

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССОВ И ОСОБЕННОСТИ ПОВРЕЖДЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ТЕХНИКИ МИКРООРГАНИЗМАМИ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**С.А. Семенов, *К.З. Гумаргалиева, **Г.Е. Заиков*

**Институт химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук*

***Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук*

В настоящем обзоре предложен комплекс характеристик и методов определения основных этапов процесса микробиологического повреждения материалов техники – адгезии, роста микробных клеток и изменения свойств материалов под воздействием микроорганизмов. Характеристики и методы обеспечивают возможность установления наличия и количественной оценки интенсивности протекания этих процессов в модельном эксперименте и при исследовании проб (образцов) материалов, взятых из эксплуатации.

Экспериментально обоснована методика выявления микробиологических повреждений эксплуатирующихся материалов и изделий. Она основана на раздельном определении комплекса присущих процессу повреждения характеристик с помощью различных микробиологических, физико-химических и биохимических методов. Показана эффективность использования методики при оценке микробиологической повреждаемости эксплуатирующихся образцов техники и исследованиях причин их отказов и неисправностей в работе.

Анализ современных представлений о микробиологических повреждениях объектов техники дал основание полагать, что для научно-обоснованного решения ряда практически важных задач обеспечения микробиологической стойкости изделий перспективно рассматривать реальный процесс взаимодействия микроорганизмов-деструкторов с материалами, разделив его на три основных взаимосвязанных этапа. К ним относятся: 1 – адгезия перенесенных к поверхности материала микробных клеток, 2 – их рост и 3 – изменение свойств материала под воздействием микроорганизмов [1–7].

Реализация такого поэтапного методического подхода обусловила необходимость изыскания объективных характеристик каждого из указанных этапов (процессов) и методов их экспериментального определения.

В настоящем обзоре приведены результаты таких исследований. Дано обоснование методики выявления микробиологических повреждений изделий, в том числе рассмотрены основные результаты ее использования для оценки повреждаемости эксплуатирующейся техники микроорганизмами.

1. Характеристики и методы определения процессов взаимодействия микроорганизмов-деструкторов с материалами

По своему функциональному назначению характеристики адгезии, роста микроорганизмов, изменения свойств материалов и

экспериментальные методы их получения должны обеспечивать возможность проведения предусмотренных в работе исследований количественных закономерностей, методик определения, средств и методов повышения микробиологической стойкости объектов техники. В связи с этим необходимо, чтобы характеристики позволяли выявлять как сам факт наличия, так и количественно оценивать интенсивность процессов микробиологического повреждения. Используемые для их определения методы должны обладать высокой чувствительностью, специфичностью, а также, учитывая практическую направленность исследований, реализовываться с помощью достаточно простого оборудования и доступных реактивов.

Выбор конкретных характеристик и методов основывался на имеющихся в литературе данных об экспериментальном изучении свойств, состава и структуры, участвующих в рассматриваемых процессах микробиологических объектов и материалов техники, а также специфики изменения состояния системы микроорганизм-материал, обусловленного протеканием каждого из этих процессов.

Многие из первоначально отобранных нами характеристик и методов разрабатывались для других целей: изучения растений, тканей животных, бактерий, микроскопических грибов, а также старения полимеров, коррозии металлов. Поэтому они нуждались в оценке возможности исполь-

зования для исследований микробиологического повреждения материалов техники.

С этой целью анализировали отложения (загрязнения), обнаруживаемые на поверхности (или в объеме) материалов, образующиеся при лабораторном моделировании рассматриваемых процессов и обнаруживаемые в реальных условиях эксплуатации объектов техники, а также сами материалы, на которых присутствовали эти отложения.

При моделировании процессов микробиологического повреждения в лабораторных условиях использовали методику и объекты исследований (материалы, виды микроорганизмов), приведенные в [1]. Образцы материалов помещали в специальную камеру [1], в объеме которой распыляли споры микроскопических грибов и бактерий. Оседая в неподвижном воздухе, они адгезировали на поверхности образцов. На этом этапе испытаний апробировали характеристики и методы определения адгезионного взаимодействия. Другие образцы с адгезированными спорами инкубировали в благоприятных для роста микроорганизмов-деструкторов условиях. После определенного времени инкубирования образцы с образовавшимися на их поверхности (или в объеме) отложениями (массами продуктов роста и жизнедеятельности микроорганизмов) снимали с испытаний и проводили определение различных характеристик микробиологического ростового процесса и изменения свойств материалов, используя для этого выбранные методы анализа.

Исследовали также отложения и соответствующие материалы, отбираемые с изделий непосредственно в условиях эксплуатации. Далее такие объекты будем называть «реальные пробы». Особенностью реальных отложений является их сложный, как правило, неизвестный состав. В них могут присутствовать как микроорганизмы, так и различные атмосферные и технологические примеси, продукты коррозии металлов, старения полимеров, окисления горюче-смазочных материалов и др. [8, 9]. В этом случае неизвестна и предыстория повреждения материала (образования отложения, изменения свойств), в том числе и видовой состав микроорганизмов-деструкторов, участвующих в этом повреждении.

В ходе исследований большинство выбранных методов были модифицированы с учетом особенностей исследуемых объектов и процессов. Оценку объективности и достоверности каждой характеристики и метода проводили путем сопоставления

результатов, полученных с использованием различных методов анализа.

Выбранные характеристики и методы приведены в табл. 1 и в [10–12]. Они могут быть отнесены к двум группам: 1 – индикаторные, позволяющие установить только сам факт наличия процесса и 2 – количественные, обеспечивающие, кроме того, и возможность определения величины той или иной его характеристики.

Адгезионное взаимодействие приводит к закреплению клеток (спор) микроорганизмов на поверхности материала. В результате, для разделения этих двух объектов (клетки и материала) необходимо воздействие силового поля определенной величины. Наличие клеток на поверхности и величина силы их отрыва от материала характеризуют этот начальный этап микробиологического повреждения.

Факт присутствия на материале клеток микроорганизмов-деструкторов является индикаторной характеристикой процесса адгезии. Эта характеристика достоверно определяется методами световой или люминесцентной микроскопии (табл. 1) только при лабораторных работах с микроорганизмами известного видового состава. Наличие адгезированных жизнеспособных микробных клеток может быть установлено инкубированием пробы в условиях контакта с питательной средой, состав которой учитывает тип исследуемого материала и видовые особенности возможных микроорганизмов-деструкторов (метод посева на питательные среды).

Количественной характеристикой процесса служит число адгезии. Его величина представляет собой отношение количества клеток, оставшихся на поверхности материала после воздействия некоторой определенной силы отрыва к числу клеток, первоначально (до воздействия силового поля) находившихся на поверхности. Эту характеристику процесса получают так называемыми «методами отрыва большого числа частиц».

Определение характеристик адгезии при исследовании реальных проб имеет ряд особенностей. Установлено, что нередко клетки (споры) микроорганизмов и некоторые небиологические компоненты отложений имеют схожие, неразличаемые микроскопированием внешние признаки. При использовании люминесцентной микроскопии в поле зрения часто наблюдается сплошной светящийся фон. Его происхождение связано, вероятно, с люминесценцией присутствующих в отложении объектов небиологического

происхождения. В этом случае для получения достоверных результатов требуется использование специальных веществ-тушителей фона, что не всегда возможно и существенно усложняет выполнение анализа.

Высев на плотные питательные среды, как правило, позволяет оценить (по морфологии колоний) разнообразие присутствующих в реальной пробе жизнеспособных микробных клеток. Для установления их принадлежности к микроорганизмам-деструкторам требуется выполнение дополнительных исследований. В общем случае такие исследования предусматривают экспериментальную оценку агрессивности выявленных видов микроорганизмов к материалу. Для этого каждый вид клеток (предварительно очищенный от других видов) культивируют на материале с последующим определением приведенных в табл. 1 характеристик микробного роста и изменения свойств материала. При этом используют приемы и методы работы, аналогичные стандартным, применяемым при лабораторной оценке микробиологической стойкости объектов техники. Затем, при необходимости, выявленные таким образом агрессивные к материалу микроорганизмы (микроорганизмы-деструкторы) идентифицируют (до рода или вида) известными в микробиологии методами [13–17].

Количественно оценить адгезионный процесс при непосредственном исследовании реальных проб затруднительно. Такая оценка может быть проведена путем воспроизведения процесса в лабораторных условиях. При этом в модельном эксперименте по определению числа адгезии (табл. 1.) используют образцы материалов и микробные клетки (споры), отобранные с исследуемого (поврежденного) изделия. Условия проведения испытаний должны, по возможности, имитировать реальные.

Рост микроорганизмов может быть охарактеризован массой их микробного тела и клеток (биомассой), а также содержащимися в них и выделяемыми при развитии веществами.

Для индикации ростового процесса биомасса определяется по ее внешним признакам визуально, методами световой и люминесцентной микроскопии, а также высевом на селективные питательные среды. Индикаторными характеристиками роста являются также продуцируемые микроорганизмами вещества: белковые соединения (определяются биохимическими и ИК-спектрометрическими методами), amino- и

карбоновые кислоты (спектрофлуоресцентный и хроматографический методы), витамин В₆ (спектрофлуоресцентный метод), аденозинтрифосфат (хемоллюминесцентный метод), ферменты (биохимические методы).

Некоторые из указанных характеристик позволяют установить не только сам факт микробного роста, но и некоторую дополнительную информацию об этом процессе и участвующих в нем микроорганизмах. Так, аденозинтрифосфат (АТФ) продуцируется микроорганизмами только непосредственно в процессе жизнедеятельности и отсутствует в клетках, прекративших свое развитие, а также находящихся в споровой форме [18–22]. Поэтому выявление этого соединения в пробе свидетельствует о наличии в ней растущей (развивающейся) биомассы.

Карбоновые кислоты и ферменты (оксидазы, каталазы, фосфатазы) являются наиболее агрессивными к материалам соединениями, продуцируемыми микроорганизмами. При этом указанные ферменты, по мнению многих авторов [16, 21], позволяют, в частности, микроскопическим грибам использовать материалы техники в качестве источника углеродного питания. Присутствие таких веществ в пробе свидетельствует не только о микробном росте, но и характеризует деструктивные по отношению к материалу свойства растущих микроорганизмов.

Количественными характеристиками роста могут служить (табл. 1) величина биомассы, определяемая гравиметрическим и радиометрическими методами, концентрация белковых соединений (метод Лоури), и аденозинтрифосфата (хемоллюминесцентный метод). Установлено, что концентрация каждого из указанных веществ пропорциональна величине, присутствующей в пробе биомассы микроорганизмов. Это позволяет, при необходимости, проводить корректный сопоставительный анализ ростовых процессов, экспериментальные данные о которых получены с использованием любой из этих количественных характеристик. При этом выбор характеристики и метода ее определения обуславливается особенностями роста данного вида микроорганизма на конкретном материале. Если величина биомассы сравнительно высока (более 1 мг/см²) и технически возможно ее достаточно полное отделение от материала может использоваться гравиметрический метод.

Таблица 1. Характеристики процессов микробиологического повреждения материалов и методы их определения.

Характеристика	Метод анализа, источник информации	Сущность и назначение метода
1	2	3
Адгезионное взаимодействие микроорганизмов с материалами		
Наличие клеток (спор) микроорганизмов на материале	Микроскопирование Световое (при увеличении 70, 400 - 600) [24–26]	Фиксация увеличенного изображения внешних признаков клеток микроорганизмов: микроскопических грибов – мелкодисперсные образования (Ø1...1.2 мкм) различной формы (шаровидной, эллипсоидной, цилиндрической, булавовидной); бактерий – мельчайшие подвижные (и неподвижные) частицы (Ø до 1 мкм), имеющие форму шариков, цепочек шариков, нитчатых и змеевидных структур, жгутиков;
	люминесцентное (при облучении УФ-светом с длиной волны 360 - 365 нм) [26–30]	микроскопических грибов и бактерий – зеленое свечение окрашенных флуорохромом клеток микроорганизмов. Индикация признаков процесса адгезии
Число адгезии	Высев на плотные питательные среды [31–35]	Установление роста содержащихся в пробе микробных клеток при их контакте с питательной средой. Индикация адгезии жизнеспособных микробных клеток, идентификация микроорганизмов-деструкторов
	Отрыв «большого числа частиц» (методы наклона поверхности и центробежного отрыва) [36, 37]	Определение (микроскопированием, микрофотографированием, высевам на питательные среды) на материале количества микробных клеток до и после воздействия заданной по величине силы отрыва. Количественная оценка силы адгезии спор микроскопических грибов и бактерий к твердым материалам.
Процесс роста микроорганизмов на материалах		
Наличие и количество биомассы	Визуальный [38–40]	Установление видимых невооруженным глазом признаков биомассы микроскопических грибов и бактерий: на твердых материалах – налет в виде тонкой пленки (отложения), войлочного сетчато-переплетенного роста, слизь различного цвета; в жидкостях – студнеобразная слизистая масса, загрязнения, пленки на границе раздела фаз жидкостей. Индикация роста микроорганизмов.
	Микроскопирование: Световое (при увеличении 70, 400 - 600)	Фиксация увеличенного изображения внешних признаков биомассы: переплетение тонких ветвящихся в виде сетки нитей (мицелиальные гифы Ø 5...10 мкм), споры грибов, бактериальные клетки;
	Люминесцентное (при облучении УФ-светом с длиной волны 360 - 365нм)	зеленое свечение окрашенных флуолохромом мицелиальных гиф, микробных клеток. Индикация роста микроорганизмов
	Высев на плотные питательные среды	Фиксация роста колоний микроорганизмов на питательной среде. Индикация жизнеспособной биомассы, идентификация микроорганизмов-деструкторов

1	2	3
Наличие и количество биомассы	Гравиметрический [41–44]	<p>Определение взвешиванием высушенной массы микроорганизмов.</p> <p>Определение количества сухой удельной биомассы микроорганизмов.</p>
	Радиометрический [45, 46]	<p>Измерение интенсивности β-излучения радиоактивного изотопа (индикатора), накапливающегося в биомассе микроорганизмов, культивируемых на материале в контакте с этим индикатором. Индикатором служат тритиевая вода (полимерные материалы), меченый тритием по концевой группе <i>n</i>-октадекан (топливо). Интенсивность β-излучения пропорциональна величине биомассы.</p> <p>Индикация и определение количества биомассы на поверхности или в объеме материала.</p>
Присутствие и количество белка и белковых соединений	Биохимический [47–53]	<p>Фиксация (визуальная или инструментальная) колориметрических эффектов, получаемых вовлечением содержащегося в пробе белка в химические реакции, окрашивающие реакционный раствор в различные цвета:</p>
	Реакция с нингидрином	<p>синий – в результате взаимодействия нингидрина с аминокруппами белка и аминокислот;</p>
	Реакция с трифенилтетразолием хлористым	<p>красно-коричневый – в результате окислительно-восстановительного взаимодействия формальдегида и 2,3,5-трифенилтетразолия хлорида в щелочной среде при катализирующем действии белка;</p>
	Реакция с красителем Кумаси Ж-250	<p>синий - в результате образования комплекса красителем белок в кислом растворе;</p>
	Реакция с образованием берлинской лазури	<p>ярко-голубой – в результате осаждения белка желтой кровяной солью с последующим взаимодействием образовавшегося соединения с трехвалентным железом;</p>
	Метод Лоури	<p>голубой – в результате взаимодействия белков со сложным реактивом (реагент Фолина), содержащем ионы молибдена, вольфрама, фосфорную кислоту. Интенсивность окрашивания пропорциональна концентрации белка и определяется по оптической плотности реакционного раствора при длине волны 750нм.</p> <p>Индикация микробного роста, определение концентрации белка в пробе (метод Лоури). Возможен расчет величины биомассы соответствующей установленной концентрации белка.</p>
Инфракрасная спектрофотометрия [43]	<p>Получение ИК-спектра пробы с характерными для функциональных групп белковых соединений полосами поглощения: 1660 см⁻¹ (группа C=O в амидах) и 1550 см⁻¹ (групп N-C и N-C в амидах).</p> <p>Индикация микробного роста.</p>	

1	2	3
Присутствие и количество белка и белковых соединений	Спектрофлуоресцентный [55]	Получение спектра флуоресценции пробы с характерной для ароматических аминокислот полосой флуоресценции в диапазоне длин волн от 340 до 360 нм при возбуждении ультрафиолетовыми лучами с длиной волны 320 нм. Индикация микробного роста.
	Тонкослойная хроматография [56–59]	Получение хроматограмм пробы с характерным для аминокислот расположением (фронта подъема) пятен розового (красного) цвета (при обработке нингидрином). Индикация микробного роста.
Присутствие пиридоксина (витамин В ₆)	Спектрофлуоресцентный [60, 61]	Получения спектра флуоресценции пробы с характерным для пиридоксина максимумом в диапазоне длин волн 385...420 нм при возбуждении ультрафиолетовым светом с длиной волны 320 нм. Индикация микробного роста.
Присутствие карбоновых кислот	Спектрофлуоресцентный [62]	Фиксация (визуальная) ярко-голубой, сине-зеленой, желто-зеленой флуоресценции соединений образующихся в результате сплавления (нагревания) содержащихся в пробе ди- и три-карбоновых кислот с резорцином и концентрированной серной кислотой. Возбуждение УФ-облучением с длиной волны до 360 нм. Индикация роста микроорганизмов-деструкторов.
	Тонкослойная хроматография [63–65]	Получение хроматограмм пробы с характерным для карбоновых кислот расположением (фронтом подъема) пятен желтого цвета (при обработке бромкрезоловым зеленым). Индикация роста микроорганизмов-деструкторов.
Наличие и количество аденозинтрифосфата (аденозин-5 трифосфорной кислоты динатриевая соль, АТФ)	Хемолюминесцентный [18–20]	Измерение интенсивности свечения с длиной волны 560 нм, образующегося в результате вовлечения присутствующего в пробе АТФ в ферментативную реакцию разложения субстрата (люциферина) в присутствии биокатализатора (люциферазы светляков). Интенсивность свечения пропорциональна концентрации АТФ. Индикация процесса роста (развивающейся биомассы), количественное определение содержания АТФ в пробе. Возможен расчет величины живой (развивающейся) биомассы, соответствующей установленной концентрации АТФ.
Присутствие ферментов	Биохимический [21, 22, 66 – 68]	Фиксация (визуальная) эффектов биохимических реакций, катализируемых соответствующим типом ферментов:
Оксидазы		сине-фиолетовое окрашивание в результате образования формазанов при восстановлении оксидазами солей тетразолия;
Каталазы		газовыделение (пузырьки) в результате образования кислорода при разложении каталазой перекиси водорода;
Фосфатазы		фиолетовое или пурпурное окрашивание в результате взаимодействия фталата натрия, паранитрофенилфосфата и трехосновного фосфата натрия в присутствии фосфатазы. Индикация роста микроорганизмов-деструкторов.

1	2	3
Процесс изменения свойств материалов под воздействием микроорганизмов		
Показатели свойств материала (физико-химических, механических и др.)	Методы определения показателей свойств в соответствии со стандартами и другой технической документацией	Определение изменения показателя свойств материала после и (или) в процессе воздействия на него микроорганизма. Индикация наличия и количественное определение процесса воздействия микроорганизмов-деструкторов на свойства материала.

Для количественной оценки роста, обуславливающего образование микроколичеств биомассы (менее 0.1 мг/см²) применяют характеристики, определяемые радиометрическим, биохимическим (метод Лоури) или хемолюминесцентным методами.

Анализ результатов определения характеристик микробного роста в реальных пробах показывает, что выявляемые невооруженным глазом внешние признаки биомассы встречаются крайне редко. Применение увеличительных средств и световой микроскопии в ряде случаев позволяет достоверно определить эту характеристику (биомассу). Однако наблюдаемый при этом мицелий грибов, клетки (споры) часто имеют структуру и форму, сходную с компонентами отложений небиологической природы. Использование люминесцентной микроскопии, так же как в исследованиях реального адгезионного процесса, часто требует подбора тушителей фонового свечения, обусловленного особенностями материала и многокомпонентным составом реальной пробы.

Индикация биомассы методом высева на селективные питательные среды позволяет выявить жизнеспособные микробные клетки. Как уже отмечалось, данный метод является необходимым элементом работ, выполняемых при исследовании реальных проб и направленных на установление принадлежности присутствующих в них (пробах) микроорганизмов к деструкторам материалов и их родовой и видовой идентификации. Однако сам факт наличия таких микроорганизмов однозначно свидетельствует лишь об адгезионном взаимодействии, но не позволяет судить о протекании ростового процесса. В таких случаях на поверхностях и в объемах, зараженных микроорганизмами-деструкторами, отсутствуют другие характеристики процесса микробиологического роста.

Результаты выявления в реальных пробах веществ, продуцируемых микроорганизмами, часто подтверждаются данными определения характеристик роста независимыми методами.

Однако нередко присутствующие в таких пробах немикробиологические компоненты способны непредсказуемо изменять колориметрические эффекты биохимических реакций, ИК-спектры, спектры флуоресценции и хроматограммы, полученные при выполнении соответствующих анализов. Кроме того, имели место случаи, когда реальные пробы содержали биологические объекты, происхождение которых не было связано с микробиологическим ростовым процессом (пыльца растений, насекомые и т.п.). Исследование таких объектов приводит к результатам, аналогичным получаемым в присутствии продуктов жизнедеятельности микроорганизмов.

Такие характеристики, как аденозинтрифосфат, ферментативные комплексы и соответствующие методы их определения, менее чувствительны к присутствующим в реальных пробах немикробиологическим компонентам. Вместе с тем, в ряде проб, содержащих фрагменты мицелия гриба, споры, белковые соединения, не удалось обнаружить аденозинтрифосфат и ферменты. Такой результат дает основания полагать, что микробный ростовой процесс на материале завершился, и живые (растущие) клетки (споры) отсутствуют или их количество ниже чувствительности используемых методов анализа.

Количественная оценка микробиологического роста при изучении реальных проб может быть проведена с использованием радиометрических методов (определение величины биомассы), хемолюминесцентным и биохимическим методами (определения концентрации аденозинтрифосфата, белковых соединений, соответственно). При этом применение радиометрических методов ограничено необходимостью обеспечения достаточно полного отделения микробиологических объектов от других присутствующих в реальной пробе компонентов, а также подбора контрольных образцов с целью получения значения фонового уровня

накапливаемой материалом радиоактивности.

Изменение свойств материала под воздействием микроорганизмов характеризуется соответствующими показателями свойств, измеряемыми после или в процессе его контакта с продуктами микробного роста. Применяют стандартные или специально разработанные методы определения показателя. В зависимости от их выбора изучение процесса может быть индикаторным, например, если характеристикой является внешний вид материала, а методом его оценки – визуальный осмотр, и количественными (механические, физико-химические и другие показатели свойств, определяемые соответствующими инструментальными методами).

Экспериментально установлено, что чувствительными к воздействию микроорганизмов являются следующие показатели свойств: разрывное напряжение (предел вынужденной эластичности) – для полиметилметакрилата, поливинилхлорида, полиэтилена, поли-ε-капролактама, триацетатцеллюлозы, хлопчатобумажных и льняных тканей, герметика У-30МЭС-5; электросопротивление – лакоткани, поливинилхлорида, стеклотекстолита; концентрация пластификатора – в изоляционном поливинилхлориде; светопропускание – для оптических стекол; кислотность и содержание механических примесей – в топливе, маслах; степень коррозионного повреждения – для стали и алюминиевых сплавов.

Исследования состояния эксплуатирующихся материалов, имеющих признаки развития микробиологического ростового процесса, часто позволяли установить изменение внешнего вида, прочности, электросопротивления, оптических свойств, компонентного состава и других показателей свойств. Вместе с тем не удалось выявить каких-либо особенностей указанных изменений, однозначно связанных только с воздействием микроорганизмов. Зачастую они могли являться следствием воздействия не только и не столько микроорганизмов, сколько других факторов: температуры, света, агрессивных сред, механических нагрузок и т.п. В связи с этим для подтверждения наличия и количественной оценки участия микроорганизмов в процессе изменения свойств материала необходимо проведение модельных лабораторных экспериментов по воспроизведению характера реального микробиологического повреждения.

Методически такие эксперименты анало-

гичны рассмотренным выше проводимым при определении принадлежности обнаруженных в реальных пробах микробных клеток к микроорганизмам-деструкторам. Они также предусматривают культивирование микроорганизмов на материале с оценкой микробиологического роста и изменения свойств последнего. При этом в модельном эксперименте зараженные выявленными в реальных пробах микроорганизмами образцы инкубируют в условиях внешней среды (температуре, влажности и др.), близких к реально существующим на изделии. Могут также использоваться специальные образцы, учитывающие конструктивные особенности поврежденных деталей, агрегатов и узлов изделия.

Таким образом, приведенные в табл. 1. характеристики и методы могут быть использованы для определения наличия и интенсивности процессов взаимодействия материалов с микроорганизмами-деструкторами.

Возможности предложенных характеристик и методов для изучения количественных закономерностей этих процессов в модельных лабораторных экспериментах были рассмотрены в [1–7].

При исследовании эксплуатирующейся техники отдельно взятые характеристики и методы их определения не все и не всегда позволяют объективно судить о протекании рассматриваемых процессов микробиологического повреждения. Для этого необходим сопоставительный анализ результатов отдельного определения целого ряда признаков данному процессу (указанных в табл. 1) характеристик с помощью набора различных физико-химических, биохимических, микробиологических методов анализа и воспроизведение характера процесса в модельном лабораторном эксперименте. Такое комплексное использование характеристик и методов обеспечивает достоверность получаемых с их помощью результатов определений исследуемых процессов и, следовательно, позволяет достоверно выявить микробиологическое повреждение эксплуатирующихся изделий техники.

Схема, иллюстрирующая методику, проведение такого исследования, приведена на рис. 1. Общее заключение о наличии и интенсивности микробиологического повреждения материала должно основываться на совокупности всех данных полученных при проведении предусмотренных схемой (рис. 1) анализов.

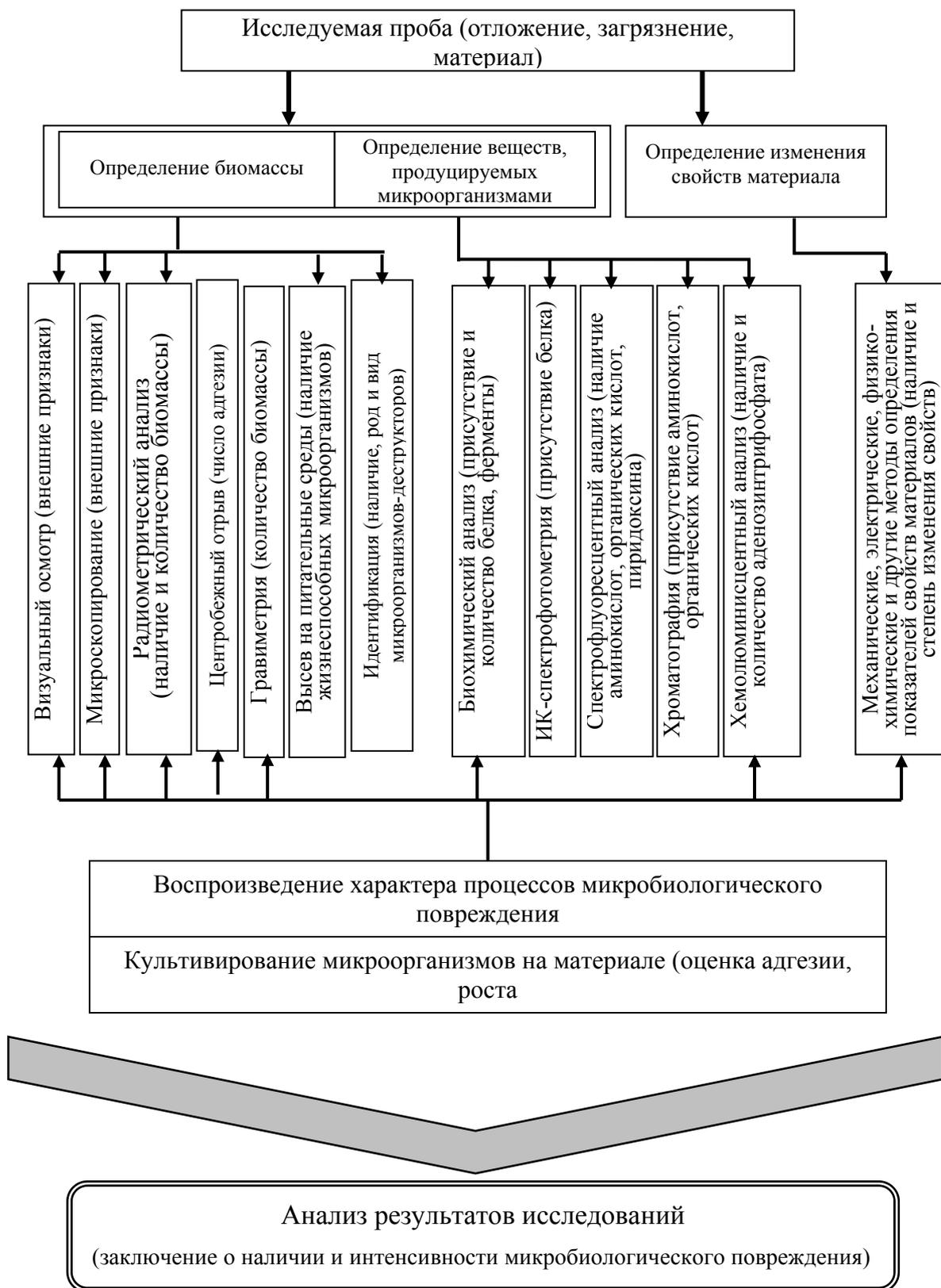


Рис.1. Схема выявления процессов микробиологического повреждения материалов, эксплуатирующихся объектов техники.

2. Повреждения материалов техники, вызываемые микроорганизмами

В соответствии с приведенной на рис. 1. методикой проведения исследований оценивали повреждаемость техники микроорганизмами в реальных условиях эксплуатации.

Объектами исследований являлись изделия техники от достаточно простых по конструкции, технологии изготовления и способа применения (защитные и оптические стекла, техническая документация) до очень сложных.

Выявлено и исследовано значительное количество случаев повреждений различных изделий. Установлено, что повреждающему воздействию микроорганизмов в той или иной степени подвержено большинство используемых в изделиях техники материалов.

Около 15% составляют повреждения материалов, известных своей низкой микробиологической стойкостью (древесина, бумага, фибра, кожа, хлопчатобумажные ткани, войлок, фетр). Сравнительно незначительное количество повреждений этих материалов обусловлено тем обстоятельством, что ранее разработанные и используемые в технике средства и методы защиты существенно повышают микробиологическую стойкость соответствующих изделий в условиях эксплуатации. В то же время, анализ обстоятельств возникновения выявленных повреждений свидетельствует о том, что все они, как правило, обусловлены невыполнением требований нормативно-технической документации по изготовлению и эксплуатации (хранению) таких изделий.

Наиболее часто повреждаются микроорганизмами полимерные (28.5% от общего числа), горюче-смазочные (27.4%) материалы, лакокрасочные покрытия (16.2%), металлы и сплавы (12.6%). Вместе с тем большинство этих материалов в стандартных лабораторных испытаниях показывают достаточную микробиологическую стойкость, удовлетворяющую действующим требованиям. Следовательно, полученные нами результаты дают основание полагать, что существующие требования и методы испытаний микробиологической стойкости не в полном объеме отражают характер взаимодействия микроорганизм-материал и влияние на этот процесс реальных условий эксплуатации техники.

В табл. 2 показаны виды микроорганизмов – деструкторов, выявленные с поврежденных материалов (рис. 2). Как правило, в пробах, отбираемых с таких материалов, обнаруживается несколько видов микроорганизмов,

принадлежащих к различным таксономическим группам. Однако деструкторами материалов чаще всего являются только один – два вида. Из них наиболее распространены микроскопические грибы (установлены в более 80% всех исследованных проб) и бактерии (около 16%). Наряду с этими микроорганизмами выделено незначительное количество актиномицетов и дрожжей, однако они показали значительно меньшую агрессивность к материалам техники.

Грибы родов *Aspergillus*, *Penicillium*, *Trichoderma*, *Fusarium*, *Alternaria* и бактерии рода *Bacillus* способны повреждать самые различные материалы. В то же время многие микроорганизмы обладают деструктивной способностью преимущественно к отдельным материалам. Топливо чаще всего повреждается грибами родов *Cladosporium*, *Penicillium*, а также бактериями *Pseudomonas*. Свыше половины всех случаев микробиологического повреждения масел и смазок происходит в результате воздействия грибов родов *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Scopulariopsis* и бактериями рода *Bacillus*. Коррозию металлов и сплавов, связанную с микробиологическим фактором, наиболее часто вызывают грибы *Aspergillus*, *Penicillium*, *Alternaria*, *Paecilomyces*, а также бактерии *Bacillus*. Микробиологическое повреждение полимерных и лакокрасочных материалов, в большинстве случаев является следствием заселения этих материалов родами *Aspergillus*, *Penicillium*, *Stemphylium*, *Chaetomium*, *Trichoderma*, *Alternaria*, *Fusarium*, *Bacillus*. Оптического стекла – *Aspergillus*, *Penicillium*, *Trichoderma*.

Наиболее агрессивными видами являются: по отношению к топливу – *Cladosporium resinae*, *Penicillium chrysogenum*, *Pseudomonas aeruginosa*; к маслам и смазкам – *Aspergillus niger*, *Penicillium chrysogenum*, *Fusarium sambucinum*, *Bacillus subtilis*; к полимерным и лакокрасочным материалам – *Aspergillus niger*, *Aspergillus terreus*, *Aspergillus flavus*, *Penicillium chrysogenum*, *Penicillium funiculosum*, *Alternaria alternata*, *Stemphylium botryosum*, *Bacillus subtilis*; к металлам и сплавам – *Aspergillus flavus*, *Penicillium chrysogenum*, *Penicillium funiculosum*, *Bacillus subtilis*; оптическому стеклу – *Aspergillus versicolor*, *Aspergillus flavus*.

Выявлено свыше 500 штаммов видов микроорганизмов, приведенных в табл. 2.

Анализ результатов исследований микроорганизмов – деструкторов позволил установить, что их видовой состав и свойства штаммов (агрессивность к материалу, физиолого-биохимические и антагонисти-

ческие) различаются в зависимости от типа (марки) повреждаемого материала, конструктивно-технологических особенностей деталей (узлов, агрегатов), почвенно-климатического района эксплуатации изделия.

Такие выявленные взаимосвязи необходимо учитывать при выборе тест-культур для испытаний микробиологической стойкости материалов и изделий, эффективности средств и методов защиты.

Таблица 2. Микроорганизмы-деструкторы материалов техники.

Материал	Вид микроорганизма
Топлива	грибы: <i>Cladosporium resinae</i> , <i>Cladosporium herbarum</i> , <i>Cladosporium chlorocephalum</i> , <i>Penicillium chrysogenum</i> , <i>Penicillium steckii</i> , <i>Penicillium notatum</i> , <i>Penicillium cyclopium</i> , <i>Penicillium nalgiovensis</i> , <i>Acremonium kiliense</i> ; <i>Aspergillus niger</i> .; <i>Fusarium moniliform</i> , <i>Fusarium solani</i> . <i>Stemphylium botryosum</i> ; бактерии <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ; дрожжи <i>Hansenula holstii</i> .
Масла и смазки	грибы: <i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus caespitosus</i> , <i>Aspergillus flavus</i> , <i>Aspergillus tamaris</i> , <i>Aspergillus fumigatus</i> , <i>Aspergillus melleus</i> , <i>Aspergillus ochraceus</i> ; <i>Penicillium chrysogenum</i> , <i>Penicillium rubrum</i> , <i>Penicillium verrucosum</i> , <i>Fusarium sambucinum</i> , <i>Fusarium solani</i> ; <i>Scopulariopsis brevicaulis</i> ; бактерии: <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus pumilus</i> , <i>Mycobacterium lacticolum</i> .
Материалы на основе синтетических и натуральных полимеров	грибы: <i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus flavus</i> , <i>Aspergillus terreus</i> , <i>Aspergillus amstelodami</i> , <i>Penicillium funiculosum</i> , <i>Penicillium chrysogenum</i> , <i>Penicillium notatum</i> , <i>Penicillium cyclopium</i> , <i>Penicillium ochro-chloron</i> , <i>Alternaria alternata</i> , <i>Aureobasidium pullulans</i> , <i>Fusarium sp.</i> , <i>Chaetomium globosum</i> , <i>Trichoderma viride</i> , <i>Cladosporium herbarum</i> , <i>Cladosporium sphaerospermum</i> , <i>Stemphylium botryosum</i> , <i>Paecilomyces variotii</i> ; бактерии: <i>Bacillus megaterium</i> , <i>Bacillus pumilus</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Acinetobacter sp.</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Mycobacterium globiforme</i> ; дрожжи: <i>Hansenula holstii</i> .
Лакокрасочные покрытия	грибы: <i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus flavus</i> , <i>Aspergillus terreus</i> , <i>Aspergillus amstelodami</i> , <i>Aspergillus tamaris</i> , <i>Penicillium chrysogenum</i> , <i>Penicillium brevi-compactum</i> , <i>Penicillium funiculosum</i> , <i>Penicillium cyclopium</i> , <i>Penicillium ochro-chloron</i> , <i>Penicillium martensii</i> ; <i>Trichoderma viride</i> , <i>Paecilomyces varioti</i> , <i>Alternaria alternata</i> , <i>Fusarium moniliform</i> , <i>Chaetomium globosum</i> ; бактерии: <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Flavobacterium</i> .
Металлы и сплавы	грибы: <i>Aspergillus flavus</i> , <i>Aspergillus niger</i> , <i>Penicillium chrysogenum</i> , <i>Penicillium funiculosum</i> , <i>Trichoderma viride</i> , <i>Aureobasidium pullulans</i> , <i>Cladosporium cladosporioides</i> , <i>Scopulariopsis brevicaulis</i> , <i>Fusarium sambucinum</i> , <i>Rhizopus nigricans</i> , <i>Alternaria sp.</i> , <i>Paecilomyces varioti</i> ; бактерии: <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> .
Стекло (оптическое и защитное)	грибы: <i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus terreus</i> , <i>Aspergillus penicilloides</i> , <i>Aspergillus flavus</i> , <i>Aspergillus versicolor</i> , <i>Penicillium chrysogenum</i> , <i>Penicillium regulosum</i> ; <i>Chaetomium globosum</i> , <i>Trichoderma viride</i> , <i>Paecilomyces varioti</i> , <i>Scopulariopsis brevicaulis</i> .

Характер повреждения исследованных материалов под воздействием указанных в табл. 2 микроорганизмов приведен в табл. 3.

Общим для всех материалов нежелательным изменением является образование на их поверхности (или в объеме) отложений (загрязнений), представляющих собой продукты микробного роста и жизнедеятельности (биомасса, метаболиты микроорганизмов – органические кислоты, ферменты и другие вещества).

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что воздействие метаболитов является главной причиной вызываемых микроорганизмами изменений свойств материалов. Отмечаемые авторами [69, 70] случаи механического разрушения материалов вследствие разрастания мицелия гриба нами не обнаружены.

В зависимости от степени и особенностей влияния метаболитов на свойства материалов

все выявленные в эксплуатации техники микробиологические повреждения могут быть отнесены к двум типам. Первый тип обуславливает обратимые изменения свойств. Это значит, что после удаления отложений микробиологической природы все обнаруженные изменения показателей материала восстанавливаются до исходных значений. На эксплуатирующихся объектах техники выявлено большое количество случаев обратимого снижения электросопротивления и прочностных свойств поливинилхлоридной (ПВХ) и латексной изоляции проводов электросетей, стеклотекстолитовых печатных плат, снижения прочности органического стекла на основе полиметилметакрилата (ПММА), полиэтиленовой

(ПЭ) и триацетатцеллюлозной (ТАЦ) пленок, а также повышения содержания механических примесей в нефтяных топливах, технических маслах и смазках.

Имеющиеся в литературе данные о влиянии на материалы жидких сред, анализ результатов, проводимых нами согласно схеме рис. 3 экспериментов по воспроизведению характера микробиологических повреждений дают основания предполагать, что рассматриваемые обратимые изменения свойств являются, прежде всего, результатом физических процессов: для твердых материалов – их сорбционного взаимодействия с метаболитами; для жидкостей – засорения микробными массами.

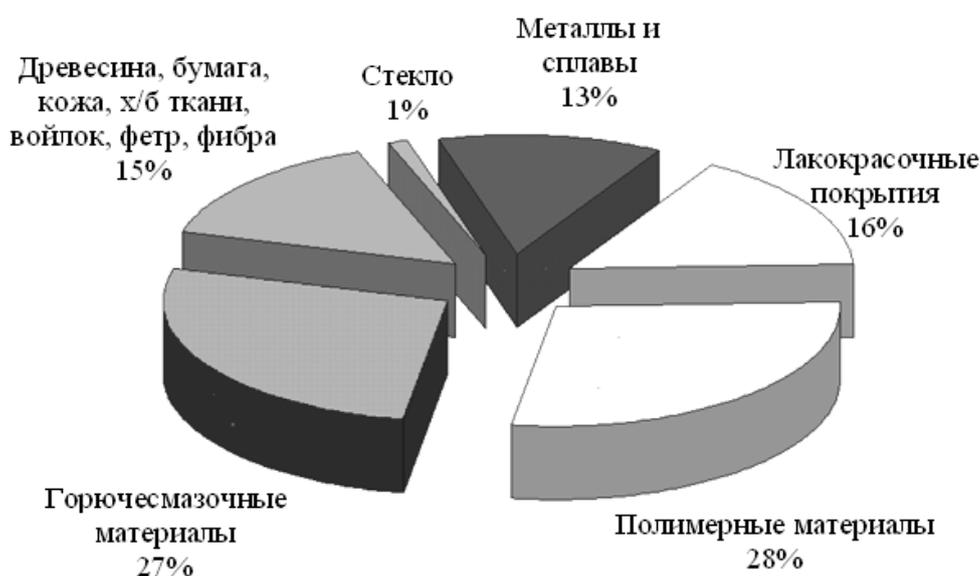


Рис. 2. Количество выявленных микробиологических повреждений различных материалов.

Ко второму типу относятся микробиологические повреждения, приводящие к необратимым изменениям свойств. То есть изменения наблюдаются как в присутствии на материале микроорганизмов, так и после их удаления.

Необратимые изменения прочностных и диэлектрических показателей, связанные с воздействием микроорганизмов, обнаружены: у поливинилхлоридной, латексной и резиновой изоляции электропроводов; снижение прочности – у резин мягких топливных баков и шлангов, хлопчатобумажных тканей, синтетических тканей.

К повреждениям этого типа относятся также: растрескивание органического стекла; разрушение лакокрасочных покрытий; полисульфидного герметика и стеклотекстолита; дефекты металлов и сплавов; изменения кислотности горюче-смазочных материалов; вязкости технических масел и смазок.

Модельные эксперименты по воспроизведению характера указанных повреждений и имеющиеся сведения о влиянии на материалы агрессивных сред позволили предположительно связать их (повреждений) возникновение, прежде всего, с химическими процессами: для полимерных материалов и ЛКП – с деструкцией нестойких химических связей (химическая деструкция); для металлов и сплавов – электрохимической коррозией.

Необратимые изменения свойств могут обуславливаться и физическими процессами, предположительно заключающимися в сорбционно-диффузионном взаимодействии находящегося в напряженном состоянии полимера с метаболитами, а также диффузионной десорбции низкомолекулярных компонентов из полимерных материалов и лакокрасочных покрытий.

Подробное описание модельных экспериментов, послуживших основанием для

приведенных выше гипотез о характере процессов, обуславливающих влияние микроорганизмов на свойства материалов, приведено в работе [6].

Анализ выявленных случаев микробиологических повреждений показывает, что их возникновение, характер и интенсивность развития зависят от свойств, состояния и особенностей использования (в изделии) материала, агрессивности микроорганизма-деструктора, продолжительности и условий взаимодействия пары материал-микроорганизм, а также ряда способствующих этому взаимодействию факторов.

Наиболее значимыми для микробиоло-

гического повреждения условиями являются температурно-влажностный режим, а также наличие на материале минеральных и органических загрязнений. Основные способствующие факторы могут быть отнесены к трем группам, представленным на рис. 3.

Установлено, что каждый отдельно взятый из указанных на этом рисунке факторов в том или ином случае способствовал микробиологическому повреждению. Однако определяющее влияние на возможность их возникновения и интенсивность развития оказывает, как правило, сочетание нескольких факторов.

Таблица 3. Характер и последствия микробиологического повреждения материалов техники.

Материал	Характер повреждения материала	Последствия повреждения, влияющее на работоспособность изделия
<p>Горюче-смазочные материалы топливо: авиационное – Т-1, ТС-1, Т-6, РТ; дизельное – ДЛ-0,2-61, ДС; бензин – А-76, А-80; масла: смазывающие – МН-7,5У, Б-38, МК-8, МС-8Г, ИПМ-10, АС-8; гидравлические – АМГ-10, ГТЖ-2214; смазки: рабочие – НК-50, ЦИАТИМ-201, ВНИИНП-207, 1-13; консервационные – ПВК, АМС-3</p>	<p>Волокнистые, слизистые массы в поверхностном слое (смазка) или в объеме материала, на границе раздела фаз материал-вода (топливо, масло), стойкие эмульсии (топливо, масло); изменение цвета; изменение консистенции, разжижение или загустение (масло, смазка); изменение кислотности; изменение вязкости (масло, смазка).</p>	<p>Засорение фильтров, неисправности в работе насосов и других агрегатов топливной, масляной, гидравлической систем изделий; разрушение защитных покрытий и герметика; коррозия, повышение усилий трения и износ металлических деталей и узлов (узлы навески и стыковки агрегатов, шарниры, подшипники, механизмы зубчатых передач, редукторы, гидроусилители, амортизаторы и др.)</p>
<p>Материалы на основе синтетических и натуральных полимеров органическое стекло (СО-95, СО-120), поливинилхлоридный пластикат И-40-13, полиэтиленовая пленка, лакоткань, стеклотекстолит СТК/ЭП, парусина, брезент, прорезиненная ткань (БЦК, Т-15), тепло-звукоизоляционный материал (ткань АНЗМ, ТЗИМ), капрон ЛТКМП, герметик У-30МЭС-5, резина Р-3826, НО-68, ИРП-1338</p>	<p>Налет различной консистенции и цвета; изменение цвета и блеска поверхности; изменение механических, диэлектрических свойств и состава (снижение содержания пластифицирующей добавки, набухание, вспучивание, образование трещин).</p>	<p>Набухание, вспучивание и отслоение герметика; растрескивание оргстекла (стекла кабин, приборов); снижение электросопротивления и разрушение изоляции проводов; электрозамыкание и разрушение токоведущих дорожек печатных плат; изменение электрических характеристик электро- и радиоэлектронных изделий (ЭРИ); снижение прочностных свойств и разрушение деталей ЭРИ (колодки ШР, прокладки, переключатели, вкладыши, корпуса приборов и др.); разрушение резиновых уплотнительных профилей и манжет; разгерметизация кабин, отсеков, контейнеров хранения; снижение прочности парашютных строп, лент силового каркаса и купола; разрушение тентов, палаток и чехлов.</p>

Продолжение табл. 2.

Металлы и сплавы алюминиевые сплавы Д-16, АМЦ, В-95; стали СТ-3, 10ХСНД, 30ХГСА; магниевые сплавы МЛ-8, МЛ-5; латунь ЛС-62; медный сплав М-2	Налет различной формы, цвета и консистенции (слизистый порошкообразный, войлоковидный); коррозия металла (поверхностная, язвенная, расслаивающая).	Очаги коррозии и разрушение силовых элементов конструкции (обшивка, лонжероны, нервюры, стрингера, капоты и др.) и металлических топливных баков; очаги коррозии узлов крепления деталей шасси, агрегатов систем изделий, болтовых и шарнирных соединений, деталей подшипников и др; коррозия деталей ЭРИ (электропредохранители, контактные пары, токоведущие дорожки и др.); изменение электрических параметров и отказы в работе ЭРИ.
Лакокрасочные покрытия Грунтовка АК-170, ВЛ-02, АЛГ, АЛГ-1; краска АК-5178, АК-70, Муар, ПФ-223, АС-16, АС-1115, ПХВ-69А, ХВ-16; лак АС-16, Линоксин, НЦ; эмали М-12, ПФ-163, ПФ-223.	Налеты различной формы, размера и консистенции; изменение цвета, блеска; вспучивание, растрескивание и отслоение; изменение физико-механических показателей (прочностных, адгезионных и др.).	Разрушение покрытия и коррозия металлических деталей конструкции и оборудования изделий; разрушение покрытия и деталей из полимерных материалов (лакотканевая оплетка электроизоляции, радиоантенны и др.); изменение электрических характеристик ЭРИ.
Стекло оптическое и защитное	Налет белого или серого цвета в виде пятен различной формы и размера; травление поверхности в виде сетчатого нитевидного рисунка; изменение светопропускания (оптических свойств).	Ухудшение характеристик оптических приборов (линзы, светофильтры, бинокли, стереотрубы, дальномеры, перископы, защитные очки и др.).

Возникающие в процессе воздействия микроорганизмов отложения, загрязнения материала, изменения его свойств обуславливают необходимость увеличения затрат на техническое обслуживание изделия (очистка, ремонт, замены, восстановление деталей и др.). Вместе с тем следует подчеркнуть, что для техники наиболее важным показателем микробиологического повреждения является его влияние на техническое состояние и работоспособность деталей, узлов, агрегатов и систем изделия.

Существенная роль микробиологического фактора в возникновении каждого конкретного случая, обобщенно показанного в табл. 3, определена с участием специалистов в области эксплуатации изделий, отдельных систем и агрегатов. Приведенные в таблице последствия были вызваны микробиологическими повреждениями, отнесенными нами как к 1-му, так и ко 2-му типам. Так, необратимое изменение свойств и разрушение стеклотекстолита, резины, ЛКП, используемых в составе электрорадиоизделий, часто

обуславливает нарушения работоспособности приборов и оборудования. Обратимое микробиологическое повреждение этих материалов также нередко вызывает нарушение работоспособности – так называемые «плавающие дефекты». После прогрева поврежденного таким образом прибора его электрические параметры восстанавливают свои исходные значения (нередко даже простым включением в рабочее состояние).

Наиболее характерным результатом микробиологического повреждения ГСМ является засорение топливных и масляных фильтров микробной массой. Случаи засорения топливных фильтров неоднократно происходили при выполнении полетов таких типов самолетов, как Ил-76, Ту-154, Ту-134, М-17 и др. При срабатывании сигнализации засорения фильтра экипаж вынужден был выключать соответствующий двигатель и менять полетное задание. Имели место случаи падения тяги двигателя и прекращения полета (самолет М-17).



Рис. 3. Факторы, способствующие возникновению и развитию микробиологических повреждений.

Исследования причины отказа в работе топливного насоса ЭЦНТ-10с-76 самолета Ил-76 позволили установить, что отказ произошел в результате засорения микробиологической массой предохранительной сетки насоса.

Выявляются частые случаи засорения

микробиологической массой топливных фильтров кораблей во время их походов в тропических водах (Красное море, Индийский океан). Вынужденная частая замена фильтров негативно сказывается на выполнении задачи.

Лабораторными экспериментами по воспроизведению характера повреждений топ-

ливных систем установлено, что развитие микроорганизмов приводит к накоплению в топливе и водном отстое, присутствующем в топливных баках, органических кислот. Наблюдается увеличение кислотного числа топлива с 0.35 мг КОН на 100 мл топлива до 1.2-1.3 (после 180 суток роста). pH водной фазы, при этом, снижается с 7.0 до 4.9-4.3. Выделяемые микроорганизмами метаболиты приводят к вспучиванию и отслоению герметика и ЛКП, коррозии металлических деталей, применяемых в конструкции агрегатов и узлов топливных систем изделий. При воздействии микроскопического гриба *Cladosporium resinae* (в течение 30 суток) на образцы из сплава Д-16, с нанесенным на них герметиком У-30МЭС-5, прочность герметика снижается на 25-30%. При этом коррозия поражает до 100% поверхности образца (в виде отдельных язв или сплошная).

В эксплуатации возникали течи топлива из самолетных топливных баков-кессонов из-за сквозной коррозии стенок, возникшей в результате микробного роста в топливе ТС-1.

Образование биомассы, способной приводить к таким последствиям (повреждениям), возможно лишь при наличии в топливе свободной воды, границы раздела фаз топливо-вода, минеральных загрязнений а также при температуре окружающей среды от 10 до 30°C.

Комплексные исследования причин микробиологических повреждений показывают, что, как правило, эти повреждения возникают там, где имеет место сочетание различных благоприятных для развития микроорганизмов факторов (рис. 3).

Так, конструкция топливных баков транспортных самолетов создает условия для накопления воды в несливаемых остатках топлива. При этом контроль за его составом в эксплуатации практически не возможен до появления явных признаков микробиологических повреждений, указанных выше. Способствующими этим повреждениям факторами является также: эксплуатация в районах с тропическим и субтропическим климатом, а также в районах с резкими перепадами дневных и ночных температур, обуславливающими образование водного конденсата в баках; длительные перерывы в полетах самолета; несоответствие микробиологической стойкости применяемых в конструкции топливных систем материалов (герметик У-30МЭС-5 и др. защитные покрытия) условиям работы; отсутствие в эксплуатационной документации требований по контролю микробиологической заражен-

ности топливных систем при подготовках к полетам и регламентных работах на самолетах, конструкция и условия работы которых приводят к указанным выше повреждениям.

Достаточно распространенным последствием микробиологического повреждения масел и смазок является возникновение и развитие коррозионных процессов на деталях агрегатов масляных, гидравлических систем (амортизаторы, гидравлические цилиндры, подъемники и др.) и смазываемых деталях узлов трения. В этих случаях продуцируемые микроорганизмами метаболиты существенно повышают кислотность масел и смазок, увеличивая тем самым их коррозионную агрессивность к металлам.

Проведенная на образцах из Ст.3 оценка коррозионной активности поврежденных бактериями *Bacillus sp.* масел и смазок показала, что глубина коррозионных язв может достигать за 180 суток экспонирования следующих значений: АМГ-10 – 0.79 мм, МН-7.5 – 0.27 мм, АМС-3 – 0.19 мм. Для контрольных образцов за это же время она не превысила 0.05 мм, 0.02 мм и 0.015 мм, соответственно.

Другими последствиями рассматриваемого вида повреждения смазочных материалов являются повышенные усилия трения и износ в шарнирах, подшипниках, узлах навески, механизмах зубчатых передач и др.

Микробиологическое повреждение масел и смазок, приводящее к рассмотренным последствиям, возможно при наличии в этих материалах свободной воды (более 1-2%) или относительной влажности воздуха более 70%, температуре от 15-30°C. Возникновению и развитию указанных повреждений во многом способствует попадание и скопление воды и загрязнений в указанных агрегатах, а также нарушение предусмотренных эксплуатационной документацией сроков замены смазки.

К наиболее серьезным последствиям микробиологических повреждений полимерных материалов приводит воздействие на них продуцируемых микроорганизмами веществ. В результате происходят существенные изменения механических, диэлектрических, физико-химических свойств материалов вплоть до разрушения изготовленных из этих материалов деталей и элементов изделий. Снижение сопротивления электроизоляции и разрушения ее наружного слоя (лакотканевой оплетки) неоднократно наблюдалось на авиационной технике. Так, на самолете Ту-16 после его 6 лет эксплуатации в Индии

электропроводка бортовой сети была полностью повреждена микроорганизмами и заменена при ремонте.

Микробиологические повреждения полимерных материалов деталей, входящих в состав ЭРИ (детали сложных схем печатных плат, заливочные компаунды, электроизоляционные лаки, прессматериалы, колодки и вкладыши штепсельных разъемов и др.) приводят к изменению рабочих характеристик и потере работоспособности приборов и оборудования. По этим причинам происходили отказы в работе радиостанций Р-805, Р-860, радиокomплекса АРК-9, автопилота АП-15.

Лабораторные модельные эксперименты с электросхемой позволили установить, что даже относительно небольшое отрицательное воздействие микроорганизмов на один из ее элементов из полимеров приводит к существенному изменению электрических параметров всей схемы.

Воздействие микроорганизмов на материалы парашютных систем обуславливает снижение прочности таких силовых элементов, как стропы, ленты силового каркаса, купол. Установлено снижение величины их разрывной нагрузки на 15-20%.

Продуцируемые микроорганизмами метаболиты вызывают набухание и разрушение ЛКП. Проникая к защищаемому таким покрытием материалу, они способствуют развитию коррозии металлов, изменению структуры, состава и свойств полимеров и других материалов.

Лабораторные эксперименты показали, что рост микроскопического гриба *Aspergillus niger* на краске АК-70 уже через 30 суток приводит к снижению прочности при ударе в три раза. В присутствии гидрофилизующего загрязнения рост гриба вызывает разрушение покрытия. За это время контрольные образцы оставались без изменения.

Микробиологические повреждения ЛКП нередко приводили к значительной расслаивающей коррозии силовых элементов конструкции из алюминиевых сплавов (обшивка крыла и оперения самолета), язвенной коррозии деталей из магниевых сплавов (кронштейны, качалки, каркас кабины самолетов), коррозионным поражениям стальных деталей (капоты автомобилей, крышки лючков, элементы корабельной надстройки и др.).

Микробиологическое повреждение оптического стекла обуславливало нарушение работоспособности фоторегистрирующих и прицельно-навигационных приборов, визиров,

стереотруб, дальномеров, перископов. Воздействие метаболитов микроорганизмов ухудшает оптические характеристики входящих в состав указанных изделий линз, окуляров, призм, светофильтров.

Продуцируемые в результате микробного роста вещества повышают коррозионную агрессивность среды на поверхности металлов и их сплавов.

Эксперименты по воспроизведению характера обнаруженных в эксплуатации микробиологических повреждений металлов позволили установить, что глубина коррозии стали 3 в присутствии *Aspergillus niger* в 2-3 раза превышает полученную для контрольных образцов. Развитие *Bacillus* sp. на алюминиевых образцах в 3-4 раза ускоряет разрушение защитной оксидной пленки и заметно интенсифицирует коррозионный процесс.

К наиболее опасным для техники последствиям микробиологического повреждения металлов следует отнести коррозию силовых элементов конструкции изделий (шпангоуты, лонжероны, нервюры, стрингеры, силовые балки, стойки и др.). Неоднократно выявлялись случаи изменения электрических характеристик и отказов в работе отдельных элементов ЭРИ, связанные с коррозионными повреждениями металлов (штепсельные разъемы, контактные пары переключателей, токоведущие дорожки печатных плат и др.).

Экспериментально установлено, что микробиологические повреждения полимерных материалов, ЛКП, металлов и сплавов, оптических стекол заметно влияющие на работоспособность изделий, могут возникать в результате интенсивного роста микроорганизмов, происходящего при температурах 15-30°C и относительной влажности не ниже 55%.

Воздействие факторов, способствующих приведенным выше экспериментально подтвержденным случаям микробиологических повреждений, можно показать на отдельных примерах. Так, жгуты проводов БПВЛ бортовой сети самолетов нередко помещены в чехлы, изготовленные из микробиологически нестойкого материала. Микроорганизмы, развиваясь на чехлах, распространяются на электроизоляцию проводов, вызывая, в конечном счете, ее разрушение. Заселяя хлопчатобумажные мешки хранения парашютов, микроскопические грибы при определенных условиях переносятся на основное изделие, повреждая

его элементы. Микробиологическое повреждение оптических стекол возникает при их непосредственном контакте с заселенными микроорганизмами (микробиологически нестойкими) смазками и защитными чехлами.

Недостаточная эффективность дренажа подпольных отсеков самолетов типа Ту-16 позволяет скапливаться в них воде (особенно при длительном хранении самолета). Выявлены многочисленные случаи микробиологических повреждений деталей и оборудования, находящихся в этих отсеках (элементов конструкции фюзеляжа, электропроводов, штепсельных разъемов и др.).

Интенсивное развитие микробиологического повреждения силовых элементов крыла и оперения самолета, показанное ранее (лонжероны, нервюры и др.), происходит при отсутствии возможности своевременного контроля за их состоянием и невыполнении необходимых мероприятий по предупреждению и устранению возникающих повреждений. Доступ к этим элементам (для контроля и необходимой профилактики) возможен лишь при капитальном ремонте самолета.

Кроме того, возникновению рассмотренных повреждений полимеров, ЛКП и металлов способствуют негерметичности блоков, узлов и агрегатов оборудования, несвоевременное удаление различных загрязнений (например, в местах контакта оптического стекла с окантовкой или с нарезной частью крепления стекла), несоответствие микробиологической стойкости используемых материалов условиям работы изготовленных из них деталей (лакотканевая изоляция электропроводов БПВЛ), нарушение требований технологии изготовления и ремонта деталей, отсутствие в эксплуатационной и ремонтной документации целенаправленных требований по контролю и профилактике микробиологических повреждений изделий.

Таким образом, проведенная оценка микробиологической повреждаемости эксплуатирующейся техники показала высокую объективность и достоверность выявления микробиологических повреждений материалов с помощью приведенной на рис. 1 методики исследований. Определены номенклатура повреждаемых объектов (материалов, деталей, агрегатов, систем), видовой состав вызывающих

эти повреждения микроорганизмов, а также условия и факторы, способствующие возникновению и развитию повреждений.

Заключение

Предложен комплекс характеристик и методов определения основных этапов процесса микробиологического повреждения материалов техники – адгезии, роста микробных клеток и изменения свойств материалов под воздействием микроорганизмов. Характеристики и методы обеспечивают возможность установления наличия и количественной оценки интенсивности протекания этих процессов в модельном эксперименте и при исследовании проб (образцов) материалов, взятых из эксплуатации.

Экспериментально обоснована методика выявления микробиологических повреждений эксплуатирующихся материалов и изделий. Она основана на отдельном определении комплекса присущих процессу повреждения характеристик с помощью различных микробиологических, физико-химических и биохимических методов. Показана эффективность использования методики при оценке микробиологической повреждаемости эксплуатирующихся образцов техники и исследованиях причин их отказов и неисправностей в работе.

Установлено, что на работоспособность и техническое состояние изделий техники существенное влияние оказывают микробиологические повреждения следующих материалов: топлива ТС-1 (авиационный керосин), дизельного топлива ДЛ-0,2-61, бензина А-76, А-80, масла АМГ-10, МН-7,5У, смазки АМС-3, ПВХ-2, органического стекла СО-95, поливинилхлоридного пластика И-40-13, лакоткани изоляции электропроводов, алюминиевых (Д16), магниевых (МЛ-5) сплавов, стали 3, лакокрасочных покрытий АК-170, АК-70, НЦ.

Определены видовой состав микроорганизмов-деструкторов материалов, а также условия и факторы, способствующие возникновению и развитию микробиологических повреждений техники. Указанные материалы и вызывающие их повреждения микроорганизмы использовались нами в качестве объектов дальнейших исследований закономерностей каждого из этапов микробиологического повреждения.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Semenov, S. A. Biodegradation and durability of materials under the action of microorganism / S. A. Semenov, K. Z. Gumargalieva, G. E. Zaikov. – Utrecht (The Netherlands) : VSP International Science Publishers, 2003. – 199 p.
2. Moiseev, Yu. V. Chemical resistance of polymers in reactive media / Yu. V. Moiseev, G. E. Zaikov. – New York : Plenum Press, 1987. – 586 p.
3. Zaikov, G. E. Diffusion of electrolytes in polymers / G. E. Zaikov, A. L. Iordanskii, V. S. Markin. – Zeist (the Netherlands) : VNU Science Press, 1988. – 328 p.
4. Minsker, K. S. Degradation and stabilization of polymers on the base of vinylchloride / K. S. Minsker, S. V. Kolesov, G. E. Zaikov. – Oxford : Pergamon Press, Oxford. – 1988, 526 p.
5. Gumargalieva, K. Z. Biodegradation and biodeterioration of polymers: kinetic aspects / K. Z. Gumargalieva, G. E. Zaikov. – New York : Nova Science Publ., 1998. – 210 p.
6. Zaikov, G. E. Biomedical application of polymers / G. E. Zaikov. – New York : Nova Science Publ., 1996. – 207 p.
7. Iordanskii, A. L. Interaction of polymers with biologically active media / A. L. Iordanskii, G. E. Zaikov, T. E. Rudakova. – Utrecht (the Netherlands) : VSP International Science Publ., 1999. – 210 p.
8. Василенко, В. Т. Влияние эксплуатационных факторов на топливную систему самолета / В. Т. Василенко, Н. С. Черненко. – М. : Машиностроение, 1986. – 184 с.
9. Скрибачилин, В. Б. О причинах засорения фильтров топливных систем летательных аппаратов / В. Б. Скрибачилин // Проблемы безопасности полетов. – 1980. – № 4. – С. 41–44.
10. Жданова, О. А. Выявление и предотвращение биоповреждений изоляционных материалов электросетей техники. Методические рекомендации. Вып. № 6216 / О. А. Жданова, С. А. Семенов, В. Б. Скрибачилин. – М. : Ведомст. изд-во, 1991. – 48 с.
11. Комплекс методов для оценки биологического загрязнения горюче-смазочных материалов. Методические рекомендации. Вып. № 5314 / В. Б. Скрибачилин, Е. А. Лаптева, Л. К. Михайлова, С. А. Семенов. – М. : Ведомст. изд-во, 1985. – 44 с.
12. Выявление, устранение и предупреждение биозасорения ГСМ при хранении и применении на технике. Методические рекомендации. Вып. № 5476 / В. Б. Скрибачилин, Е. А. Лаптева, Л. К. Михайлова, С. А. Семенов. – М. : Ведомст. изд-во, 1986. – 20 с.
13. Методы экспериментальной микологии / Под ред. В. И. Билай. – Киев : Наукова Думка, 1982. – 550 с.
14. Шлегель, Г. Общая микробиология / Г. Шлегель. – М. : Мирб., 1987. – 566 с.
15. Курсанов, Л. И. Пособие по определению грибов из родов *Aspergillus* и *Penicillium* / Л. И. Курсанов. – М. : Медгиз, 1947.
16. Микробная коррозия и ее возбудители / Е. И. Андреюк [и др.]. – Киев : Наукова Думка, 1980. – 207 с.
17. Руководство к практическим занятиям по микробиологии / Под ред. Н. С. Егорова. – М. : Изд.-во МГУ, 1971. – 104 с.
18. Стейниер, Р. Мир микробов. Т.1 / Р. Стейниер, Э. Эдельберг, М. Ингрэм. – М. : Мир, 1979. – 259 с.
19. Биолюминесценция / Л. Ю. Бровка [и др.] // Биохимия. – 1978. – № 5. – 43 с.
20. Практикум по микробиологии / Под ред. Н. С.Егорова. – М. : МГУ, 1986. – 184 с.
21. Диксон, Д. Ферменты / Д. Диксон, Э. Уэбб. – М. : Изд-во иностр. лит., 1968. – 731 с.
22. Новые методы анализа аминокислот, пептидов и белков. – М. : Мир, 1974. – 462 с.
23. Биохимические аспекты проблемы защиты промышленных материалов от повреждения микроорганизмами / А. А. Анисимов [и др.] // Актуальные вопросы биоповреждений. – М., 1983. – С. 77–101.
24. Мейнелл, Д. Экспериментальная микробиология / Д. Мейнелл, Э. Мейнелл. – М. : Мир, 1967. – 347 с.
25. Разработка и производство наукоемкого оборудования для генноинженерных, биотехнологических и медико-биологических исследований : Научно-прикл. разраб. (генет., селекция, биотехнол.) / Ин-т цитол. и генет. СО РАН. –Новосибирск, 1997. – 86 с.
26. Роскин, Г. И. Микроскопическая техника / Г. И. Роскин. – М. : Сов. наука, 1967. – 447 с.
27. Гречушкина, Н. Н. Рост микроорганизмов на средах с нефтяными топливами / Н. Н. Гречушкина, И. Т. Нетте // Вестн. Моск. ун-та. Сер. биологии и почвоведения. – 1968. – № 2. – С. 122–124.

28. Карнаухов, В. Н. Люминесцентный спектральный анализ клетки / В. Н. Карнаухов. – М. : Наука, 1978. – 209 с.
29. Ланецкий, В. П. Выявление грибной инфекции в растительных тканях методом люминесцентной микроскопии / В. П. Ланецкий, Б. В. Филин-Колдаков, Л. П. Пospelova // Микология и фитопатология. – 1976. – Т. 10, вып. 6. – С. 516–518.
30. Мейсель, М. Н. Применение люминесцентной микроскопии для быстрого обнаружения патологических изменений в тканях и органах / М. Н. Мейсель, А. В. Глуткина // Докл. АН СССР. – 1953. – Т. 3, № 91. – С. 647–654.
31. Белякова, Л. А. О микроорганизмах, развивающихся на авиационных материалах и топливных средах / Л. А. Белякова // Биологическое повреждение материалов. – 1979. – С. 28–32.
32. Мехтиева, Н. А. Распространение микромицетов в топливных системах самолетов / Н. А. Мехтиева, Л. И. Кандинская // Биологические повреждения строительных и промышленных материалов: материалы Всесоюз. школы-семинара, Киев, 1978. – Киев, 1978. – С. 112–114.
33. Thomas, A. H. *Aspergillus fumigatus* and supersonic aviation. 2. Corrosion / A. H. Thomas, E. S. Hill // Int. Biodeterior. Bull. – 1976. – Vol. 12, № 4. – P. 116–119.
34. Gibbs, C. P. The rate of microbial degradation of oil in a beach gravel column / C. P. Gibbs, S. I. Davies // Microbial. Ecol. – 1976. – Vol. 3, № 1. – P. 55–64.
35. Калаганов, В. А. Определение степени микробного поражения смазочно-охлаждающих жидкостей / В. А. Калаганов, В. И. Каган, В. З. Закирова // Химия и технология топлив и масел. – 1985. – № 8. – С. 44–46.
36. Звягинцев, Д. Г. Взаимодействие микроорганизмов с твердыми поверхностями / Д. Г. Звягинцев. – М. : Изд-во МГУ, 1973. – 47 с.
37. Зимон, А. Д. Адгезия пыли и порошков / А. Д. Зимон. – М. : Химия, 1967. – 43 с.
38. Parbery, D. J. Biological problems in jet aviation fuel and the biology of *Amorphotheca resinae* / D. J. Parbery // Mater. Org. – 1971. – Vol. 6. – P. 161–208.
39. Защита нефтяных дистиллятных топлив от микроорганизмов / Т. П. Вишнякова [и др.] // Биокоррозия, биоповреждения, обрастание. – М., 1976. – С. 83–89.
40. Методика лабораторных испытаний антимикробной активности добавок к нефтяным топливам / И. Л. Работнова [и др.] // Биологические повреждения строительных и промышленных материалов. – М., 1973. – С. 58–68.
41. Поражаемость микроорганизмами нефтяных дистиллятных топлив и их защита / Н. С. Егоров [и др.] // Биологические повреждения строительных и промышленных материалов: матер. Всесоюз. школы-семинара, Киев, 1978. – Киев, 1978. – С. 136–137.
42. Арутюнов, В. Д. Приготовление постоянных препаратов для люминесцентной микроскопии / В. Д. Арутюнов // Журн. общ. Биологии. – 1956. – Т. 17, № 1. – С. 79–83.
43. Edmons, P. Selection of test organisms for use in evaluating microbial inhibitors in fuel-water systems / P. Edmons // Appl. Microbiol. – 1965. – Vol. 13, № 5. – P. 823–824.
44. Miller, T. Z. Utilisation of gas oil by yeast culture / T. Z. Miller, M. X. Jonson // Sotchnol. Bioans. – 1966. – Vol. 8, № 4. – P. 567–580.
45. Елифанова, О. И. Метод радиографии в изучении клеточных циклов / О. И. Елифанова, В. В. Терспих. – М. : Наука, 1969. – 119 с.
46. Илков, А. Т. Изотопные методы в микробиологии / А. Т. Илков // Экспериментальная микробиология / Под ред. С. В. Бырдарова. – София : Медицина и физкультура, 1965. – С. 166–195.
47. Hill, E. C. Biodeterioration of petroleum products / E. C. Hill // Microbial aspects of the deterioration of materials. – London, 1975. – P. 127–136.
48. Ленинджер, А. Молекулярные основы структуры и функции клетки / Л. Ленинджер. – М. : Мир, 1974. – 957 с.
49. Страйер, Л. Биохимия. Т.1 / Л. Страйер. – М. : Мир, 1984. – 232 с.
50. Lowry, O. H. Protein measurement with the Folin phenol reagent / O. H. Lowry, N. J. Rosenbrough, A. L. Furr // J. Biol. Chem. – 1951. – Vol. 193, № 1. – P. 265–275.
51. Пат. РСТ С 12Q1/04 WO 9504157 А 1. Способ идентификации микроорганизмов с помощью по меньшей мере двух хромогенов. (РСТ). 09.02.95г.
52. Оценка различных количественных методов определения белков, нативных и обработанных формальдегидом / Н. В. Кондакова [и др.] // Вопр. мед. химии. – 1983. – Т. 29, № 2. – С. 134–140.
53. Fazokas, S. Two new staining procedures for quantitative estimation of proteins on

- electrophoretic strips / S. Fazokas., R. G. Webeter, A. Datymer // Biochim. Biophys. Acta. – 1963. – Vol. 71, № 2. – P. 377–391.
54. Казицына, Л. А. Применение УФ-, ИК-, ЯМР- и масс-спектропии в органической химии / Л. А. Казицына, Н. Б. Куплецкая. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1979. – 240 с.
55. Ультрафиолетовая флуоресценция клетки / Н. А. Черноградская [и др.]. – Л. : Наука, 1978. – 215 с.
56. Rippahn, J. Quantitation in high-performance micro-thin layer chromatography / J. Rippahn, H. J. Halpasp // J. Chromatogr. – 1975. – Vol. 112. – P. 81–96.
57. Ахрем, А. А. Тонкослойная хроматография / А. А. Ахрем, А. И. Кузнецова. – М. : Наука, 1964. – 175 с.
58. Determann, H. Neue anwendungen der Dunnochlchtchromatographte / H. Determann, T. Wleland, G. Lubon // Experientia. – 1962. – Bd. 18, № 9. – P. 430–432.
59. Лабораторное руководство по хроматографическим и смежным методам. Ч. 1 и 2. / Под ред. О. Микша. – М. : Мир, 1982.
60. Поморцева, Н. В. Образование витамина В₆ грибом *Cladosporium resinae* / Н. В. Поморцева, И. Т. Нетте, Л. И. Либер // Прикл. биохимия и микробиология. – 1977. – Т. 13, вып. 5. – С. 718–721.
61. Юденфренд, С. Флуоресцентный анализ в биологии и медицине / С. Юденфренд. – М. : Мир, 1965. – 484 с.
62. Файгль, Ф. Капельный анализ органических веществ / Ф. Файгль. – М. : Госхимиздат, 1962. – 836 с.
63. Yamada, K. Utilisation of hydrocarbons by microorganisms: screoning of alkane assimilating fungl and their oxidation products from alcans / K. Yamada, J. Torigoe // Agr. Chem. Soc. – 1966. – Vol. 40, № 3. – P. 364–370.
64. Lin, H. E. Formation of organic acids and ergosterol from n-alkanes by fungi isolated from oil fillds in Japan / H. E. Lin, N. Jida, H. IIsuca / J. Ferment. Technol. – 1971. – Vol. 49, № 3. – P. 771–777.
65. Методика количественной бумажной хроматографии сахаров, органических кислот и аминокислот / Под ред. О. А. Семихатова. – Л. : Изд-во АН СССР, 1962. – 85 с.
66. Циперович, А. С. Ферменты / А. С. Циперович. – Киев : Техника, 1971. – 354 с.
67. Левина, Л. Ш. Определение активности глюкозооксидазы экспресс-методом / Л. Ш. Левина, Е. И. Лебедева // Науч. техн. информ. Винодельч. Промышленность. – 1966. – Вып.4. – С. 6–9.
68. Hill, E. C. A simple repid microbiological test for aircraft fuel / E. C. Hill // Aircraft Eng. – 1970. – № 7. – P. 24–26.
69. Биоповреждения / Под ред. В. Д. Ильичева. – М. : Высшая школа, 1987. – 352 с.
70. Герасименко, А. А. Защита машин от биоповреждений / А. А. Герасименко. – М. : Машиностроение, 1984. – 111 с.