

УДК 675.043.42

Д.С. Скоробогатко¹, А.Н. Головков¹, И.И. Кудинов¹, С.И. Куличкова¹

**К ВОПРОСУ ОБ ЭКОТОКСИЧНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ
РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ НЕИОНОГЕННЫХ ПАВ,
ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОЧИСТКЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
В ПРОЦЕССЕ КАПИЛЛЯРНОГО КОНТРОЛЯ ДЕТАЛЕЙ
АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ (обзор)**

DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-98-106

Проведен обзор современных классов неионогенных поверхностно-активных веществ (ПАВ), применяемых для очистки металлических поверхностей. Рассмотрены такие аспекты, как эффективность очистки металлических поверхностей, экотоксичность, биоразлагаемость и влияние на здоровье человека. Определен наиболее перспективный класс ПАВ – алкилполиглюкозиды (АППГ) для очистки металлических поверхностей, в том числе в процессе капиллярного контроля. Установлено, что АППГ показали высокую эффективность при удалении с металлических поверхностей даже таких загрязнений, как денатурированный белок и пригоревший кукурузный крахмал. Отмечено также, что АППГ обладают наибольшей эмульгирующей способностью среди промышленных ПАВ, что эффективно влияет на снижение расхода ПАВ при очистке поверхностей.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, капиллярный контроль, неионогенные ПАВ, экотоксичность, биоразлагаемость, охрана окружающей среды.

D.S. Skorobogatko¹, A.N. Golovkov¹, I.I. Kudinov¹, S.I. Kulichkova¹

**REVISITING THE ECOTOXICITY AND EFFICIENCY
OF DIFFERENT CLASSES OF INDUSTRIAL NONIONIC SURFACES USED
FOR CLEANING METAL SURFACES IN THE PROCESS OF CAPILLARY
CONTROL OF DETAILS OF THE AVIATION TECHNOLOGY (review)**

A review of modern classes of nonionic surfactants used for cleaning metal surfaces is carried out. The following aspects are considered: efficiency of cleaning metal surfaces, ecotoxicity, biodegradability, impact on human health. The most promising class of surfactants – alkyl polyglycosides (APG) – for cleaning metal surfaces, including in the process of capillary control, has been determined. It is noted that APGs have shown high efficiency in removing even such contaminants as denatured protein and burnt corn starch from metal surfaces. In addition, APGs have the highest emulsifying ability among industrial surfactants, which effectively affects the reduction in surfactant consumption when cleaning the surfaces.

Keywords: non-destructive testing, capillary testing, nonionic surfactants, ecotoxicity, biodegradability, environmental protection.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute»]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Капиллярная дефектоскопия является широко применяемым и самым чувствительным методом неразрушающего контроля, который позволяет выявлять поверхностные дефекты с минимальной шириной раскрытия 1 мкм и менее. Достоинством метода является то, что он точно фиксирует местоположение поверхностного дефекта, его ориентацию и размеры.

Важное условие, обеспечивающее выявление поверхностной несплошности при капиллярном контроле, – проникновение пенетранта в поверхностный дефект в количестве, достаточном для последующего образования индикаторного рисунка. Процесс производства деталей авиационной техники, как правило, состоит из множества технологических операций, при которых возможно образование различных загрязнений, жировых пленок, остатков моющих составов, которые существенно затрудняют контроль. Они могут перекрывать полости дефектов или полностью заполнять их, снижать смачиваемость пенетрантом материала изделия, влиять на интенсивность окраски или люминесценции индикаторной жидкости, образовывать окрашиваемый или люминесцентный фон на изделии и вызывать появление ложных индикаторных рисунков [1].

При высоком уровне чувствительности контроля предпочтительны химические или ультразвуковые способы очистки. Моющие жидкости не должны вызывать растравливания материала деталей. Соответственно, возрастает важность выбора химических компонентов, эффективных и безопасных при очистке металлических поверхностей, в авиационной промышленности [2–6]. Следует также отметить, что капиллярный контроль может проводиться в различных климатических условиях [7].

Отраслевым документом, регламентирующим порядок проведения капиллярного контроля в авиационной отрасли, для очистки поверхности рекомендована последовательная обработка бензином, а затем ацетоном с использованием волосяных щеток или серийных ультразвуковых ванн. Предлагаемые растворители показали высокую эффективность при капиллярном контроле, однако обладают высокой степенью токсичности и пожароопасности. Для повышения безопасности производственного процесса предусмотрена замена указанных моющих средств на технические моющие средства, такие как водные растворы неионогенных поверхностно-активных веществ (НПАВ) – неонов (оксиэтилированные алкилфенолы) марок АФ9-10 или АФ9-12, марки «Вертолина» или соединений марок ОП-7 и ОП-10 (оксиэтилированные алкилфенолы), а также синтанола АЛМ-10 (оксиэтилированные жирные спирты) (рис. 1).

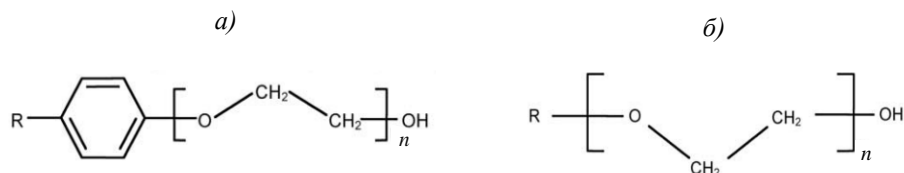


Рис. 1. Структурные формулы оксиэтилированных алкилфенола $RC_6H_4O(CH_2CH_2O)_nH$ (а) и жирного спирта $RO(CH_2CH_2O)_nH$ (б) (где R – алкильный радикал; n – степень оксиэтилирования)

Экотоксичность неионогенных поверхностно-активных веществ

Неионогенные поверхностно-активные вещества – основной класс поверхностно-активных веществ (ПАВ), используемых для очистки металлических поверхностей в промышленности. Наиболее широко используются оксиэтилированные производные спиртов, алкилфенолов, карбоновых кислот и сложных эфиров, которые применяют в качестве моющих агентов, эмульгаторов и стабилизаторов дисперсных систем. Данные классы ПАВ не вызывают коррозии [8]. Однако НПАВ затрудняют процессы биологического окисления органических загрязнений, что препятствует биологической очистке сточных вод. В итоге это приводит к ухудшению физико-химических показателей качества воды. При попадании в водоем синтетические НПАВ из-за способности к солубилизации и эмульгированию наносят вред живым организмам. Масштабы загрязнения этими веществами в настоящее время можно сравнить только с загрязнениями нефтью и пестицидами [9–11].

Установлено, что в сточных водах промышленных предприятий присутствуют НПAB в концентрациях, существенно превышающих нормы, которые позволяют проводить сброс стоков в городскую канализацию [12].

Известно, что при адсорбции смеси ПАВ проявляется явление синергизма [13]. Следовательно, при попадании в водоемы смеси ПАВ могут проявлять синергизм адсорбции и усиливать токсическое действие в результате формирования адсорбционных слоев на поверхности мембран клеток живых организмов и растений.

Утвержденная для неололов (оксиэтилированных алкилфенолов) величина предельно допустимой концентрации (ПДК) в водоемах хозяйственно-бытового пользования составляет от 0,1 до 0,3 мг/дм³, а для синтанолов 0,1 мг/дм³. Для приготовления моющих растворов по ГОСТ 18442–80 «Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования», как правило, используется 2 %-ный (по массе) раствор ПАВ, что значительно превышает ПДК растворов, допустимых для слива в канализацию. В работе [14] отмечено, что концентрация ПАВ в донных отложениях водоемов (ил и т. д.), взятых за чертой промышленных агломераций, в большинстве случаев совпадает со значением ПДК, а в ряде случаев даже превышает его.

Параметры оценки экотоксичности поверхностно-активных веществ

Основным параметром, необходимым для оценки экотоксичности используемых ПАВ, является биоразлагаемость, а также токсичность продуктов их разложения. Различают первичную биоразлагаемость, которая подразумевает структурные изменения молекул ПАВ микроорганизмами, приводящие к потере их рабочих свойств, и полную биоразлагаемость, имея в виду разложение ПАВ до диоксида углерода и воды. Согласно современным требованиям, первичная биоразлагаемость ПАВ должна составлять не менее 90 %, а полная – не менее 60 %. Чем больше уровень биоразложения ПАВ, тем оно безопаснее для окружающей среды.

Данные о биоразложении для конкретного ПАВ состоят из аэробных и анаэробных параметров биоразложения. Процесс аэробной биодegradации происходит в присутствии кислорода и имеет особое значение для изучения как первичной, так и окончательной биодegradации ПАВ. Анаэробная биодegradация (без кислорода) также должна быть принята во внимание, поскольку вещество способно к полному биоразложению, только если оно может разлагаться в анаэробных условиях, таких как биостанции очистных сооружений, емкости бытовых септиков и отложения рек (ил) [15]. В России по ГОСТ 50595–93 «Вещества поверхностно-активные. Метод определения биоразлагаемости в водной среде» ПАВ по степени биоразлагаемости разделяют на четыре класса: быстроразлагаемые – до 3 сут, умеренно разлагаемые – от 3 до 10 сут, медленно разлагаемые – от 11 до 25 сут, чрезвычайно медленно разлагаемые – более 25 сут (см. таблицу).

Значения предельно допустимой концентрации (ПДК) и класс биоразлагаемости для основных промышленных классов поверхностно-активных веществ (ПАВ) в России

ПАВ	ПДК в воде водоемов хозяйственно-бытового пользования, мг/л	Биоразлагаемость по ГОСТ 50595–93	Экотоксичность
Неололы	0,1–0,3	4 класс	Сильно токсичен
Синтанолы	0,1	1 класс	Умеренно токсичен
ОП-7 (10)	0,1–0,3	4 класс	Сильно токсичен

В работе [16] приводится диаграмма соотношения эффективности к экотоксичности различных промышленных ПАВ, применяемых в России (рис. 2). Отмечается,

что наиболее эффективные промышленные ПАВ, приведенные на данной диаграмме, являются при этом наиболее экотоксичными (неонол АФ9-12, соединение ОП-10, синтанол АЛМ-7). Данные ПАВ чаще других используются для очистки металлических поверхностей при капиллярном контроле авиадеталей.

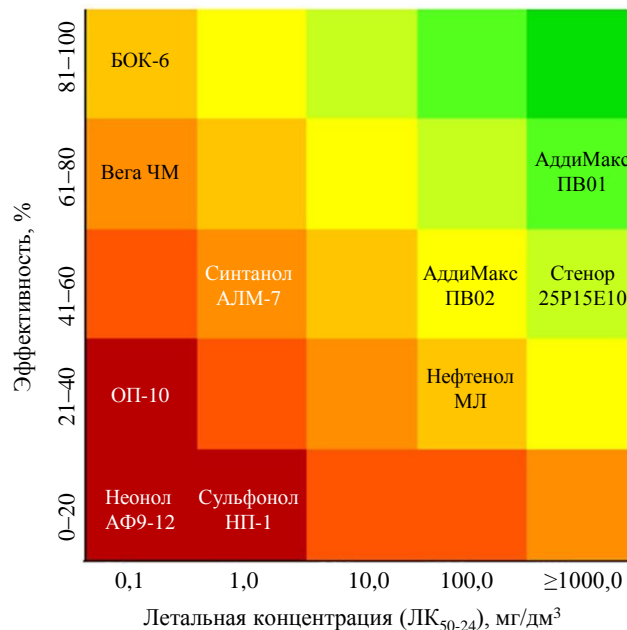


Рис. 2. Зависимость эффективности поверхностно-активных веществ от экотоксичности

В качестве основных ПАВ для создания очищающих растворов в промышленности России уже более 40 лет используются неонолы (оксиэтилированные алкилфенолы), а также синтанолы (оксиэтилированные жирные спирты). Однако по результатам многочисленных исследований установлено, что неонол представляет угрозу для пресноводных организмов (является экотоксичным), а также является крайне медленно биоразлагаемым, причем продукты разложения обладают большей опасностью по сравнению с исходным веществом. В связи с этим в Европейском союзе (Германия) с января 2005 г. от использования неонола в промышленности отказались в пользу более экологически безопасных ПАВ для очищающих жидкостей.

Вредные факторы основных промышленных поверхностно-активных веществ, применяемых в России для очистки металлических поверхностей

В работе [17] рассматривается вредное воздействие неонолов на окружающую среду и здоровье человека. Разложение неонола в окружающей среде приводит к появлению нонилфенола, который отсутствует в окружающей среде и является химическим веществом (ксенобиотиком), чужеродным для живых организмов. Поскольку нонилфенол является гидрофобным жирорастворимым веществом, то может адсорбироваться в осадочных породах, при этом его концентрация в осадочных породах намного больше, чем в воде, что отмечается при анализе; он также способен накапливаться в тканях водных организмов. Доказано негативное влияние нонилфенола на нейроиммуноэндокринную систему, следствием чего является возникновение эстрогеноподобных эффектов, возникновение которых можно объяснить сходством структур нонилфенола и гормона эстрадиола, вследствие чего он обладает способностью имитировать эффекты природных биологически активных соединений и вызывать нарушение различных

функций живых организмов. Проводимые исследования показали, что нонилфенол обладает способностью вызывать эстрогенные эффекты у рыб (гермафродитизм). Проведенные в мире за последние 20 лет эксперименты показали, что иммунная система является мишенью для действия нонилфенола. Он может вызывать обострение аллергических и аутоиммунных заболеваний, выступать в качестве инициатора и промотора развития опухолевых процессов, вызывать нарушения моторных функций, а также оказывает нейротоксический эффект на нервную систему.

Другими широко используемыми в промышленности НП АВ являются синтанол ДС-10 (смесь первичных оксиэтилированных высших жирных спиртов фракций C_{10} – C_{18} с $n = 10$), а также оксиэтилированные алкилфенолы марок ОП-7 и ОП-10. В работе [18] приводятся данные, что синтанол ДС-10 не обладает канцерогенными свойствами, однако он способен усиливать канцерогенную активность других веществ при их воздействии на кожу. При эксперименте на гвинейских свинках обнаружили, что синтанол ДС-10, соединения ОП-7 и ОП-10 при повторном введении в организм формируют состояние повышенной чувствительности кожи. Под воздействием этих веществ у животных развивается контактный аллергический дерматит, образование папиллом кожи происходило более чем у 70 % мышей, причем у 25 % животных папилломы кожи превращались в злокачественные опухоли. Установлено также, что продукты трансформации соединений ОП-7 и ОП-10 влияют на функции организма (повышение уровня SH-групп, снижение иммунобиологической реактивности, изменения в соотношении белковых фракций, снижение уровня холестерина и *p*-липопротеидов). Синтетические ПАВ способны проникать через гистогематические барьеры и негативно влияют на репродуктивную функцию, иммунную систему, липидный обмен. Кроме того, ПАВ усиливают проникновение других вредных веществ в организм и способны имитировать и блокировать действие стероидных гормонов организма, нарушать синтез и блокировать функционирование гормональных рецепторов.

В работе [19] проводилось исследование экотоксичности с использованием люминесцентного биотеста *Microtox* и биоразлагаемости основных классов промышленных ПАВ – неололов и оксиэтилированных жирных спиртов. Значения токсичности определяли как значения эффективной концентрации EC_{50} и EC_{20} . Определяли также не только токсичность ПАВ, но и продуктов биоразложения (метаболитов). Самым токсичным оказался оксиэтилированный жирный спирт марки FINDET 1214N/16 (радикал R: C_{12} (70 %)– C_{14} (30 %), $n = 4$). Наименее токсичным оказался оксиэтилированный нонилфенол (R: C_9 , $n = 9,5$), однако продукты его биоразложения оказались крайне токсичными. Для исследованных ПАВ также отмечалось, что токсичность продуктов разложения оксиэтилированных спиртов меньше, чем токсичность исходного оксиэтилированного жирного спирта. По итогам работы сделан вывод о более высокой экотоксичности ПАВ с длинными линейными углеводородными радикалами по сравнению с разветвленными.

В монографии [20] для пресноводных рыб и ракообразных приводится значение средней дозы вещества, вызывающей гибель половины особей испытываемой группы, $LC_{50} < 5$ мг/л для большинства оксиэтилированных жирных спиртов с линейными алкильными радикалами, причем с увеличением степени оксиэтилирования токсичность снижается, а с увеличением длины алкильного радикала – увеличивается, однако увеличение степени оксиэтилирования снижает степень биоразлагаемости.

В работе [21] отмечено, что оксиэтилированные жирные спирты с линейным алкильным радикалом относятся к легко биоразлагаемым ПАВ с 80 %-ным первичным разложением за 28 дней и 40 %-ным для ПАВ с разветвленным алкильным радикалом. Однако оксиэтилированные алкилфенолы и жирные спирты относительно устойчивы к биоразложению в анаэробных условиях. Таким образом, они могут накапливаться в придонных отложениях (ил, почва).

Алкилполигликозиды

Алкилполигликозиды (АПГ) – новый перспективный класс НПВ, который предлагается в качестве замены оксиэтилированным алкилфенолам и жирным спиртам (рис. 3), их синтезируют из природного сырья – сахара (или крахмала) и жирных спиртов, полученных из растительного сырья.

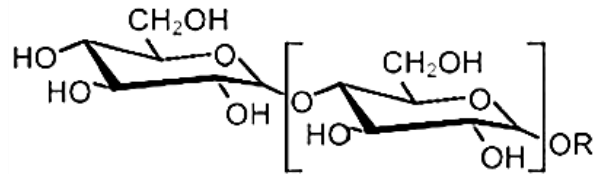


Рис. 3. Структурная формула алкилполигликозида

Влияние алкилполигликозидов на окружающую среду (биоразлагаемость)

В работе [22] приводятся данные о полной биоразлагаемости АПГ как в случае аэробного, так и анаэробного биоразложения. В работе [23] сравнивалась экотоксичность (на водорослях, ракообразных и рыбах) и биоразлагаемость АПГ и оксиэтилированных жирных спиртов. Алкилполигликозиды быстро биоразлагаются в аэробных условиях. По данным лабораторных исследований установлено, что происходит практически 100 %-ное удаление данных ПАВ из сточных вод при использовании станций биоочистки (при условии отсутствия высоких нагрузок). Тесты на анаэробное биоразложение показали, что линейные АПГ подвергаются минерализации (разложение на углекислый газ и воду) на 70 %. Отмечено, что разветвленные АПГ менее подвержены биоразложению. Оксиэтилированные жирные спирты лишь частично подвергаются минерализации анаэробными бактериями. Тесты на токсичность для водных организмов показали увеличение токсичности в следующем порядке: разветвленные АПГ (ЕС/LC₅₀ – более 500 мг/л) < линейные АПГ (ЕС/LC₅₀ – более 5 мг/л) < оксиэтилированные жирные спирты (ЕС/LC₅₀ – более 2 мг/л). Отмечено, что наиболее экотоксичным для водных организмов среди исследованных ПАВ в данной работе был оксиэтилированный жирный спирт.

В работе [24] для АПГ (R: C₈–C₁₄) приведены данные о его полной степени биodeградации в течение 28 дней испытаний с использованием теста в закрытом сосуде и теста на содержание растворенного органического углерода. Тест в закрытом сосуде на полную биоразлагаемость (до воды и углекислого газа) показал уровень минерализации 88 %, тогда как предел для легко биоразлагаемых ПАВ составляет 60 %.

Тест на содержание органического углерода показал уменьшение растворенного органического углерода на 90 % за 28 дней испытаний, что значительно превышает установленный уровень в 70 %, требуемый для отнесения ПАВ к полностью биоразлагаемым.

Экотоксичность алкилполигликозидов

В работе [25] исследована экотоксичность АПГ марок Glucorone 650 ЕС, Glucorone 600 CS и Glucorone 215 CS на ракообразных (большая дафния), бактериях (*Photobacterium phosphoreum*) и водорослях (*Raphidocelis subcapitata*). Отмечено, что экотоксичность АПГ значительно меньше токсичности оксиэтилированных алкилфенолов. В работе [26] отмечалось, что АПГ не влияет на эндокринную систему лабораторных мышей, отсутствует влияние на репродуктивную функцию при дозе 1000 мг на 1 кг тела в день и не обнаружены токсические отравления.

В работе [27] отмечено, что АПГ в отличие от других классов ПАВ не разрушают пространственную структуру белков и не нарушают их рабочие свойства в растворах.

Это одна из причин использования АПГ для солюбилизации биологических мембран без их разрушения.

В работе [28] обнаружено, что независимо от химической структуры АПГ экстремально высокая доза 5000 мг на 1 кг тела меньше значения LC_{50} , а доза в 1000 мг на 1 кг тела не приводит к накоплению АПГ в тканях (нет кумулятивного токсикологического эффекта). Алкилполигликозиды также не проявляли выраженной токсичности по отношению к таким породам лабораторных крыс, как спрег-доули и вистар, при введении их в желудочно-кишечный тракт. По итогам исследования было предложено не включать АПГ в классификатор опасных химических соединений (и не маркировать со степенью опасности). Алкилполигликозиды также не вызывают острых токсических реакций при попадании на кожу, не обладают мутагенным эффектом (проведено исследование на штамме *Salmonella typhimurium*) и легко разлагаются в организмах млекопитающих, причем на всех стадиях биоразложения не было никаких токсичных интермедиатов (соединений).

Промышленное применение алкилполигликозидов

В работе [29] рассмотрены поверхностное натяжение, эмульгирующая способность и стабильность получаемых нефтяных эмульсий для 8 различных ПАВ – нефтяной сульфокислоты, сульфонола, α -олефин-сульфоната натрия, додецилбензолсульфоната натрия, АПГ, соединения ОП-10, лаурилбетаина (BS-12), лаурилэфир сульфата натрия. Обнаружено, что АПГ обладал наилучшими эмульгирующими свойствами, причем эти свойства не зависят от температуры и содержания хлорида натрия в моющем растворе, в то время как свойства других исследованных ПАВ в различной степени зависят от этих параметров. Увеличение нефтеотдачи при использовании АПГ при температуре 90 °С и солености 30 г/л может достигать 10,1 %, что в ~2 раза больше, чем у обычных ПАВ. Эти результаты показали, что АПГ являются эффективными ПАВ с высокой эмульгирующей способностью при добыче нефти в условиях высоких температур и солености.

В работе [30] изучено влияние различных классов ПАВ на электроочистку металлических поверхностей. Исследована моющая способность следующих ПАВ: анионных (линейных алкилбензолсульфонатов, двух полиоксиэтилированных лауриловых эфиров карбоновых кислот) и неионогенных (оксиэтилированного жирного спирта, АПГ, двух полиоксиэтилированных глицериновых эфиров). В качестве загрязнений использованы желатинизированный раствор кукурузного крахмала, помещенный на металлическую поверхность (нержавеющая сталь марки AISI 410), который далее нагревался при температуре 60 °С в течение 12 ч, и раствор сывороточного белка, который подвергался денатурации на металлической поверхности из той же стали при температуре 121 °С в течение 1 ч. Все изученные ПАВ улучшили результаты моющей способности используемых растворов при электроочистке по отношению к раствору сравнения (без ПАВ). Однако лучшая моющая способность получена для раствора АПГ (Glucopon 650 EC) с концентрацией 1 г/л при температуре 60 °С.

Заключения

Неонолы, синтанолы, соединения ОП-7 и ОП-10 оказывают негативное влияние на здоровье человека и окружающую среду – наиболее вредное воздействие оказывает неонол, который можно заменить неионогенными ПАВ – например, такими как алкилполигликозиды.

Алкилполигликозид подвергается практически полному аэробному и анаэробному биоразложению, разлагаясь на 90 %, и таким образом значительно превышает

уровень в 70 %, требуемый для полной биоразлагаемости. Оксигенированные алкил-фенолы и жирные спирты относительно устойчивы к биоразложению в анаэробных условиях, и они могут накапливаться в придонных отложениях (ил, почва).

Токсичность АПГ значительно меньше токсичности оксигенированных алкил-фенолов и жирных спиртов, АПГ не оказывают мутагенного эффекта и не вызывают аллергических реакций, легко разлагаются в организмах млекопитающих, причем на всех стадиях биоразложения не обнаружено никаких токсичных интермедиатов (соединений). Независимо от химической структуры АПГ не накапливаются в тканях – отсутствует кумулятивный токсикологический эффект, а также, в отличие от других классов ПАВ, не разрушают пространственную структуру белков и не нарушают их рабочие свойства в растворах.

Алкилполигликозиды обладают наилучшей моющей (эмульгирующей) способностью среди наиболее часто используемых промышленных ПАВ. Данный класс ПАВ также наиболее эффективен при очистке металлических поверхностей (нержавеющей стали марки AISI 410) от различных загрязнений (типа нагара) и имеет наибольшие перспективы применения при очистке поверхности перед проведением капиллярного неразрушающего контроля.

Библиографический список

1. Головков А.Н., Куличкова С.И., Кудинов И.И., Скоробогатько Д.С. Анализ существующих контрольных образцов для проверки чувствительности дефектоскопических материалов при проведении капиллярного неразрушающего контроля (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 11 (83). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-95-103.
2. Ночовная Н.А., Никитин Я.Ю., Григоренко В.Б., Козлов И.А. Изменение свойств поверхности титанового сплава VT20 при химическом удалении эксплуатационных углеродсодержащих загрязнений // Труды ВИАМ. 2017. № 10 (58). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.05.2021). DOI: 10/18577/2307-6046-2017-0-10-5-5.
3. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // Тез. докл. XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. С. 25–26.
4. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520–530.
5. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. № 1. С. 3–4.
6. Кравченко Н.Г., Козлов И.А., Щекин В.К., Ефимова Е.А. Составы моющих композиций для промывки авиационного двигателя (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-105-113.
7. Лаптев А.Б., Барботько С.Л., Николаев Е.В. Основные направления исследований сохраняемости свойств материалов под воздействием климатических и эксплуатационных факторов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 547–561. DOI: 10/18577/2017-9140-2017-0-S-547-561.
8. Ланге К.Р. Поверхностно-активные вещества: синтез, свойства, анализ, применение. М.: Профессия, 2007. 201 с.
9. Olkowska E., Ruman M., Polkowska Z. Occurrence of Surface Active Agents in the Environment // Journal of Analytical Methods in Chemistry. 2014. No. 2. P. 1–15. DOI: 10.1155/2014/769708.
10. Rebello S., Anoopkumar A., Sindhu R. et al. Comparative life-cycle analysis of synthetic detergents and biosurfactants – an overview // Refining biomass residues for sustainable energy and bioproducts technology, advances, life cycle assessment, and economics. Elsevier, 2020. P. 511–521. DOI: 10.1016/B978-0-12-818996-2.00023-5.

11. Giagnorio M., Amelio A., Grüttner H., Tiraferri A. Environmental impacts of detergents and benefits of their recovery in the laundering industry // *Journal of Cleaner Production*. 2007. Vol. 154. P. 593–601. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.04.012.
12. Волков В.А., Миташова Н.И., Агеев А.А. Определение показателей качества сточных вод, содержащих поверхностно-активные вещества // *Известия Московского государственного технического университета МАМИ*. 2014. Т. 3. № 1 (19). С. 68–76.
13. Агеев А.А. Адсорбция поверхностно-активных веществ. М.: МГУДТ, 2015. 180 с.
14. Zoller U., Ashash E., Ayali G., Shafir S. Nonionic detergents as tracers of ground water pollution caused by municipal sewage // *Environmental International*. 1990. Vol. 16. No. 3. P. 301–306. DOI: 10.1016/0160-4120(90)90125-P.
15. Berna J., Cassani G., López R. et al. Anaerobic Biodegradation of Surfactants – Scientific Review // *Tenside Surfactants Detergents*. 2007. Vol. 44. No. 6. P. 312–347. DOI: 10.3139/113.100351.
16. Куликова О.А. Экологические аспекты применения ПАВ для восстановления нарушенных арктических земель: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: Рос. гос. ун-т нефти и газа (нац. иссл. ун-т) им. И.М. Губкина, 2019. 17 с.
17. Бураковский А.И., Пивень Н.В., Лухверчик Л.Н. Нонилфенол как повреждающий фактор регуляторных систем организма // *Труды Белорусского государственного университета*. 2010. Т. 5. С. 243–246.
18. Волощенко О.И., Медяник И.А. Гигиена и токсикология бытовых химических веществ. Киев: Здоровье (Библиотека практикующего врача), 1983. С. 17.
19. Alameda E.J., Fernández-Serrano M. Acute toxicity and relationship between metabolites and ecotoxicity during the biodegradation process of non-ionic surfactants: fatty-alcohol ethoxylates, nonylphenol polyethoxylate and alkylpolyglucosides // *Water Science & Technology*. 2009. Vol. 59. No. 12. P. 2351–2358. DOI: 10.2166/wst.2009.266.
20. Talmage S.S. Environmental and Human Safety of Major Surfactants – Alcohol Ethoxylates and Alkylphenol Ethoxylates. London: CRC Press, 1994. P. 212.
21. Scott J.M., Jones N.M. The biodegradation of surfactants in the environment // *Biochimica et Biophysica Acta*. 2000. Is. 1–2. P. 235–251. DOI: 10.1016/S0304-4157(00)00013-7.
22. Merrettig-Bruns U., Erich J. Anaerobic Biodegradation of Detergent Surfactants // *Materials*. 2009. No. 2. P. 181–206. DOI: 10.3390/ma2010181.
23. Steber J., Guhl W., Stelter N., Schröder F.-R. Alkyl Polyglycosides – Technology, Properties and Application. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft GmbH, 1997. P. 177–190. DOI: 10.1002/9783527614691.ch11.
24. Jurado E., Fernandez-Serrano M., Nunez J. et al. Acute Toxicity of Alkylpolyglucosides to *Vibrio fischeri*, *Daphnia magna* and Microalgae: A Comparative Study // *Bulletin of Environmental Contamination Toxicology*. 2012. Vol. 88. No. 2. P. 290. DOI: 10.1007/s00128-011-0479-5.
25. Messingera H., Aulmann W., Kleber M., Koehl W. Investigations on the effects of alkyl polyglucosides on development and fertility // *Food and Chemical Toxicology*. 2007. Vol. 45. No. 8. P. 1375–1382. DOI: 10.1016/j.fct.2007.01.018.
26. Santonicola M.G., Lenhoff A.M., Kaler E.W. Binding of alkyl polyglucoside surfactants to bacteriorhodopsin and its relation to protein stability // *Biophysical Journal*. 2008. Vol. 94. No. 9. P. 3647–3658. DOI: 10.1529/biophysj.107.113258.
27. Aulmann W., Sterzel W. Toxicology of Alkyl Polyglycosides. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft GmbH, 1997. DOI: 10.1002/9783527614691.ch9.
28. Li G., Chen L., Ruan Y. et al. Alkyl polyglycoside: a green and efficient surfactant for enhancing heavy oil recovery at high-temperature and high-salinity condition // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2019. Vol. 9. P. 2671–2680. DOI: 10.1007/s13202-019-0658-1.
29. Vicaria J.M., Herrera-Márquez O., Fernández-Casillas C. et al. Cleaning protocols using surfactants and electrocleaning to remove food deposits on stainless steel surfaces // *Journal of Applied Electrochemistry*. 2018. Vol. 48. P. 1363–1372. DOI: 10.1007/s10800-018-1209-z.
30. Ware A.M., Waghmare J.T. Alkylpolyglycoside: Carbohydrate Based Surfactant // *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2007. Vol. 28. No. 3. P. 437–444. DOI: 10.1080/01932690601107807.