

Оригинальная статья

УДК 57.044

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2024-2-222-234>

БИОТЕСТИРОВАНИЕ ДЕКАБРОМДИФЕНИЛОКСИДА С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ТЕСТ-СИСТЕМЫ

Л. П. Эрдниев¹, Ю. С. Гусев¹, Е. В. Плешакова^{2✉},
И. С. Кошелева¹, Д. А. Кузянов^{1,2}, А. Н. Микеров¹

¹ Саратовский медицинский научный центр гигиены ФБУН «ФНЦ медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения»
Россия, 410022, г. Саратов, ул. Заречная, здание 1А, стр. 1

² Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н. Г. Чернышевского
Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Поступила в редакцию 24.10.2023 г., после доработки 25.11.2023 г., принята 29.11.2023 г., опубликована 28.06.2024 г.

Аннотация. Проанализировано биотестирование антипирина декабромдифенилоксида с применением многокомпонентной тест-системы. Показано, что его водные растворы характеризуются обратным дозозависимым эффектом в стимуляции роста колонии зеленой водоросли *Chlorella vulgaris* и отсутствием признаков токсического воздействия у *Daphnia magna*. При термической деструкции декабромдифенилоксида при температуре 400°C образуется смесь продуктов, одним из компонентов которой является бром. Смесь продуктов деструкции попадает в воздух и обладает токсическими свойствами, которые проявляются в виде стимуляции роста колонии зеленой водоросли *Chlorella vulgaris*, а также гибели и нарушения роста эмбрионов моллюсков *Planorbis*. Таким образом, оценка токсичности проб воды с содержанием антипирина может проводиться методом биотестирования с использованием в качестве тест-объектов культуры зеленой водоросли *Chlorella vulgaris* и суточных эмбрионов *Planorbis*. Отмечено, что на фоне сформированного мнения о безопасности декабромдифенилоксида, обоснованного плохой растворимостью в воде и низкой токсичностью для биообъектов, возникает необходимость изучения эмбриотоксического действия продуктов термической деструкции для животных и человека.

Ключевые слова: *Chlorella vulgaris*, *Daphnia magna*, декабромдифенилоксид, антипирин, биотестирование, токсикология

Соблюдение этических норм. Протоколы с использованием животных были одобрены Комитетом по биоэтике Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского (протокол № 8 от 18.04.2023 г.).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

✉ Для корреспонденции. Кафедра биохимии и биофизики Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского.

ORCID и e-mail адреса: Эрдниев Леонид Петрович: <https://orcid.org/0000-0001-5187-7361>, leonid-erdniev@yandex.ru; Гусев Юрий Сергеевич: <https://orcid.org/0000-0001-7379-484X>; yuran1989@yandex.ru; Плешакова Екатерина Владимировна: <https://orcid.org/0000-0003-3836-0258>, plekat@yandex.ru; Кошелева Ирина Сергеевна: <https://orcid.org/0000-0003-1992-5305>; irishka-kosheleva@mail.ru; Кузянов Дмитрий Андреевич: <https://orcid.org/0000-0002-5070-4431>; dimakuzyanov@gmail.ru; Микеров Анатолий Николаевич: <https://orcid.org/0000-0002-0670-7918>; mail@smnecg.ru.

БИОТЕСТИРОВАНИЯ ДЕКАБРОМДИФЕНИЛОКСИДА

Для цитирования. Эрдиев Л. П., Гусев Ю. С., Плешакова Е. В., Кошелева И. С., Кузянов Д. А., Микеров А. Н. Биотестирование декабромдифенилоксида с применением многокомпонентной тест-системы // Поволжский экологический журнал. 2024. № 2. С. 222 – 234. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2024-2-222-234>

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день антипирены являются неотъемлемыми компонентами материалов, используемых при производстве электроники и мебели. Анализ литературы показывает, что бромсодержащие антипирены составляют 39% от объема потребления (Арбузова, 2019; Zhang et al., 2016). Одним из наиболее перспективных и высокоэффективных в этой группе является декабромдифенилоксид (ДБДФО) (Norrocks, 2020).

Декабромдифенилоксид представляет собой белое или почти белое порошкообразное вещество. Практически нерастворим в воде (менее 0.1 мг/л); частично растворяется в ацетоне (50 мг/л), хлорбензоле (600 мг/л), о-ксилоле (870 мг/л) и некоторых других органических растворителях (Шафран и др., 2013). Предполагается, что ДБДФО в чистом виде характеризуется низкой токсичностью при воздействии на живые биологические объекты при попадании в объекты окружающей среды в связи с плохой растворимостью в воде (de Boer et al., 2003). В ранних исследованиях показано, что пероральное введение ДБДФО беременным самкам белых крыс в суточной дозе 1000 мг/кг на протяжении 19 суток не вызвало никаких клинических и патоморфологических изменений не только у взрослых особей, подвергшихся воздействию, но и у потомства (Hardy et al., 2002). Низкая токсичность ДБДФО объясняется плохой сорбционной способностью из желудочно-кишечного тракта и хорошей элиминацией. Так, в экспериментах сорбционная доза составила 0.3 – 2% от поступившей, а время полного выведения с калом составило 72 ч (Hardy, 2002).

Однако по результатам данных исследований нельзя в полной мере говорить о полной безопасности ДБДФО для человека и биологических объектов. На сегодняшний день имеются исследования, указывающие на способность метаболитов ДБДФО к аккумуляции в живых организмах и объектах окружающей среды в концентрациях, превышающих безопасные значения (Bastos et al., 2008; Wang et al., 2018; Wu et al., 2019). Одним из наиболее опасных метаболитов является бром. Так, при хроническом воздействии в суточных дозах от 0.1 до 1 мг/кг на протяжении 2 лет отмечалось увеличение его концентрации в печени и жировых тканях. При этом в сыворотке крови, мышцах и почках его концентрация сохранялась в норме. Авторами также отмечается, что изменения носили нестойкий характер, и значения указанных показателей нормализовались через год после прекращения поступления ДБДФО (Зарембо, 1981).

Как ни странно, но на фоне хорошо исследованной пероральной токсичности ДБДФО, обосновывающей естественный путь попадания в организм (Darnerud et al., 2001; Chen et al., 2009; Watkins et al., 2011), остается малоизученной ингаляционная токсичность. Данные о регистрации общетоксического действия ДБДФО на организм белых крыс при хроническом ингаляционном воздействии в concentra-

ции 40 мг/м³ в течение 20 суток не способны охарактеризовать показатели токсичности продуктов его термической деструкции (Шафран и др., 2013). Хотя предполагается, что именно эти продукты, включая бром, являются наиболее опасной формой ингаляционного воздействия ДБДФО на организм человека и могут выступать в качестве загрязнителей объектов окружающей среды.

Отмечено, что в условиях высоких температур ДБДФО способен разлагаться с выделением паров брома, вступающего в свою очередь в реакцию окисления вместо кислорода при горении материалов, и тем самым подавляющего процесс горения, так как энергетический выход реакции субстрата с бромом значительно ниже энергетического выхода реакции с кислородом. Доля ДБДФО, разлагаемая при термическом воздействии, зависит от воздействующей температуры и составляет от 1 до 90% при значениях 290 – 408°C соответственно (Леонова и др., 2013). Таким образом, при температуре более 400°C в воздухе одномоментно создается токсическая концентрация продуктов термической деструкции ДБДФО, основным компонентом которых являются пары брома, быстро сорбируемые легкими. У человека симптомы отравления бромом при ингаляционном поступлении проявляются следующим образом: удушье, отмечающееся при концентрациях 11 – 23 мг/м³; тяжелые токсические явления – при 30 – 60 мг/м³ и смерть – при 220 мг/м³ (Перминова, 2017).

Помимо кратковременного токсического ингаляционного воздействия на человека продукты термической деструкции ДБДФО, попадая в окружающую среду, воздействуют на биологические объекты и способны накапливаться в объектах окружающей среды. Наибольшую угрозу экологической безопасности представляет факт накопления брома в воде и почве (Белозеров и др., 2018; Чернюк и др., 2022).

Таким образом, перечисленные факты обосновывают актуальность вопросов по изучению токсичности продуктов термической деструкции ДБДФО при остром и хроническом воздействии на организм биообъектов, включая человека. При этом отдельными не менее актуальными задачами необходимо признать исследования, направленные на изучение процессов трансформации этих продуктов в результате взаимодействия с компонентами окружающей среды и их последующего комбинированного воздействия на биологические объекты и человека.

Ответы на эти вопросы позволят повысить достоверность комплексной оценки риска здоровью населения, создаваемого в результате использования ДБДФО в составе антипиреновых рецептур.

Цель настоящего исследования заключалась в оценке токсического действия водных растворов декабромдифенилоксида и продуктов его термической деструкции методом биотестирования с использованием многокомпонентной тест-системы.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Оценка острой токсичности продуктов термической деструкции ДБДФО проводилась в лабораторных условиях. В работе использовалось химически чистое соединение ДБДФО (Shandong Haiwang Chem Co.Ltd, Китай). Создание заданных концентраций соединения осуществлялось методом термической возгонки 1000, 4000 и 6000 мг при температуре 400±20°C в течение 5 мин в ингаляционной каме-

БИОТЕСТИРОВАНИЯ ДЕКАБРОМДИФЕНИЛОКСИДА

ре объемом 0,2 м³ при температуре воздуха 24±2°C при относительной влажности воздуха 40±5%.

Отбор газообразных продуктов термической деструкции ДБДФО, содержащихся в воздухе, осуществлялся аспиратором «ПУ-4Э» со скоростью 2 л/мин в течение 10 мин. Сорбция продуктов из воздуха осуществлялась методом барботирования через фильтрующую систему двух последовательно соединенных поглотителей Петри (малый) и фильтра АФА-ХП. В качестве сорбирующего раствора использовали отстоянную водопроводную воду. Каждый поглотитель помещали в 5 мл сорбирующего раствора и настаивали в течение 3 суток. Последующее замачивание фильтра АФА-ХП в поглотительном растворе в течение суток обеспечивало переход осажденных на нем частиц в раствор.

Для оценки токсических эффектов использовалась биотест-система, состоящая из тест-объектов с разным уровнем организации: термофильный штамм одноклеточной зеленой водоросли *Chlorella vulgaris* Beijer («Европолитест», г. Москва, свидетельство на тест-объект от 01.02.2022 г.); ветвистоусых рачков *Daphnia magna* («Европолитест», г. Москва, свидетельство на тест-объект от 09.03.2023 г.) и моллюсков рода *Planorbis*.

Оценка токсичности продуктов термической деструкции ДБДФО с применением в качестве тест-объекта *Chlorella vulgaris* проводилось на комплексе оборудования «Лаборатория биотестирования вод» в соответствии с требованиями ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04 (Т 16.1:2:2.3:3.7-04).

Исследования на *Daphnia magna* осуществлялись в соответствии с требованиями ГОСТ 32536-2013 «Методы испытания химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Определение острой токсичности для дафний».

Критерием токсического действия относительно улиток *Planorbis* служили визуальные изменения, наблюдаемые у эмбрионов, подвергшихся воздействию токсикантов по сравнению с контрольной группой: гибель, задержка развития, проявления мутаций. Отобранные кладки помещали в стаканы объемом 50 мл с культивационной водой (контроль) и растворами токсикантов в разных концентрациях (опыт) при температуре 24±1°C и световом режиме 12/12 ч. Продолжительность экспозиции кладок в растворе с содержанием продуктов термической деструкции ДБДФО составляла 15 сут. Изучение состояния кладок и эмбрионов осуществляли методом микроскопии при увеличении в 12,5 раз.

Биотестирование с применением указанных тест-объектов проводилось в трехкратной биологической и аналитической повторности.

Для выявления ионов брома был использован метод капиллярного электрофореза с применением аппарата Капель 105-М («Люмэкс», Россия). Этот метод основывался на разделении ионов в растворе под воздействием электрического поля, обусловленного различием их подвижности в капилляре. Для определения концентрации ионов брома в образце был разработан и применен градуированный график, который представляет собой калибровочную кривую, связывающую концентрацию ионов брома с их временем миграции или другими параметрами, характеризующими их поведение при электрофорезе.

Для описания данных использовали следующие показатели: средняя арифметическая (M), ошибка средней арифметической (m) и уровень достоверности (p).

Оценку различий между выборками проводили с использованием *t*-критерия Стьюдента, так как переменные соответствовали нормальному распределению. Уровень достоверности различий считали значимым при $p < 0.05$.

Статистическая обработка результатов проводилась при помощи программы Microsoft Excel (Microsoft Corp., USA) и Statistica 10.0 (StatSoft Inc., OK, USA).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Первоначально для подтверждения имеющихся данных о низкой токсичности ДБДФО для биологических объектов было проведено исследование по определению показателя острой токсичности водных растворов при воздействии на зеленую водоросль *Chlorella vulgaris* Beijer и рачков *Daphnia magna*.

Учитывая низкую растворимость антипирена в воде, при оценке острой токсичности использовались растворы, приготовленные методом замачивания ДБДФО в воде объемом 50 мл с последующим удалением нерастворенной части путем фильтрации через бумажный фильтр. Экспозиция ДБДФО в воде составляла 10 мин. Результаты исследования представлены в табл. 1.

Таблица 1. Показатели токсичности ДБДФО по результатам биотестирования на *Chlorella vulgaris* и *Daphnia magna*

Table 1. Toxicity indices of decabromodiphenyl oxide (DBDPO) based on bioassays with *Chlorella vulgaris* and *Daphnia magna*

Вид тест-объекта / Test subject type	Масса ДБДФО, мг / Mass of DBDPO, mg	Регистрируемый токсический эффект / Registered toxic effect	Величина токсического эффекта, % / Incidence of toxic effect, %
<i>Chlorella vulgaris</i>	Контроль / Control	—	100±1
	2500	Стимуляция роста колонии культуры водоросли / Increasing algal culture colony growth through stimulation	140±1*
	5000		122±2*
	7500		119±2*
	15000		115±1*
<i>Daphnia magna</i>	Контроль / Control	Признаков токсического воздействия не отмечается / No signs of toxic effects are observed	
	2500		
	5000		
	7500		
	15000		

Примечание. * – различие в группе достоверно в сравнении с контрольной группой ($p < 0.05$).

Notes. * – in comparison to the control group, the difference within the group is statistically significant ($p < 0.05$).

Результаты свидетельствуют, что в исходном виде антипирен обладает определенной видовой токсичностью. Отмечена обратная направленность дозозависимого эффекта в зависимости от массы антипирена, подвергнувшегося замачиванию в воде, или термической деструкции.

БИОТЕСТИРОВАНИЯ ДЕКАБРОМДИФЕНИЛОКСИДА

Тенденция ответной реакции культуры водоросли *Chlorella vulgaris* на повышение дозовой нагрузки за счет увеличения относительной массы ДБДФО с 50 до 300 мг/мл, проконтактировавшего с водой, показывает, что наибольшей токсичностью обладает водный раствор, в котором был замочен антипирен в относительной массе 50 мг/мл. Стимуляция роста культуры на 40% указывает на токсичность водного раствора в соответствии с ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04. Дальнейшее увеличение относительной массы антипирена не повышало токсичности водных растворов, в которых он был замочен, и показатели роста колонии водоросли не преодолели критерийный 30%-ный показатель, хотя достоверно отличались от контрольной группы.

Биотестирование, проведенное на ветвистоусых рачках *Daphnia magna*, показало, что они более устойчивы к воздействию водных растворов ДБДФО и не проявили видимых признаков токсического поражения при воздействии в тех же дозовых нагрузках.

Учитывая, что во время термической деструкции ДБДФО в атмосферу выделяются пары брома, была определена его концентрация в воздухе камеры в зависимости от массы антипирена, подвергнутого термическому воздействию. По результатам исследований установлено, что концентрации брома 0.096 ± 0.008 , 0.142 ± 0.011 и 0.215 ± 0.017 мг/л были сформированы в результате 5-минутного термического воздействия на ДБДФО с массами 1000, 4000 и 6000 мг соответственно.

При оценке токсического воздействия продуктов термической деструкции ДБДФО к тест-объектам *Chlorella vulgaris* и *Daphnia magna* были добавлены эмбрионы улитки катушки *Planorbis*. Расширение видового ряда биообъектов позволило изучить токсическое воздействие на всех этапах развития эмбрионов улиток и оценить выраженность мутагенного эффекта. Результаты представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Показатели токсичности продуктов термической деструкции ДБДФО по результатам биотестирования на *Chlorella vulgaris* и *Daphnia magna*

Table 2. Toxicity parameters of decabromodiphenyl oxide (DBDPO) thermal degradation products through biotoxicity testing on *Chlorella vulgaris* and *Daphnia magna*

Вид тест-объекта / Test subject type	Масса ДБДФО, мг / Mass of DBDPO, mg	Регистрируемый токсический эффект / Registered toxic effect	Величина токсического эффекта, % / Incidence of toxic effect, %
<i>Chlorella vulgaris</i>	Контроль / Control	—	100±13
	1000	Стимуляция роста колонии культуры водоросли / Increasing algal culture colony growth through stimulation	153±9*
	4000		115±1
	6000		103±9
<i>Daphnia magna</i>	Контроль / Control	Признаков токсического воздействия не отмечается / No signs of toxic effects are observed	—
	1000		
	4000		
	6000		

Примечание. * – различие в группе достоверно в сравнении с контрольной группой ($p < 0.05$).

Notes. * – in comparison to the control group, the difference within the group is statistically significant ($p < 0.05$).

Таблица 3. Показатели токсичности продуктов термической деструкции ДБДФО по результатам биотестирования на *Planorbis*

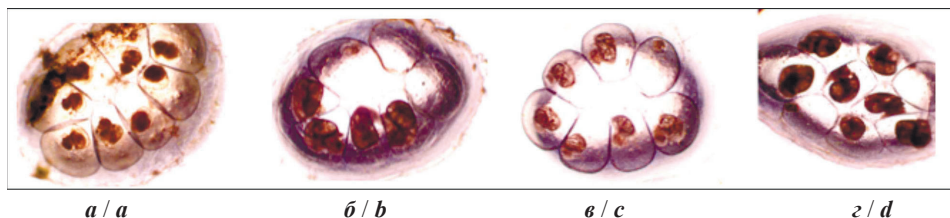
Table 3. Toxicity indicators of thermal degradation products of decabromodiphenyl oxide (DBDPO) through biotoxicity assessment on *Planorbis*

Масса ДБДФО, мг / Mass of DBDPO, mg	Исходный размер эмбрионов, мм / Initial size of embryos, mm	Размер эмбрионов на 5-е сутки, мм / Embryo size at 5 days, mm	Динамика изменения роста, разы / Dynamics of growth changes, number of times	Гибель эмбрионов за 5 суток, % / Incidence of embryo demise within 5 days, %
Контроль / Control	1.04±0.03 (n = 6)	2.5±0.07 (n = 6)	2.4±0.06	–
1000	0.9±0.07 (n = 5)	3.6±0.10* (n = 4)	4.5±0.13*	20
4000	0.9±0.03 (n = 7)	2.9±0.06* (n = 6)	3.6±0.08*	14
6000	1.4±0.07* (n = 8)	4.1±0.15* (n = 8)	2.9±0.11*	–

Примечание. * – различие в группе достоверно в сравнении с контрольной группой ($p < 0.05$).

Notes. * – in comparison to the control group, the difference within the group is statistically significant ($p < 0.05$).

Визуальных признаков мутации при микроскопии у эмбрионов выявлено не было. Результаты сравнительной микроскопии эмбрионов на 5 сутки представлены на рисунке.



Эмбрионы *Planorbis* на 5-е сутки после воздействия продуктов термической деструкции ДБДФО: *a* – контрольная группа, *b* – 1000 мг, *c* – 4000 мг, *d* – 6000 мг

Figure. Incubated *Planorbis* embryos after 5 days following exposure to the products of thermal decomposition of decabromodiphenyl oxide: *a* – control group, *b* – 1000 mg, *c* – 4000 mg, *d* – 6000 mg

Нарушения частоты и амплитуды движения у эмбрионов в экспериментальных группах не отличались от таковых в контрольной. Выклев молоди отмечался во всех группах синхронно за 2 суток. Во всех группах молодь сохраняла жизнеспособность и двигательную активность на протяжении 3 суток до окончания эксперимента.

Результаты определения зависимости концентрации брома (C_{Br} , мг/дм³) в воздухе при термической деструкции ДБДФО указывают на ее прямую зависимость от массы антипирена ($M_{ДБДФО}$, мг) и могут быть описаны уравнением. Показатели корреляционной связи ($R = 0.97$, $p < 0.05$) определяют выявленную зависимость как весьма высокую.

$$C_{Br} = 0.6618 + 0.00002M_{ДБДФО}$$

БИОТЕСТИРОВАНИЯ ДЕКАБРОМДИФЕНИЛОКСИДА

В совокупности смесевой состав из продуктов термической деструкции ДБДФО оказывает токсическое действие, сопоставимое с водными растворами. Так, при повышении массы подвергшегося термической деструкции ДБДФО с 1000 до 6000 мг, была получена ответная реакция от тест-объектов *Chlorella vulgaris* и эмбрионов *Planorbis*. Наибольший отклик в виде стимуляции роста колонии *Chlorella vulgaris* на 53% был получен в результате воздействия смеси продуктов термической деструкции ДБДФО массой 1000 мг. При этом увеличение массы антипирена до 4000 мг и в последующем до 6000 мг приводило только к снижению стимуляции роста колонии водоросли до значений, аналогичных результатам контрольной группы.

В то же время воздействие продуктов термической деструкции ДБДФО на эмбрионы улиток показало, что в меньших дозах они стимулируют рост эмбрионов. Так, на 5-е сутки размеры эмбрионов в опытной группе, подвергшейся воздействию смеси продуктов, образуемых после деструкции 1000 мг ДБДФО, увеличились в 4.5 ± 0.13 раза. При этом в контрольной группе аналогичный показатель составил 2.4 ± 0.06 раза. Дальнейшее увеличение воздействующей дозы смеси продуктов деструкции привело к уменьшению стимуляции роста размеров эмбрионов, однако достоверно превосходило значение в контрольной группе. На 8-е сутки наблюдения размеры эмбрионов не имели статистических различий, как между опытными группами, так и от значений в контрольной группе. При этом значительный рост размеров эмбрионов в первые пять суток сопровождался гибелью до 20% в группе с максимальным ростом. Для выявления более значимой зависимости гибели эмбрионов от воздействующей дозы смеси продуктов, очевидно, требуется проведение дополнительных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе обосновано, что оценка токсичности проб воды с содержанием ДБДФО целесообразно проводить методом биотестирования с использованием в качестве тест-объектов колонии зеленой водоросли *Chlorella vulgaris* и суточных эмбрионов *Planorbis*.

Выявлено, что при термической деструкции ДБДФО образуется смесь продуктов, одним из компонентов которой является бром, концентрация которого напрямую зависит от массы антипирена.

Поступая в воздух, продукты горения ДБДФО могут оседать на поверхности почвы и попадать в водоемы. Как было нами показано, при попадании в воздух смесь компонентов оказывает токсические эффекты в виде стимуляции роста колонии зеленой водоросли *Chlorella vulgaris*, а также гибели и нарушения роста эмбрионов моллюсков *Planorbis*. Данный факт свидетельствует об экологической и санитарно-гигиенической опасности смеси продуктов, образуемых при сгорании материалов, содержащих в качестве антипирена ДБДФО. К примеру, у человека гипертрофия плода в первый триместр является причиной ряда осложнений, таких как: ранний токсикоз, гестоз, анемия, повышенный риск преждевременной потери беременности (Шабалов, 2004).

Таким образом, на фоне сформированного мнения о безопасности ДБДФО, обоснованного его низкой токсичностью для биообъектов, результаты этого исследования актуализируют вопросы, связанные с изучением эмбриотоксичного действия продуктов термической деструкции относительно животных и человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Арбузова А. А. К вопросу об изучении рынка современных текстильных материалов с повышенной огнестойкостью // Пожарная и аварийная безопасность: сборник материалов XIV Международной научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность», посвященной 370-й годовщине образования пожарной охраны России. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2019. С. 214 – 216.

Белозеров Д. А., Летникова А. С., Курышев А. А. Эколого-гидрогеохимическая оценка состояния неоген-четвертичного водоносного комплекса юго-восточной части города Воронежа // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2018. № 2. С. 143 – 150. <https://doi.org/10.17308/geology.2018.2/1555>

Зарембо О. К., Гуменный В. С. Назначение антипиренов и их биологическое действие // Гигиена и санитария. 1981. № 12. С. 42 – 44.

Леонова Д. И., Третьякова Е. В., Цымбалюк К. К., Шафран Л. М. Определение содержания фталевых пластификаторов и броморганических антипиренов в объектах окружающей среды и продуктах термоокислительной деструкции полимерных материалов // Актуальные проблемы транспортной медицины. 2013. № 4 (34). С. 7 – 17.

Перминова Т. А. Бром в компонентах природной среды Томской области и оценка его токсичности: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск, 2017. 182 с.

Чернюк В. Д., Кухарчик Т. И., Кулакович В. П. Отходы пластмасс электротехнических изделий как потенциальный источник загрязнения почв тяжелыми металлами и стойкими органическими загрязнителями // Актуальные вопросы устойчивого природопользования: научно-методическое обеспечение и практическое решение: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию НИЛ экологии ландшафтов факультета географии и геоинформатики БГУ / отв. ред. Д. С. Воробьев. Минск: Белорусский государственный университет, 2022. С. 462 – 465.

Шабалов Н. П. Неонатология: учеб. пособие: в 2 т. М.: МЕДпресс-информ, 2004. Т. 1. 608 с.

Шафран Л. М., Бабий В. Ф., Третьякова Е. В., Леонова Д. И. К проблеме токсикологической и эколого-гигиенической оценки бромсодержащих антипиренов // Актуальные проблемы транспортной медицины. 2013. № 2 (32). С. 38 – 49.

Bastos P. M., Eriksson J., Vidarson J., Bergman A. Oxidative transformation of polybrominated diphenyl ether congeners (PBDEs) and of hydroxylated PBDEs (OH-PBDEs) // Environmental Science and Pollution Research. 2008. Vol. 15, iss. 7. P. 606 – 613. <https://doi.org/10.1007/s11356-008-0045-9>

Chen S., Ma Y., Wang J., Chen D., Luo X.-J., Mai B.-X. Brominated flame retardants in children's toys; concentration, composition, and children's exposure and risk assessment // Environmental Science & Technology. 2009. Vol. 43, iss. 11. P. 4200 – 4206. <https://doi.org/10.1021/es9004834>

Darnerud P. O., Eriksen G. S., Johannesson T., Larsen P. B., Viluksela M. Polybrominated diphenyl ethers: Occurrence, dietary exposure, and toxicology // Environmental Health Perspectives. 2001. Vol. 109, suppl. 1. P. 49 – 68. <https://doi.org/10.1289/ehp.01109s149>

de Boer J., Wester P. G., van der Horst A., Leonards P. E. Polybrominated diphenyl ethers in influents, suspended particulate matter, sediments, sewage treatment plant and effluents and

БИОТЕСТИРОВАНИЯ ДЕКАБРОМДИФЕНИЛОКСИДА

biota from the Netherlands // *Environmental Pollution*. 2003. Vol. 122, iss. 1. P. 63 – 74. [https://doi.org/10.1016/s0269-7491\(02\)00280-4](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(02)00280-4)

Hardy L. The toxicology of the three commercial polybrominated diphenyl oxide (ether) flame retardants // *Chemosphere*. 2002. Vol. 46, iss. 5. P. 757 – 777. [https://doi.org/10.1016/s0045-6535\(01\)00240-5](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(01)00240-5)

Hardy L., Schroeder R., Biesemeier J., Manor O. Prenatal oral (gavage) developmental toxicity study of decabromodiphenyl oxide in rats // *International Journal of Toxicology*. 2002. Vol. 21, iss. 2. P. 83 – 91. <https://doi.org/10.1080/10915810252866051>

Horrocks R. The potential for bio-sustainable organobromine-containing flame retardant formulations for textile applications – A review // *Polymers*. 2020. Vol. 12, iss. 9. Article number 2160. <https://doi.org/10.3390/polym12092160>

Wang R., Tang T., Feng S., Xie J., Tao X., Huang K., Zou M., Yin H., Dang Z., Lu G. Debromination of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and their conversion to polybrominated dibenzofurans (PBDFs) by UV light: Mechanisms and pathways // *The Journal of Hazardous Materials*. 2018. Vol. 354. P. 1 – 7. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.04.057>

Watkins D. J., McClean M. D., Fraser A. J., Weinberg J., Stapleton H. M., Sjödin A., Webster T. F. Exposure to PBDEs in the office environment: Evaluating the relationships between dust, handwipes, and serum // *Environmental Health Perspectives*. 2011. Vol. 119, iss. 9. P. 1247 – 1252. <https://doi.org/10.1289/ehp.1003271>

Wu Z., Han W., Yang X., Li Y., Wang Y. The occurrence of polybrominated diphenyl ether (PBDE) contamination in soil, water/sediment, and air // *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26, iss. 23. P. 23219 – 23241. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05768-w>

Zhang M., Buekens A., Li X. Brominated flame retardants and the formation of dioxins and furans in fires and combustion // *The Journal of Hazardous Materials*. 2016. Vol. 304. P. 26 – 39. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.10.01>

Biotesting of decabromodiphenyl oxide using a multicomponent test system

L. P. Erdniev¹, Yu. S. Gusev¹, Y. V. Pleshakova^{2✉},
I. S. Kosheleva¹, D. A. Kuzyanov^{1,2}, A. N. Mikerov¹

¹ Saratov Hygiene Medical Research Center of the Federal Budget Scientific Institution
“Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies”
1A, Unit 1 Zarechnaya St., Saratov 410022, Russia

² Saratov State University
83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Received: October 24, 2023 / revised: November 25, 2023 / accepted: November 29, 2023 / published: June 28, 2024

Abstract. The results of biotesting of decabromodiphenyl oxide using a multicomponent test system are presented. It has been demonstrated that its aqueous solutions exhibit a reverse dose-dependent effect in stimulating the growth of colonies of the green algae *Chlorella vulgaris* and show no signs of toxic effects on *Daphnia magna*. During the thermal decomposition of decabromodiphenyl oxide at a temperature of 400°C, a mixture of products is formed, one of which is bromine. The decomposition product is released into the air and possesses toxic properties, as evidenced by stimulation of the growth of colonies of the green algae *Chlorella vulgaris*, as well as the death and growth abnormalities of *Planorbis* mollusk embryos. Therefore, water samples containing decabromodiphenyl oxide can be assessed for toxicity by biotesting methods, using cultures of green algae *Chlorella vulgaris* and 24-hour-old *Planorbis* embryos as test subjects. It is noteworthy that in the context of the prevailing perception of the safety of decabromodiphenyl oxide, based on its poor water solubility and low toxicity to biological organisms, there arises a need to study embryotoxic effects of the thermal decomposition products on both animals and humans.

Keywords: *Chlorella vulgaris*, *Daphnia magna*, decabromodiphenyl oxide, antipyrene, biotesting, toxicology

Ethics approval and consent to participate: Animal protocols were approved by the Bioethics Committee of Saratov State University (protocol No. 8 dated April 18, 2023).

Competing interests: The authors have declared that no competing interests exist.

For citation: Erdniev L. P., Gusev Yu. S., Pleshakova Y. V., Kosheleva I. S., Kuzyanov D. A., Mikerov A. N. Biotesting of decabromodiphenyl oxide using a multicomponent test system. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2024, no. 2, pp. 222–234 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2024-2-222-234>

✉ *Corresponding author.* Department of Biochemistry and Biophysics of Saratov State University, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Leonid P. Erdniev: <https://orcid.org/0000-0001-5187-7361>, leonid-erdniev@yandex.ru; Yuri S. Gusev: <https://orcid.org/0000-0001-7379-484X>; yuran1989@yandex.ru; Yekaterina V. Pleshakova: <https://orcid.org/0000-0003-3836-0258>, plekat@yandex.ru; Irina S. Kosheleva: <https://orcid.org/0000-0003-1992-5305>; irishka-kosheleva@mail.ru; Dmitry A. Kuzyanov: <https://orcid.org/0000-0002-5070-4431>; dimakuzyanov@gmail.ru; Anatoly N. Mikerov: <https://orcid.org/0000-0002-0670-7918>; mail@smnecg.ru.

REFERENCES

- Arbuzova A. A. To study the market of modern textile materials with high fire resistance. In: *Fire and Emergency Safety: Collection of Materials of the XIVth International Scientific and Practical Conference Devoted to the 370th anniversary of Russian Fire Services*. Ivanovo, Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire and Rescue Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia Publ., 2019, pp. 214–216 (in Russian).
- Belozerov D. A., Letnikova A. S., Kuryshv A. A. Ecological and hydrogeochemical assessment of the state of the neogene-quaternary aquifer complex in the south-eastern part of the city of Voronezh. *Bulletin of Voronezh State University. Series: Geology*, 2018, no. 2, pp. 143–150 (in Russian). <https://doi.org/10.17308/geology.2018.2/1555>
- Zarembo O. K., Gumenny V. S. Purpose of fire retardants and their biological effect. *Hygiene and Sanitation*, 1981, no. 12, pp. 42–44 (in Russian).
- Leonova D. I., Tretyakova E. V., Tsymbalyuk K. K., Shafran L. M. Determination of phthalic plasticizers and flame retardants organobromine in environmental environment and products oxidative degradation polymer material. *Actual Problems of Transport Medicine*, 2013, no. 4 (34), pp. 7–17 (in Russian).
- Perminova T. A. *Bromine in the Components of the Natural Environment of the Tomsk Region and Assessment of its Toxicity*. Diss. Cand. Sci. (Geol.-Mineral.). Tomsk, 2017. 182 p. (in Russian).
- Chernyuk V. D., Kukharchik T. I., Kulakovich V. P. Plastic waste from electrical products as a potential source of soil pollution with heavy metals and persistent organic pollutants. In: Vorobyov D. S., ed. *Materials of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 60th Anniversary of the Research Laboratory of Landscape Ecology of the Faculty of Geography and Geoinformatics of Belarusian State University*. Minsk, Belarusian State University Publ., 2022, pp. 462–465 (in Russian).
- Shabalov N. P. *Neonatologiya: ucheb. posobie: v 2 t.* [Neonatology: Textbook. manual: In 2 volumes]. Moscow, MEDpress-inform, 2004, vol. 1. 608 p. (in Russian).
- Shafran L. M., Babiy V. F., Tretyakova E. V., Leonova D. I. The problem of toxicological and ecological hygienic assessment of brominated flame retardants. *Actual Problems of Transport Medicine*, no. 2 (32), pp. 38–49 (in Ukrainian).
- Bastos P. M., Eriksson J., Vidarson J., Bergman A. Oxidative transformation of polybrominated diphenyl ether congeners (PBDEs) and of hydroxylated PBDEs (OH-PBDEs). *Environmental Science and Pollution Research*, 2008, vol. 15, iss. 7, pp. 606–613. <https://doi.org/10.1007/s11356-008-0045-9>
- Chen S., Ma Y., Wang J., Chen D., Luo X.-J., Mai B.-X. Brominated flame retardants in children's toys; concentration, composition, and children's exposure and risk assessment. *Environmental Science & Technology*, 2009, vol. 43, iss. 11, pp. 4200–4206. <https://doi.org/10.1021/es9004834>
- Darnerud P. O., Eriksen G. S., Johannesson T., Larsen P. B., Viluksela M. Polybrominated diphenyl ethers: Occurrence, dietary exposure, and toxicology. *Environmental Health Perspectives*, 2001, vol. 109, suppl. 1, pp. 49–68. <https://doi.org/10.1289/ehp.01109s149>
- de Boer J., Wester P. G., van der Horst A., Leonards P. E. Polybrominated diphenyl ethers in influents, suspended particulate matter, sediments, sewage treatment plant and effluents and biota from the Netherlands. *Environmental Pollution*, 2003, vol. 122, iss. 1, pp. 63–74. [https://doi.org/10.1016/s0269-7491\(02\)00280-4](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(02)00280-4)
- Hardy L. The toxicology of the three commercial polybrominated diphenyl oxide (ether) flame retardants. *Chemosphere*, 2002, vol. 46, iss. 5, pp. 757–777. [https://doi.org/10.1016/s0045-6535\(01\)00240-5](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(01)00240-5)

Л. П. Эрдниев, Ю. С. Гусев, Е. В. Плешакова и др.

Hardy L., Schroeder R., Biesemeier J., Manor O. Prenatal oral (gavage) developmental toxicity study of decabromodiphenyl oxide in rats. *International Journal of Toxicology*, 2002, vol. 21, iss. 2, pp. 83–91. <https://doi.org/10.1080/10915810252866051>

Horrocks R. The potential for bio-sustainable organobromine-containing flame retardant formulations for textile applications – A review. *Polymers*, 2020, vol. 12, iss. 9, article no. 2160. <https://doi.org/10.3390/polym12092160>

Wang R., Tang T., Feng S., Xie J., Tao X., Huang K., Zou M., Yin H., Dang Z., Lu G. Debromination of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and their conversion to polybrominated dibenzofurans (PBDFs) by UV light: Mechanisms and pathways. *The Journal of Hazardous Materials*, 2018, vol. 354, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.04.057>

Watkins D. J., McClean M. D., Fraser A. J., Weinberg J., Stapleton H. M., Sjödin A., Webster T. F. Exposure to PBDEs in the office environment: Evaluating the relationships between dust, handwipes, and serum. *Environmental Health Perspectives*, 2011, vol. 119, iss. 9, pp. 1247–1252. <https://doi.org/10.1289/ehp.1003271>

Wu Z., Han W., Yang X., Li Y., Wang Y. The occurrence of polybrominated diphenyl ether (PBDE) contamination in soil, water/sediment, and air. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, vol. 26, iss. 23, pp. 23219–23241. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05768-w>

Zhang M., Buekens A., Li X. Brominated flame retardants and the formation of dioxins and furans in fires and combustion. *The Journal of Hazardous Materials*, 2016, vol. 304, pp. 26–39. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.10.014>