

Белорусский национальный технический университет
УП «Промышленные экологические системы»

**АБСОРБЦИОННО-БИОХИМИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ
ОЧИСТКИ ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ВОЗДУХА
ОТ ВРЕДНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ**

Сборник материалов
научно-инновационного семинара
в честь 30-летия Государственного предприятия
«Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»

28 апреля 2022 г.

Минск
БНТУ
2023

УДК 628.83:66.02+628.5(06)

ББК 38.762.2я63

A17

Редакционная коллегия:

Ю. П. Шаповалов, Н. Н. Вит, Е. В. Королёва

В сборник включены материалы докладов Научно-инновационного семинара в честь 30-летия Государственного предприятия «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» «Абсорбционно-биохимические установки очистки вентиляционного воздуха от вредных органических веществ».

Требования к системе: IBM PC – совместимый ПК стандартной конфигурации, дисковод CD-ROM. Программа работает в среде Windows.

Открытие электронного издания производится посредством запуска файла Сборник_АБХУ-2022. Возможен просмотр электронного издания непосредственно с компакт-диска без предварительного копирования на жесткий диск компьютера.

Дата доступа в сети: 27.01.2023. Объем издания: 0,78 Мб. Заказ 41

Белорусский национальный технический университет

Пр-т Независимости, 65, Минск, Республика Беларусь

Тел. (017) 292-40-81, факс (017)292-91-37

ISBN 978-985-583-881-5

© Белорусский национальный
технический университет, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Вит Н. Н. Модернизация абсорбционно-биохимических установок для очистки вентиляционного воздуха, удаляемого от линий пропитки и сушки кордной ткани.....	4
Прибылов А. В. Удаление мелкодисперсных взвешенных веществ из системы регенерации водного абсорбента абсорбционно-биохимических установок (АБХУ).....	8
Ланкин Р. И., Францкевич В.С. Гидравлическое сопротивление подвижной шаровой насадки в массообменных аппаратах	12
Глушень Е. М. Микробные аспекты очистки абсорбционных растворов.....	21
Наркевич Д. А. Перспективы использования микроорганизмов рода <i>rhodococcus</i> для очистки абсорбционных растворов.....	26

УДК 66.021.3

МОДЕРНИЗАЦИЯ АБСОРБЦИОННО-БИОХИМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ОЧИСТКИ ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ВОЗДУХА, УДАЛЯЕМОГО ОТ ЛИНИЙ ПРОПИТКИ И СУШКИ КОРДНОЙ ТКАНИ

Вит Н. Н., директор
УП «Промышленные экологические системы»

В 2008 году были разработаны и поставлены на ОАО «Гродно-химволокно» четыре абсорбционно-биохимических установки (далее – АБХУ), для очистки вентиляционного воздуха от вредных органических веществ.

При разработке системы очистки вентвоздуха (рис. 1) необходимо было учитывать наличие в вентвоздухе маслянистых веществ и температуру отходящего вентвоздуха 160–180 °С. Для чего в системе очистки было предусмотрена установка утилизатора тепла испарительного типа с попутной подачей охлаждающей воды и вакуумная система шламоудаления для сбора замасливателя.

По данным мониторинга показателей работы АБХУ максимальная эффективность очистки достигает по фенолу до 85 %, по формальдегиду до 93 %, по аммиаку до 85 %. В процессе эксплуатации установок в течение 14 лет было установлено следующее:

1. В связи с высоким наличием в очищаемых газах маслянистых веществ при работе АБХУ наблюдается склонность к зарастанию внутренних поверхностей аппаратов, массообменных решеток, трубопроводов и форсунок, что приводит к увеличению гидравлического сопротивления аппаратов и снижению эффективности очистки. В некоторых случаях наблюдалась снижение эффективности очистки по фенолу и формальдегиду до 50 и соответственно 65 %, что объясняется снижением количества подаваемого абсорбента и несвоевременным обслуживанием АБХУ.

Одним из факторов, способствующих зарастанию (налипанию) маслянистых веществ, является разрушение защитного лакокрасочного покрытия на внутренних поверхностях аппаратов и как следствие этого протекание коррозионных процессов. В результате коррозии значительно увеличивается адгезия смолистых веществ на внутренних поверхностях аппаратов.

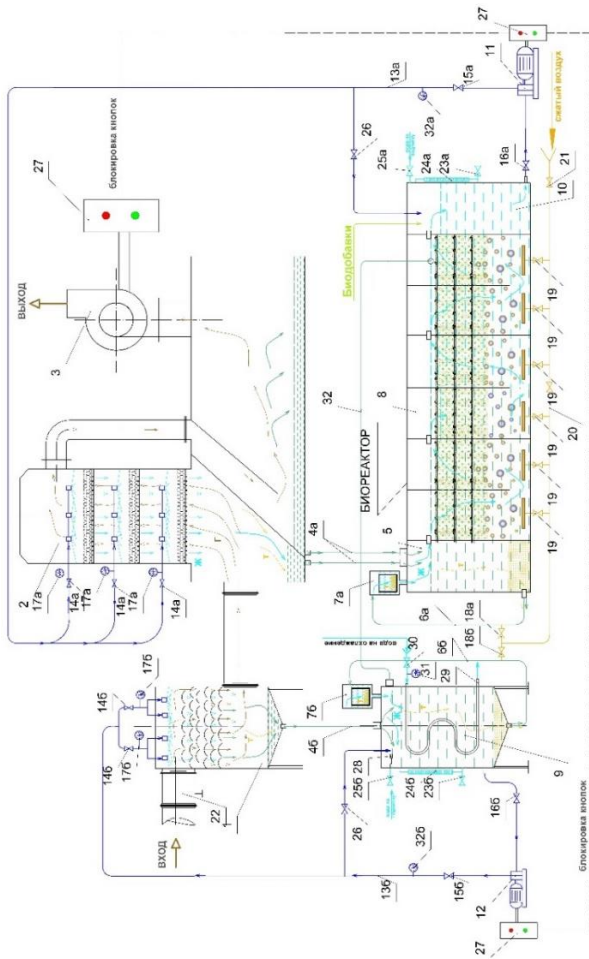


Рис. 1. Принципиальная схема очистки вентиляционного воздуха от вредных органических веществ, выделяющихся при термообработке и сушке кордной ткани на ОАО «РодноХимволокно»:

1 – утилизатор тепла; 2 – абсорбер; 3 – вентилятор; 4 – патрубок; 5 – усреднитель; 6 – эрлифт; 7 – шламосборник; 8 – аэротенк; 9 – шламуловитель; 10 – сборник; 11, 12 – насос; 13 – трубопровод; 14, 15, 16 – кран; 17 – манометр; 18, 19 – кран; 20 – трубопровод; 21 – кран; 22 – шибер; 23 – пробоотборник; 24 – уровень; 25 – кран; 26 – кран байпаса; 27 – пульта управления; 28 – клапан поплавковый; 29 – теплообменный элемент; 30 – кран; 31, 32 – манометр; жс – жидкость; з – газ; т – твердые вещества.

2. Также в процессе эксплуатации наблюдается каплеунос абсорбционного раствора с выбрасываемым вентиляционным воздухом. Данное явление обусловлено применением в качестве сепарационного устройства каплеуловителя гравитационного типа. Принцип работы аппаратов данного типа основан на значительном снижении скорости газового потока до такой степени, чтобы в следствие, силы тяжести капли успели осесть. Эффективность работы данных аппаратов напрямую зависит от степени снижения скорости и времени пребывания воздуха в аппарате.

3. Вакуумная система шламоудаления имеет недостаточный объем ресивера для сбора шлама, что сопровождается неудобством и высокими трудозатратами по выведению шлама из абсорбционного раствора.

Для повышения эффективности улавливания и эксплуатационных свойств аппаратов планируется их модернизация.

В частности, планируется замена аппаратов из углеродистой стали на аппараты, выполненные из коррозионностойкой стали, что значительно увеличит срок эксплуатации оборудования, а также внутренние поверхности аппаратов будут менее склонны к зарастанию смолистыми веществами, что позволит увеличить межсервисные интервалы обслуживания газоочистного оборудования.

Сушило кордной ткани является пожароопасным источником, поэтому в систему подачи абсорбционного раствора планируется установка резервного насоса, для бесперебойной работы. Для предотвращения забивания форсунок планируется установка грязевых фильтров на напорной части трубопроводов и замена тангенциальных форсунок с металлическими вкладышами на пластиковые форсунки не склонные к зарастанию.

Существующий каплеуловитель гравитационного типа планируется заменить на более эффективный каплеуловитель центробежного типа, что позволит значительно снизить каплеунос.

В системе шламоудаления планируется замена существующего ресивера на ресивер большего объема.

Изменению конструкции подвергнется и утилизатор тепла испарительного типа. Планируется изменение с попутной на противоточную схему орошения. Для увеличения плотности орошения будет выполнена замена сплинкерных форсунок полого конуса на спиральные форсунки полного конуса орошения.

Предложенная модернизация позволит значительно уменьшить трудозатраты при эксплуатации АБХУ при сохранении паспортных характеристик (эффективности очистки и гидравлического сопротивления) установок на весь срок эксплуатации.

УДАЛЕНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ВЗВЕШЕННЫХ Веществ ИЗ СИСТЕМЫ РЕГЕНЕРАЦИИ ВОДНОГО АБСОРБЕНТА АБСОРБЦИОННО-БИОХИМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК (АБХУ)

Прибылов А. В.

УП «Промышленные экологические системы»

Абсорбционно-биохимические установки (АБХУ) на ряде литейных предприятий Российской Федерации решают задачу очистки от вредных органических веществ [1] вентвоздуха, удаляемого от участков заливки, охлаждения и выбивки форм: ОАО «ЛеМаЗ» (г. Лебедянь, ОАО «Металлист» (г. Качканар), ЗАО «Термотрон-завод» (г. Брянск), ООО «Осколнефтемаш» (г. Старый Оскол), ОАО «АЛНАС» (г. Альметьевск) и т. д.

Для вывода шлама из аппаратов регенерации АБХУ предусмотрена система шламоудаления основанная на принципе гравитационного осаждения крупных взвешенных веществ на дно емкостей, с последующим выводом при помощи эрлифтов в шламовые корзины. Однако, частицы кварцевого песка и сажи размером от 1 до 20 мкм остаются в растворе во взвешенном состоянии. При этом водный раствор приобретает в течение нескольких лет эксплуатации АБХУ темную окраску и загрязняет смотровые окна скруббера, а также взвешенные вещества способствуют забиванию распылительных форсунок, что уменьшает количество абсорбента на массообменных решетках и снижает эффективность очистки от летучих органических соединений (ЛОС).

Для осветления раствора необходимо применение химических реагентов-коагулянтов и флокулянтов. [2]

Коагуляция нейтрализует заряды частичек взвешенных веществ, в результате они перестают отталкиваться один от другого и сбиваются в крупные соединения (рис. 1).

Флокулянты объединяют частицы путем образования полимерных мостиков, их электролиптические свойства остаются без изменения. Коагулянты образуют устойчивый осадок, который легко собрать после оседания.



Рис. 1. Принцип коагуляции

Процесс флокуляции осуществляется посредством образования жестких полимерных связей между частичками осаждаемой грязи (рис. 2).

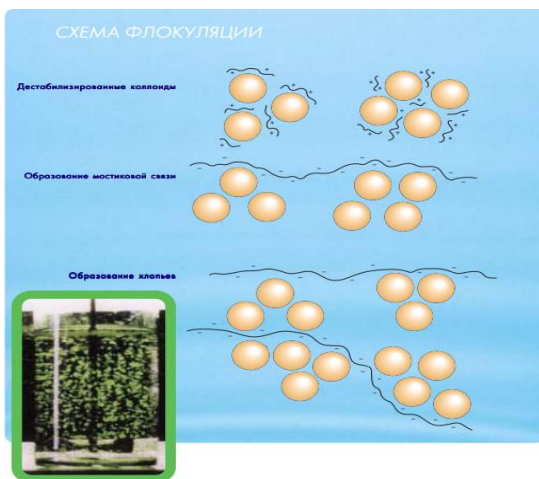


Рис. 2. Принцип флокуляции

Так на Оскольском заводе нефтяного машиностроения (ООО «Осколнефтемаш», РФ) после нескольких лет эксплуатации было проведено осветление раствора (рис. 3).



Рис. 3. Результаты эксперимента по осветлению раствора

1-й образец – исходный абсорбционный раствор;

2-й образец – раствор обработан коагулянтом (Floguat FL40; 0,1 % раствор);

3-й образец – раствор обработан флокулянтом (Floram AN 956 SH; 0,1 % раствор);

4-й образец – раствор после фильтрации.

После укрупнения частиц в абсорбционном растворе провели его фильтрацию, что позволило провести процесс шламоудаления и осветлить водный абсорбент (рис. 4).



Рис. 4. Шламовые корзины фильтрации раствора на ООО «Осколнефтемаш»

Удаление шлама с помощью химических реагентов:

– проводится на ОАО «АДМ» (г. Киев, Украина) с 2008 г.;

– находится в стадии апробирования на ООО «Шлюмберже» (г. Липецк) и ООО «Завод ТЕХНО г. Челябинск» (Корпорация ТехноНИКОЛЬ).

На ООО «Свиспан Лимитед» (г. Костополь, Украина) на участке сушки стружки применен декантер для удаления древесных волокон из АБХУ.

После анализа опыта по осветлению абсорбционного раствора при помощи коагулянтов и флокулянтов на ряде промышленных предприятий, не только в литейном производстве, но и в деревообработке, и при изготовлении минераловатных плит, встала задача в аппаратурном оформлении процесса осветления и его автоматизации.

Литература

1. Ермоленко, А. Е. Санитарно-гигиеническая экспертиза литейных песчано-смоляных смесей / А. Е. Ермоленко, В. В. Любимов // Литейное производство. – № 11. – 1989. – С. 15–16.
2. Хенце, М. Очистка сточных вод / М. Хенце, П. Армоэс, Й. Ля-Кур-Янсен. – Москва: Мир, 2009. – С. 391–398.
3. Прибылов, А. В. Опыт применения абсорбционно-биохимических установок для очистки вентиляционных выбросов в литейном производстве / А. В. Прибылов, Ю. П. Шаповалов, Е. М. Глушень // Литье и металлургия. – 2021. – № 2. – С 105–108.

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОДВИЖНОЙ ШАРОВОЙ НАСАДКИ В МАССООБМЕННЫХ АППАРАТАХ

Ланкин Р. И., аспирант; Францкевич В. С., зав. каф. машин
и аппаратов химических и силикатных производств
УО «Белорусский государственный технологический университет»

Массообменные процессы и сопутствующая им аппаратура широко используется на предприятиях химической, нефтеперерабатывающей, нефтехимической, газоперерабатывающей, металлургической, пищевой, химико-фармацевтической и энергетической отраслей промышленности, а также в производствах агропромышленного комплекса и строительных материалов.

Анализ конструкций теплообменных аппаратов показывает, что основную их долю составляют полые форсуночные скрубберы, имеющие низкую эффективность порядка 60 %. Далее следуют аппараты с насадкой (кольцевые, хордовые, блочные щелевые, решетчатые и сотовые, сетчатые, зигзагообразные и т. д.) и тарелки различных конструкций (ситчатые, щелевые, колпачковые, клапанные, S-образные и т. д.), которые имеют повышенное гидравлическое сопротивление при сравнительно высокой эффективности 80–90 %.

Аппараты с подвижной насадкой наиболее распространены и от противоточных аппаратов других классов отличаются тем, что элементы насадки находясь во взвешенном состоянии, совершают хаотичные и пульсационные движения. В объеме газоочистного слоя направление движения и длина пути пробега каждого элемента насадки носят равновероятный и случайный характер [1]. Они предназначены для мокрой очистки отходящих промышленных газов от вредных однородных (газы, аэрозоли, туманы) и неоднородных (пыль, сажа) примесей в химической, металлургической, строительной, нефтяной, газовой, машиностроительной, целлюлозно-бумажной и других отраслях.

Достоинствами аппаратов с подвижной насадкой являются:

- высокая степень очистки (до 96–99 %);
- позволяет создать безотходную технологию очистки газа;
- прост в эксплуатации и удобен в обслуживании;
- устойчив к переменным нагрузкам по газу и жидкости;

– не забивается отложениями, маслянистыми и твердыми веществами.

В качестве подвижных насадок могут использоваться: кольца Рашига и Палля, седла Берля и «Инталокс», розетки Теллера, а также простые шары и др.

Для обеспечения нормальной работы насадки, плотность насадки не должна превышать плотность орошающей жидкости. В качестве орошающей жидкости наиболее часто используется вода.

Подвижная насадка должна соответствовать следующим характеристикам:

- обладать большой поверхностью в единице объема;
- хорошо смачиваться орошаемой жидкостью;
- оказывать малое сопротивление газовому потоку;
- равномерно распределяться орошаемой жидкостью;
- стойка к химическому воздействию жидкости и газа, который движется в колонне;
- иметь небольшой удельный вес;
- обладать высокой механической прочностью;
- иметь невысокую стоимость [2].

Недостатками аппаратов с подвижной насадкой является неравномерное распределение газа в надрешеточном пространстве как по сечению, так и по высоте аппарата, а также образование застойных зон в самой насадке.

Таким образом изучение гидродинамики газожидкостных потоков является актуальной темой.

Целью данной работы являлось изучение влияния технологических параметров (изменение расположения входного патрубка, скорости газа и степени орошения) на гидравлическое сопротивление. Экспериментальная установка, представленная на рис. 1, включает в себя сборник для воды, на котором находятся цилиндрические сегменты, в которых располагаются три решетки. Воздух в колонну подается вентилятором. Вода из бака нагнетается насосом, и через форсунки поступает на каждый из трех слоев насадки шарообразной формы (рис. 2). Высота слоя насадки 0,37 от высоты слоя. Отношение диаметра аппарата к диаметру шаров составляет 6,9.

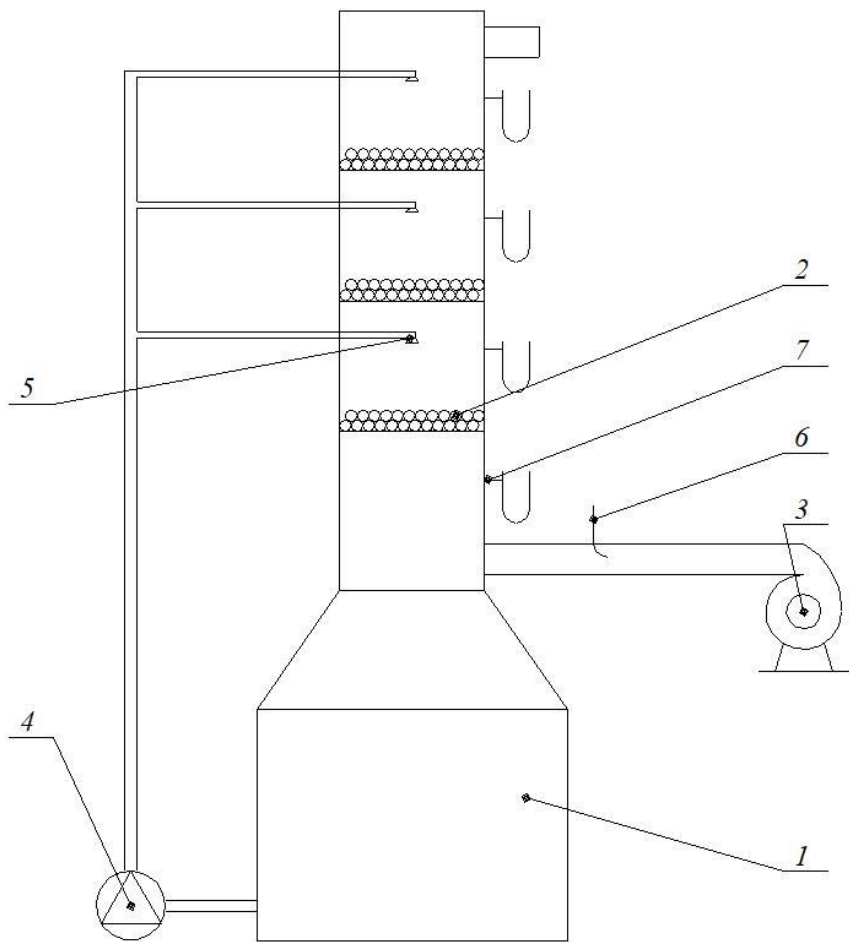


Рис. 1. Экспериментальный абсорбер:

1 – абсорбционная колонна; 2 – насадка; 3 – вентилятор; 4 – насос; 5 – форсунки;
6 – трубка Пито; 7 – клапан для измерения перепада давления с дифманометрами

В ходе эксперимента действительная скорость газа в колонне варьировалась от 1,7 до 4 м/с, что соответствует расходу до 500 м³/час. Расход воздуха замерялся через трубку Пито, связанную с дифманометром. Перепад давления измерялся дифманометром.



Рис. 2. Насадка в абсорбционной колонне

По окончании первой стадии экспериментов были составлены зависимости гидравлического сопротивления ΔP , Па, от скорости газа ω , м/с, в колонне без орошения, на каждой секции (рис. 3-5).

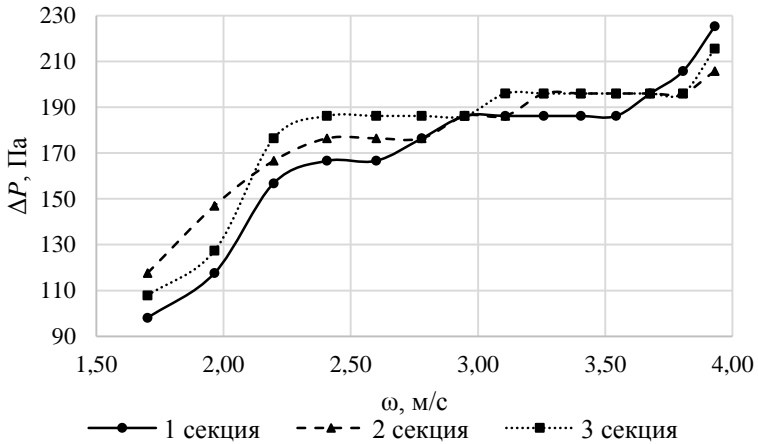


Рис. 3. Зависимость гидравлического сопротивления ΔP , Па, от скорости газа ω , м/с, в колонне с тангенциальным входным патрубком

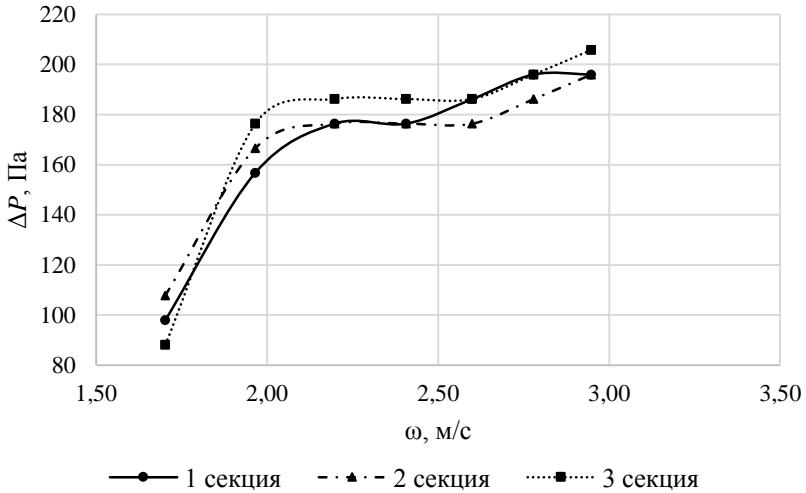


Рис. 4. Зависимость гидравлического сопротивления ΔP , Па, от скорости газа ω , м/с, в колонне с радиальным под углом 30° входным патрубком

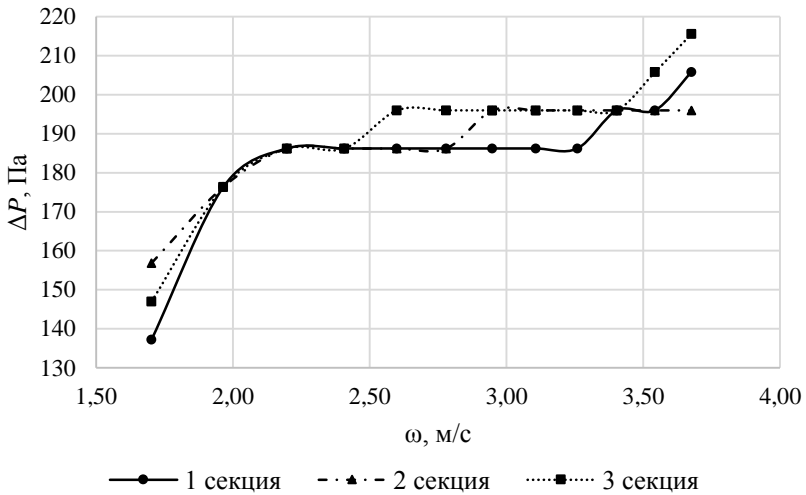


Рис. 5. Зависимость гидравлического сопротивления ΔP , Па, от скорости газа ω , м/с, в колонне с радиальным входным патрубком

При тангенциальном и радиальном входах начало псевдооживления наблюдалось при расходе в колонне в диапазоне 2,2–2,4 м/с. А при расходе 3,4–3,5 м/с наблюдалось «полное» псевдооживление. Но при расходе свыше 420 м³/час 3,7 м/с наблюдалось хаотическое движение насадки.

Затем был составлен график зависимости сопротивления колонны ΔP , Па, от скорости газа ω , м/с, в колонне без орошения, на каждой секции (рис. 6).

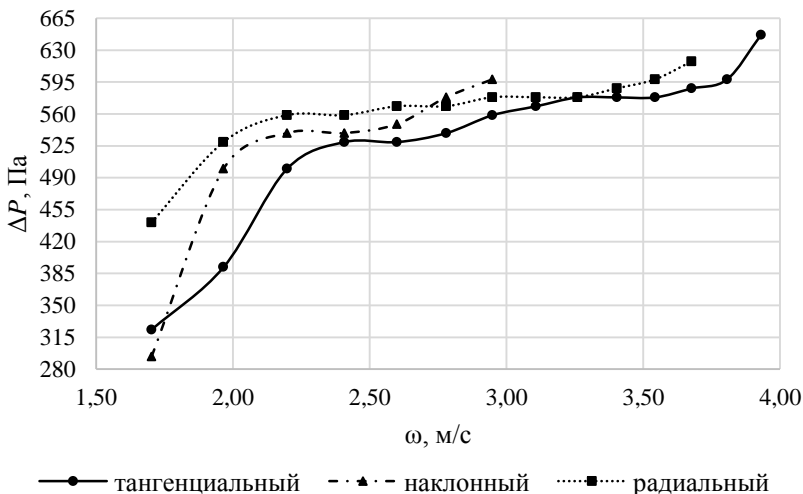


Рис. 6. Зависимость гидравлического сопротивления ΔP , Па, от скорости газа ω , м/с, в колонне

Из графиков видно, что при входном патрубке, расположенном радиально под углом 30°, гидравлическое сопротивление наибольшее, а при тангенциальном наименьшее [3].

Затем на втором этапе эксперимента производилось орошение водой на каждую секцию через форсунки. Плотность орошения составляла $q = 17,5$ м³/м²·час. Затем были построены зависимости гидравлического сопротивления ΔP , Па, от скорости газа ω , м/с, в колонне на первой секции (рис. 7) и самой колонны (рис. 8).

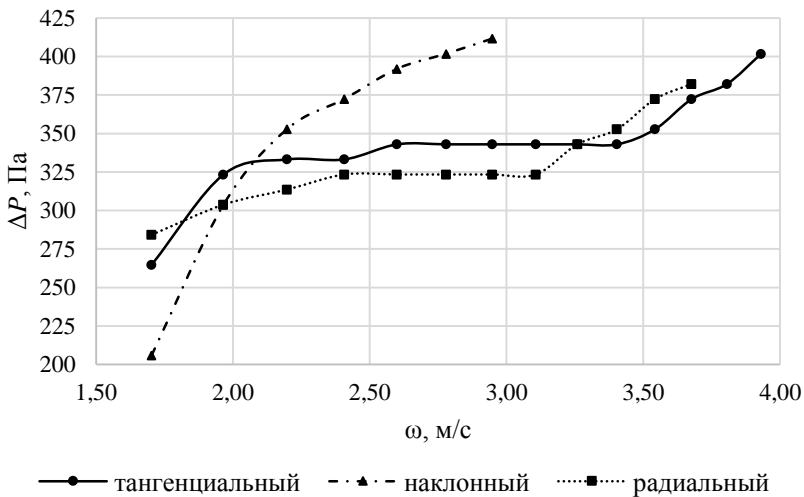


Рис. 7. Зависимость гидравлического сопротивления ΔP , Па, от скорости газа ω , м/с, на первой секции

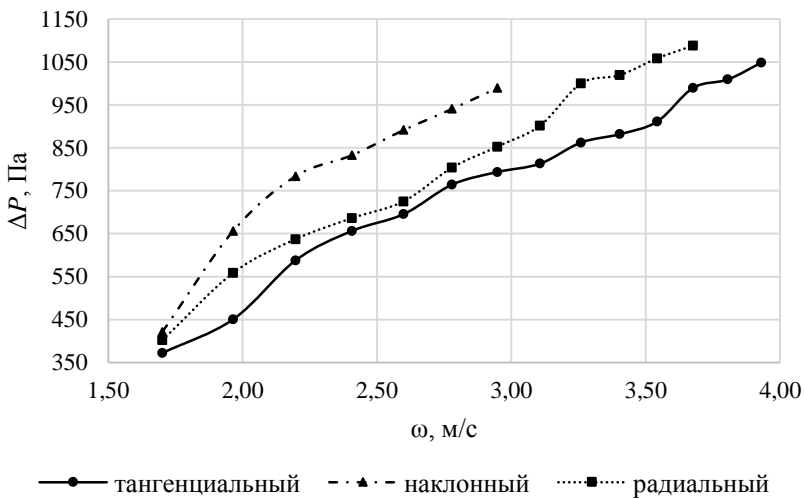


Рис. 8. Зависимость гидравлического сопротивления ΔP , Па, от скорости газа ω , м/с, в колонне

Проанализировав графики (рис. 7 и 8) подтвердился предыдущий вывод, что сопротивление в колонне меньше с тангенциальным входным патрубком. Это вариант выберем в качестве основного для дальнейших исследований.

Далее добавились пограничные плотности орошения $q = 15 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{час}$ и $q = 20 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{час}$, и были построены зависимости гидравлического сопротивления ΔP , Па, от скорости газа ω , м/с, для колонны с тангенциальным входным патрубком (рис. 9).

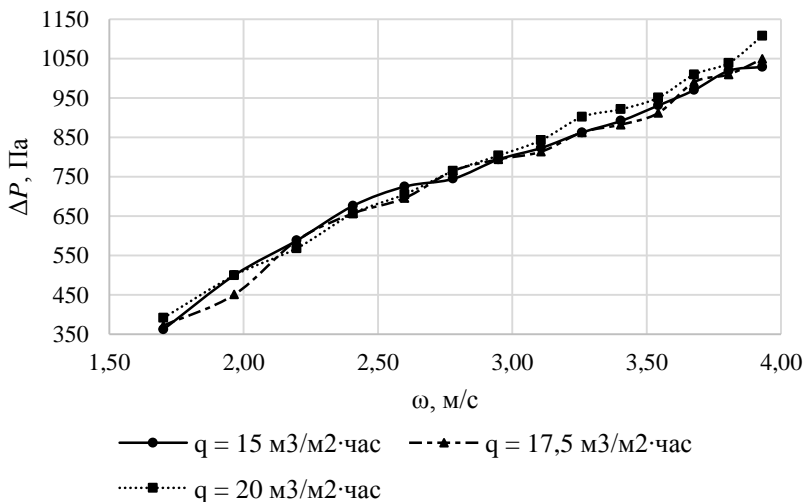


Рис. 9. Зависимость гидравлического сопротивления ΔP , Па, от скорости газа ω , м/с, в колонне с различной плотностью орошения

В ходе эксперимента выявлено что при скорости газа более 3,2 м/с расход воздуха в колонне составляет $370 \text{ м}^3/\text{час}$ и начинался процесс каплеуноса, а при 3,6–3,7 м/с наблюдалось «полное» псевдооживление насадки необходимое для нормальной работы аппарата.

Таким образом наименьшее гидравлическое сопротивление достигается с тангенциальным входным патрубком, а с увеличением плотности орошения растет и гидравлическое сопротивление. При скорости газа свыше 3,2 м/с наблюдался каплеунос, а при 3,6–3,7 – «полное» псевдооживление насадки.

Полученные данные будут использованы при апробации разрабатываемой компьютерной модели гидродинамики газожидкостных

потоков в массообменном аппарате с подвижной насадкой с использованием вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics).

Литература

1. Балабеков, О. С. Расчет и конструирование теплообменных и пылеулавливающих аппаратов с подвижной и регулярной насадкой: Монография / О. С. Балабеков, А. А. Волненко. – Шимкент, 2015. – 184 с.

2. Ланкин, Р. И. Гидродинамика в аппаратах с подвижной насадкой / Р. И. Ланкин, В. С. Францкевич, Ю. П. Шаповалов // Нефтехимия – 2021: материалы IV Международного научно-технического форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке, Минск, 22–24 ноября 2021 г. – Минск: БГТУ, 2021. – С. 228–231.

3. Ланкин, Р. И. Гидравлическое сопротивление абсорбционной колонны с подвижной насадкой / Р. И. Ланкин, В. С. Францкевич // 86-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), 31 января – 12 февраля 2022 г. – Минск: БГТУ, 2022. – С. 148–151.

УДК 579.6 + 579.695 + 579.66 + 579.663

МИКРОБНЫЕ АСПЕКТЫ ОЧИСТКИ АБСОРБЦИОННЫХ РАСТВОРОВ

Глушень Е. М., кандидат биологических наук, доцент, заведующий лабораторией природоохранных биотехнологий
Государственное научное учреждение «Институт микробиологии Национальной академии наук Беларуси»

Из различных способов очистки водных растворов – механических, химических, физико-химических и биологических – традиционно наиболее часто используется аэробная биологическая очистка. Принцип использования микроорганизмов в очистке воздуха различных производственных помещений от токсических веществ основан на способности активных деструкторов разрушать эти вещества.

Процесс утилизации ксенобиотиков микроорганизмами включает:

- трансформацию или незначительные изменения молекулы загрязняющего вещества;
- фрагментацию или разложение сложной молекулы на более простые соединения;
- минерализацию или превращение сложного вещества в самые простые (H_2O , CO_2 , H_2 , NH_3 , CH_4 и т. д.).

Разработка эффективных природоохранных биотехнологий требует постоянного пополнения микроорганизмов-деструкторов разнообразных ксенобиотиков. Институт микробиологии Национальной академии наук Беларуси располагает обширной коллекцией бактерий-деструкторов органических токсикантов. Основной фонд коллекции представлен более 500 штаммами микроорганизмов различной таксономической принадлежности, из которых 65 входят в Белорусскую коллекцию непатогенных микроорганизмов, зарегистрированную во Всемирной федерации коллекций культур (WFCC-VIRCEN World Data Centre for Microorganisms, WDCM-BIM 909).

Культуры выделены из природных и производственных сред в результате многолетних исследований сотрудниками лаборатории природоохранных биотехнологий Института микробиологии НАН Беларуси. Коллекционные штаммы способны к деградации широкого спектра ксенобиотиков: нефть и нефтепродукты, жировые вещества,

фенол, формальдегид, метанол, стирол, хлорорганические соединения, третичные амины, фталаты, летучие органические соединения и т. д.

Музейная коллекция деструкторов ксенобиотиков в подавляющем большинстве представлена бактериями рода *Rhodococcus* (76 %). Остальная часть микроорганизмов относится к родам *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Brevibacterium*, *Chryseobacterium*, *Debaryomyces*, *Enterobacter*, *Gardonia*, *Kluyveromyces*, *Methylobacterium*, *Microbacterium*, *Mycolicibacterium*, *Pseudomonas*, *Rhodotorula*, *Sarcina*, *Sphingomonas* и *Stenotrophomonas*. Стоит отметить, что музейные штаммы родококков являются не только активными деструкторами ароматических, гетероциклических и алифатических соединений, но также являются и продуцентами таких практически ценных метаболитов, как поверхностно-активные вещества и экзополисахариды.

Наиболее эффективным способом поиска микроорганизмов-деструкторов является выделение микробных изолятов из природных объектов, длительное время загрязняемых сельскохозяйственными ядохимикатами или токсичными промышленными отходами. Далее в ходе всесторонних лабораторных исследований проводится селекция микроорганизмов, способных наиболее активно разлагать в воде целевой поллютант. Оценивается технологичность микроорганизмов, степень и сроки деструкции загрязнителя, интегральную токсичность абсорбента до и после микробной биоремедиации. Отобранные штаммы микроорганизмов-деструкторов проверяются на безопасность для теплокровных животных. Критериями токсикологических испытаний являются вирулентность, токсичность и патогенность. После комплекса лабораторных исследований приступают к испытаниям микроорганизмов в производственных условиях, по результатам которых отбирают наиболее перспективные штаммы. Далее изучаются физиолого-биохимические особенности отобранных штаммов микроорганизмов-деструкторов, проводится их идентификация и депонирование в коллекционном фонде.

С использованием музейных микроорганизмов разработаны эффективные технологии очистки водных растворов от пластификаторов, нефтепродуктов, формальдегида, фенола, третичных аминов, а также многокомпонентных сточных вод завода органического син-

теза. Данные технологии очистки внедрены и с успехом используются на ряде промышленных предприятий Республики Беларусь, России, Украины и других стран.

Высокий деструктивный потенциал коллекционных штаммов бактерий-деструкторов по отношению к широкому спектру органических соединений раскрывает широкие возможности для создания и внедрения в кратчайшие сроки экологически безопасных природоохранных биотехнологии очистки сточных вод и почв от различных ксенобиотиков.

Технология получения микробных препаратов на основе штаммов-деструкторов включает следующие стадии:

- оптимизация условий культивирования и питательных сред для получения биопрепарата (источники азотного и углеродного питания, время культивирования, РН, солевой состав питательной среды, ПАВ);

- изучение микробиологической деструкции метаболитов хроматографическими и спектральными методами;

- оценка возможности совместного культивирования микроорганизмов на основе изучения их взаимоотношений (антагонизм, стимуляция) и оптимизация параметров процесса.

Следующим этапом является создание технологии применения биопрепаратов на основе штаммов-деструкторов для очистки абсорбентов, включающим в себя:

- качественные и количественные показатели загрязнений, микробиологические показатели очищаемого абсорбента;

- внесение препарата в биореактор АБХУ;

- внесение биогенных элементов;

- химический и микробиологический контроль за процессом очистки.

В результате многолетних исследований получен ряд высокоэффективных биопрепаратов для очистки абсорбционных растворов:

1. БиоКиТ. Препарат предназначен для очистки сточных вод и абсорбционных растворов от ксилола и толуола. Область применения: химическая и лакокрасочная промышленность.

Высококонцентрированный препарат. Может использоваться в качестве биоагрузки и активатора иловой смеси биологических очистных сооружений. Эффективность очистки водных растворов от ксилола составляет 75–99 %, а от толуола – 80–100 % в зависимости

от концентрации токсикантов. Степень очистки многокомпонентных стоков с химическим потреблением кислорода (ХПК) 3500–7500 мг О₂/л, содержащих ксилол, толуол и сопутствующие вещества, составляет 80–95 %.

Экологически безопасный препарат пролонгированного действия. Не требует постоянного внесения. Аналогов нет.

2. Тэамин. Предназначен для регенерации абсорбционных растворов и глубокой очистки сточных вод, содержащих триметиламин и диметилэтиламин

Отличительные особенности препарата – высокоактивные штаммы микроорганизмов-деструкторов, способные осуществлять деструкцию третичных аминов в концентрациях до 10 г/л со степенью очистки 95–100 %. Экологически безопасный препарат, не имеющий мировых аналогов.

3. ФеноФорм. Препарат предназначен для очистки сточных вод и абсорбционных растворов от фенола и формальдегида.

Высококонтрированный микробный препарат. Эффективность очистки абсорбционных растворов и стоков при использовании препарата ФеноФорм в качестве биоагрузки составляет 85–99 % по ХПК. Степень очистки от фенола составляет 80–99 %, от формальдегида – 75–99 %. Препарат может быть использован в качестве биоагрузки или в качестве активатора иловой смеси. Экологически безопасный препарат пролонгированного действия. Не требует постоянного внесения. Аналогов нет.

Специалистами Института микробиологии НАН Беларуси в настоящий момент интенсивно проводятся исследования, направленные на создание препаратов для очистки абсорбционных растворов от смеси растворителей на основе спиртов и эфиров. В результате проделанной поисковой и исследовательской работы получены высокоактивные микроорганизмы-деструкторы, обладающие широкой субстратной специфичностью по отношению основных загрязнителей сточных вод лакокрасочных производств, в том числе спиртов, кетонов, эфиров и растворителей на основе смесей углеводов. Выделены штаммы, характеризующиеся высокой скоростью роста на высококонцентрированных средах (5 %), содержащих бензол, пропанол, бутанол и ацетон в качестве единственного источника углерода.

Получен высокоэффективный консорциум, способный не только активизировать очистку в биореакторах за счет утилизации органических субстратов, но и нейтрализовать дурнопахнущие вещества. Данный консорциум будет являться основой биопрепарата для активации очистки и устранения неприятных запахов от закрытых систем биологических очистных сооружений.

Постоянно пополняемая уникальная коллекция микроорганизмов-деструкторов ксенобиотиков позволит и в будущем создавать высокоэффективные экологически безопасные биопрепараты, соответствующие мировому уровню и содействующие эффективному решению экологических проблем.

УДК 579.6 + 579.017.8 + 579.695

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРООРГАНИЗМОВ РОДА *RHODOCOCCLUS* ДЛЯ ОЧИСТКИ АБСОРБЦИОННЫХ РАСТВОРОВ

Наркевич Д. А., младший научный сотрудник, аспирант
Государственное научное учреждение «Институт микробиологии
Национальной академии наук Беларуси»

Исходя из литературных данных, среди представителей рода *Rhodococcus* обнаружено много видов и штаммов, способных к деградации таких органических соединений, как нафталин, ксилол, толуол, этилбензол, дибензофураны, бифенил, стирен, катехол, флуорен, индол, нитрофенол и др.

Rhodococcus используют о-ксилол, бензол, алкибензол, фенол, фталаты и другие ароматические соединения в качестве источников углерода и азота. В этом процессе участвует фермент о-ксилолдиоксигеназа (в ее состав входят ферредоксиновая и железосерная-оксигеназная компоненты).

Фенол и подобные ему ароматические соединения могут обнаруживаться в промышленных сточных водах. Бактерии *родококки* способны использовать фенол как единственный источник углерода и энергии, параллельно утилизируя формальдегид, который также присутствует в сточных водах. Фермент фенолгидроксилаза катализирует структурный переход фенола в катехол для его дальнейшей биodeградации.

Как показывает практика, после предварительной механической очистки в стоках могут присутствовать остаточные количества фенола, удаление которых затруднено из-за плохой аэрации и низкого содержания питательных веществ. С учетом того, что родококки отличаются способностью длительно оставаться жизнеспособными в олиготрофных (при низкой концентрации доступных для питания органических соединений) условиях за счет азотфиксации, запасаания и эффективного использования эндогенных фосфорных соединений, проведено исследование возможности доочистки загрязненных фенолом сточных вод двух промышленных предприятий, занимающихся нефтехимическим производством (НХП) и производством дубильных экстрактов (ПДЭ) культурой *R. erythropolis*. Содержание

фенола в пробах сточных вод предприятия НХП составляло 0,09 мг/л, а в стоках компании ПДЭ – 0,74 мг/л. После 3 сут воздействия бактерий концентрация фенола снижалась до 0,012 и 0,155 мг/л, соответственно. Полученные данные показывают, что данная культура проявляет активность в реальных условиях загрязненных сточных вод обоих производств. Существенное изменение содержания фенола в сточных водах при использовании *родококков* наблюдалась уже после первых суток воздействия. Степень очистки сточных вод, достигаемая при их использовании, составляла для стоков НХП 86,7 %, а для стоков ПДЭ – 79,1 % [1].

Бактерии *R. aetherivorans* синтезируют фермент поли-(3-гидроксипропионат-3-гидроксибутират) и могут использовать толуол как единственный источник энергии. Этот полимер характеризуется гибкостью и прочностью наравне с обычными пластмассами.

Бензотиазолы принадлежат к большой группе синтетических гетероциклических соединений и используются в различных промышленных процессах: при производстве шин как катализаторы процессов вулканизации, как лекарственные средства при онкозаболеваниях и заболеваниях ЦНС. Из сточных вод был выделены бактерии *R. rhodochrous*, способные разлагать производные бензотиазола, в том числе 2-гидроксибензотиазол, 2-аминобензотиазол (АБТ) и меркаптобензотиазол. Для увеличения биодеструктивного потенциала штамма по отношению к бензотиазолам было предложено сочетание фото- и/или биодеградации с присутствием комплекса нитрилтриацетата, который является фото индуктором. При его наличии даже без источника света существенно увеличивалась скорость биодеградации АБТ. Позже было также показано наличие ассоциированных с клеткой поверхностно активных веществ (далее ПАВ) – гликолипидов. Их синтез позволяет переводить гидрофобные компоненты веществ в доступную форму для микроорганизмов [2].

Трихлорэтилен (ТХЭ) относится к алифатическому соединению и, исходя из аэробных условий биологического распада данного вещества, процесс происходит преимущественно в результате кометаболизма (сопряженного разложения) с метанолом, аммиаком, пропаном, фенолом, толуолом или кумолом в качестве ростового субстрата.

Ранее также был отмечен рост биодеградации полихлорированных дифенилов несколькими видами микроорганизмов с помощью

растительных эфирных масел. Такие компоненты как кумол, карвон, лимонен и пинен проверены на способность индуцировать деградацию ТХЭ для *R. gordoniae* и *R. erythropolis*. Наиболее эффективным оказался кумол.

N-нитрозодиметиламин (НДМА) обладает сильной канцерогенной активностью и высвобождается вместе с промышленными сточными водами, как побочный продукт после дезинфицирования хлорамином и другими веществами. Осуществляется разложение пропанотрофами у которых есть ферменты монооксигеназы с широкой субстратной специфичностью. У *R. ruber* установлен специфический путь разложения НДМА, в чем-то похожий с денитрифицирующим путем у млекопитающих, который катализируется Р-450 изозимами. Конечными продуктами такого распада являются закись азота, нитрат, нитрит, формальдегид, формиат и метиламин. *R. ruber* способен к снижению концентрации НДМА в среде с 8,3 мкг/л до 2 нг/л во время роста на пропане в качестве единственного источника углерода [3].

Осуществлять вышеперечисленные процессы бактериям рода *Rhodococcus* помогают следующие синтезируемые ими компоненты:

Экзополисахариды – высокомолекулярные полимеры, состоящие из остатков сахаров, которые секретируются микроорганизмами в окружающую среду и могут служить барьером между клетками и окружающей средой, а также прикрепления к твердым поверхностям. Например, бензотоллерантный *родококк* может синтезировать большое количество экзополисахаридов. Они способствуют повышенной устойчивости клеток продуцента к бензину, особенно на первых стадиях взаимодействия клеток с токсическим агентом.

R. rhodochrous синтезируют внеклеточный полисахарид массой в несколько миллионов дальтон, который состоит из D-глюкозы, D-галактозы, D-маннозы, D-глюкуроновой кислоты в отношении 1:1:1:1, а также в его структуре были найдены 0,8 % (массовая доля) октодекановой и 2,7% (массовая доля) гексадекановой кислот. Было показано, что дикие штаммы родококков без этого ЭПС при его получении приобретают способность усваивать углеводороды нефти. Данный клеточный метаболит также принимает участие в эмульгировании гидрофобной фракции нефти, что приводит к увеличению площади поверхности раздела фаз вода-углеводород и способствует более быстрому процессу биодеградации последнего [4].

Широкий спектр ферментов обеспечивает возможность утилизации микроорганизмами широкого спектра веществ, некоторые из них были описаны выше.

Мощным регулятором активности микробной популяции, в том числе той, которая окисляет гидрофобные соединения, являются поверхностно-активные вещества (ПАВ), в частности ПАВ микробного происхождения. Эмульгирование (солюбилизация) углеводов с помощью ПАВ улучшает поступление гидрофобных органических загрязнителей (ГОЗ) из почв и воды в микробные клетки и, соответственно, их деградацию. Таким образом, ПАВ выполняют роль «посредников» между клеткой и ГОЗ. Поэтому целесообразным является применение поверхностно-активных компонентов или культур, которые их активно синтезируют, в технологиях и препаратах для очистки почв и воды от нефтепродуктов.

Rhodococcus wratislaviensis синтезируют ПАВ в присутствии лимитирующих концентраций азота и лишь на гидрофобных субстратах (используют n-алканы – от n-октана до n-гептадекана).

R. erythropolis способны к синтезу свободных и ассоциированных с клеточной стенкой ПАВ. Гликолипидная компонента может быть представлена трегалозомоно- и димиколатами, фосфолипидная – фосфотидилглицеролом, фосфотидилэтаноламином, дифосфотидилглицеролом, а нейтральные жиры – цетиловый спирт, пальмитиновая кислота, метиловый эфир n-пентадекановой кислоты, триглицеридом, миколовыми кислотами и т. д.

Синтез данных соединений позволяет на 20–25 % увеличить разложение ароматических и алифатических соединений [5].

Родококки – экстремотолерантные бактерии. Они обитают в холодных полярных пустынях, антарктических и альпийских почвах, почв тундры с ежегодным промерзанием и оттаиванием в соседствующих с ледниками районах, болотных солончаках, сухом песке в пустыне, поверхностных пресных, грунтовых, минеральных и пластовых водах, обнаруживаются в коралловых рифах, снеге и керне.

Биологические особенности родококков, способствующие их выживанию в загрязненных экосистемах включают:

– большой геном размером более 5 млн п.н. с высоким (50–70 %) содержанием в геноме пар гуанин-цитозин, что обуславливает физическую стабильность нуклеиновых кислот;

– «избыточный» геном с множеством функциональных генов-аналогов с дублирующими функциями;

– разнообразие ферментов оксидоредуктаз и гидролаз (дегидрогеназы, пероксидазы, оксигеназы, сульфатазы, нитрилгидратазы, фенолгидролазы, полимедные оксидазы и др.), среди которых присутствуют оксигеназные комплексы с широкой субстратной специфичностью, что позволяет *родококкам* использовать необычайно широкий спектр метаболических и кометаболических субстратов;

– наличие жесткой липофильной клеточной стенки с высоким содержанием миколовых кислот (длинноцепочечные α -разветвленные β -гидроксилированные жирные кислоты), обеспечивающей защиту от поедания простейшими и обладающей повышенным сродством к гидрофобным соединениям;

– образование капсулоподобных структур вокруг клеток для защиты от неблагоприятных факторов среды, в частности, от осмотического стресса и высыхания;

– естественная колониально-морфологическая изменчивость (диссоциация) и связанные с ней изменчивость многих физиолого-биохимических свойств и возможность существования родококков в виде гетерогенных популяций с разной выраженностью признаков у членов популяции;

– клеточный полиморфизм и наличие в цикле развития переживающей стадии временно покоящихся, но потенциально активных цистоподобных клеток, а также низкий уровень эндогенного дыхания, что обеспечивает выживание родококков в условиях длительного голодания;

– синтез протекторных и макроэргических соединений, каротиноидных пигментов, экстрацеллюлярных и клеточно связанных гликолипидов;

– способность к азотфиксации в присутствии углеводов и олигонитрофилия;

– отсутствие катаболитной репрессии, способность к диауксо-, олиго- и психротрофии – свойства, обеспечивающие быстрый переход клеток с углеводородного субстрата на углеводный и сохранение метаболизма в условиях низкой концентрации субстрата и низкой скорости протекания биохимических процессов;

– ацидо-, алкало-, гало-, ксеро-, термо- и осмоотолерантность [6].

В ряде работ было отмечено, что *родококки* обладают широким метаболическим потенциалом и способны к росту в присутствии различных органических субстратов в концентрациях, не всегда потребляемых другими микроорганизмами. Показано, что *родококки* – постоянный и доминирующий компонент микробиоценозов нефтезагрязненных почв. Их активность в 70 раз превосходит активность других нефтеоокисляющих микроорганизмов. Это связано с более крупными размерами клеток и их способностью окислять большие количества *n*-алканов, чем это необходимо для удовлетворения своих энергетических и конструктивных потребностей. Избыток окисленного *n*-алкана *родококки* переводят в нейтральные липиды, тогда как другие нефтеоокисляющие микроорганизмы (например, псевдомонады) внутреннего пула углеводов не имеют и резервных липидов не образуют.

Родококки имеют большее сродство к границе раздела фаз углевод-вода, где и происходит постепенный процесс разложения гидрофобных соединений, нежели бактерии рода *Pseudomonas*. Соответственно, последние будут находиться в более водной фазе. Несмотря на то, что их совместное использование в препаратах является эффективным, т. к. у них разные биодegradативные пути, *родококки* начнут процесс разложения быстрее из-за более близкого расположения клеток относительно гидрофобного субстрата, который будет являться источником углерода и энергии [7].

Почему следует использовать биопрепараты для очистки? Они содержат необходимый титр микроорганизмов, которые обладают способностью к утилизации широкого спектра загрязняющих веществ, а правильное использование биодобавок и самих препаратов может увеличить их биодеструктивный потенциал, в то время как процесс «самозарождения» является неконтролируемым. Каждый раз в биореакторе могут появляться разные культуры с различными активностями, в том числе антагонистическими (что может спровоцировать гибель более активного по деструктивной способности штамма, но менее конкурентоспособного в данном сочетании + может происходить общее снижение титра клеток в биореакторе). Главные недостатки процесса «самозарождения» – невозможность контроля в условиях технологического процесса очистки, так как момент появления деструктивно активной биомассы клеток при таких условиях является непрогнозируемым и неизвестно доподлинно в какой момент

времени будет получен достаточный титр активных биодеструкторов. Соответственно, вышеперечисленные недостатки исключают возможность использования данного метода на предприятиях ввиду невозможности прописать четкий временной характер и условия очистки производственных сред в технической документации. Помимо этого, для контроля очистки необходимо знать состав и количество микроорганизмов в препарате при его использовании, что также не является возможным при процессах «самозарождения».

Литература

1. Коробов, В. В. Возможность использования штамма-деструктора фенола и 2, 4-дихлорфенола, *Rhodococcus erythropolis* 17S, для очистки промышленных стоков / В. В. Коробов [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 16. Биология. – 2017. – №. 4. – С. 235–240.
2. Фаттахова, А. М. Применение катализаторов в окислительных процессах очистки природных и сточных вод / А. М. Фаттахова [и др.] // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. – 2011. – № 2. – С. 83–87.
3. Осипенко, Б. Г. Нитрозодиметиламин (НДМА)-гепатотропный яд и канцероген: токсиколого-гигиенические аспекты его биологического действия (сообщение 1) / Б. Г. Осипенко, Л. О. Полякова // Сибирский медицинский журнал. – Иркутск, 2005. – Т. 53, № 4. – С. 5–9.
4. Беседнова, Н. Н. Экзополисахариды морских бактерий: перспективы применения в медицине / Н. Н. Беседнова [и др.] // Антибиотики и химиотерапия. – 2018. – Т. 63, № 7-8. – С. 67–78.
5. Мансураева, Л. М. Поверхностно-активные вещества: свойства и применение / Л. М. Мансураева, И. И. Юсупова, С. А. Булаев // Вестник магистратуры. – 2022. – № 2-1 (125). – С. 30–35.
6. Li H. Bioadsorption behavior of *Rhodococcus opacus* on the surface of calcium and magnesium minerals / H. Li [et al.] // JOM. – 2015. – Т. 67, № 2. – С. 382–390.
7. Захарова, Н. Г. Краткий курс по микробиологии, вирусологии и иммунологии / Н. Г. Захарова, В. И. Вершинина, О. Н. Ильинская // Казань: Бриг, 2015. – С. 562–640.