

Р и с. 5. Коэффициент гидродинамического демпфирования колебаний пучка твэлов ТВС ВВЭР-440 (○) и PWR (●)

же время гидродинамическое демпфирование колебаний твэлов в потоке теплоносителя характеризует общие особенности взаимодействия механической колебательной системы (пучка твэлов) с гидродинамикой турбулентного течения. Для всех ТВС эти особенности связаны с продольным обтеканием поверхностей твэлов и возникающими при этом гидродинамическими силовыми факторами, ограничивающими колебания. В связи с этим особый интерес представляет демпфирование колебаний, отражающее только гидродинамические эффекты. На рис. 5 сопоставлены коэффициенты гидродинамического демпфирования для ТВС PWR [6] и ВВЭР-440. Коэффициент демпфирования определяется через декремент колебаний по выражению $\zeta = 2mf/\Delta(V)$. Представленные данные подтверждают общий характер формирования эффектов диссипации энергии колебаний в пучках твэлов, расположенных по треугольной и квадратной решеткам, вследствие взаимодействия продольного потока теплоносителя с обтекаемыми поверхностями твэлов. При этом наблюдается линейный рост коэффициента гидродинамического демпфирования с увеличением скорости течения.

Таким образом, стендовые экспериментальные исследования вибрационных процессов с использованием полномасштабных макетов ТВС, изготовленных из конструкционных материалов и по штатной

технологии, позволяют получать динамические характеристики пучков твэлов с учетом влияния на них турбулентного потока теплоносителя. Полученная в результате таких стендовых исследований информация необходима для всестороннего обоснования вибрационного состояния конструкций ТВС в реакторных условиях, а также их модернизации и разработки новых конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Драгунов Ю.Г., Дранченко Б.Н., Абрамов В.В., Хайретдинов В.У. Вибродинамические исследования в обоснование проектных решений ВВЭР. — В сб.: Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР. Подольск, 2007, т. 2, с. 356—375.
2. Гетья С.И., Солонин В.И., Перевезенцев В.В. и др. Опыт разработки и использования пьезорезистивных виброакселерометров для измерения вибрационных характеристик тепловыделяющих сборок водоохлаждаемых ядерных реакторов. — Датчики и системы, 2006, № 10, с. 25—29.
3. Перевезенцев В.В. Экспериментальные исследования динамических характеристик пучков твэлов ТВС ВВЭР-440. — Наука и образование: электронное научно-техническое издание, 2011, № 10.
4. Федорович Е.Д., Фокин Б.С., Аксельрод А.Ф., Гольдберг Е.Н. Вибрации элементов оборудования ядерных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1989. 168 с.
5. Федотовский В.С., Синяевский В.Ф., Тереник Л.В. Инерционность и гидродинамическое демпфирование при колебаниях труб и трубных пучков в жидкости. — В сб.: Динамические характеристики и колебания элементов энергетического оборудования. М.: Наука, 1980, с. 86—97.
6. Collard B. Flow induced damping of a PWR fuel assembly. — In: Proc. of Techn. Meeting «Structural Behaviour of Fuel Assemblies for Water Cooled Reactors». Vienna: IAEA, 2005, p. 279—288.

Поступило в Редакцию 20.03.12

УДК 621.039.014

БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА МАСЛОСОДЕРЖАЩИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Сафонов А.В., Трегубова В.Е., Кулюхин С.А., Ершов Б.Г.

(Ин-т физхимии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, г. Москва)

В настоящее время для утилизации радиоактивных масел используют термические и сорбционные методы, недостатками которых являются низкая степень очистки и большой объем образующегося радиоактивного осадка. Ферроцианидный метод позволяет очищать отработанные масла от ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{106}Ru с высоким коэффициентом, однако в связи с разнородным компонентным составом фи-

зико-химические способы переработки являются дорогостоящими и не всегда эффективными. Альтернативой физико-химическим методам могут служить биологические методы деструкции нефтепродуктов, поскольку способны приводить к полному разложению органического материала. Данные способы, обладая невысокой себестоимостью, уже более 30 лет успешно используют для ликвидации нефтяных за-

грязнений почвы и акваторий, повышения нефтеотдачи выработанных нефтяных пластов и др.

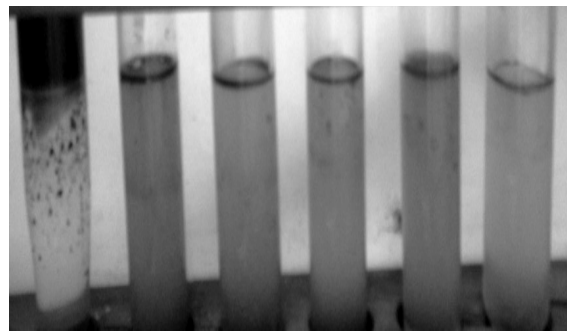
Биологическое разрушение компонентов нефти происходит за счет ферментов, катализирующих трансформацию различных углеводов нефти: н-алканов, соединений ароматического и полиароматических рядов и гетероатомных соединений [1]. Кроме того, важную роль в деградации углеводов играют биологические поверхностно-активные вещества гликолипидной природы, которые по эффективности эмульгирования не уступают синтетическим поверхностно-активным веществам, но в отличие от них они малотоксичны и легко разлагаются в окружающей среде [2]. Существенными являются процессы взаимодействия радионуклидов с микроорганизмами, что может приводить к их выделению из жидкой фазы [3—6].

Целью настоящей работы является разработка научных основ для создания биологического модуля, позволяющего провести деструкцию компонентов масла и использовать наработанную бактериальную биомассу для очистки от радионуклидов.

Биологический подход к утилизации определяется, в первую очередь, компонентным составом масел. В зависимости от типа и степени физической деструкции происходит значительное варьирование химического состава, в среднем в маслах содержится не менее трех десятков различных органических и неорганических соединений.

Для исследований было взято неотреботанное вакуумное трансформаторное масло марки ВМ 4, которое представляет собой остаток машинного масла марки СУ после удаления из сырья 13—15% головной фракции. Это масло не содержит присадок и вырабатывается из сернистой или малосернистой парафиновой нефти путем глубокой очистки и специальной вакуумной дистилляции. На первом этапе из коллекции Института микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН были подобраны различные микроорганизмы из родов *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Acinetobacter*, *Aeromonas*, *Arthrobacter*, *Rhodococcus*, обитающие в нефтяных пластах и пластовой жидкости различных подземных экосистем в аэробных и анаэробных условиях. На основе штаммов было подготовлено пять физиологически разных смесей, существующих как в аэробных, так и анаэробных условиях. По предварительным данным все микроорганизмы способны деструктировать углеводороды в интервале 15—35 °С, при этом многие образовывали поверхностно-активные вещества. Большинство бактерий имели высокую устойчивость к ионизирующему излучению. Согласно данным [6] использованные культуры способны сорбировать радионуклиды.

Бактерии культивировали в течение месяца на минеральной среде состава, г/дм³: NaNO₃ 2, Na₂SO₄



К- 1 2 3 4 5

Р и с. 1. Внешний вид проб с маслом и культурами микроорганизмов и без бактерий после культивирования в течение 30 сут

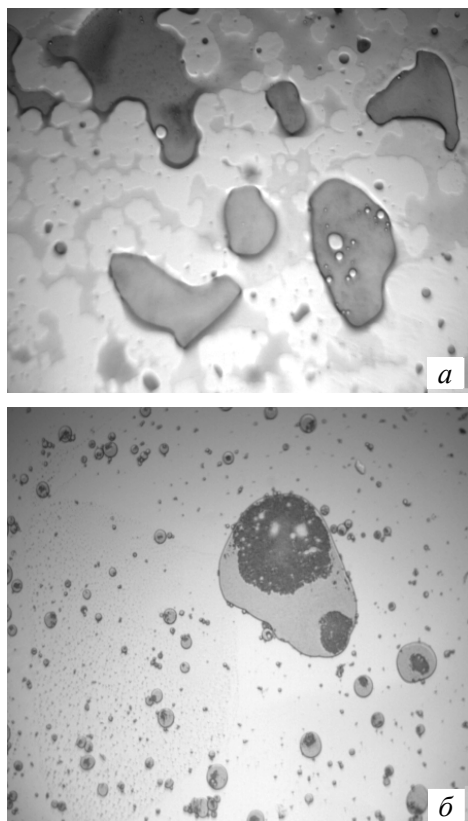
0,5, NaCl 1, дрожжевой экстракт 0,01, pH 7—7,2 с добавлением отработанного машинного масла в отношении 1:10. За месяц культивирования в одинаковых условиях при 25 °С произошло резкое изменение растворимости органической фазы по сравнению с исходным образцом. Визуальный анализ среды позволил выявить значительное уменьшение границы раздела органической и водной фазы по сравнению с пробой без микроорганизмов (К-) (рис. 1). Это могло произойти как вследствие взаимодействия масла с поверхностно-активными веществами, так и микробной деструкции его компонентов. Особенно это заметно в среде, засеянной культурами 2 и 3, где после встряхивания были визуально обнаружены следы пены, свидетельствующие о появлении поверхностно-активных веществ.

Микроскопический анализ показал, что после культивирования произошло изменение внешнего вида масляных капель, по-видимому, в результате деструкции части углеводородных фракций. Из анализа рис. 2 можно сделать вывод о том, что в объеме капли остались труднодеградируемые углеводородные фракции, объем которых был в среднем в 2—3 раза меньше исходного (см. рис. 1).

Гравиметрический анализ проводили с предварительной экстракцией масла дихлорметаном в объеме 5 см³. После тщательного перемешивания органическую фазу отбирали и подвергали высушиванию в течение суток для полного испарения дихлорметана, после чего воздушно-сухой остаток взвешивали.

Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что за 15 сут культивирования в зависимости от сообщества масляная фракция уменьшается на 11—67% (см. таблицу). Сравнение массы 1 см³ масла из пробы без микроорганизмов с исходной масляной каплей свидетельствует о микробиологической природе изменений.

Хромато-масс-спектрометрический анализ масла после микробиологической обработки показал уменьшение н-алкановой фракции на 18—50%, изоалкановой — на 20—25% (рис. 3).



Р и с. 2. Микроскопический анализ масляной капли до (а) и после культивирования (б)

В заключение необходимо отметить, что полученные результаты показывают возможность применения микробиологических процессов для утилизации маслосодержащих радиоактивных отходов. Однако для опытно-промышленных испытаний необходимо оценить кинетические параметры процесса, подобрать оптимальные условия его протекания и разработать технологическую схему модуля.

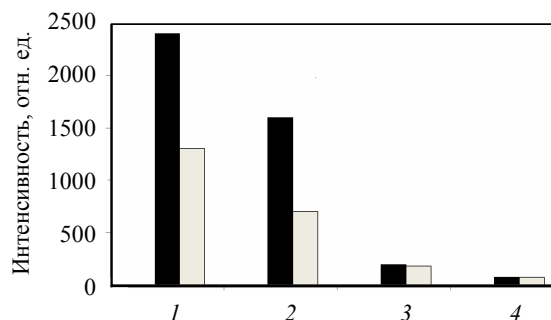
Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда Президента РФ (Программа поддержки молодых кандидатов наук, грант МК-2330.2012.3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hamme D., Singh A., Ward O. Recent advances in petroleum microbiology. — Microbiology and Molecular Biology Rev., 2003, v. 67, № 4, p. 503—549.
2. Жуков Д.В., Мурыгина В.П., Калужный В.Н. Механизмы деградации углеводов нефти микроорганизмами. — Успехи современной биологии, 2006, т. 126, № 3, с. 285—296.

Изменение массы 1 см³ масла за счет разрушения разными культурами микроорганизмов

Культура	Масса 1 см ³ масла, г	Деструкция, %
OD1	0,81	10,98
OD2	0,3	67,03
OD3	0,52	42,85
OD4	0,54	40,65
OD5	0,66	27,47
К-	0,9	0,98



Р и с. 3. Результаты хромато-масс-спектрометрического анализа основных фракций масла до (■) и после культивирования (□): 1, 2, 3, 4 — н-, -изоалканы, алкены, ароматические углеводороды, полиароматические углеводороды соответственно

низмами. — Успехи современной биологии, 2006, т. 126, № 3, с. 285—296.

3. Горбунова О.А., Сафонов А.В., Ершов Б.Г. и др. Влияние денитрифицирующих микроорганизмов на безопасность длительного хранения радиоактивных отходов. — Вопросы радиационной безопасности, 2011, № 3, с. 3—12.
4. Перетрухин В.Ф., Хижняк Т.В., Герман К.Э. Биосорбция технеция-99 и некоторых актинидов донными осадками, взятыми из оз. Белое Косино Московского региона. — Радиохимия, 1996, т. 38, с. 471—475.
5. Сафонов А.В., Назина Т.Н., Ершов Б.Г. и др. Микробиологические процессы в глубинном хранилище жидких радиоактивных отходов «Северный». — Микробиология, 2010, т. 79, № 4, с. 551—561.
6. Лукьянова Е.А., Захарова Е.В., Назина Т.Н. и др. Сорбция радионуклидов микроорганизмами из глубинного хранилища жидких низкоактивных отходов. — Радиохимия, 2008, т. 50, № 1, с. 75—80.

Поступило в Редакцию 8.06.12