobiologiya*. 1990. Vol. 59. No. 2. Pp. 359–360. (In Russ.)]

Егоров Н.С., Самуилов В.Д. Биотехнология: Учеб. пособие для вузов в 8 кн. Кн. 7: Имобилизованные ферменты / Под ред. Н.С. Егорова. М., 1987. [Egorov N.S., Samuilov V.D. Biotekhnologiya [Biotechnology]. Vol. 7: Immobilized enzymes. N.S. Egorov (ed.). Moscow, 1987.]

Изоляция и исследование роста аборигенных штаммов микроорганизмов, осуществляющих деструкцию загрязнений окружающей среды / Владимцева И.В., Колотова О.В., Соколова И.В. и др. // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2010. № 9. С. 16–20. [Vladimtseva I.V., Kolotova O.V., Sokolova I.V. et al. Isolation and growth study of indigenous strains of microorganisms involved in the destruction of environmental pollution. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*. 2010. No. 9. Pp. 16–20. (In Russ.)]

Имобилизованные клетки микроорганизмов / Синицин А.П., Райнина Е.И., Лозинский В.И. и др. М., 1994. [Sinitin A.P., Rajnina E.I., Lozinskij V.I. et al. Immobilizovannyye kletki mikroorganizmov [Immobilized microorganism cells]. Moscow, 1994.]

Магнитные носители для иммобилизации микроорганизмов активного ила: поиск оптимальных условий иммобилизации / Потапова Л.В., Владимцева И.В., Колотова О.В. и др. // Водоочистка. 2006. № 6. С. 11–13. [Potapova L.V., Vladimtseva I.V., Kolotova O.V. et al. Magnetic carriers for immobilization of microorganisms of activated sludge: Search for optimal conditions for immobilization. *Vodoочистка*. 2006. No. 6. Pp. 11–13. (In Russ.)]

Павлович С.А. Магниточувствительность и магнитовосприимчивость микроорганизмов. Мн., 1981. [Pavlovich S.A. Magnitochuvstvitelnost i magnitovospriimchivost mikroorganizmov [Magnetosensitivity and magnetic susceptibility of microorganisms]. Minsk, 1981.]

Потапова Л.В. Иммобилизация в магнитные носители микроорганизмов, осуществляющих очистку сточных вод: Дис. ... канд. биол. наук. Волгоград, 2006. [Potapova L.V. Immobilizatsiya v magnitnye nositeli mikroorganizmov, osushhestvlyayushhikh oчитку stochnykh vod [Immobilization of wastewater treatment microbes into magnetic carriers]. PhD Dis. Volgograd, 2006.]

Потапова Л.В., Владимцева И.В., Колотова О.В. Иммобилизация микроорганизмов активного ила на магнитные носители // Современные наукоемкие технологии. 2005. № 9. С. 69–71. [Potapova L.V., Vladimtseva I.V., Kolotova O.V. Immobilization of microorganisms of activated sludge on magnetic carriers. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2005. No. 9. Pp. 69–71. (In Russ.)]

Потапова Л.В., Владимцева И.В., Колотова О.В. Подбор оптимальных условий иммобилизации микроорганизмов активного ила на магнитные носители // Биология, медицина, ветеринария и фармацевтика: Сб. научных трудов. Одесса, 2005. С. 17–18. [Potapova L.V., Vladimtseva I.V., Kolotova O.V. Selection of optimal conditions for the immobilization of microorganisms of activated sludge on magnetic carriers. *Biologiya, meditsina, veterinariya i farmatsevtika*. Odessa, 2005. Pp. 17–18. (In Russ.)]

Разработка технологии очистки сточной воды с использованием иммобилизованной микрофлоры / Кобызева Н.В., Гатауллин А.Г., Силищев Н.Н., Логинов О.Н. // Вестник Оренбургского государственного университета. 2009. № 1. С. 104–107. [Kobyzeva N.V., Gataullin A.G., Silishhev N.N., Loginov O.N. Development of wastewater treatment technology using immobilized microflora. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2009. No. 1. Pp. 104–107. (In Russ.)]

Скрябин Г.К., Кошеенко К.А. Иммобилизованные клетки микроорганизмов // Биотехнология. 1984. № 5. С. 70–77. [Skryabin G.K., Koshheenko K.A. Immobilized microorganism cells. *Biotekhnologiya*. 1984. No. 5. Pp. 70–77. (In Russ.)]

Способ получения желатиновых микроносителей для культивирования клеток: А.с. № 1486515 СССР: МКИ С12 N 5/00, 11/00 / Туркин С. И., Лукин Ю. В., Марквичева Е.А. и др.; Заявл. 06.10.87 г.; Оpubл. 15.06.89 г. Булл. № 22. [Sposob polucheniya zhelatinovykh mikronositelej dlya kultivirovaniya kletok [A method of producing gelatin microcarriers for cell culture]: Copyright certificate for an invention No. 1486515 USSR: МКИ S12 No. 5/00, 11/00. Turkin S.I., Lukin Yu.V., Markvicheva E.A. et al. Stated 06.10.1987; Publ. 15.06.1989. Bull. 22.]

Старостина Н.Г., Луста К.А., Фихте Б.А. Защитное действие антиоксидантов на *E. coli* при иммобилизации клеток в полиакриламидном геле // Микробиология. 1985. Вып. 54. № 5. С. 730–734. [Starostina N.G., Lusta K.A., Fikhte B.A. The protective effect of antioxidants on *E. coli* during cell immobilization

in polyacrylamide gel. *Mikrobiologiya*. 1985. Vol. 54. No. № 5. Pp. 730–734. (In Russ.)]

Ткачук Н.Г. Влияние электрического тока на рост и ферментативную активность микроорганизмов активного ила // Электронная обработка материалов. 1978. № 4. С. 78–79. [Tkachuk N.G. The influence of electric current on the growth and enzymatic activity of microorganisms of activated sludge. *Elektronnaya obrabotka materialov*. 1978. No. 4. Pp. 78–79. (In Russ.)]

Экологическая биотехнология / Под ред. К.Ф. Форстера, Д.А. Вейза; Пер. с англ. Л., 1990. [Ekologicheskaya biotekhnologiya [Environmental biotechnology]. C.F. Forster, D.A.J. Wase (ed.). Leningrad, 1990.]

Burns M.A., Kresitadze G.J., Graves D.J. Dried calcium alginate magnetite spheres: A new support for chromatographic separation and enzyme immobilization. *Biotechnol. and Bioeng.* 1985. Vol. 27. No. 2. Pp. 137–145.

Статья поступила в редакцию 20.03.2020, принята к публикации 30.04.2020

The article was received on 20.03.2020, accepted for publication 30.04.2020

Сведения об авторах/ About the authors

Владимцева Ирина Владимировна – доктор биологических наук, профессор; профессор кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности, Волгоградский государственный технический университет

Irina V. Vladimtseva – Dr. Biol. Hab.; Professor at the Department of Industrial Ecology and Life Safety, Volgograd State Technical University

E-mail: alexvlad32@yandex.ru

Могилевская Ирина Владимировна – кандидат биологических наук; доцент кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности, Волгоградский государственный технический университет

Irina V. Mogilevskaya – PhD in Biology; Associate Professor at the Department of Industrial Ecology and Life Safety, Volgograd State Technical University

E-mail: mogi-irina@yandex.ru

Колотова Ольга Владимировна – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности, Волгоградский государственный технический университет

Olga V. Kolotova – PhD in Technical Science; Assistant professor at Department of Industrial Ecology and Life Safety, Volgograd State Technical University

E-mail: olgakolotova@mail.ru

Древин Валерий Евгеньевич – кандидат химических наук, доцент; заведующий кафедрой химии, пищевой и санитарной микробиологии, Волгоградский государственный аграрный университет

Valery E. Drevin – PhD in Chemistry; Head at the Department of Chemistry, Food and Sanitary Microbiology, Volgograd State Agricultural University

E-mail: himvgsxa@mail.ru

Заявленный вклад авторов

И.В. Владимцева – общее руководство исследованием, планирование экспериментов, проведение опытов по культивированию иммобилизованных клеток, анализ и обработка результатов, подготовка текста статьи.

И.В. Могилевская – проведение экспериментов по иммобилизации бактериальных клеток в полиакриламидные и альгинатные микрогранулы.

О.В. Колотова – проведение экспериментов по изучению влияния ЭМП на микроорганизмы.

В.Е. Древин – конструирование прибора для определения влияния ЭМП на микроорганизмы, оформление графического материала.

Contribution of the authors

I.V. Vladimtseva – general management of the research, planning experiments, conducting experiments on the cultivation of immobilized cells, analysis and processing of the results, preparation of the text of the article.

I.V. Mogilevskaya – conducting experiments on the immobilization of bacterial cells into polyacrylamide and alginate microgranules.

O.V. Kolotova – conducting experiments to study the effect of electromagnetic fields on microorganisms.

V.E. Drevin – the design of the device to determine the effect of electromagnetic fields on microorganisms, the design of graphic material.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи
All authors have read and approved the final manuscript