

Определение токсичности компонентов поликристаллической солнечной панели

М. И. Семенова, П. В. Манахова, И. В. Веженкова, К. А. Порохненко
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹ smi-2409@yandex.ru, ² caterpillar921@gmail.com, ³ vezhenkova@yandex.ru, ⁴ ksenyawww@mail.ru

Аннотация. Панели, которые аккумулируют энергию Солнца, разработанные для солнечной энергетики, являются относительно новыми и мало изученными устройствами. На сегодняшний день, химическая инертность и токсичность некоторых веществ, из которых состоит панель, не изучена. В статье рассматривается бывшая в эксплуатации поликристаллическая солнечная панель для исследования интегральной токсичности отдельных компонентов. Этими компонентами являются полимерные материалы EVA (этиленвинилацетат) и Tedlar (поливинилфторид). Результаты эксперимента позволяют определить уровень опасности компонентов для окружающей среды.

Ключевые слова: альтернативные источники энергии; поликристаллические солнечные панели; фотоэлементы; биотестирование; токсичность

I. ВВЕДЕНИЕ

Солнечная энергия – один из наиболее популярных видов альтернативной энергетики на сегодняшний день. В 2019 году с помощью солнечных панелей было получено 2,7 % мировой электроэнергии. И можно полагать, данная цифра будет только расти со временем, так как все больше стран отдает предпочтение возобновляемым источникам энергии. Более того, Великобритания предполагает отказаться от газа к 2035 году.

Солнечные панели – это фотоэлементы, способные преобразовывать солнечную энергию в электрический ток. Важность данного изобретения тяжело переоценить, так как оно используется во многих отраслях: медицине, телекоммуникации, связи, микроэлектронике и т. д. А в 50х годах прошлого века Россия и США даже запустили спутники с использованием солнечных панелей. Тем не мене, если сама солнечная энергия и является возобновляемым, экологически чистым ресурсом, то солнечные панели со временем выходят из строя, и их необходимо заменять новыми.

В среднем срок эксплуатации солнечной панели составляет от 20 до 30 лет, после чего происходит деградация модуля. Тому есть целый ряд причин: воздействие ультрафиолета и влаги, разрушение компонентов устройства, например, этиленвинилацетатной пленки в кристаллических солнечных панелях, и т. д.

Поскольку солнечные панели вошли в эксплуатацию относительно недавно, то многие страны еще не располагают развитой системой их утилизации. Для 90% всех солнечных панелей последней стадией жизни становится захоронение на полигонах. А ведь некоторые

составляющие, такие как фотогальванический элемент, рама, могут быть использованы повторно.

Помимо главного фотогальванического элемента и стекла, в состав кристаллических солнечных панелей входят полимерные материалы EVA (этиленвинилацетат) и Tedlar (поливинилфторид), токсичность и химическая инертность которых еще не изучены. Как уже было упомянуто ранее, солнечная энергетика – относительно молодая отрасль, и вывод солнечных панелей из эксплуатации занимает много времени. В результате, у ученых пока просто не было возможности тщательно изучить влияние отработанных компонентов солнечных панелей на окружающую среду и, следовательно, на здоровье человека.

Загрязнение компонентами окружающей среды – одна из глобальных экологических проблем, которая требует развития и применения методов, направленных на оценку опасности отдельных химических веществ и их смесей, обнаружения их в окружающей среде, оценку влияния спектра поллютантов на живые системы разного уровня и других прикладных природоохранных приемов.

Получение объективных и достоверных результатов биотестирования зависит от множества факторов реализации биотестов: свойств тестируемой среды, особенностей выбранных тест-организмов и оцениваемых тест-функций, условий и алгоритмов проведения экспериментов.

II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1. Объекты исследования

В качестве объекта исследования были выбраны отработанные поликристаллические солнечные панели, определялась зависимость токсичности компонентов данных панелей (EVA, Tedlar®, стекло и кремний) от 3х факторов – размера фракции компонентов отработанных солнечных панелей, времени выдержки в дистиллированной воде и температуры окружающей среды. Рассматривались мелкая ($f < 5$ mm) и крупная фракции отходов (5 mm $< f < 10$ mm), диапазон температуры (+4°C и +35°C) и время выдержки (1 и 7 суток). Для проведения исследования была выполнена особая пробоподготовка, которая заключалась в последовательном выполнении следующих шагов:

1. демонтаж отработанной солнечной панели и выделение необходимых компонентов: был произведен механический демонтаж панели, выделены компоненты, такие как стекло, кремний и полимеры EVA, Tedlar®;

2. фракционирование: измельчение компонентов с помощью роторной мельницы марки «Retsch»;
3. отбор навески и смешивание с дистиллированной водой;
4. перемешивание смеси: экстрагирование проводилось в течение 2-х часов на аппарате для встряхивания жидкости.
5. выдержка, отстаивание и фильтрация надосадочной жидкости: подготовленные смеси каждого вещества выдерживались при температурах окружающей среды 4°C и 35°C в течении 1 и 7 суток. После чего надосадочная жидкость была профильтрована через бумажный фильтр.

2. Метод биотестирования с использованием хемотоксической реакции инфузорий

Для определения токсичности в данном исследовании был выбран биотестовый анализ, являющийся одним из основных методов выявления токсичности среды при помощи тест – объектов. Биотестирование направлено на оценку суммарного токсического действия всего комплекса загрязняющих веществ, содержащихся в исследуемой среде (пробе). В результате лабораторного исследования с помощью тест-организмов устанавливается токсичность среды как интегральный показатель ее загрязнения. Основная задача биотестирования – установить наличие или отсутствие интегральной токсичности. Основным принципом биотестирования заключается в одновременном проведении токсикологического эксперимента по определению воздействия на тест-организмы исследуемой пробы и контрольной среды, не содержащей токсических веществ, и последующем сравнении полученных результатов. При биотестировании главным «инструментом» исследователя являются живые тест-организмы – это особи определенного вида, благодаря ответным реакциям которых характеризуют качество тестируемой среды. Тест-объекты (тест-организмы), по определению Л. П. Брагинского – «датчики» сигнальной информации о токсичности среды и заменители сложных химических анализов, позволяющие оперативно констатировать факт токсичности среды, независимо от того, обусловлена ли она наличием одного точно определяемого аналитически вещества или целого комплекса аналитически не определяемых веществ [Брагинский Л.П. Методологические аспекты токсикологического биотестирования на *Daphnia magna* St. и других ветвистоусых ракообразных (критический обзор) // Гидробиологический журнал. 2000. Т. 36, No 5. С. 50-70]. Принцип «батареи биотестов» на сегодняшний день является основным при планировании экологических исследований, включающих биотестирование различных сред. Он заключается в использовании нескольких тест-организмов различной систематической принадлежности, что позволяет выявлять наиболее уязвимое звено биоты.

В данном исследовании использовались следующие тест-организмы: 1) *Paramecium caudatum*; 2) *Chlorella vulgaris* Beijer, 3) *Tetrahymena pyriformis*.

2.1. Особенности исследования с использованием *Paramecium caudatum*

реакции простейших на воздействие внешней среды можно рассматривать как более простую модель, по сравнению с многоклеточными организмами [193]; *P. caudatum* – эукариотические организмы, как большинство организмов на планете, поэтому их реакции могут быть сопоставимы с цитологическим ответами более сложно организованных животных.

Основываясь на способности тест-объектов проявлять реакцию на присутствие опасных для их жизнедеятельности веществ в водных вытяжках из отходов, и перемещаться в направлении изменения концентрации этих веществ (хемотаксическая реакция), был разработан метод определения токсичности [10], который и является основой для проведения исследований.

Для осуществления хемотаксической реакции необходимо наличие стабильного во времени градиента концентраций химических веществ. Наслоение в вертикальной кювете на взвесь *Paramecium caudatum* в загустителе испытуемой жидкости позволяет создать подобный градиент. Так образуется стабильная граница раздела в измерительной кювете, которая сохраняется на протяжении всего времени биотестирования. Данный раздел не ограничивает свободное перемещение инфузорий, поэтому они двигаются в предпочтительном для них направлении. Для распределения инфузорий необходимо 30 минут после создания двух зон. Массовое перемещение организмов в верхние слои жидкости – важная особенность поведенческой реакции *Paramecium caudatum* [10–15]. Скопление тест-организмов в верхней зоне кюветы свидетельствует об отсутствии токсических веществ в анализируемой пробе. Отличной чертой перераспределения *Paramecium caudatum* в кювете свидетельствует о токсичности анализируемой пробы. Сравнивая число клеток инфузории в контрольной пробе, в которой отсутствуют токсические вещества, и в анализируемой, был получен критерий токсического действия. Путем вычисления соотношения числа клеток инфузорий, содержащихся в контрольной и анализируемой пробах, получается количественная оценка параметра тест-реакции, которая характеризует токсическое действие. Данная величина носит название индекс токсичности (Т) и является безразмерной.

$$T = \frac{|I_{av.c} - I_{av.s}|}{I_{av.c}} * K, \quad (1)$$

где $I_{av.c}$ – средние показания прибора для контрольных образцов, $I_{av.s}$ – средние показания для испытуемых образцов, K – коэффициент разбавления образца (коэффициент) [10,11].

Согласно ERD F 16.3.16-10 в зависимости от значения показателя пробы классифицируют по их токсичности на 3 группы:

- I. Приемлемая токсичность ($0.00 < T \leq 0.40$).
- II. Умеренная токсичность ($0.40 < T \leq 0.70$).
- III. Высокая степень токсичности ($T > 0.70$) [10]

2.2. Особенности исследования с использованием *Chlorella vulgaris* Beijer

Методика основана на регистрации различий в величине оптической плотности тест-культуры водоросли хлорелла, выращенной на среде, не содержащей токсических веществ (контрольная проба) и в тестируемых пробах вод и водных вытяжек (опытная проба), в которых эти вещества могут присутствовать. Измерение оптической плотности суспензии водоросли позволяет оперативно контролировать изменение численности клеток в контрольном и опытном вариантах токсикологического эксперимента, проводимого в специализированном многокюветном культиваторе.

Измерения проводят на приборе ИПС-3 через 22 часа культивирования водорослей Хлорелла. В первую очередь проводятся снятие контрольных проб. Для этого флаконы с суспензией водорослей поочередно загружают в прибор. Эксперимент можно считать успешным, если величины оптической плотности в контрольных флаконах были не ниже 0,120. Если оптическая плотность тест-культуры в этих флаконах регулярно превышает величину 0,180, следует на 1–2 часа сократить время культивирования.

Водные вытяжки, содержащие менее 1 % взвешенных веществ, пропускают через бумажный фильтр, что является достаточным для проведения исследования.

Для проведения анализа необходимо использовать 2 мл тест-культуры, которые переносятся в стаканы с 48 мл контрольной пробы и тестируемой. Далее полученный раствор в размере 6 мл разливают во флаконы реакторы и проводят исследования на приборе ИПС-3.

Для определения индекса токсичности производят расчет по (2).

$$T = \frac{D_K - D_0}{D_K} * 100\%, \quad (2)$$

где D_K , D_0 – значения прибора, полученные для концентраций инфузорий в контрольной и опытной пробах.

Критерием токсичности пробы является снижение на 20 % и более (подавление роста) или увеличение на 30 % и более (стимуляция роста) величины оптической плотности культуры водоросли, выращиваемой в течение 22 часов на тестируемой воде по сравнению с ее ростом на контрольной среде, приготовленной на дистиллированной воде.

ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04, 16.1:2:2.3:3.7-04

2.3. Особенности исследования с использованием *Tetrahymena pyriformis*

Тетрахимены обладают уникальными свойствами, благодаря которым являются наиболее подходящими для определения токсичности продуктов питания, что не позволяют осуществлять другие представители простейших. Также свойства тетрахимен позволяют использовать их в численных методах и методах учета, основанных на хемотаксической реакции, наряду с наиболее распространёнными тест-культурами. Отмечается, что тетрахимены имеют сходство с высшими животными по ряду особенностей метаболизма, что дает возможность использования

культуры для экспресс-анализов токсичности, заменяя более сложные анализы на мышах. Также данный вид простейших обладает геотаксической и хемотаксической реакцией, что дает возможно применения приборных методик, предназначенных для парамеций.

Среди преимуществ использования методик биотестирования с применением тест-культуры тетрахимен стоит выделить быстроту анализа, относительную простоту выращивания культуры и их дешевизну. Наибольшее распространение тетрахимены получили при исследовании токсичности продуктов питания, а также кормов. [12]

Помимо использования тетрахимен для определения токсичности продуктов питания, проводились исследования, доказывающие целесообразность применения данной тест-культуры при биотестировании окружающей среды, загрязненной наиболее распространёнными токсикантами. К примеру, тетрахимены обладают схожей чувствительностью к поверхностно-активным веществам, как и парамеции. А сравнение чувствительности этих же культур к нефтепродуктам, показало, что гораздо более чувствительными являются тетрахимены.

Для проведения анализов с помощью тетрахимены использовалась методика, описанная в п. 2.2.1. Оценивалась хемотоксическая реакция данного типа тест-организмов с помощью прибора «Биотестер – 2М».

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Результаты определения индекса токсичности опытных образцов с П.К.

Первый этап исследования – биотестирование с использованием в качестве тест-организмов инфузорий Парамеции. Опираясь на опыт, полученный при проведении предыдущих исследований [16, 17], была использована методика [10]. Каждая из исследуемых проб анализировалась в 3-х кюветках, с каждой кюветки снималось по 10 показаний прибора «Биотестер – 2М». Всего было подготовлено и обследовано 1500 проб, по которым получены 48 измерений интегральной токсичности. Подготовленные по описанной методике в пункте 2.1 пробы были поочередно помещены в кюветный модуль прибора и зафиксированы показания прибора. Был рассчитан индекс токсичности по формуле (1). Результаты представлены на рис. 1 и рис. 2. Как видно из полученных диаграмм, при выдержке в дистиллированной воде в течение суток у «стекло» и Tedlar® наблюдается превышение показания 0,4, что свидетельствует о возможном негативном воздействии рассматриваемых компонентов на окружающую среду. Также при времени выдержки в течении 7 дней наблюдается превышение порогового значения ($T=0,4$) у всех компонентов, кроме кремния. Следовательно, даже на данном этапе исследования можно сделать вывод, что захоронивание отработанных поликристаллических панелей является нежелательным.

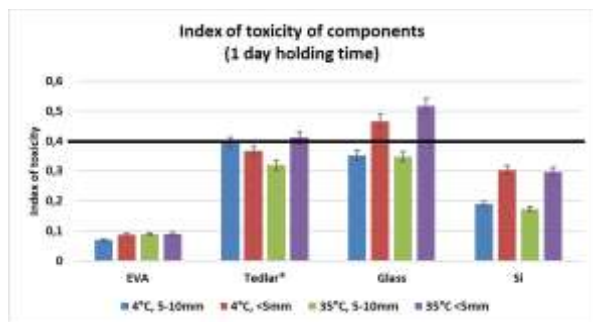


Рис. 1. Усредненный индекс токсичности компонентов при выдержке в дистиллированной воде в течение 1 дня (Тест-объект – Парамеции)

Кроме проведения биотестового анализа с полученными значениями был проведен регрессионный анализ на основе метода наименьших квадратов для выявления зависимостей токсичности компонентов отработанных солнечных панелей от факторов окружающей среды.

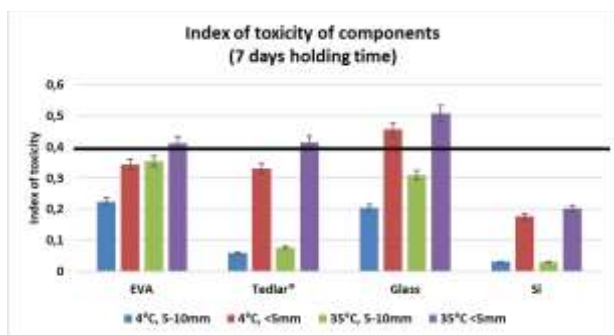


Рис. 2. Усредненный индекс токсичности компонентов при выдержке в дистиллированной воде в течение 7 дней (Тест-объект – Парамеции)

Регрессионный анализ полученных данных (индексов токсичности) начинался с проверки нулевой гипотезы, заключающейся в том, что рассматриваемые факторы не оказывают влияния на токсичность. Этому соответствует простая модель, представленная формулой 3.

1. Простая модель:

$$Y = b + \varepsilon \quad (3)$$

где Y – токсичность, отклик эксперимента, b – матожидание токсичности, ε – ошибка эксперимента.

С помощью программного пакета MSExcel была рассчитана оценка дисперсии токсичности для каждого компонента

Адекватность простой модели проверялась путем сравнения с моделью, включающей влияние факторов окружающей среды на индекс токсичности.

2. Модель, включающая влияние факторов, описана в формуле (4):

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + \varepsilon \quad (4)$$

где Y – токсичность, b – неизвестные коэффициенты модели, x_1 – время выдержки, x_2 – температура, x_3 – размер фракции, ε – ошибка эксперимента.

Для оценки неизвестных коэффициентов модели использовался регрессионный анализ на основе метода наименьших квадратов.

В табл. 2 приведены полученные оценки дисперсий ошибок эксперимента для двух моделей ($D^*(y)$ – оценка дисперсии токсичности для простой модели, S^2 – оценка дисперсии токсичности для сложной модели).

ТАБЛИЦА I Оценка дисперсии экспериментальной ошибки

	S^2	$D^*(y)$	$F = D^*(y)/S^2$
EVA	0,0019	0,0197	10,35
Tedlar®	0,0004	0,0028	69,53
Стекло	0,0011	0,0168	15,29
Кремний	0,0021	0,0117	5,6

Для всех компонентов оценка дисперсии ошибки эксперимента уменьшилась ($F > 1$). Для проверки значимости этого уменьшения была проверена гипотеза о не влиянии рассматриваемых факторов на токсичность компонентов ($H_0: S^2 = \psi^2$). При выполнении нулевой гипотезы, распределение случайной величины F будет зависеть только от чисел степеней свободы числителя и знаменателя. Это распределение носит название F -распределения или распределения Фишера.

После подтверждения гипотезы были построены доверительные интервалы для коэффициентов усложненной модели. Полученные доверительные интервалы представлены в табл. 3 и табл. 4. Коэффициент Стьюдента $t = 3,31$ взят из специальных таблиц с числом степеней свободы $f = 8$ и уровнем значимости $0,05$. Оценки дисперсий коэффициентов регрессии взяты из приведенных выше оценок ковариационных матриц [18–19].

$F > F^*$, следовательно гипотеза о равенстве дисперсий противоречит экспериментальным данным для всех компонентов. Следовательно, факторы окружающей среды будут влиять на индекс токсичности компонентов.

ТАБЛИЦА II Доверительные интервалы для коэффициентов сложной модели полимерных компонентов

EVA	Tedlar®
$0.169 < b_0 < 0.232$	$0.197 < b_0 < 0.227$
$0.093 < b_1 < 0.152$	$0.149 < b_1 < 0.172$
$0.003 < b_2 < 0.061$	$0.005 < b_2 < 0.033$
$-0.048 < b_3 < 0.014$	$-0.024 < b_3 < 0.006$

ТАБЛИЦА III Доверительные интервалы для коэффициентов сложной модели для стекла и кремния

Glass	Si
$0.293 < b_0 < 0.339$	$0.088 < b_0 < 0.152$
$0.085 < b_1 < 0.129$	$0.068 < b_1 < 0.129$
$0.005 < b_2 < 0.049$	$-0.029 < b_2 < 0.031$
$-0.076 < b_3 < -0.03$	$-0.046 < b_3 < 0.018$

По результатам математической обработки выявлена значимая зависимость ($\alpha = 0.05$) индекса токсичности от времени выдержки для всех компонентов (доверительные интервалы коэффициента b_1 для всех компонентов не содержат значение «ноль»). Зависимость от температуры не выявлена для кремния (т.к. в доверительный интервал для коэффициента b_2 рассматриваемого компонента попадает значение ноль), но присутствует для EVA, Tedlar®, glass. Зависимость от размера фракции отмечена только для компонента

«glass» (уменьшение индекса токсичности с увеличением размера фракции).

Тогда функции зависимости в нормированных факторах имеют следующий вид:

1) EVA

$$y=0,201+0,123x_1+0,032x_2$$

2) Tedlar®

$$y=0,212+0,158x_1+0,019x_2$$

3) Стекло

$$y=0,316+0,107x_1+0,027x_2-0,053x_3$$

4) Кремний

$$y=0,12+0,099x_1$$

Данный этап исследования позволил в последующих экспериментах использовать только один тип фракции – мелкую (т. к. только у стекла наблюдалась зависимость изменения токсичности от размера фракции). Соответственно, пробоподготовка для последующих анализов включала в себя следующие этапы:

1) демонтаж отработавшей солнечной панели и выделение необходимых компонентов (стекло, кремний, EVA, Tedlar®);

2) измельчение компонентов ($f < 5 \text{ mm}$);

3) отбор навески и смешивание с дистиллированной водой;

4) перемешивание смеси;

5) выдержка, отстаивание и фильтрация: температуры окружающей среды 4°C и 35°C, время выдержки в дистиллированной воде в течение 1 и 7 суток.

3.2 Результаты определения индекса токсичности опытных образцов с хлореллой

Подготовленные по представленной выше измененной методике пробы были поочередно помещены в кюветный модуль прибора ИПС – 3 и зафиксированы показания прибора. Критерием токсичности пробы в данном виде биотестового анализа является снижение средней величины оптической плотности по сравнению с контрольным вариантом на 20 % и более в случае подавления роста тест-культуры. Во время исследования выполнено пять серий экспериментов с каждым сочетанием параметров. Результаты усреднены и представлены на рис. 3 и рис. 4.

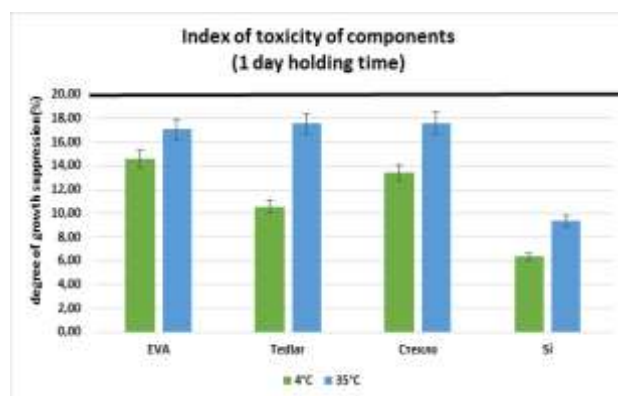


Рис. 3. Усредненный индекс токсичности компонентов при выдержке в дистиллированной воде в течение 1 дня (Тест-объект – Хлореллы)

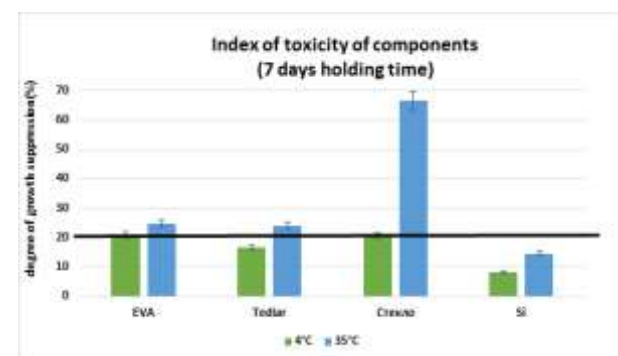


Рис. 4. Усредненный индекс токсичности компонентов при выдержке в дистиллированной воде в течение 7 дней (Тест-объект – Хлореллы)

При проведении исследований с данным тест-организмом (Хлореллы) получаются следующие результаты:

- при времени выдержки в дистиллированной воде равному 1 дню ни один из рассматриваемых показателей не превысил порогового значения. Это означает, что такие пробы являются безвредными для окружающей среды.
- при 7 дневной выдержке в дистиллированной воде наблюдаются превышения порогового значения практически у всех компонентов (исключение составляет кремний и проба Tedlar®, полученная при температуре окружающей среды равной 4 °C).

Как и предшествующие анализы с использованием Парамеции данный тип исследования выявил нежелательное захоронение солнечных панелей, в связи с ростом индекса токсичности при длительном воздействии водной среды на компонент.

3.3 Результаты определения индекса токсичности опытных образцов с Тетрахименами

При исследовании с Тетрахименами использовалась аналогичная методика, как с Парамециями [10], за исключением вариативности проб (т. к. первоначальные исследования позволили исключить крупную фракцию). Подготовленные пробы (как в исследовании с использованием Хлореллы) пробы были поочередно помещены в кюветный модуль прибора «Биотестер–2М»

и зафиксированы показания прибора. Был рассчитан индекс токсичности по формуле (1). Результаты представлены на рис. 5 и рис. 6. Также как и в случае с Парамециями, пороговое значение индекса токсичности равно 0,4. ($T=0,4$). При превышении данного значения проба не может считаться безопасной для окружающей среды, попадание данного компонента может оказать негативное воздействие на биосферу.

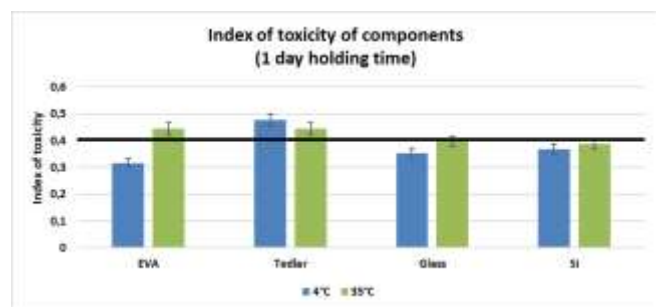


Рис. 5. Усредненный индекс токсичности компонентов при выдержке в дистиллированной воде в течение 1 дня (Тест-объект – Тетрахимены)

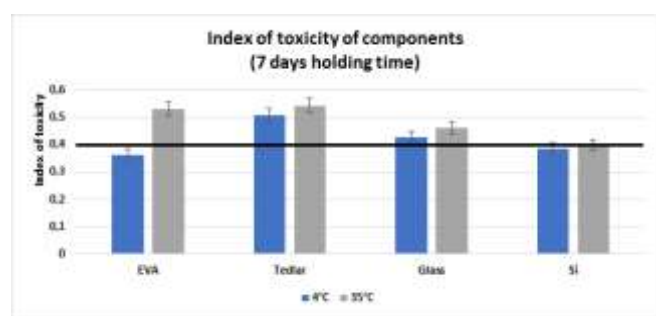


Рис. 6. Усредненный индекс токсичности компонентов при выдержке в дистиллированной воде в течение 7 дней (Тест-объект – Тетрахимены)

Исходя из результатов, представленных на рисунках, можно сделать вывод, что попадание компонентов в окружающую среду может привести к её загрязнению: показания индекса токсичности превышают пороговые значения уже при односуточном времени выдержки. Исключение составляет компонент «кремний», индекс токсичности которого ни при одном эксперименте не превысил значение $T=0,4$. Следовательно, исследование с использованием Тетрахимен подтверждает гипотезу, что захоронение солнечных панелей нежелательно.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проведении исследования, цель которого определить зависимость интегральной токсичности компонентов бывшей в эксплуатации поликристаллической солнечной панели (стекло и кремний, а также полимеры EVA и Tedlar), был проведен целый ряд опытов с использованием метода биотестирования. В эксперименте учитывались такие факторы, как размер фракции, время экспозиции фрагментов солнечной панели в дистиллированной воде и температура. Экспериментально полученные данные были проверены аналитически с помощью регрессионного анализа, основанного на методе наименьших квадратов. Численный расчет показал, что индекс токсичности всех составляющих солнечной панели в значительной степени ($\alpha=0.05$) зависит от

времени выдержки. Значение индекса токсичности тем больше, чем дольше выдержка. Таким образом, можно сделать вывод, что захоронение является не самым подходящим способом утилизации отработанной солнечной панели. Зависимость уровня токсичности от размера фракции была зарегистрирована только для стекла. На основании этого в дальнейших изучениях можно проводить опыты, используя только мелкую ($f<5mm$) фракцию EVA, Tedlar и кремния. Зависимость уровня токсичности от температуры была выявлена для всех компонентов кроме кремния. Особый интерес представляет взаимосвязь индекса токсичности EVA и Tedlar с температурой. Согласно результатам сравнительного анализа, зависимость практически идентична. Однако разброс экспериментальных значений для Tedlar относительно линии аппроксимации слегка больше, что позволяет полагать, что в составе полимера присутствуют примеси. Предположительно, в состав примесей могут входить фтор или сера, однако для точного определения природы примесей необходимо проводить дополнительные исследования.

Последующие исследования с использованием других тест-организмов (Хлореллы и Тетрахимены) подтвердили данную гипотезу. Во всех исследованиях наблюдались превышения пороговых значений при 7-дневном времени выдержки (7 days holding time). Исключение составляет только компонент «Si». При проведении исследования для данного компонента не наблюдалось превышение пороговых значений.

Таким образом, результаты показали, что компоненты бывшей в эксплуатации солнечной панели потенциально опасны для окружающей среды. Во избежание негативных последствий от захоронения отработанных деталей, принятые сегодня методы утилизации рекомендуется пересмотреть. Результаты экспериментов могут быть использованы в процессе разработки не только новой методики утилизации солнечных панелей, но и более сложной математической модели. В будущем планируется проведение опытов с целью наработки экспериментальных данных и подтверждения выявленной тенденции изменения зависимости индекса токсичности от температуры и времени экспозиции для других значений параметров. Конечной целью этих исследований является разработка численной модели с использованием более сложных математических операций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Р. Дэн, Н. Л. Чанг, З. Оуян, К. М. Чонг Обзоры возобновляемых и устойчивых источников энергии, 109, 532–550 (2019)
- [2] Цусер А., Рехбергер Х., Рассмотрение доступности ресурсов в стратегиях развития технологий: тематическое исследование фотогальваники. Ресурсы, сохранение и переработка Том 56, Выпуск 1, 56-65 (2011)
- [3] Кейити Комото, Джин-Сок Ли, Управление прекращением срока службы фотоэлектрических панелей: тенденции в технологиях переработки фотоэлектрических модулей. IEA PVPS Task12, Подзадача 1, Переработка. Отчет IEA-PVPS T12-10. (2018)
- [4] Yan Xu, Jinhui Li, Quanyin Tan, Anesia Lauren Peters, Congren Yang, Глобальное состояние переработки отходов солнечных панелей: обзор, Waste Management 75, 450–458 (2018)
- [5] Чой Дж.К., Фтенакис В., Environ. Проектирование и оптимизация инфраструктуры рециркуляции фотоэлектрических элементов, Науч. Технология 44, 22, 8678–8683, (2010)
- [6] Тихановская Г.А., Машихина Ю.В. Биологический экологический контроль (ВоГУ, Вологда, 2016)

- [7] Чеснокова К.М., Чугай Н.В. Биологические методы оценки качества объектов окружающей среды (Изд-во ВлГУ, Владимир, 2008)
- [8] Гелашвили Д.Б., Безель В.С., Безруков М.Е., Романова Е.Б., Силкин А.А., Нижегородцев А.А. Принципы и методы экологической токсикологии (Издательство ННГУ, Нижний Новгород, 2015)
- [9] Бубнов А.Г., Буймова С.А., Бубнов А.А. Гуцин, Т.В. Извекова, Биотест-анализ - комплексный метод оценки качества объектов окружающей среды (ГОУ ВПО Иван. госхим. техн. ун-т, Иваново, 2007)
- [10] ЭРД Ф 16.3.16-10 «Методика определения токсичности отходов производства и потребления экспресс-методом с использованием прибора серии Биотестер» (2015)
- [11] ЭРД Ф 16.3.12-07 «Методика определения токсичности золошлаковых отходов методом биотестирования на основе выживаемости парамеций и церидафний» (Федеральный номер ФР.1.39.2007.04104, почвоведческий факультет МГУ и ОАО Всероссийский теплотехнический институт)
- [12] ЭРД Ф 14.1:2.3.13-06 (ЭРД Ф 16.1:2.3:3.10-06) «Методика определения токсичности отходов, почв, сточных вод, осадков поверхностных и подземных вод методом биотестирования с использованием равномерных инфузорий *Paramecium caudatum* Ehrenberg (Федеральный номер Фр.1.39.2006.02506., ЛЕТАП, МГУ)
- [13] Национальный стандарт России «Вода. Определение токсичности по выживаемости пресноводных инфузорий *Paramecium caudatum* Ehrenberg» (57166-2016, 2016)
- [14] Методические указания по применению методов биотестирования для оценки качества воды в системах питьевого водоснабжения (МР № ЦОС ПВ Р 005-95)
- [15] Измайлова Н.Л., Ляшенко О.А., Антонов И.В. Биотестирование и биоиндикация состояния водных объектов (СПбГТУРП, Санкт-Петербург, 2014)
- [16] Семенова М., Веженкова И., Степанова М., Кустов Т. Определение степени токсичности полимеров EVA и Tedlar при утилизации компонентов кристаллических солнечных панелей, E3S Web of Conferences, 161, 01085 (2020)
- [17] Веженкова И., Семенова М., Ковалевская А., Грязнов А., Родригес-Барросо М.Р., Хименес Кастанеда Р. Определение химического состава примесей и влияние на степень токсичности компонентов солнечных панелей, E3S Web of Conferences, 220, 01057 (2020)
- [18] Кассациер К.Э., Степанова М.С. Дисперсионно-регрессионный анализ. СПб: ЛЭТИ, 2020. 70 с.
- [19] Сидняев Н.И. Теория планирования эксперимента и статистический анализ данных. М.: Юрайт, 2020, 496 с.