



Экспериментальные методы в очистке сточных вод

Марк ван Лодрехт
Пер Хельмър Нильсен
Карлос Лопес-Васкес
Дамир Брджанович



Экспериментальные методы в очистке сточных вод

Experimental Methods in Wastewater Treatment

Mark C.M. van Loosdrecht
Per H. Nielsen
Carlos M. Lopez-Vazquez
Damir Brdjanovic



Экспериментальные методы в очистке сточных вод

Перевод с английского языка

Главные редакторы англоязычного текста

Марк ван Лосдрехт

Пер Хелькьер Нильсен

Карлос Лопес-Васкес

Дамир Брджанович

Редакторы русскоязычного текста

Н.Р. Ахмедова, С.П. Батуев, Т.В. Вдовина,

Е.С. Гогина, И.А. Гульшин, А.Г. Журавлева,

Н.А. Залетова, А.А. Кулаков, Н.А. Макиша,

И.Б. Муковкина, А.Г. Першина, А.Н. Эпов, О.В. Янцен



УДК 628.34/.35
ББК 38.761.204
Э413

*Авторский коллектив и научные редакторы русскоязычной версии приведены на с. 7.
Перевод с английского Н.В. Кахаевой*

Экспериментальные методы в очистке сточных вод : монография / гл. ред. англ. текста М. ван Лосдрехт, П.Х. Нильсен, К. Лопес-Васкес, Д. Брджанович ; пер. с англ. Н.В. Кахаевой. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2020. – 346 с. – Текст: непосредственный.

Данный перевод книги «Экспериментальные методы в очистке сточных вод» опубликован при согласовании с издательством IWA Publishing, зарегистрированным по адресу Альянс Хаус, Кэкстон Стрит, 12, Лондон SW1H 0QS, Великобритания, www.iwapublishing.com.

This translation of «Experimental Methods in Wastewater Treatment» is published by arrangement with IWA Publishing of Alliance House, 12 Caxton Street, London SW1H 0QS, UK, www.iwapublishing.com.

Сегодня только пятая часть всех сточных вод в мире проходит надлежащую очистку. За последние 20 лет база знаний и понимание методов очистки сточных вод значительно расширились. Глобальное распространение и применение существующих знаний необходимы для достижения Целей устойчивого развития ООН в области водных ресурсов и санитарии для всех. Книга представляет собой руководство, которое объединяет инновационные экспериментальные химико-биологические методы очистки сточных вод и включает подробное описание ключевых биологических процессов. В основу книги легла новая парадигма, направленная на вторичное использование материалов и получение энергии в процессе очистки сточных вод. Книга предназначена для молодых и практикующих специалистов, полезна в процессе исследовательской или производственной деятельности на лабораторных, пилотных или полномасштабных установках очистки сточных вод.

Книга составлена при участии 38 ведущих ученых из стран Европы, США и Канады и переведена на 9 языков. Издание книги на русском языке реализовано Издательством Томского государственного архитектурно-строительного университета совместно с партнерами в 2020 г.

Правообладателем является издательство Всемирной водной ассоциации «IWA Publishing». Все права защищены © IWA Publishing, 2016. Согласно Закону Великобритании об авторском праве, промышленных образцах и патентах (1998 г.), данная публикация может использоваться в научных целях для выполнения индивидуальных исследований, критического разбора или обзора, при этом никакая ее часть не подлежит воспроизведению, хранению или передаче в любой форме и любым способом без письменного согласия правообладателя. Фотографическое воспроизведение выполняется в соответствии с условиями лицензий, выданных Агентством по лицензированию объектов авторского права Великобритании или соответствующей организации, регулирующей право на воспроизведение за пределами Великобритании. Запросы на воспроизведение, не оговоренные в данных условиях, направляются в издательство IWA Publishing по адресу, указанному выше.

Дизайн обложки: Петер Стро / Peter Stroo
Графический дизайн: Ханс Эмейс / Hans Emeis

Первое издание 2016
© IWA Publishing, 2016

Издание на английском языке:
ISBN: 9781780404745 (печатная версия)
ISBN: 9781780404752 (электронная версия)

Издание на русском языке:
ISBN: 978-5-93057-929-1 (печатная версия)
ISBN: 978-5-93057-930-7 (электронная версия)

© IWA Publishing, 2016
© Томский государственный
архитектурно-строительный
университет. Издание на
русском языке,
оформление, перевод, 2020

Предисловие

Очистка сточных вод является основной технологией для защиты и повторного использования водных ресурсов, что наглядно демонстрируется ее широким распространением и последовательным внедрением во многих странах мира. За последние десятилетия научные исследования значительно продвинулись в понимании сложных и междисциплинарных аспектов биологических, биохимических, химических и механических процессов. Можно сделать вывод, что глобальное применение существующих знаний и опыта в технологии очистки сточных вод станет краеугольным камнем в будущем управлении водными ресурсами, согласно Целям в области устойчивого развития, принятым ООН в сентябре 2015 г.

Всего около 1/5 сточных вод во всем мире в настоящее время проходят надлежащую процедуру очистки. Для достижения цели устойчивого управления водными ресурсами к 2030 г. потребуются дополнительные очистные сооружения, рассчитанные приблизительно на 600 000 человек в день. Я убежден, что настоящая книга внесет значительный вклад в достижение этой амбициозной цели.

В ближайшем будущем большинство населения планеты будет проживать в городах, а также в странах с низким и средним уровнем дохода, где большая часть сточных вод не проходит соответствующую очистку. Возможно, наиболее ограничивающим фактором в достижении целей устойчивого управления водными ресурсами является нехватка квалифицированных, хорошо подготовленных специалистов, способных понимать результаты научных исследований и применять их на практике. В связи с этим первостепенное значение имеет распространение доступных на сегодняшний день научных достижений и успешного опыта применения технологий очистки сточных вод по всему миру. Это послужило одним из стимулов создания настоящей книги, являющейся инновационным вкладом, помогающим преодолеть проблему развития потенциала. Данная книга определенно внесет свою лепту в преодоление разрыва между наукой и технологиями и их практическим применением.

Большая группа авторов этой книги и рецензентов составляет междисциплинарную команду всемирно признанных экспертов. Таким образом, книга сыграет важную роль в установлении общего профессионального дискурса, способствуя развитию глобальных коммуникаций между специалистами в области сточных вод. Кроме того, авторы связали описание научной основы процессов очистки сточных вод с онлайн-видеокурсом для обучения студентов, исследователей, инженеров, лаборантов и операторов очистных сооружений, демонстрируя

общепринятые процедуры проведения экспериментов и их применение для лабораторных, пилотных и полномасштабных очистных установок. С точки зрения Международной водной ассоциации (IWA), эта книга также обладает потенциалом для развития нового поколения исследователей, она дает им возможность общаться в глобальном масштабе и за пределами их конкретной области знаний. Оба эти аспекта необходимы для разработки адаптированных решений в конкретных локальных условиях и обеспечения доступности их реализации в глобальном масштабе. В течение некоторого времени существовала тенденция отдельного развития научных исследований и практики. Одной из причин этого является глобальное внедрение метода академической оценки, который в первую очередь фокусируется на влиянии публикаций на прогресс в научных исследованиях. Результаты прикладных исследований, оказывающих влияние на практику управления качеством воды, не достаточно широко поощряются, поскольку их влияние не всегда отражается в цитировании в научных журналах. Настоящая монография пытается преодолеть эту проблему, поскольку она направлена на расширение диалога и сотрудничества между учеными и практиками. Ученым предлагается решать практические задачи с помощью научных методов, а практикам – понимать научную основу всех процессов, имеющих отношение к оптимизации очистных сооружений.

В то время как обычные процессы очистки сточных вод в основном обусловлены качеством стоков и минимизацией затрат, в монографии полностью отражен сдвиг парадигмы в сторону восстановления материалов и энергии из сточных вод. В этом отношении книга также очень актуальна для развитых стран, поскольку новая парадигма окажет существенное влияние на будущее развитие управления сточными водами во всем мире.

Как президент Международной водной ассоциации хочу поздравить авторов этой книги с их большим достижением, а также поблагодарить Фонд Билла и Мелинды Гейтс и Правительство Нидерландов за финансовую поддержку.

Проф., др. Гельмут Кройсс
Президент Международной водной ассоциации
(International Water Association – IWA)

От лица редакторов русскоязычного текста

В настоящей монографии представлены основные методы, используемые при экспериментальной оценке активного ила сооружений биологической очистки сточных вод. Методы классифицированы по типу процесса биологической очистки и методике проведения экспериментов. Кроме того, в книге представлены методики обработки экспериментальных данных и дана трактовка полученных результатов экспериментов.

Важным преимуществом книги для читателя, занимающегося научными исследованиями, станет максимальная стандартизация основных методов оценки активности ила, респирометрических методов и методов оценки седиментационных свойств, а также применяемой аппаратуры и протоколов экспериментов. Это позволит сравнивать полученные данные с результатами других исследований и максимально снизить риск возникновения ошибок, которые могут возникать вследствие недостаточной проработки методик подготовки исходных материалов, проведения экспериментов и представления результатов.

К сожалению, после известного кризиса в российской отраслевой науке, касающейся обработки сточных вод, исследовательская база, включая оборудование и методические наработки, в РФ крайне ограничена. При подготовке многих исследований, в том числе диссертационных работ, применяемые методики определения показателей активного ила основываются на нескольких аналогичных и не всегда наиболее показательных работах и «подгоняются» под имеющееся оборудование. Это приводит к значительным отличиям величин технологических показателей ила, определяемых различными авторами при одном и том же названии. В результате применения разных, не всегда полных методик эксперимента могут встречаться значительные отличия как сути измеряемого параметра, так и точности его определения. Использование материалов, рассмотренных в настоящей монографии, позволит в значительной степени избежать таких различий.

Кроме того, представлены наиболее современные методы микроскопирования и генетической идентификации микроорганизмов, используемые при изучении состава биоценоза активного ила. Несмотря на то, что эти методы для изучения активного ила в РФ сейчас практически не используются, в ряде зарубежных статей показано, что они дают весьма ценную информацию для понимания закономерностей функционирования биоценоза активного ила. Знакомство с указанными методами обеспечит солидную базу для их последующего внедрения в исследовательскую практику в России.

В практическом плане унифицированные методики определения основных видов активности ила важны для сравнительной оценки работы широко внедряемых в настоящий момент в РФ технологий биологического удаления азота и фосфора, а также для настройки математических моделей, применяемых при проектировании и оценке эксплуатации данных технологий.

Хотя работа по сравнению основных показателей активности ила на современных станциях в РФ практически не проводилась, внедрение их определения с последующим сравнением может создать уникальную базу для оценки проектирования и эксплуатации действующих очистных сооружений с биологическим удалением азота и фосфора.

Унификация подходов к определению данных по фракционированию стоков по биоокисляемости, требующихся для математического моделирования процессов очистки сточных вод, необходима для обеспечения достоверности получаемых при моделировании результатов, особенно при проектировании крупных сооружений с удалением азота и фосфора. Неполное применение методик или отсутствие соответствующих экспериментов может приводить к существенным ошибкам при расчете сооружений с использованием современных математических моделей. Результаты таких расчетов должны отбраковываться при экспертизе проектов, однако это невозможно в отсутствие унифицированных методик фракционирования.

Оценка параметров биоокисляемости и токсичности, особенно при проектировании и анализе работы сооружений очистки промышленных сточных вод, часто является необходимой основой для квалифицированного проектирования и анализа причин неудовлетворительной работы очистных сооружений. Следует отметить, что в РФ полностью отсутствуют общепризнанные методики оценки токсичности с использованием активного ила, а определение биоокисляемости, как уже отмечалось выше, проводится различными, не всегда соотносящимися между собой методами. Применение, а главное понимание основ методик, представленное в настоящей монографии, безусловно, полезно для существенного улучшения определения токсичности и биоокисляемости.

Эпов Андрей Николаевич
Главный технический специалист
TWW Treatment Waste Water ООО «Домкострой»

Авторы

Carlos M. Lopez-Vazquez	UNESCO-IHE Institute for Water Education, The Netherlands	1, 2
Damir Brdjanovic	UNESCO-IHE Institute for Water Education, The Netherlands	1, 2
Eldon R. Rene	UNESCO-IHE Institute for Water Education, The Netherlands	2
Elena Ficara	Milan University of Technology, Italy	2
Elena Torfs	Université Laval, Canada	6
Eveline I.P. Volcke	Ghent University, Belgium	4
George A. Ekama	University of Cape Town, South Africa	3
Glen T. Daigger	University of Michigan, USA	6
Gürkan Sin	Technical University of Denmark, Denmark	5
Henri Spanjers	Delft University of Technology, The Netherlands	3
Holger Daims	University of Vienna, Austria	8
Ilse Y. Smets	Catholic University of Leuven, Belgium	6
Imre Takács	Dynamita, France	6
Ingmar Nopens	Ghent University, Belgium	6
Jeppe L. Nielsen	Aalborg University, Denmark	7
Jiří Wanner	University of Chemistry and Technology Prague, Czech Republic	7
Juan A. Baeza	Universitat Autònoma de Barcelona, Spain	5
Kartik Chandran	Columbia University, USA	4
Krist V. Gernaey	Technical University of Denmark, Denmark	5
Laurens Welles	UNESCO-IHE Institute for Water Education, The Netherlands	2
Mads Albertsen	Aalborg University, Denmark	8
Mari K.H. Winkler	University of Washington, USA	6
Mark C.M. van Loosdrecht	Delft University of Technology, The Netherlands	1, 2, 4
Mathieu Spérandio	Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France	3
Morten S. Dueholm	Aalborg University, Denmark	8
Nancy G. Love	University of Michigan, USA	2
Per H. Nielsen	Aalborg University, Denmark	1, 7, 8
Peter A. Vanrolleghem	Université Laval, Canada	3, 4, 6
Piet N.L. Lens	UNESCO-IHE Institute for Water Education, The Netherlands	2
Rasmus H. Kirkegaard	Aalborg University, Denmark	8
Robert J. Seviour	La Trobe University, Australia	7
Sebastiaan C.F. Meijer	Yuniko BV, The Netherlands	5
Sophie Balemans	Ghent University, Belgium	6
Søren M. Karst	Aalborg University, Denmark	8
Sylvie Gillot	IRSTEA, France	4
Tessa P.H. van den Brand	KWR Watercycle Research Institute, The Netherlands	2
Tommaso Lotti	Milan University of Technology, Italy	2
Yves Comeau	École Polytechnique de Montréal, Canada	2

Автор главы
Редактор главы

Авторы

Карлос М. Лопес-Васкес	Институт Делфта по образованию в области водных ресурсов при партнерстве с ЮНЕСКО, Нидерланды	1, 2
Дамир Брджанович	Институт Делфта по образованию в области водных ресурсов при партнерстве с ЮНЕСКО, Нидерланды	1, 2
Эльдон Р. Рене	Институт Делфта по образованию в области водных ресурсов при партнерстве с ЮНЕСКО, Нидерланды	2
Элена Фикара	Технический университет Милана, Италия	2
Элена Торфс	Университет Лавалья, Канада	6
Эвелина И.П. Волке	Гентский университет, Бельгия	4
Джордж А. Экама	Университет Кейптауна, ЮАР	3
Глен Т. Дайгер	Университет штата Мичиган, США	6
Гюркан Син	Датский технический университет, Дания	5
Генри Спаньерс	Делфтский технический университет, Нидерланды	3
Хольгер Деймс	Университет Вены, Австрия	8
Ильза И. Сметц	Католический университет Левена, Бельгия	6
Имре Такач	Общество с ограниченной ответственностью «Dynamita», Франция	6
Ингмар Нопенс	Гентский университет, Бельгия	6
Йеппе Л. Нильсен	Университет Ольборга, Дания	7
Йири Ваннер	Химико-технологический университет в Праге, Чешская Республика	7
Хуан А. Баеса	Автономный университет Барселоны, Испания	5
Картик Чандрани	Колумбийский университет, США	4
Крист В. Герней	Датский технический университет, Дания	5
Лауренс Веллес	Институт Делфта по образованию в области водных ресурсов при партнерстве с ЮНЕСКО, Нидерланды	2
Мэдс Альбертсен	Университет Ольборга, Дания	8
Мари К.Х. Винклер	Вашингтонский университет, США	6
Марк К. М. ван Лосдрехт	Делфтский технический университет, Нидерланды	1, 2, 4
Матьё Сперандьё	Национальный институт прикладных наук Тулузы, Франция	3
Мортен С. Дуэльхольм	Университет Ольборга, Дания	8
Ненси Дж. Лав	Университет штата Мичиган, США	2
Пер Х. Нильсен	Университет Ольборга, Дания	1, 7, 8
Питер А. Ванроллеге	Университет Лавалья, Канада	3, 4, 6
Пит Н.Л. Ленс	Институт Делфта по образованию в области водных ресурсов при партнерстве с ЮНЕСКО, Нидерланды	2
Расмус Х. Кьеркегор	Университет Ольборга, Дания	8
Роберт Дж. Севиор	Университет Ла Троба, Австралия	7
Себастиан К.Ф. Мейер	Общество с ограниченной ответственностью «Yuniko BV», Нидерланды	5
Софи Балмэнс	Гентский университет, Бельгия	6
Сёрен Карст	Университет Ольборга, Дания	8
Сильви Жило	Институт науки и технологий охраны окружающей среды и сельского хозяйства (IRSTEA), Франция	4
Тесса П.Х. ван ден Бранд	Научно-исследовательский институт водных циклов KWR, Нидерланды	2
Томасо Лотти	Технический университет Милана, Италия	2
Ив Комо	Политехническая школа Монреаля, Канада	2

Автор главы
Редактор главы

Научные редакторы русскоязычного текста

Ахмедова Н.Р.	Калининградский государственный технический университет, г. Калининград	1, 2
Батуев С.П.	Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск	5
Вдовина Т.В.	Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань	7
Гогина Е.С.	Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва	2, 3
Гульшин И.А.	Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва	3
Журавлева А.Г.	Владимирский государственный университет, г. Владимир	1, 2
Залетова Н.А.	Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва	2
Кулаков А.А.	Общество с ограниченной ответственностью «Альта Групп», г. Москва	6
Макиша Н.А.	Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва	3
Муковкина И.Б.	ООО «Томскводоканал», г. Томск	4
Першина А.Г.	Сибирский государственный медицинский университет, г. Томск	8
Эпов А.Н.	TWW Treatment Waste Water ООО «Домкопстрой», г. Москва	2, 3
Янцен О.В.	Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва	2

Благодарности

Томский государственный архитектурно-строительный университет выражает глубокую благодарность за участие в подготовке русскоязычного издания научной монографии «Экспериментальные методы в очистке сточных вод» своих партнеров в лице организаций и отдельных ученых и отраслевых экспертов.

НИУ МГСУ

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (г. Москва)

СибГМУ

Сибирский государственный медицинский университет (г. Томск)

Ахмедова Наталья Равиловна

к.б.н., доцент кафедры водных ресурсов и водопользования, Калининградский государственный технический университет

Батуев Станислав Павлович

к.ф.-м.н., доцент кафедры прикладной математики, Томский государственный архитектурно-строительный университет

Вдовина Татьяна Владимировна

к.т.н., доцент кафедры промышленной биотехнологии, Казанский национальный исследовательский технологический университет

Гогина Елена Сергеевна

к.т.н., доцент кафедры водоснабжения и водоотведения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Гульшин Игорь Алексеевич

к.т.н., старший преподаватель кафедры водоснабжения и водоотведения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Журавлева Антонина Геннадьевна

ассистент кафедры теплогасоснабжения, вентиляции и гидравлики, Владимирский государственный университет

Залетова Нина Анатольевна

д.т.н., профессор кафедры водоснабжения и водоотведения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Кулаков Артем Алексеевич

к.т.н., главный технолог ООО «Альта Групп», доцент кафедры экологической и промышленной безопасности, РТУ МИРЭА

Макиша Николай Алексеевич

к.т.н., доцент кафедры водоснабжения и водоотведения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Муковкина Ирина Борисовна

Инженер-проектировщик, ООО «Томскводоканал»

Першина Александра Геннадьевна

к.б.н., руководитель Центра биологических исследований и биоинженерии, Сибирский государственный медицинский университет

Эпов Андрей Николаевич

Главный технический специалист TWW Treatment Waste Water ООО «Домкопстрой»

Янцен Ольга Викторовна

старший преподаватель кафедры водоснабжения и водоотведения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Отдельная благодарность – идейному вдохновителю проекта издания научной монографии на русском языке профессору Дамиру Брджановичу, одному из главных редакторов оригинальной версии.

О редакторах книги



Проф., др. Марк ван Лосдрехт

Марк К.М. ван Лосдрехт – известный ученый, признанный за значительный вклад в исследования по снижению потребления энергии и воздействия на очистные сооружения, благодаря его запатентованным и отмеченным наградами технологиям Shagon®, Anammox® и Nereda®. Его основная работа сосредоточена на использовании микробных культур в области проектирования технологий и процессов природообустройства, с особым акцентом на удаление питательных веществ, биопленку и биологическое обрастание. В настоящее время является профессором и руководителем группы экологической биотехнологии в Техническом университете Делфта. Профессор ван Лосдрехт – член Королевской академии искусств и наук Нидерландов (KNAW), Нидерландской академии технологий и инноваций (AcTI) и Международной водной ассоциации (IWA), является лауреатом множества престижных наград. Его научные интересы включают системы гранулированного ила, микробные полимеры для хранения, очистку сточных вод, обработку газа, обработку почвы, микробную конверсию неорганических соединений, производство химикатов из отходов и моделирование. Он опубликовал более 500 работ, руководил 65 аспирантами и является почетным профессором в Университете Квинсленда (Австралия). В настоящее время – главный редактор исследований в области водных ресурсов и советник издательства IWA Publishing.



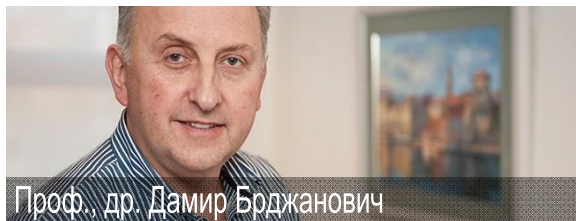
Проф., др. Пер Хелькьер Нильсен

Пер Х. Нильсен – профессор кафедры химии и биологии в Ольборгском университете, Дания, где он возглавляет многопрофильный центр микробных сообществ. Является приглашенным исследователем в Сингапурском центре инженерных наук в области окружающей среды Технологического университета Наньян, Сингапур. Исследовательская группа профессора Нильсена работает в области биотехнологии окружающей среды более 25 лет, специализируясь на микробной экологии биологической очистки сточных вод, производстве биоэнергии, биоремедиации, биопленках, заражении имплантов, разработке микробиологических подходов, основанных на новых технологиях секвенирования. С 2005 по 2013 гг. возглавлял группу Международной водной ассоциации (IWA) по микробной экологии и водному хозяйству, в настоящее время является председателем биокластера ассоциации IWA. Является членом Датской академии технических наук (ATV) и Международной водной ассоциации (IWA), лауреат нескольких престижных наград. Опубликовал более 230 рецензируемых публикаций и руководил 25 аспирантами. Ключевой научный интерес – микробная экология в проектировании водных технологий, особенно связанная с очисткой сточных вод, где он разработал некультивируемые микроорганизмы, в частности, с использованием технологий секвенирования следующего поколения. Является инициатором и ответственным за открытый ресурс MiDAS, содержащий руководство для исследований в области микробиологии сточных вод и активного ила.



Др. Карлос Лопес-Васкес

Карлос М. Лопес-Васкес – доцент технологий очистки сточных вод в Институте Делфта по образованию в области водных ресурсов при партнерстве с ЮНЕСКО. В 2009 г. получил докторскую степень по экологической биотехнологии (с отличием) в Технологическом университете Делфта и Институте Делфта по образованию в области водных ресурсов при партнерстве с ЮНЕСКО. В течение своей профессиональной карьеры принимал участие в различных консультационных проектах для государственного и частного секторов, касающихся систем очистки бытовых и промышленных сточных вод. Проработав около двух лет в отделе исследований и разработок по водным ресурсам Nalco Europe в области промышленных систем водоподготовки и очистки сточных вод, в 2009 г. вновь присоединился к научной группе кафедры санитарных технологий в Институте Делфта. С тех пор он принимает участие в исследовательских и образовательных проектах, в развитии потенциала, выступает научным руководителем десятков магистрантов и нескольких аспирантов. Применяя математическое моделирование в качестве важнейшего инструмента, он уделяет особое внимание разработке и передаче инновационных и экономически эффективных технологий очистки сточных вод развивающимся странам, странам с переходной экономикой, а также промышленным предприятиям.



Проф., др. Дамир Брджанович

Дамир Брджанович – профессор в области проектирования санитарных систем в Институте Делфта, а также профессор Технического университета Делфта и член научной группы по экологической биотехнологии. В сферу его компетенции входят санитарные технологии для бедных регионов и экстренная санитария, управление жидкими бытовыми отходами (ЖБО) из децентрализованных санитарных систем, городские дренажные системы и очистка сточных вод. Является пионером в практическом применении моделей в очистке сточных вод в развивающихся странах. При финансовой поддержке Фонда Билла и Мелинды Гейтс (BMGF) изобрел устройство Shit Killer® для управления фекальными отходами в чрезвычайных ситуациях, отмеченную наградами технологию Smart Toilet® и соответствующее программное обеспечение eSOS View®. Инициировал разработку и внедрение инновационных образовательных подходов и продуктов (включая электронное обучение) в Институте Делфта. В 2015 г. при поддержке BMGF основал Всемирную ассоциацию электронного обучения в области ЖБО (Global Faecal Sludge Management e-learning Alliance). Сегодня его научная группа состоит из десяти сотрудников, трех постдокторантов и 22 аспирантов. Более 100 студентов магистратуры прошли обучение под его руководством. Имеет множество публикаций, является одним из инициаторов создания научного журнала Всемирной водной ассоциации Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development, а также инициатором, автором и редактором пяти научных монографий в области санитарии и очистки сточных вод. С 2015 г. член IWA.

О книге и онлайн-курсе

За последние двадцать лет знания и понимание очистки сточных вод значительно продвинулись, произошел переход от эмпирического подхода к фундаментальному, включающему в себя химию, микробиологию, физическую и биологическую инженерию, часто использующую экспериментальные лабораторные работы и методы. Многие из этих экспериментальных методов и технологий активно развивались и сейчас являются надежными инструментами в исследованиях и практике очистки сточных вод. Для специалистов отрасли, особенно представителей нового поколения молодых ученых и инженеров, количество, сложность и разнообразие этих новых разработок могут быть достаточно высокими, особенно в развивающихся странах, где доступ к лабораторным курсам продвинутого уровня по очистке сточных вод весьма ограничен. Кроме того, информация об инновационных экспериментальных методах «разбросана» по научной литературе, и только часть ее доступна в учебниках или руководствах. Целью настоящей монографии является устранение указанных выше недостатков. Она объединяет инновационные экспериментальные методы, разработанные исследовательскими группами и специалистами-практиками по всему миру и широко применяемые в исследованиях и практике очистки сточных вод.

Книга «Экспериментальные методы в очистке сточных вод» составляет часть онлайн-программы по санитарным технологиям Института Делфта, она дополнена видеозаписями, на которых авторы поясняют описанные выше методы и подходы, а также руководствами по лучшим экспериментальным практикам. Монография предназначена для студентов и аспирантов, исследователей, сотрудников лабораторий, операторов очистных сооружений, консультантов и других специалистов отрасли.

Идея о создании онлайн-курса появилась в 2009 г., когда Институт Делфта получил финансирование от Министерства иностранных дел Нидерландов для разработки инновационных методов и продуктов обучения. Кроме того, в 2011 г. были получены дополнительные средства от Фонда Билла и Мелинды Гейтс (BMGF), которые позволили полностью реализовать первоначальную идею. Концептуальная основа для книги, включая онлайн-курс, была согласована в Монреале в ходе Всемирного водного конгресса и выставки Международной водной ассоциации (IWA) в сентябре 2010 г. и более детально рассмотрена во время мероприятия «Активированный ил – 100 лет и дальше» в Эссене. Тогда концепция была представлена научному сообществу с целью привлечения рецензентов в дополнение к уважаемым группам авторов-экспертов для получения критических отзывов о содержании книги и улучшения

качества конечного продукта. Кроме того, авторам книги было предложено подготовить слайды для презентаций, учебные упражнения и представить сценарии для видеозаписей лекций и выполнения экспериментальных процедур на базе Института Делфта и партнерских лабораторий. Эти материалы были собраны в виде онлайн-курса, доступного для зарегистрировавшихся учащихся. Издательство IWA Publishing дало согласие на публикацию книги и обучающего онлайн-курса. Также было решено, что книга и материалы будут находиться в открытом доступе и предоставляться бесплатно. Онлайн-курс проводится один раз в год (для получения дополнительной информации о том, как получить доступ к материалам или стать участником курса, посетите сайт Института Делфта). Книга также используется для преподавания в рамках серии лекций по специальности «Санитария» магистерской программы Института Делфта в области городского водоснабжения и санитарии. Концепция книги построена таким образом, что ее можно изучать как отдельно, так и в рамках онлайн-курса.

Необходимо отметить людей, чья бесценная поддержка стала решающей в публикации данной книги: доктор Рошан Шреста, доктор Дулай Коне, доктор Фрэнк Рейсберман и доктор Брайан Арбогаст (BMGF), а также доктор Вим Дювен и Йетце Хеун (Институт Делфта по образованию в области водных ресурсов). Над редактированием книги работали Питер Строо, Ханс Эмейс, Клэр Тейлор, Мишель Джонс и Мэгги Смит. Благодарность за предоставление содержания книги выражается всем авторам, рецензентам и инициативной группе редакторов. Кроме того, я благодарю авторов, которые разрешили использовать в книге и курсе данные своих исследований, изображения и фотографии.

Наконец, я надеюсь, что эта книга и учебные материалы будут полезны в исследовательской или практической работе на лабораторных, пилотных или полномасштабных установках очистки сточных вод.

Проф., др. Дамир Брджанович
Профессор в области санитарной инженерии

Содержание

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	17	2.3.4. Экспериментальная установка.....	74
Mark C.M. van Loosdrecht, Per H. Nielsen, Carlos M. Lopez-Vazquez, Damir Brdjanovic (авторы)		2.3.4.1. Оценка объемных и удельных скоростей.....	75
2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНОСТИ МИКРООРГАНИЗМОВ В АКТИВНОМ ИЛЕ	23	2.3.4.2. Реактор.....	75
Carlos M. Lopez-Vazquez, Laurens Welles, Tommaso Lotti, Elena Ficara, Eldon R. Rene, Tessa P.H. van den Brand, Damir Brdjanovic, Mark C.M. van Loosdrecht (авторы)		2.3.4.3. Перемешивание.....	75
Yves Comeau, Piet N.L. Lens, Nancy G. Love (редакторы)		2.3.4.4. Контроль pH.....	76
2.1. ВВЕДЕНИЕ	23	2.3.4.5. Контроль температуры.....	76
2.2. УЛУЧШЕННОЕ БИОЛОГИЧЕСКОЕ УДАЛЕНИЕ ФОСФОРА	25	2.3.4.6. Отверстия для дозирования и отбора проб.....	76
2.2.1. Описание процесса.....	25	2.3.4.7. Отбор проб.....	76
2.2.2. Экспериментальная установка.....	27	2.3.4.8. Среда.....	76
2.2.2.1. Реакторы.....	27	2.3.5. Методика анализа.....	77
2.2.2.2. Отбор проб активного ила.....	32	2.3.5.1. ХПК _{органич} и ХПК _{общ}	78
2.2.2.3. Подготовка образцов активного ила.....	33	2.3.5.2. Сульфат.....	78
2.2.2.4. Субстрат.....	34	2.3.5.3. Сульфид.....	78
2.2.2.5. Аналитические исследования.....	35	2.3.6. Тесты на активность СРБ: подготовка.....	79
2.2.2.6. Исследуемые параметры.....	39	2.3.6.1. Оборудование.....	79
2.2.3. Тесты активности на отдельных этапах УБУФ: подготовка.....	40	2.3.6.2. Материалы.....	79
2.2.3.1. Оборудование.....	40	2.3.6.3. Среда.....	79
2.2.3.2. Материалы.....	40	2.3.6.4. Отбор проб.....	80
2.2.3.3. Подготовка среды.....	41	2.3.6.5. Подготовка иловой смеси.....	81
2.2.3.4. Подготовка материалов (отбор проб).....	42	2.3.6.6. Отбор и обработка образцов.....	82
2.2.3.5. Подготовка активного ила.....	44	2.3.7. Тесты на активность: выполнение.....	82
2.2.4. Тесты на активность: выполнение.....	46	2.3.8. Анализ данных.....	83
2.2.4.1. Анаэробные тесты активности УБУФ.....	47	2.3.8.1. Материальный баланс и расчеты.....	83
2.2.4.2. Аноксидные тесты УБУФ.....	49	2.3.8.2. Обсуждение и интерпретация данных.....	84
2.2.4.3. Аэробные тесты УБУФ.....	51	2.3.9. Пример.....	84
2.2.5. Анализ данных.....	53	2.3.10. Практические рекомендации.....	86
2.2.5.1. Оценка стехиометрических параметров.....	53	2.4. БИОЛОГИЧЕСКОЕ УДАЛЕНИЕ АЗОТА	86
2.2.5.2. Оценка кинетических параметров.....	56	2.4.1. Описание процесса.....	86
2.2.6. Обсуждение и интерпретация данных.....	58	2.4.1.1. Нитрификация.....	87
2.2.6.1. Анаэробные тесты на активность.....	58	2.4.1.2. Денитрификация.....	88
2.2.6.2. Аэробные тесты на активность.....	60	2.4.1.3. Анаэробное окисление аммония (анаммокс).....	89
2.2.6.3. Аноксидные тесты на активность.....	61	2.4.2. Возможные методы контроля процесса.....	90
2.2.7. Примеры.....	61	2.4.2.1. Химический контроль.....	90
2.2.7.1. Описание.....	61	2.4.2.2. Титриметрический контроль.....	91
2.2.7.2. Анализ данных.....	62	2.4.2.3. Манометрический контроль.....	92
2.2.8. Дополнительные данные.....	65	2.4.3. Экспериментальная установка.....	92
2.2.8.1. Появление ГАБ в системах УБУФ.....	65	2.4.3.1. Реакторы.....	92
2.2.8.2. Влияние источника углерода.....	66	2.4.3.2. Оборудование для титриметрических испытаний.....	93
2.2.8.3. Влияние температуры.....	66	2.4.3.3. Оборудование для манометрических испытаний.....	94
2.2.8.4. Влияние кислотности.....	66	2.4.3.4. Отбор проб активного ила.....	94
2.2.8.5. Денитрификация с помощью культур УБУФ.....	67	2.4.3.5. Подготовка образца активного ила.....	95
2.2.8.6. Избыток/нехватка внутриклеточных соединений.....	67	2.4.3.6. Субстрат.....	96
2.2.8.7. Избыточная продолжительность азрации.....	67	2.4.3.7. Химические анализы.....	97
2.2.8.8. Недостаток основных ионов.....	68	2.4.3.8. Исследуемые параметры.....	97
2.2.8.9. Токсичность/ингибирование процесса.....	68	2.4.3.9. Типы лабораторных тестов.....	99
2.3. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ СУЛЬФАТОВ	68	2.4.4. Определение нитрифицирующей активности: подготовка к тесту.....	100
2.3.1. Описание процесса.....	68	2.4.4.1. Оборудование.....	100
2.3.2. Виды состояния сульфидов.....	71	2.4.4.2. Материалы.....	100
2.3.3. Влияние окружающей среды и условий эксплуатации на СРБ.....	72	2.4.4.3. Подготовка среды.....	100
2.3.3.1. Источник углерода.....	72	2.4.5. Определение нитрифицирующей активности: выполнение теста.....	101
2.3.3.2. Отношение ХПК к SO ₄ ²⁻	73	2.4.6. Тесты на денитрификацию: подготовка.....	105
2.3.3.3. Температура.....	73	2.4.6.1. Оборудование.....	105
2.3.3.4. pH.....	73	2.4.6.2. Материалы.....	106
2.3.3.5. Кислород.....	74	2.4.6.3. Рабочие растворы.....	106
		2.4.6.4. Подготовка материалов.....	106
		2.4.7. Тесты на денитрификацию: выполнение.....	106
		2.4.8. Тесты на активность бактерий анаммокс: подготовка.....	111
		2.4.8.1. Оборудование.....	112
		2.4.8.2. Материалы.....	112
		2.4.8.3. Рабочие растворы.....	112

2.4.8.4. Подготовка материалов.....	113	3.4.3. Кратковременное биохимическое потребление кислорода (БПК _{кр}).....	167
2.4.9. Тесты на активность бактерий анаммокс: выполнение.....	113	3.4.3.1. Выполнение теста.....	168
2.4.10. Примеры.....	115	3.4.3.2. Вычисления.....	170
2.4.10.1. Тесты на активность нитрификации.....	115	3.4.4. Токсичность и ингибирование.....	170
2.4.10.2. Тесты на активность денитрификации.....	117	3.4.4.1. Цель.....	170
2.4.10.3. Тесты на активность бактерий анаммокс.....	119	3.4.4.2. Выполнение теста.....	170
2.4.11. Дополнительные факторы.....	121	3.4.4.3. Вычисления.....	171
2.4.11.1. Присутствие других организмов.....	121	3.4.4.4. Биоразлагаемые токсиканты.....	172
2.4.11.2. Нехватка необходимых микро- и макронутриентов.....	121	3.4.5. Фракционирование сточных вод.....	173
2.4.11.3. Токсичное и ингибирующее воздействие.....	122	3.4.5.1. Легко биоразлагаемый субстрат (SB).....	175
2.4.11.4. Влияние источника углерода на денитрификацию.....	122	3.4.5.2. Медленно биоразлагаемый субстрат (ХСВ).....	176
2.5. АЭРОБНОЕ УДАЛЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ.....	122	3.4.5.3. Гетеротрофная биомасса (Х _{гоно}).....	177
2.5.1. Описание процесса.....	122	3.4.5.4. Автотрофная (нитрифицирующая) биомасса (Х _{ано}).....	177
2.5.2. Экспериментальная установка.....	124	3.4.5.5. Аммоний (S _{NH3}).....	177
2.5.2.1. Реакторы.....	124	3.4.5.6. Фракции органического азота (Х _{СВ,N} и S _{В,N}).....	178
2.5.2.2. Отбор образцов активного ила.....	124	3.5. КЛАССИФИКАЦИЯ БИОМАССЫ.....	178
2.5.2.3. Подготовка образцов активного ила.....	125	3.5.1. Летучие взвешенные вещества.....	178
2.5.2.4. Среды.....	125	3.5.2. Удельная метаногенная активность (УМА).....	178
2.5.2.5. Аналитические тесты.....	126	3.5.2.1. Цель.....	178
2.5.2.6. Исследуемые параметры.....	126	3.5.2.2. Общее.....	178
2.5.3. Тесты на аэробное удаление: подготовка.....	127	3.5.2.3. Выполнение теста.....	179
2.5.3.1. Оборудование.....	127	3.5.2.4. Обработка данных.....	179
2.5.3.2. Материалы.....	127	3.5.3. Удельная активность аэробной и аноксидной биомассы.....	180
2.5.3.3. Рабочие растворы.....	127	3.5.3.1. Максимальная удельная скорость нитрификации (СПА).....	181
2.5.3.4. Подготовка материалов.....	128	3.5.3.2. Максимальная удельная скорость аэробного гетеротрофного дыхания (СПК).....	182
2.5.3.5. Подготовка активного ила.....	129	3.5.3.3. Максимальная удельная скорость денитрификации (СПН).....	182
2.5.4. Тесты на аэробное удаление: выполнение.....	129	4. ТЕСТИРОВАНИЕ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ.....	187
2.5.5. Анализ данных.....	130	Kartik Chandran, Eveline I.P. Volcke, Mark C.M. van Loosdrecht (авторы)	
2.5.6. Пример.....	130	Peter A. Vanrollegem, Sylvie Guillot (редакторы)	
2.5.6.1. Описание.....	130	4.1. ВВЕДЕНИЕ.....	187
2.5.6.2. Анализ данных.....	131	4.2. ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ.....	188
2.5.7. Дополнительные факторы и рекомендации.....	132	4.2.1. Производительность очистных сооружений.....	188
2.5.7.1. Одновременное накопление и рост микроорганизмов.....	132	4.2.2. Сезонные колебания выбросов.....	188
2.5.7.2. Нехватка питательных веществ.....	133	4.2.3. Цель отбора проб.....	189
2.5.7.3. Токсичность или ингибирование.....	133	4.3. ОЦЕНКА ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ И СБОР ДАННЫХ.....	189
3. РЕСПИРОМЕТРИЯ.....	145	4.3.1. Подготовка к отбору проб.....	189
Henry Spanjers, Peter A. Vanrollegem (авторы)		4.3.2. Идентификация образцов и протокол результатов.....	190
George A. Ekama, M. Spérandio (редакторы)		4.3.3. Факторы, ограничивающие достоверность результатов.....	191
3.1. ВВЕДЕНИЕ.....	145	4.3.4. Практические рекомендации для аналитических измерений.....	191
3.1.1. Основы дыхательного процесса.....	146	4.3.5. Общая методика отбора проб.....	192
3.2. ОБЩАЯ МЕТОДОЛОГИЯ РЕСПИРОМЕТРИИ.....	148	4.3.6. Отбор проб в рамках измерений отходящих газов.....	193
3.2.1. Основы методологии респирометрии.....	148	4.3.7. Протокол испытаний и измерений.....	195
3.2.2. Обобщенные принципы.....	148	4.4. ИЗМЕРЕНИЕ ВЫБРОСОВ.....	196
3.2.2.1. Принципы на основе измерений в жидкой фазе.....	148	4.5. ИЗМЕРЕНИЕ N₂O В ОТКРЫТЫХ РЕЗЕРВУАРАХ.....	197
3.2.2.2. Принципы на основе измерений в газовой фазе.....	150	4.5.1. Методика для измерения поверхностного потока N ₂ O.....	199
3.3. ОБОРУДОВАНИЕ.....	152	4.5.1.1. Оборудование и материалы.....	199
3.3.1. Оборудование для анаэробной респирометрии.....	152	4.5.1.2. Процедура эксперимента.....	199
3.3.1.1. Состав биогаза.....	152	4.5.1.3. Методы отбора проб выбросов азотного парникового газа.....	200
3.3.1.2. Измерение выделяющегося газа.....	153	4.5.1.4. Прямое измерение содержания N ₂ O в жидкой фазе.....	202
3.3.2. Оборудование для аэробной и бескислородной респирометрии.....	154	4.6. ИЗМЕРЕНИЕ ПОТОКА ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ В ОТКРЫТЫХ РЕЗЕРВУАРАХ.....	202
3.3.2.1. Реактор.....	154	4.6.1. Методика для азириванной или аэробной зоны.....	202
3.3.2.2. Измерительное оборудование.....	155	4.6.2. Методика для неазириваемых зон.....	203
3.3.2.3. Практическое выполнение.....	155	4.7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ N₂O И СН₄ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ.....	203
3.4. ХАРАКТЕРИСТИКА СТОЧНЫХ ВОД.....	161	4.7.1. Методика для измерения растворенного N ₂ O с использованием полярографических электродов.....	203
3.4.1. Биометановый потенциал (БМП).....	161	4.7.1.1. Оборудование.....	203
3.4.1.1. Цель.....	161	4.7.1.2. Процедура эксперимента.....	204
3.4.1.2. Общее.....	161	4.7.2. Методика для измерения растворенных газов с помощью газовой хроматографии.....	205
3.4.1.3. Выполнение теста.....	161		
3.4.1.4. Обработка данных.....	162		
3.4.1.5. Рекомендации.....	162		
3.4.2. Биохимическое потребление кислорода.....	163		
3.4.2.1. Цель.....	163		
3.4.2.2. Общее.....	163		
3.4.2.3. Выполнение теста.....	163		

4.7.3. Методика для измерения растворенных газов методом высаливания	205	6.2.1.5. Удельный иловый индекс в перемешиваемом растворе	246
4.7.3.1. Оборудование	205	6.2.2. Кривая осаждения и скорость зонного осаждения	246
4.7.3.2. Процедура отбора проб	205	6.2.2.1. Цель и применение	246
4.7.3.3. Процедура измерения	206	6.2.2.2. Оборудование	247
4.7.3.4. Вычисления	206	6.2.2.3. Методика проведения эксперимента	247
4.7.4. Методика для измерения растворенных газов методом очистки газа	206	6.2.2.4. Интерпретация кривой осаждения	248
4.7.4.1. Рабочий принцип	206	6.2.2.5. Измерение скорости зонного осаждения	249
4.7.4.2. Оборудование	207	6.2.3. Взаимосвязь v_{30-X}	249
4.7.4.3. Тесты на калибровку	208	6.2.3.1. Цель и применение	249
4.7.4.4. Точность измерений	208	6.2.3.2. Оборудование	249
4.7.4.5. Вычисление скорости образования N_2O в газоочистительном устройстве	209	6.2.3.3. Методика проведения эксперимента	249
4.8. АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ	209	6.2.3.4. Определение параметров зонного осаждения	251
4.8.1. Определение потоков	209	6.2.3.5. Калибровка с использованием эмпирических зависимостей на основе параметров осаждаемости ила	251
4.8.2. Определение совокупных фракций выбросов	209	6.2.4. Рекомендации для выполнения тестов на седиментацию	252
4.8.3. Вычисление коэффициентов выбросов	210	6.2.4.1. Форма и размеры емкости	252
5. РАБОТА С ДАННЫМИ И ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ	213	6.2.4.2. Содержание и транспортировка проб	252
Gürkan Sin, Krist V. Gernaey (авторы)		6.2.4.3. Диапазон концентраций	252
Sebastiaan C.F. Meijer, Juan A. Baeza (редакторы)		6.2.4.4. Частота измерений	252
5.1. ВВЕДЕНИЕ	213	6.2.5. Последние достижения в тестах на седиментацию	252
5.2. ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ	214	6.3. ИЗМЕРЕНИЕ СТЕПЕНИ ФЛОКУЛЯЦИИ АКТИВНОГО ИЛА	253
5.2.1. Обработка и валидация данных	214	6.3.1. Тест на ДВВ/ФВВ	253
5.2.1.1. Системный анализ данных биологических процессов	214	6.3.1.1. Цель и применение	253
5.2.1.2. Анализ степени восстановления	214	6.3.1.2. Оборудование	253
5.2.1.3. Проверка соответствия экспериментальных данных	216	6.3.1.3. Тест на ДВВ	253
5.2.2. Оценка параметров	216	6.3.1.4. Тест на ФВВ	254
5.2.2.1. Ручной метод проб и ошибок	217	6.3.1.5. Интерпретация тестов на ДВВ/ФВВ	255
5.2.2.2. Формальные статистические методы	217	6.3.2. Рекомендации	256
5.2.3. Анализ неопределенности	220	6.3.2.1. Условия флокуляции	256
5.2.3.1. Линейное распространение погрешностей	220	6.3.2.2. Влияние температуры	256
5.2.3.2. Метод Монте-Карло	220	6.3.2.3. Пробы надосажденной жидкости	256
5.2.4. Анализ локальной чувствительности и идентифицируемости	221	6.3.3. Последние достижения в измерении состояния флокуляции	257
5.2.4.1. Анализ линейной локальной чувствительности	221	6.4. ИЗМЕРЕНИЕ ОСАЖДАЕМОСТИ ГРАНУЛИРОВАННОГО ИЛА	257
5.2.4.2. Анализ идентифицируемости с помощью индекса коллинеарности	222	6.4.1. Цель и применение	257
5.3. МЕТОДОЛОГИЯ И ПРОЦЕСС	223	6.4.2. Оборудование	258
5.3.1. Проверка согласованности данных с использованием элементного баланса и анализа степени восстановления	223	6.4.3. Измерение плотности	258
5.3.2. Процесс оценки параметров по нелинейному методу наименьших квадратов	223	6.4.4. Определение размера гранул биомассы	259
5.3.3. Процесс оценки параметров по бутстреп-методу	224	6.4.4.1. Просеивание	259
5.3.4. Процесс анализа локальной чувствительности и идентифицируемости	224	6.4.4.2. Анализатор изображений	259
5.3.5. Анализ неопределенности с помощью метода Монте-Карло и линейного закона распространения погрешностей	225	6.4.5. Вычисление скорости осаждения гранул	260
5.4. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПРИМЕРЫ	225	6.4.6. Рекомендации	261
5.5. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ КОММЕНТАРИИ	240	6.4.6.1. Проверка достоверности результатов	261
6. ТЕСТЫ НА СЕДИМЕНТАЦИЮ	243	6.4.6.2. Применение для хлопьевидного ила	261
Elena Torfs, Ingmar Nopens, Mari K.H. Winkler, Peter A. Vanrolleghem, Sophie Balemans, Ilse Y. Smets (авторы)		6.5. ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ОСАЖДЕНИЯ В ПЕРВИЧНОМ ОТСТОЙНИКЕ	261
Glenn T. Daigger, Imre Takács (редакторы)		6.5.1. Введение	261
6.1. ВВЕДЕНИЕ	243	6.5.2. Основной принцип	262
6.2. ИЗМЕРЕНИЕ ОСАЖДАЕМОСТИ ИЛА ВО ВТОРИЧНЫХ ОТСТОЙНИКАХ	244	6.5.3. Отбор и хранение проб	263
6.2.1. Параметры осаждаемости ила	245	6.5.4. Оборудование	263
6.2.1.1. Цель и применение	245	6.5.5. Методика теста	263
6.2.1.2. Оборудование	245	6.5.6. Вычисления и представление результатов	264
6.2.1.3. Иловый индекс (ИИ)	245	6.5.6.1. Проверка массового баланса	264
6.2.1.4. Разбавленный иловый индекс	245	6.5.6.2. Расчет распределения скоростей осадений	264
		6.5.6.3. Рекомендации	265
		7. МИКРОСКОПИЯ	269
		Jeppe L. Nielsen, Robert J. Seviour и Per H. Nielsen (авторы)	
		Jifí Wanner (редактор)	
		7.1. ВВЕДЕНИЕ	269
		7.2. СВЕТОВОЙ МИКРОСКОП	269
		7.2.1. Стандартное применение светового микроскопа	271
		7.2.2. Объектив малого увеличения	271
		7.2.3. Объективы большого увеличения	271
		7.2.4. Иммерсионный объектив	271
		7.2.5. Важные замечания	272
		7.2.6. Светлополюсное и темнопольное освещение	272

7.2.7. Флуоресцентная микроскопия.....	273	8.3.7. Пример.....	300
7.2.8. Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия.....	274	8.3.7.1. Пробы.....	300
7.3. МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	274	8.3.7.2. Постановка количественной ПЦР.....	300
7.3.1. Микроскопическое определение нитчатых микроорганизмов.....	275	8.3.7.3. Результаты.....	300
7.3.2. Идентификация одноклеточных и многоклеточных организмов.....	276	8.4. АМПЛИКОННОЕ СЕКВЕНИРОВАНИЕ.....	301
7.4. МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБ АКТИВНОГО ИЛА.....	277	8.4.1. Общая информация.....	301
7.4.1. Подготовка образца активного ила.....	277	8.4.2. Ген 16S рРНК как филогенетический маркер.....	302
7.4.2. Окрашивание по Граму.....	278	8.4.3. Амплификация ПЦР.....	303
7.4.2.1. Реагенты и растворы для окрашивания по Граму.....	279	8.4.3.1. Реакция ПЦР.....	303
7.4.2.2. Процедура.....	279	8.4.3.2. Отклонения в ПЦР.....	305
7.4.3. Окрашивание по Нейссеру.....	279	8.4.3.3. Выбор праймера.....	305
7.4.3.1. Реагенты и растворы для окрашивания по Нейссеру.....	279	8.4.4. Секвенирование ДНК.....	306
7.4.3.2. Процедура.....	280	8.4.4.1. Платформа для секвенирования.....	306
7.4.4. Окрашивание с помощью DAPI.....	280	8.4.4.2. Глубина секвенирования.....	306
7.4.4.1. Реагенты и растворы для окрашивания с помощью DAPI.....	280	8.4.5. Биоинформатическая обработка данных.....	306
7.4.4.2. Процедура.....	280	8.4.5.1. Доступные инструменты.....	306
7.4.5. Окрашивание CTC.....	281	8.4.5.2. Первичные данные.....	307
7.4.5.1. Реагенты и растворы для окрашивания CTC.....	281	8.4.5.3. Показатели качества и фильтрация.....	307
7.4.5.2. Процедура.....	281	8.4.5.4. Объединение парных прочтений.....	308
7.5. ФЛУОРЕСЦЕНТНАЯ <i>in situ</i> ГИБРИДИЗАЦИЯ (FISH).....	281	8.4.5.5. Кластеризация ОТЕ.....	308
7.5.1. Реагенты и растворы для флуоресцентной <i>in situ</i> гибридизации.....	283	8.4.5.6. Выявление и удаление химер.....	308
7.5.2. Процедура.....	283	8.4.5.7. Таксономическая классификация.....	309
7.6. ТЕХНИКИ КОМБИНИРОВАННОГО ОКРАШИВАНИЯ.....	285	8.4.5.8. Таблица ОТЕ.....	309
7.6.1. Окрашивание методом FISH с применением красителя DAPI.....	286	8.4.6. Анализ данных.....	309
7.6.1.1. Реагенты и растворы для окрашивания DAPI.....	286	8.4.6.1. Определение цели анализа данных.....	309
7.6.1.2. Процедура.....	286	8.4.6.2. Валидация данных и проверка пригодности.....	309
7.6.2. Окрашивание FISH – ПГА.....	286	8.4.6.3. Сообщества или отдельные виды?.....	310
7.6.2.1. Реагенты и растворы для окрашивания ПГА.....	286	8.4.6.4. Выявление основных и переходных видов.....	310
7.6.2.2. Процедура.....	286	8.4.6.5. Исследовательский анализ с помощью многомерной статистики.....	311
8. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ МЕТОДЫ.....	289	8.4.6.6. Корреляционный анализ.....	311
Søren M. Karst, Mads Albertsen, Rasmus H. Kirkegaard, Morten S. Dueholm, Per H. Nielsen (авторы) Holger Daims (редактор)		8.4.6.7. Влияние обработок на отдельные виды.....	312
8.1. ВВЕДЕНИЕ.....	289	8.4.7. Общие наблюдения.....	312
8.2. ВЫДЕЛЕНИЕ ДНК.....	290	8.4.7.1. Относительный метод анализа.....	312
8.2.1. Общая информация.....	290	8.4.7.2. Отклонения в числе копий.....	312
8.2.2. Отбор проб.....	290	8.4.7.3. Смещение праймера.....	312
8.2.3. Выделение ДНК.....	290	8.4.7.4. Стандартизация.....	312
8.2.3.1. Лизис клеток.....	291	8.4.7.5. Влияние метода.....	312
8.2.3.2. Ингибирование нуклеаз и удаление белков.....	291	8.4.8. Методика: получение библиотеки для ампликонного секвенирования региона V1-3 гена 16S рРНК на платформе Illumina.....	313
8.2.3.3. Очистка.....	291	8.4.8.1. Оборудование.....	313
8.2.3.4. Элюирование и хранение.....	291	8.4.8.2. Материалы.....	313
8.2.4. Количественное определение концентрации и целостность.....	291	8.4.8.3. Процедура.....	313
8.2.5. Оптимизированное выделение ДНК из активного ила сточных вод.....	292	8.4.9. Интерпретация и выявление ошибок.....	316
8.2.5.1. Материалы.....	292	8.4.9.1. Контроль качества ДНК пробы и разведение.....	316
8.2.5.2. Выделение ДНК.....	292	8.4.9.2. ПЦР библиотеки.....	317
8.3. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ПЦР В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ.....	293	8.4.9.3. Очистка библиотеки.....	317
8.3.1. Общая информация.....	293	8.4.9.4. Контроль качества библиотеки.....	318
8.3.2. Материалы.....	295	8.4.9.5. Объединение библиотек.....	319
8.3.3. Методы.....	296	8.4.9.6. Контроль качества объединения и разведение.....	319
8.3.4. Обработка данных.....	298	8.4.9.7. Хранение.....	319
8.3.5. Получение данных и их интерпретация.....	298	8.4.10. Методика: секвенирование ампликонов региона V1-3 гена 16S рРНК на платформе Illumina.....	319
8.3.6. Выявление и устранение ошибок.....	299	8.4.10.1. Оборудование.....	319
		8.4.10.2. Реагенты.....	319
		8.4.10.3. Процедура.....	319
		8.4.10.4. Интерпретация и выявление ошибок.....	321
		8.4.11. Дизайн адаптеров Illumina для секвенирования библиотек ампликонов гена 16S.....	322
		8.5. ПРОЧИЕ МЕТОДЫ.....	324
		СИМВОЛЫ И СОКРАЩЕНИЯ.....	330



ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Авторы:

Mark C.M. van Loosdrecht

Per H. Nielsen

Carlos M. Lopez-Vazquez

Damir Brdjabnovic

Редакторы русскоязычного текста:

Ахмедова Наталья Равиловна

Журавлева Антонина Геннадьевна

Очистка сточных вод является важным звеном услуг, которые сектор санитарии предоставляет обществу. Долгое время санитария в основном состояла из транспортировки пресной чистой воды в города и использования этой воды для вывоза отходов из города и сброса их в природную среду. Однако с ростом численности населения в городах в результате промышленной революции XIX в. поддерживать такой цикл стало невозможным. Возникновение эпидемических заболеваний способствовало развитию очистных сооружений и их внедрению с начала XX в. Это развитие в значительной степени было результатом эмпирической деятельности с применением теоретических подходов и экспериментальных наблюдений (рис. 1.1).



Рисунок 1.1. Химическая лаборатория Noyes Laboratory в кампусе Университета штата Иллинойс в Урбана сыграла, пожалуй, самую важную роль в развитии исследований в области сточных вод в начале XX в. (фото: Университет штата Иллинойс, 1902)

Открытие и разработка технологии активного ила (см. подробно в труде Jenkins and Wanner, 2014) имели решающее значение, поскольку эта технология привела к быстрому развитию и применению различных аналитических и экспериментальных методов. Работа на экспериментальной станции в Лоренсе,

штат Массачусетс, США, которая в то время (1912) была уникальным предприятием, обеспечивающим экспериментальную проверку различных процедур очистки сточных вод, вдохновила Гилберта Фаулера попросить Эдварда Ардерна и Уильяма Локетта повторить эксперименты с аэрацией сточных вод, которые он видел в США и в Великобритании. В 1913 и 1914 гг. Локетт и Ардерн провели лабораторные эксперименты на станции очистки сточных вод Манчестер-Дэвихалм (рис. 1.2). Стекланные флаконы использовались в качестве лабораторных аэротенков, «питаемых» сточными водами из разных районов Манчестера. В отличие от экспериментов, которые Фаулер видел в Массачусетсе, в аэрационных испытаниях в Манчестере осадок, оставшийся после декантации, был оставлен во флаконе, и к нему была добавлена новая порция сточных вод для следующего испытания. Вскоре Локетт и Ардерн обнаружили, что количество осадка увеличивается с увеличением количества экспериментов. В то же время период аэрации, необходимый для «полного окисления» сточных вод («полное окисление» – термин, используемый для описания удаления разлагающихся органических веществ и полной нитрификации), был уменьшен.

Используя метод многократной аэрации с оставшимся в бутылке осадком, Локетт и Ардерн смогли сократить необходимое время аэрации для «полного окисления» с нескольких недель до менее чем 24 ч, что сделало процесс технически осуществимым. Осадок, образовавшийся во время аэрации сточных вод, был назван активным илом из-за его внешнего вида и активности. Локетт и Ардерн опубликовали результаты своих исследований в известной серии из трех работ (Arden and Lockett, 1914a, 1914b, 1915). Это ознаменовало «рождение» активного ила, который сегодня является ключевой и наиболее широко применяемой технологией для очистки сточных вод в мире.



Рисунок 1.2. Лаборатория сточных вод в Дэвихалме, где в начале XX в. был разработан процесс активного ила (фото: Объединенные коммунальные предприятия)

Проектирование сточных вод – отрасль, основанная исключительно на экспериментах, поэтому в рамках этой деятельности всегда приходилось разрабатывать и стандартизировать методы. Эта, казалось бы, простая деятельность сильно затруднена двумя факторами: (i) проектирование очистных систем – это типичная междисциплинарная область, в которой инженеры-химики, инженеры-строители, микробиологи и химики взаимодействуют для разработки и понимания процессов, задача здесь состоит в том, чтобы интегрировать методы и подходы из этих дисциплин и, (ii) кроме того, сточные воды и процессы их очистки трудно определимы по своей природе. Например, практически невозможно измерить каждое отдельное соединение в самих сточных водах. Выявление всех микроорганизмов, задействованных в процессах, в течение долгого времени было невозможно и до сих пор остается сложной задачей. Определение всех потенциально происходящих химических превращений из-за множества присутствующих химикатов опять-таки является практически невыполнимой задачей.

Из-за неопределенной природы экспериментальной системы исследования имеют тенденцию к медленному прогрессу, и они сильно зависят от стандартизированных методов, которые могут быть неточными, но при их использовании установленным способом очень полезны для сравнения экспериментальных результатов. Примерами являются широко используемые тесты на химическую или биологическую потребность в кислороде. Известный документ «Стандартные методы исследования воды и сточных вод» (APHA *et al.*, 2012; рис. 1.3) служил руководством по выполнению анализа экспериментальных и производственных систем для нескольких поколений инженеров в области санитарии. Эти методы основаны на химической характеристике и измерении содержания конкретных микроорганизмов. Требования к эффективности очистных сооружений возросли, переходя от охраны здоровья населения к водным ресурсам и охране окружающей среды, и в настоящее время к комплексному восстановлению ресурсов

и энергии. Потребность в точной характеристике микробных процессов в процессах очистки сточных вод за последние десятилетия возросла.

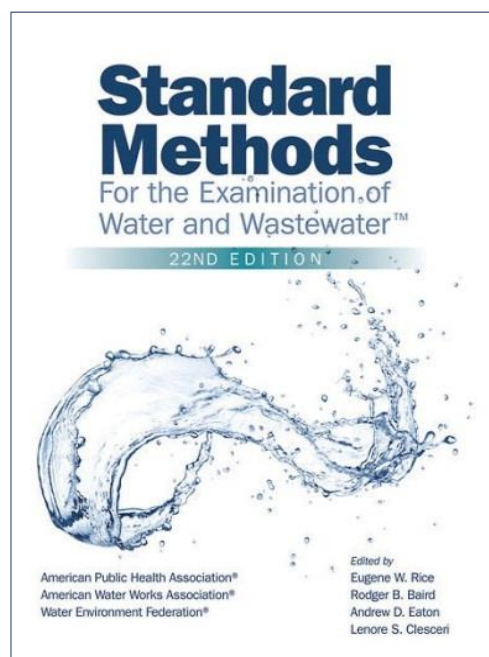


Рисунок 1.3. Стандартные методы исследования воды и сточных вод. Первое издание появилось в 1905 г. (фото: APHA *et al.*, 2012)

Разработка стандартизированных методов экспериментальной работы, которые можно легко повторить в разных лабораториях, является трудной задачей (рис. 1.4). Во многих случаях важна точная обработка данных. Однако непросто зафиксировать их в протоколе на практике. Поэтому, чтобы избежать подобных проблем, было решено подготовить книгу, описывающую все экспериментальные методы, и видео с методами, приведенными в этой книге, которые фактически демонстрируются в лаборатории.

Данная книга и связанные с ней видеоматериалы предназначены для поддержки исследований и разработок и представляют собой руководство по характеристике биологических процессов при очистке сточных вод. В первом издании книги «Экспериментальные методы в очистке сточных вод» редакторы решили сосредоточиться на процессе с участием активного ила, поскольку во всем мире эта технология применяется наиболее широко. Тем не менее большинство методов, представленных в книге, также могут применяться к технологиям, в основе которых лежат биопленки или анаэробные процессы пищеварения.

Результатом подробного рассмотрения экспериментальных методов, связанных с процессом активного ила, стало появление следующих семи глав, описывающих ключевые методы проведения экспериментов. Содержание и ключевой фокус глав приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Упрощенный обзор экспериментальных методов, представленных в книге по каждому процессу

Процесс	Глава							
	Общие сведения	Определение активности микроорганизмов в активном иле	Респирометрия	Тестирование отходящих газов	Обработка данных и оценка параметров	Оценка осаждаемости	Микроскопия	Молекулярные методы
Удаление органики	Обзор и обоснование экспериментальных методов	Кинетика	Биохимическое потребление кислорода (БПК) Краткосрочное биохимическое потребление кислорода Характеристика и категоризация сточных вод Характеристика биомассы Токсичность и ингибирование	Методы отбора проб азота и парниковых газов Методы измерения отходящих газов Методы определения концентрации N ₂ O и CH ₄ в водных растворах Методы измерения газа в открытых резервуарах	Обработка и валидация данных Оценка параметров Анализ неопределенности Анализ локальной чувствительности и идентифицируемости	Распределение скоростей осажде-ния в первичных отстойниках Осаждение ила во вторичных отстойниках Свойства флокуляции Осаждаемость гранулированного ила	Световая микроскопия Конфокальная микроскопия Морфологические исследования Методы окрашивания Флуоресцентная <i>in situ</i> гибридизация (FISH) Комбинированные методы окрашивания	Извлечение ДНК Количественная ПЦР в реальном времени Ампликонное секвенирование
Нитрификация		Активность бактерий АОО и НОО Кинетика Стехиометрия	Характеристика и категоризация сточных вод Характеристика биомассы Активность бактерий АОО и НОО Токсичность и ингибирование Кинетика Стехиометрия					
Денитрификация		Денитрификация по NO ₂ и NO ₃ Денитрификация по ЛБХПК и МБХПК Стехиометрия Кинетика	Денитрификация по NO ₂ и по NO ₃ Токсичность и ингибирование Стехиометрия Кинетика					
Анаммокс		Активность бактерий анаммокс Кинетика Стехиометрия						
УБУФ		ФАБ, ГАБ, и ДФАБ Кинетика Стехиометрия	Аэробная кинетика и стехиометрия Токсичность и ингибирование					
Анаэробная очистка		Активность СРБ Кинетика Стехиометрия	Удельная метаногенная активность Биометановый потенциал Токсичность и ингибирование Кинетика Стехиометрия					
Осаждение								

AMX Бактерии анаммокс

АОО Аммонийокисляющие бактерии

CH₄ Метан

ДНК Дезоксирибонуклеиновая кислота

ДФАБ Денитрифицирующие полифосфатаккумулирующие бактерии

УБУФ Улучшенное биологическое удаление фосфора

FISH Флуоресцентная *in situ* гибридизация

ГАБ Гликонеаккумулирующие бактерии

ПГ Парниковые газы

N₂O Оксид азотаNO₂

Нитрит

NO₃

Нитрат

NOO

Нитритокисляющие бактерии

ФАБ

Полифосфатаккумулирующие бактерии

ПЦР

Полимеразная цепная реакция

ЛБХПК

Легко биоразлагаемый ХПК, также известный как легко биоразлагаемая органика

МБХПК

Медленно биоразлагаемый ХПК, также известный как медленно биоразлагаемая органика

СРБ

Сульфатредуцирующие бактерии или

СРО

Сульфатредуцирующие организмы



Рисунок 1.4. Миссия Института Делфта по образованию в области водных ресурсов при партнерстве с ЮНЕСКО состоит в том, чтобы содействовать обучению и подготовке специалистов, расширять базу знаний посредством научных исследований и наращивать потенциал отраслевых организаций, центров знаний и других учреждений, действующих в области водных ресурсов, окружающей среды и инфраструктуры развивающихся стран и стран с переходной экономикой. На фотографиях изображен пример последнего проекта Института на Кубе, где лаборатория Института исследований промышленности (IIA) в Гаване была оснащена новейшими технологиями и проведено обучение местного персонала работе с оборудованием, подготовке и проведению экспериментальных работ (фото: Brdjanovic, 2015)

Активный ил состоит из множества микроорганизмов, которые преобразуют ряд важных соединений (органические вещества, кислород, азот и фосфатные соединения). Первые три главы посвящены характеристике конверсионных возможностей микробных сообществ в ходе основных микробных процессов. Было определено различие между методами, полностью основанными на жидкой фазе, и методами, где конверсия характеризуется измерением дыхания организмов, обычно измерениями газовой фазы.

Поскольку все больше внимания уделяется оценке воздействия очистных сооружений на окружающую среду, была добавлена отдельная глава, посвященная измерению выбросов парниковых газов на очистных сооружениях. Далее следует глава, описывающая методы обработки данных. Часто измерения, проводимые на производственных или опытных установках, имеют относительно большую неопределенность. При применении подходящих методов обработки представленные измерения мо-

гут использоваться для получения связанных (трудно измеряемых) данных процесса или для минимизации их неопределенности.

Процессы активного ила в основном зависят от осаждения хлопьевидного ила для отделения биомассы от очищенных сточных вод. Часто это является слабым местом процесса очистки и ключевым фактором при его разработке. Поэтому отдельная глава книги посвящена характеристике свойств осаждения ила.

Как было сказано выше, микроорганизмы являются «рабочими лошадками» в процессе воздействия активного ила. Поэтому микроскопия неизбежно является основным методом непосредственного наблюдения не только за отдельными организмами, но и за морфологией флокул, связанных с характеристиками осаждения. Несмотря на то, что в течение длительного времени микроскопия была основным методом при наблюдении за бактериями, присутствующими в активном иле, она не может показать всю сложность

сообщества микроорганизмов. Прогресс, достигнутый за последнее десятилетие, в методах, основанных на молекулярной ДНК, произвел революцию в области наблюдения за микроорганизмами. Эти общие новые методы описаны в последней главе книги.

В главах настоящей книги авторы попытались описать, в частности, те методы, которые являются экспериментально сложными и представляют собой нестандартные аналитические процедуры. Поэтому стандартные аналитические методы, применяемые, например, для органики, аммония, фосфата и т. д. подробно не описаны. С другой стороны, было решено включить информацию о некоторых недавно разработанных или улучшенных аналитических методах, которые используются все чаще, но их полное описание нужно собирать из различных источников (например, определение гликогена и полигидрокси-алканоатов). Методы, которые могут представлять академический интерес, но в настоящее время имеют ограниченное практическое применение, не были подробно описаны в данной монографии.

С точки зрения символов и обозначений была сделана попытка их максимальной стандартизации.

Такая стандартизация была проведена внутри каждой главы, выполнить полную стандартизацию по всем главам оказалось невозможным из-за их разнообразного содержания и неоднородности элементов, а также из-за отсутствия глобального соглашения об использовании символов и обозначений, хотя наиболее распространенные рекомендации и указания были соблюдены (например, Corominas *et al.*, 2010).

Книга составлена таким образом, чтобы удовлетворить запросы пользователей с высокими требованиями, например, работающих со сложным аналитическим и экспериментальным оборудованием. Она также подходит для использования в работе в более простых лабораториях, а также менее опытными экспериментаторами; в частности, приведены видеоматериалы, посвященные выполнению экспериментов в условиях, которые обычно преобладают в большинстве менее развитых стран.

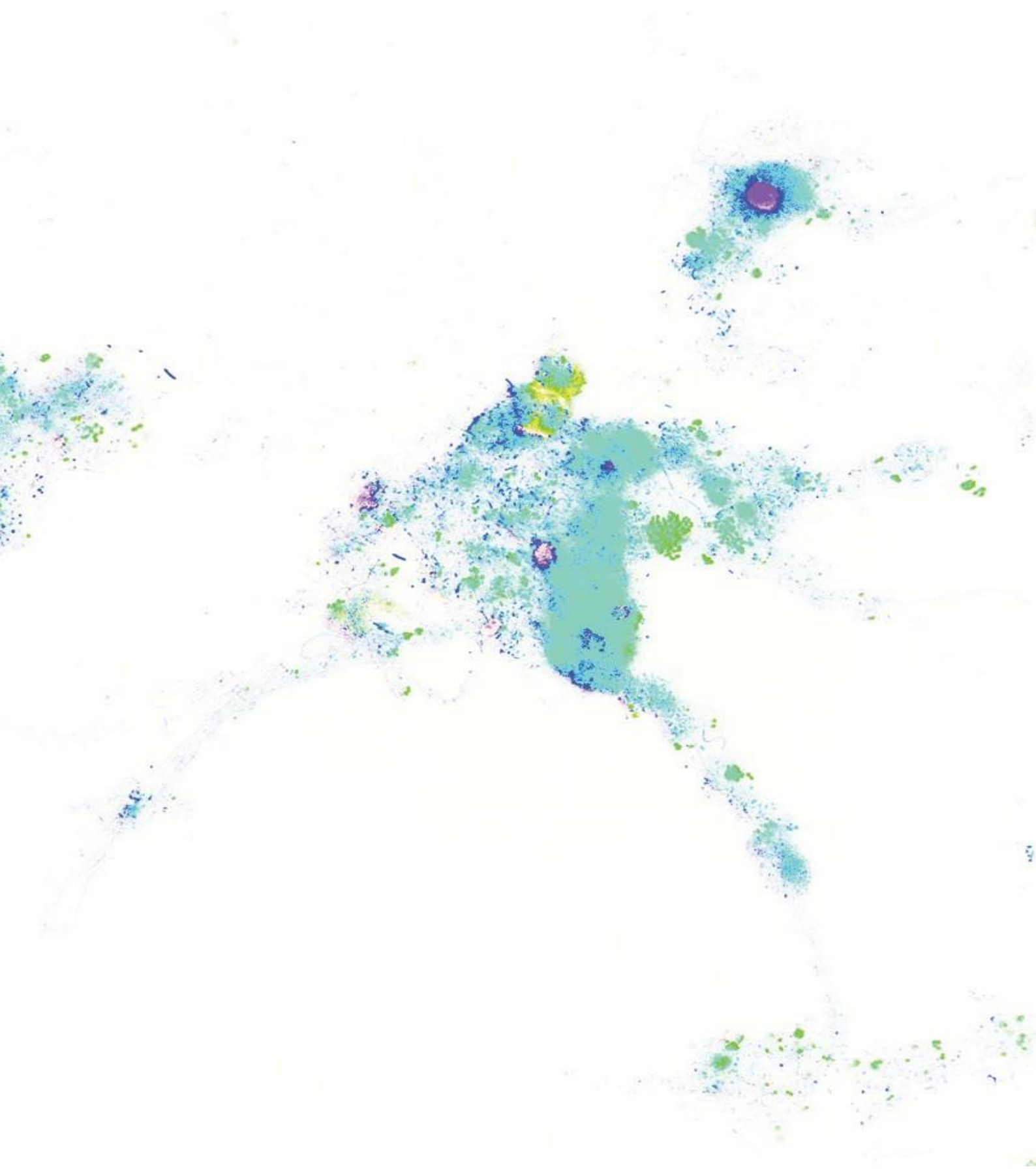
«Измерить – значит знать»
Лорд Кельвин

Список литературы

- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Environment Federation (WEF) (2012). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition. New York. ISBN 9780875530130.
- Ardern, E., Lockett, W.T. (1914a) Experiments on the Oxidation of Sewage without the Aid of Filters. *J. Soc. Chem. Ind.*, 33: 523.
- Ardern, E., Lockett, W.T. (1914b) Experiments on the Oxidation of Sewage without the Aid of Filters, Part II. *J. Soc. Chem. Ind.*, 33: 1122.
- Ardern, E., Lockett, W.T. (1915) Experiments on the Oxidation of Sewage without the Aid of Filters, Part III. *J. Soc. Chem. Ind.*, 34: 937.

- Corominas, L.L., Rieger, L., Takács, I., Ekama, A.G., Hauduc, H., Vanrolleghem, P.A., Oehmen, A., Gernaey, K.V., van Loosdrecht, M.C.M., Comeau Y. (2010). New framework for standardized notation in wastewater treatment modelling. *Water Sci Technol.*, 61(4): 841–57.
- Jenkins, D. and Wanner, J. Eds. (2014) 100 years of activated sludge and counting. IWA Publishing, London, ISBN 9781780404936: 464.

Раздел об истории развития активного ила представлен в данной главе на основе Jenkins and Wanner (2014).



ОПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНОСТИ МИКРООРГАНИЗМОВ В АКТИВНОМ ИЛЕ

Авторы:

Carlos M. Lopez-Vazquez
Laurens Welles
Tommaso Lotti
Elena Ficara
Eldon R. Rene
Tessa P.H. van den Brand
Damir Brdjanovic
Mark C.M. van Loosdrecht

Редакторы:

Yves Comeau
Piet N.L. Lens
Nancy G. Love

Редакторы русскоязычного текста:

Ахмедова Наталья Равиловна
Гогина Елена Сергеевна
Журавлева Антонина Геннадьевна
Залетова Нина Анатольевна
Эпов Андрей Николаевич
Янцен Ольга Викторовна

2.1. ВВЕДЕНИЕ

В биологических системах очистки сточных вод на степень и скорость удаления соединений и загрязняющих веществ микробными популяциями влияют различные условия и факторы. Конфигурация очистных сооружений, условия их эксплуатации, бесспорно, играют важную роль, но различные факторы, такие как характеристики сточных вод, экологические и климатические условия, также оказывают сильное влияние на распространение и деятельность конкретных микробных популяций. В любой системе биологической очистки сточных вод в конечном итоге возникает необходимость оценки, определения и понимания эффективности удаления определенных загрязняющих веществ на очистных сооружениях и реакции ила на конкретные ингибирующие или токсичные соединения.

Кроме того, с точки зрения моделирования также представляет интерес оценка и определение стехио-

метрических параметров и кинетических скоростей процессов конверсии, выполняемых определенными микробными популяциями (например, обычными гетеротрофными бактериями (ОГБ), денитрифицирующими гетеротрофными бактериями (ДГБ), аммонийоокисляющими бактериями (АОБ), нитритоокисляющими бактериями (НОБ), фосфат-аккумулирующими бактериями (ФАБ), сульфатредуцирующими бактериями (СРБ); также называемыми сульфатредуцирующими организмами (СРО) (Corominas *et al.*, 2010); или ными аммонийоокисляющими бактериями – анаммокс). Поэтому периодические тесты на активность бактерий (рис. 2.2.1) могут быть полезны для следующих целей: (i) изучить способность к биологическому расщеплению конкретного потока сточных вод (бытовых или промышленных), (ii) определить стехиометрические и кинетические параметры процесса конверсии конкретного соединения, (iii) изучить потенциальные взаимодействия (например, симбиоз

и конкуренция) между микробными популяциями и (iv) оценить потенциальное ингибирующее или токсическое воздействие различных видов сточных вод, соединений или веществ.

Лабораторные эксперименты по определению характера и типа тестов на активность могут различаться в зависимости от представляющих интерес соединений, а также от метаболизма и физиологии микробных популяций, участвующих в процессах удаления или превращения. Например, они могут варьироваться от относительно простых аэробных лабораторных тестов, где определяется удаление органического вещества с помощью ОГБ, до более сложных чередующихся анаэробных-аноксидных-аэробных периодических лабораторных экспериментов для оценки активности ФАБ при наличии различных сочетаний акцепторов электронов (таких как нитрат, нитрит и кислород) из систем активного ила, обеспечивающих улучшенное биологическое удаление фосфора (УБУФ).

В этой главе представлен обзор наиболее распространенных методов определения активности

и процедур для оценки процессов конверсии, связанных: (i) с улучшенным биологическим удалением фосфора с помощью ФАБ в чередующихся анаэробно-аэробных условиях, (ii) денитрификацией с использованием нитрата или нитрита с помощью ФАБ, (iii) снижением уровня сульфатов при помощи СРБ, (iv) удалением органических веществ в аэробных условиях с помощью ОГБ, (v) денитрификацией с помощью ДГБ с использованием нитрата или нитрита в качестве конечного акцептора электронов, (vi) окислением аммиака и нитрита с помощью АОБ и НОБ в аэробных условиях и (vii) удалением азота с помощью анаммокс-бактерий. Эти процедуры экспериментов станут ценным руководством, которое дает основу для стандартизации тестов на активность с целью применения в существующих, новых и инновационных процессах очистки. Было решено начать с представления систем УБУФ, в которых используются ФАБ, поскольку эти процессы являются сложными и включают в себя все три вида биохимической среды активного ила: анаэробную, аноксидную и аэробную.



Рисунок 2.1.1. Экспериментальные установки для тестирования активности активного ила в Институте Делфта по образованию в области водных ресурсов при партнерстве с ЮНЕСКО в Нидерландах (фото: IHE Delft)

2.2. УЛУЧШЕННОЕ БИОЛОГИЧЕСКОЕ УДАЛЕНИЕ ФОСФОРА

2.2.1. Описание процесса

Улучшенное биологическое удаление фосфора (УБУФ) может осуществляться в системах очистки сточных вод с применением систем активного ила путем введения анаэробной стадии в начале процесса очистки сточных вод. Высокая эффективность удаления фосфора (P), более низкие эксплуатационные расходы, меньший прирост ила и потенциальная возможность извлечения фосфора стали причинами его популярности и активного применения (Mino *et al.*, 1998; Henze *et al.*, 2008; Oehmen *et al.*, 2007). УБУФ выполняется фосфат(полифосфат)-аккумулирующими бактериями (ФАБ) (Comeau *et al.*, 1987; Mino *et al.*, 1998), которые за счет внутриклеточного накопления полифосфата (поли-P) могут удалять большие количества фосфора (0,35–0,38 г P/г летучих взвешенных веществ¹ (ЛВВ) ФАБ), по сравнению с удалением фосфора при помощи ОГБ (0,03 г P/г ЛВВ для ОГБ) (Wentzel *et al.*, 2008). Научные, микробиологические и технические характеристики процесса УБУФ были в центре внимания исследований, проводимых в течение последних нескольких десятилетий различными научными группами (Wentzel *et al.*, 1986, 1987; Comeau *et al.*, 1986, 1987; Smolders *et al.*, 1994a, b; Mino *et al.*,

1987, 1998; Oehmen *et al.*, 2005a, 2005c, 20i306, 2007; Nielsen *et al.*, 2010). В частности, усилия ученых были направлены на изучение метаболических механизмов УБУФ, на выявление микробной идентичности вовлеченных организмов и на оптимизацию конфигураций необходимых процессов; все это способствовало улучшению и повышению эффективности и надежности процесса УБУФ.

ФАБ представляют собой гетеротрофные организмы. Однако, в отличие от ОГБ, ФАБ обладают уникальной способностью использовать полифосфат, хранящийся внутри клетки, для производства необходимой энергии (трифосфат аденозина, АТФ) в анаэробных условиях для поглощения легко биоразлагаемого органического вещества, такого как летучие жирные кислоты (ЛЖК), ацетат (Ac) и пропионат (Pr), и накопления внутриклеточных биополимеров – поли-β-гидроксиалканоатов (ПГА). Сохраненные ПГА позже используются в анаэробных или аэробных условиях для усиления поглощения фосфора, синтеза гликогена, роста и поддержания биомассы. Эта особенность дает ФАБ конкурентное преимущество по сравнению с другими распространенными микробными популяциями. Таким образом, возможно обогащение ФАБ для дальнейшей УБУФ путем рециркуляции активного ила с помощью чередования анаэробной и аноксидной или аэробной стадий при направлении потоков, богатых ЛЖК, на анаэробную стадию. Схематичное изображение метаболизма ФАБ представлено на рис. 2.2.1.

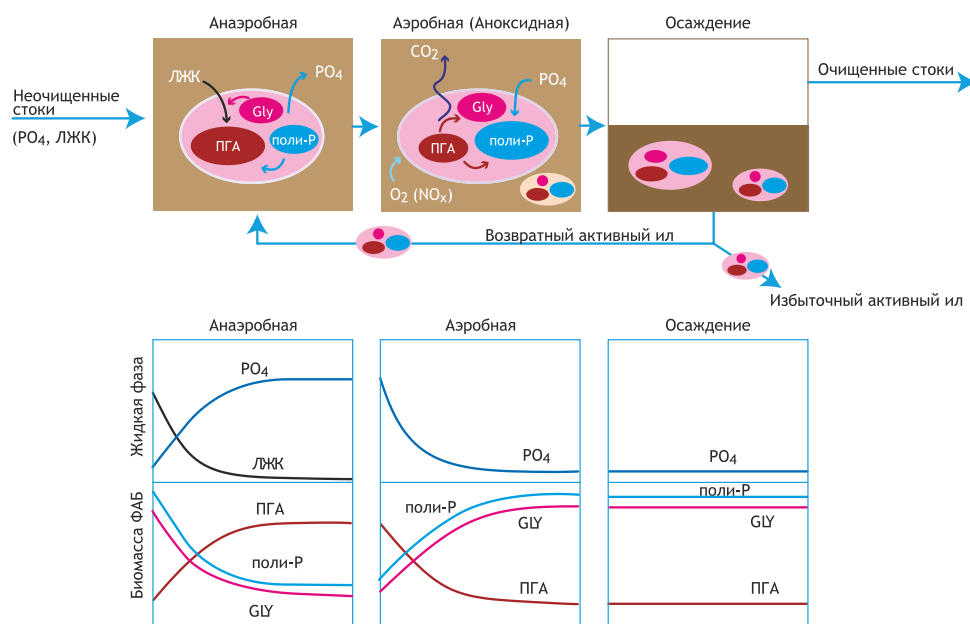


Рисунок 2.2.1. Принципиальная схема процесса очистки сточных вод в системах активного ила, выполняющих УБУФ, иллюстрирующая деятельность ФАБ (Lopez-Vazquez, 2009; на основе Meijer, 2004)

¹ Летучие взвешенные вещества (ЛВВ) – в российской практике также именуется как беззольное вещество ила (БЗВ) в соответствии с аналитической процедурой его определения. В данной книге оба термина используются как синонимы (прим. ред.).

На анаэробной стадии ФАБ аккумулируют внутри клетки легко биоразлагаемые органические вещества, присутствующие в неочищенных сточных водах или осадках (в основном, ЛЖК), в качестве ПГА, используя два других внутриклеточных полимера, которые участвуют в вышеуказанном метаболизме: поли-Р и гликоген (полимер глюкозы). Поли-Р гидролизует и используется ФАБ для обеспечения необходимой энергией (в виде аденозинтрифосфата (АТФ)) для транспортировки и хранения ЛЖК в виде ПГА (Wentzel *et al.*, 1986), в то время как гликоген используется для обеспечения преобразования ЛЖК в ПГА (эквивалентов восстановителя), а также для обеспечения дополнительной необходимой энергией (в виде АТФ) (Comeau *et al.*, 1986, 1987; Smolders *et al.*, 1994a; Mino *et al.*, 1998). Таким образом, анаэробное поглощение ЛЖК фосфатаккумуляторными бактериями приводит к накоплению ПГА и одновременному гидролизу поли-Р и гликогена. Наиболее распространенными полимерами ПГА, хранящимися в ФАБ, являются поли-β-гидроксibuтират (ПГБ), полигидроксивалерат (ПГВ) и поли-β-гидрокси-2-метилвалерат (ПГ₂МВ). Их наличие и количество зависит от состава ЛЖК (Ас или Рг). Когда Ас является наиболее распространенной ЛЖК в среде, ФАБ в основном накапливают ПГБ (до 90 % хранимых ПГА) (Smolders *et al.*, 1994a), но, когда Рг является доминирующей ЛЖК, ПГА существуют в основном в виде ПГВ и ПГ₂МВ (Oehmen *et al.*, 2007).

Кроме поглощения ЛЖК анаэробный гидролиз полифосфата и гликогена обеспечивает ФАБ энергией, необходимой для поддержания их анаэробного состояния без поглощения углерода. Следовательно, гидролиз полифосфатов приводит к выделению ортофосфата (PO₄) в жидкую фазу, что выражается в увеличении концентрации ортофосфата в жидкой фазе в ходе анаэробной стадии (см. рис. 2.2.1). В дополнение к поглощению ЛЖК, присутствующих в поступающем активном иле, ФАБ могут потреблять ЛЖК, генерируемые ферментирующими организмами на анаэробной стадии из ферментируемых органических веществ, присутствующих в стоках, поступающих на очистку.

При переходе ФАБ на аэробную стадию, они используют ПГА, хранящиеся в анаэробной фазе, в качестве источника углерода и энергии с использованием кислорода в качестве акцептора электронов; с помощью энергии этой реакции происходит потребление и накопление большего количества PO₄, чем ранее высвободившегося на анаэробной стадии (см. рис. 2.2.1). Это приводит к аэробному поглощению и удалению фосфора из жидкой фазы. На аэробной стадии ПГА используются: (i) для пополнения внутриклеточного гликогена, (ii) поддержания роста биомассы и (iii) обеспечения энергии для аэробного поддержания ФАБ (Smolders *et al.*, 1994b).

Эффективное удаление фосфора из сточных вод достигается за счет вывода избыточного активного

ила в конце аэробной фазы, когда ил имеет высокое содержание полифосфатов (см. рис. 2.2.1). Кроме того, существуют денитрифицирующие фосфатаккумуляторные бактерии (ДФАБ), которые также могут поглощать PO₄ в бескислородных условиях, используя нитрат или нитрит в качестве акцепторов электронов (Vlekke *et al.*, 1988; Kuba *et al.*, 1993; Hu *et al.*, 2002; Kerr-Jespersen *et al.*, 1993; Guisasola *et al.*, 2009). Также ФАБ, будучи гетеротрофными организмами, способны поглощать источники углерода в аэробных условиях, выделяя ортофосфат, когда источник углерода доступен, и впоследствии удаляя PO₄ (Guisasola *et al.*, 2004; Ahn *et al.*, 2007). Тем не менее в конечном итоге ФАБ может проигрывать ОГБ благодаря их метаболической адаптации к постоянным аэробным условиям (Pijuan *et al.*, 2006). Для более глубокого понимания метаболизма и факторов, влияющих на процесс УБУФ, читателю следует обратиться к материалам, опубликованным в других трудах (Comeau *et al.*, 1986; Mino *et al.*, 1998; Oehmen *et al.*, 2007).

Эффективное удаление фосфора из сточных вод достигается за счет вывода избыточного активного ила в конце аэробной фазы, когда ил имеет высокое содержание полифосфатов (см. рис. 2.2.1). Кроме того, существуют денитрифицирующие фосфатаккумуляторные бактерии (ДФАБ), которые также могут поглощать PO₄ в бескислородных условиях, используя нитрат или нитрит в качестве акцепторов электронов (Vlekke *et al.*, 1988; Kuba *et al.*, 1993; Hu *et al.*, 2002; Kerr-Jespersen *et al.*, 1993; Guisasola *et al.*, 2009). Также ФАБ, будучи гетеротрофными организмами, способны поглощать источники углерода в аэробных условиях, выделяя ортофосфат, когда источник углерода доступен, и впоследствии удаляя PO₄ (Guisasola *et al.*, 2004; Ahn *et al.*, 2007). Тем не менее в конечном итоге ФАБ может проигрывать ОГБ благодаря их метаболической адаптации к постоянным аэробным условиям (Pijuan *et al.*, 2006). Для более глубокого понимания метаболизма и факторов, влияющих на процесс УБУФ, читателю следует обратиться к материалам, опубликованным в других трудах (Comeau *et al.*, 1986; Mino *et al.*, 1998; Oehmen *et al.*, 2007).

Распространение гликогенаккумуляторных бактерий (ГАБ) наблюдается в системах УБУФ при определенных условиях (например, когда ацетат или пропионат присутствуют в качестве единственного источника углерода при температуре выше 20 °С, при рН ниже 7,0 и/или при концентрации растворенного кислорода (РК) свыше 2 мг/л) (Oehmen *et al.*, 2007; Lopez-Vazquez *et al.*, 2009a, b; Carvalheira *et al.*, 2014). ФАБ и ГАБ очевидно имеют сходный метаболизм, но последние базируются исключительно на собственных внутриклеточных запасах гликогена в качестве источника энергии и эквивалентов восстановителя, которые способствуют анаэробному накоплению ЛЖК как ПГА без какого-либо

участия полифосфатов (рис. 2.2.2). Их присутствие часто связано с неоптимальными показателями УБУФ, поскольку они не способствуют удалению фосфора, но конкурируют с ФАБ за субстрат в анаэ-

робных условиях, что приводит к ухудшению систем УБУФ (Saunders *et al.*, 2003; Thomas *et al.*, 2003). Поэтому наличие ГАБ в системах УБУФ считается нежелательным.

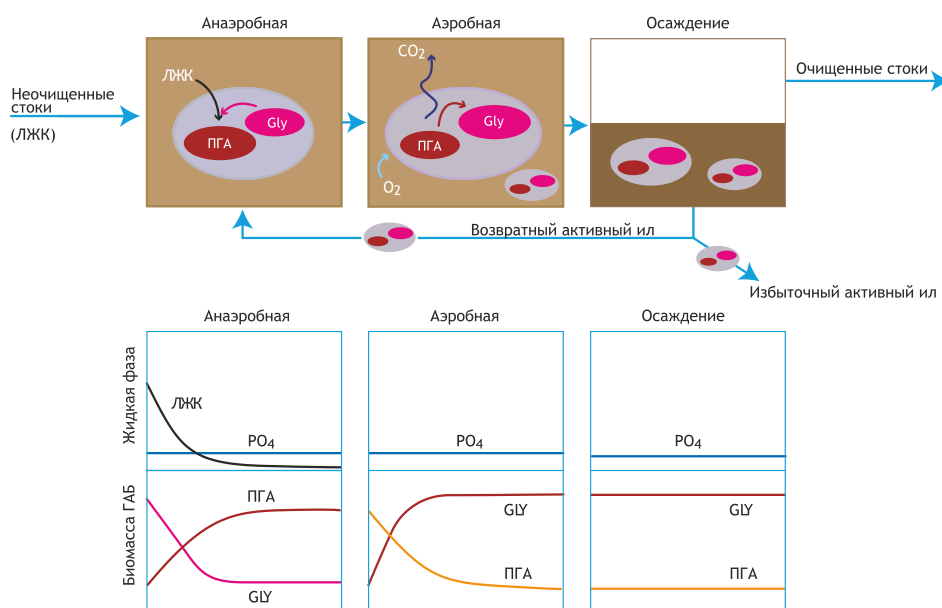


Рисунок 2.2.2. Принципиальная схема микробной активности гликогенааккумулирующих бактерий (ГАБ) (на основе Lopez-Vazquez, 2009)

Распространение гликогенааккумулирующих бактерий (ГАБ) наблюдается в системах УБУФ при определенных условиях (например, когда ацетат или пропионат присутствуют в качестве единственного источника углерода при температуре выше 20 °С, при рН ниже 7,0 и/или при концентрации растворенного кислорода (РК) свыше 2 мг/л) (Oehmen *et al.*, 2007; Lopez-Vazquez *et al.*, 2009a, b; Carvalheira *et al.*, 2014). ФАБ и ГАБ очевидно имеют сходный метаболизм, но последние базируются исключительно на собственных внутриклеточных запасах гликогена в качестве источника энергии и эквивалентов восстановителя, которые способствуют анаэробному накоплению ЛЖК как ПГА без какого-либо участия полифосфатов (рис. 2.2.2). Их присутствие часто связано с неоптимальными показателями УБУФ, поскольку они не способствуют удалению фосфора, но конкурируют с ФАБ за субстрат в анаэробных условиях, что приводит к ухудшению систем УБУФ (Saunders *et al.*, 2003; Thomas *et al.*, 2003). Поэтому наличие ГАБ в системах УБУФ считается нежелательным.

В любом случае, биореакторы, используемые для выполнения испытаний, должны: (i) исключать проникновение кислорода при анаэробных и аноксидных условиях, (ii) обеспечивать достаточную подачу воздуха для обеспечения необходимой концентрации РК – в концентрациях, превышающих 2 мг/л в аэробных условиях, (iii) обеспечивать условия для полного перемешивания, (iv) обеспечивать контроль температуры; (v) обеспечивать контроль pH и (vi) иметь устройства для отбора проб и добавления стоков, растворов, газов и других жидких сред или субстрата, используемых в испытании (рис. 2.2.3 и 2.2.4).

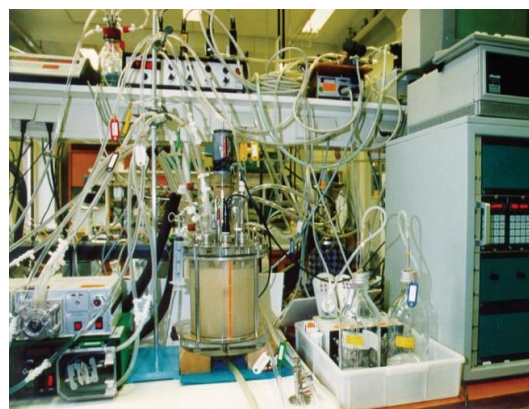


Рисунок 2.2.3. Оригинальная экспериментальная установка УБУФ с характерным желтоватым цветом высокообогащенной биомассы с ФАБ, использованная в Техническом университете Делфта в начале 1990-х гг. для разработки метаболической модели TUDelft bio-P (Smolders *et al.*, 1994a, 1994b; Murnleitner *et al.*, 1997) и новаторского исследования влияния температуры на УБУФ (Brdjanovic *et al.*, 1998a) (фото: Brdjanovic, 1994)

2.2.2. Экспериментальная установка

2.2.2.1. Реакторы

Для оценки эффективности процесса улучшенного биологического удаления фосфора испытания на активность могут проводиться в анаэробных, аэробных и аноксидных условиях в зависимости от параметров, представляющих интерес, и характера исследований.

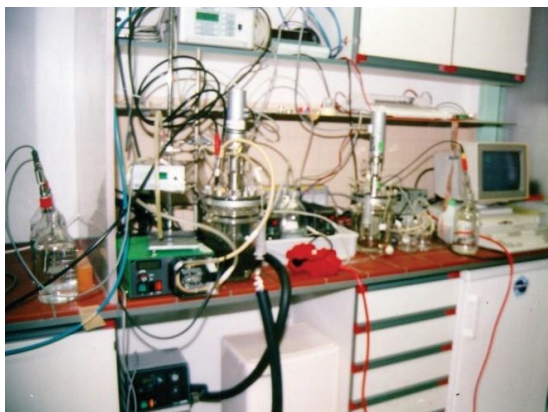


Рисунок 2.2.4. Экспериментальная установка, используемая для проведения испытаний с активным илом на очистных сооружениях в г. Харлеме, Нидерланды. Это было первое исследование (Brdjanovic *et al.*, 2000), в котором была проведена конкретная проверка метаболической модели TUDelft bio-P с использованием различных периодических испытаний со смешанной биомассой действующего КОС (фото: Brdjanovic, 1997)

Анаэробные условия

Экспериментальная установка, используемая для испытания на активность УБУФ, должна обеспечивать и поддерживать строгие анаэробные условия. Это означает, что акцепторы электронов (а именно кислород, нитрат или нитрит) не должны быть доступны для биомассы во время анаэробной фазы.

Измеритель окислительно-восстановительного потенциала можно использовать для контроля анаэробных условий, значения окислительно-восстановительного потенциала должны быть ниже 300 мВ. Лабораторная установка должна быть воздухопроницаемой и иметь выход для отходящего газа, соединенный с крышкой биореактора.

Обычно существует три нежелательных источника кислорода: (i) растворенный кислород во входящем потоке, (ii) остаточный кислород, присутствующий в самом активном иле, и (iii) кислород, проникающий из свободного пространства над жидкостью. Чтобы исключить первые два из перечисленных выше источников, следует обеспечить барботаж газообразным азотом, подаваемым со дна биореактора в течение 5–10 мин до начала испытания и во время подачи испытуемой жидкости. Время барботажа будет зависеть от массообменных свойств на границе раздела фаз газ – жидкость, которые в свою очередь зависят от ряда факторов, включая размеры биореактора, наличие и расположение перегородок, размеры лопастей мешалки и скорость перемешивания, конфигурацию газораспределителя, скорость потока газа и состав среды. Чтобы избежать проникновения кислорода, свободное пространство над жидкостью может быть обработано либо газообразным азотом, уже распыленным в активный ил в нижней части биореактора, либо продувкой азотом свободного пространства в течение 5–10 мин, в зависимости от объема свободного пространства и скорости потока газа.

В лабораторных ферментерах с рабочим объемом до 3 л обычный расход газообразного азота составляет около 30 л/ч, тогда как для реакторов периодического действия с рабочим объемом около 0,5–1,0 л рекомендуется более низкая скорость потока около 6 л/ч. Барботаж газообразным азотом в нижней части биореактора является обычной практикой, и его можно применять до, в начале и во время проведения испытаний активности; продувка свободного пространства часто используется во время выполнения испытания, чтобы избежать проникновения кислорода из атмосферы при перемешивании активного ила. Объединение этих двух подходов является одновременно нестандартным и ненужным.

Во избежание диффузии кислорода в биореактор может применяться однонаправленный обратный клапан или водяной затвор (содержащий поглотитель кислорода, такой как NaSO_2), связанный с трубой для отходящих газов. Если биореактор постоянно барботируется газом N_2 , что приводит к положительному давлению внутри биореактора и непрерывному потоку отводимого газа, наличие обратного клапана или водяного затвора не является необходимым для обеспечения анаэробных условий. Если газообразный азот недоступен или не может подаваться непрерывно из-за отсутствия соответствующего оборудования, активный ил следует осторожно, но полностью перемешивать на более медленных скоростях (намного ниже, чем 300 об/мин) при условии полного отсутствия доступа воздуха, пока концентрация растворенного кислорода (РК) не упадет ниже предела обнаружения (практически до нуля), и величина окислительно-восстановительного потенциала не опустится ниже 300 мВ.

Кроме того, чтобы минимизировать риск проникновения кислорода, следует сократить объем свободного пространства. Для этого используется заполнение ферментера до максимального рабочего объема и/или следует уменьшить площадь поверхности границы раздела фаз газ – жидкость путем введения инертного плавающего пенополиуретана или губки. Для создания воздухонепроницаемых условий среди прочих материалов обычно используются силиконовые резиновые заглушки и уплотнители, пластиковая и алюминиевая фольга. Помимо преграды для проникновения кислорода для поддержания строгих анаэробных условий необходимо предотвратить присутствие и доступность других акцепторов электронов (таких как нитрат или нитрит) для поддержания строгих анаэробных условий в течение всего испытания. Обеспечение таких мер сложнее, чем удаление кислорода. Перед выполнением испытания часто требуется соответствующая подготовка образца активного ила. Она может включать контролируемое добавление ингибиторов нитрификации в неаэрируемых и аэрируемых условиях или промывку ила, согласно дальнейшему описанию в разд. 2.2.3.5.

Научное издание

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В ОЧИСТКЕ СТОЧНЫХ ВОД

Перевод с английского Н.В. Кахаевой

Редакторы Е.А. Кулешова, Т.А. Титоренко
Технический редактор Н.В. Удлер
Компьютерная верстка Н.Б. Еремина

Подписано в печать 28.09.2020.

Формат 84×108/16. Бумага офсет. Гарнитура Times New Roman, Arial Narrow.
Усл. печ. л. 36,33. Уч.-изд. л. 30,59. Тираж 50 экз.

Изд-во ТГАСУ, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.
Отпечатано с оригинал-макета в ООО «АлКом».
г. Томск, ул. Мокрушина, 1а.