

© Грынчак В.А., Камлюк С.Н., Ильюкова И.И., Гомолко Т.Н., Юркевич Е.С., Петрова С.Ю., Лаппо Л.Г., 2026



Грынчак Виталий Александрович, Камлюк Светлана Николаевна, Ильюкова Ирина Ивановна, Гомолко Татьяна Николаевна, Юркевич Елена Станиславовна, Петрова Светлана Юрьевна, Лаппо Лидия Геннадьевна

Использование альтернативных тест-моделей в практике лабораторного биотестирования отходов химической промышленности

Государственное учреждение «Республиканский центр гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья», 220012, г. Минск, Республика Беларусь

РЕЗЮМЕ

Введение. Нефтеперерабатывающая и нефтехимическая отрасли химической промышленности представлены в Республике Беларусь несколькими относительно крупными предприятиями, функционирование которых обуславливает необходимость безопасной утилизации отходов производства.

Материал и методы. Объектами исследований были выбраны отходы: шлам ёмкостей хранения смолы пиролизной тяжёлой и отработанные катализаторы, содержащие окись алюминия. Для исследований применяли тест-модели, представленные двумя видами беспозвоночных водных организмов лабораторного разведения: брюхоногим моллюском *Lymnaea stagnalis* и ресничными инфузориями *Tetrahymena pyriformis*. Также были использованы семена высших растений и культура дождевых червей *Eisenia foetida*.

Результаты. Оценка токсичности отходов на тест-модели *Eisenia foetida* показала снижение выживаемости олигохет в диапазоне концентраций отходов 15,0–60,0 г/кг. По результатам исследования на тест-модели *Lymnaea stagnalis* шлам нефтехимический отнесён к умеренно опасным отходам (3-й класс опасности). При хронической экспозиции отработанных катализаторов на *Tetrahymena pyriformis* установлены коэффициент кумуляции 0,90 и максимальная недействующая доза 0,1 мг/мл. Изученные отходы не оказывали фитотоксического действия.

Ограничение исследования. Исследование ограничено оцениваемыми отходами химической промышленности, а также используемыми альтернативными тест-моделями для биотестирования.

Заключение. Результаты проведённых исследований свидетельствуют о целесообразности использования комплексного подхода к биотестированию отходов химической промышленности. При использовании альтернативных тест-моделей для оценки отходов нефтехимических шламов и отработанных катализаторов по показателю экотоксичности установлен итоговый 3-й класс опасности (умеренно опасные отходы).

Ключевые слова: отходы химической промышленности; биотестирование; альтернативные тест-модели; токсическое действие; моллюски; фитотоксичность; класс опасности

Соблюдение этических стандартов. Проведённые экспериментальные исследования не требовали предоставления заключения комиссии по биоэтике.

Для цитирования: Грынчак В.А., Камлюк С.Н., Ильюкова И.И., Гомолко Т.Н., Юркевич Е.С., Петрова С.Ю., Лаппо Л.Г. Использование альтернативных тест-моделей в практике лабораторного биотестирования отходов химической промышленности. *Токсикологический вестник*. 2026; 34(4): 294–302. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2026-34-4-294-302> <https://elibrary.ru/oizymj>

Для корреспонденции: Грынчак Виталий Александрович, e-mail: ecoltox@rspch.by

Вклад авторов: Грынчак В.А. — ответственность за целостность всех частей статьи, утверждение окончательного варианта статьи; Камлюк С.Н. — сбор и обработка данных, статистический анализ, написание текста; Ильюкова И.И. — концепция и дизайн исследования, обработка материала; Гомолко Т.Н. — обработка материала, редактирование; Юркевич Е.С. — статистический анализ, написание текста; Петрова С.Ю. — сбор данных, редактирование; Лаппо Л.Г. — сбор данных, написание текста.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследования выполнены в рамках НИР, зарегистрированных в государственном учреждении «Белорусский институт системного анализа и информационного обеспечения научно-технической сферы» (номера государственной регистрации 20230442 и 20230333).

Поступила в редакцию: 10 марта 2026 / Поступила после исправления: 18 мая 2026 / Принята к печати: 3 августа 2026 / Опубликовано: 16 сентября 2026

Vitaliy A. Hrynchak, Svetlana N. Kamliuk, Irina I. Ilyukova, Tatyana N. Gomolko, Elena S. Yurkevich, Svetlana Yu. Petrova, Lidia G. Lappo

Use of alternative test models in laboratory bioassays of chemical industry waste

Republican Center for Hygiene, Epidemiology and Public Health, Minsk, 220012, Republic of Belarus

ABSTRACT

Introduction. The oil refining and petrochemical sectors of the chemical industry in the Republic of Belarus are represented by several relatively large enterprises, the operation of which necessitates the safe disposal of production waste.

Materials and Methods. The following wastes were selected for study: sludge from heavy pyrolysis resin storage tanks and spent catalysts containing aluminium oxide. The study utilized test models consisting of two laboratory-bred aquatic invertebrate species: the gastropod *Lymnaea stagnalis* and the ciliated ciliate *Tetrahymena pyriformis*. Higher plant seeds and a culture of the earthworm *Eisenia foetida* were also used.

Results. Waste toxicity assessment using the *Eisenia foetida* test model revealed a decrease in oligochaete survival in the waste concentration range of 15.0 to 60.0 g/kg. Petrochemical sludge was classified as moderately hazardous waste (hazard class 3) using the *Lymnaea stagnalis* test model. Chronic exposure of *Tetrahymena pyriformis* to spent catalysts resulted in a cumulation coefficient of 0.90 and a maximum ineffective dose of 0.1 mg/mL. The studied waste did not exhibit phytotoxic effects.

Limitations. The study is limited to the assessed chemical industry wastes and the alternative test models used for biotesting.

Conclusion. The results of the conducted studies demonstrate the feasibility of using an integrated approach to biotesting chemical industry wastes. When using alternative test models to assess petrochemical sludge and spent catalyst wastes based on ecotoxicity, a final hazard class of 3 (moderately hazardous waste) was established.

Keywords: chemical industry wastes; biotesting; alternative test models; toxic effect; mollusks; phytotoxicity; hazard class

Compliance with ethical standards. The experimental studies conducted do not require the submission of a bioethics committee opinion.

For citation: Hrynchak V.A., Kamlyuk S.N., Ilyukova I.I., Gomolko T.N., Yurkevich E.S., Petrova S.Yu., Lappo L.G. Use of Alternative Use of alternative test models in laboratory bioassays of chemical industry waste. *Toxikologicheskiiy vestnik / Toxicological review*. 2026;34(4): 294–302. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2026-34-4-294-302> <https://elibrary.ru/oizymj> (in Russian)

For correspondence: Vitaliy A. Hrynchak, e-mail: ecoltox@rspch.by

Authors' contribution: Hrynchak V.A. — responsible for the integrity of all parts of the article and approval of the final version; Kamliuk S.N. — data collection and processing, statistical analysis, and writing; Ilyukova I.I. — study concept and design, data processing; Gomolko T.N. — data processing and editing; Yurkevich E.S. — statistical analysis and writing; Petrova S.Yu. — data collection, editing; Lappo L.G. — data collection, writing.

Conflict of interest. The authors declare no obvious or potential conflicts of interest in connection with the publication of this article.

Funding. The research was carried out within the framework of research work of the Belarusian Institute of System Analysis and Information Support of Scientific and Technical Sphere (state registration numbers 20230442 and 20230333).

Received: March 10, 2026 / Revised: May 18, 2026 / Accepted: August 3, 2026 / Published: September 16, 2026

Введение

Импортозамещение, укрепление и развитие отечественной промышленности являются одними из основных гарантов финансово-экономической стабильности страны. Эти задачи требуют поиска новых рациональных и экологических путей утилизации отходов производства [1–3]. Нефтеперерабатывающая и нефтехимическая отрасли химической промышленности представлены в Республике Беларусь несколькими относительно крупными предприятиями, функционирование которых обуславливает необходимость безопасной утилизации отходов производства, в том числе приоритетных — нефтехимических шламов и отработанных катализаторов [4–6].

Образование шлама ёмкостей хранения смолы пиролизной тяжёлой происходит в процессе хранения тяжёлого пиролизного продукта термического разложения нефтяного сырья (газойля, мазута, гудрона) при получении на нефтеперерабатывающих предприятиях низших олефинов — этилена, пропилена. Многокомпонентным побочным продуктом пиролиза углеводородного сырья является нефтехимический шлам. Его основная составляющая — тяжёлая смола пиролиза, область потенциального применения которой весьма широка: от непосредственного использования в качестве котельного топлива до включения в технологические процессы производства специальных масел, нафталинов, технического углерода и др. [7].

Ещё один вид отходов — отработанные катализаторы, содержащие окись алюминия, представляет собой бывшие в использовании элементы, структура которых включает пористый носитель из оксида алюминия и активные элементы (как правило, сульфиды других металлов). Катализаторы используются в технологическом процессе гидрокрекинга тяжёлых нефтяных остатков — промышленной переработки низкосортного нефтяного сырья в ценные нефтепродукты [8]. Многократное использование катализаторов такого рода постепенно ухудшает их полезные технологические свойства путём физического (изменение структуры пор) и физико-химического (отложение кокса и накопление примесей — металлов, серы и др.) износа, что становится на определённом этапе причиной выхода из строя этих деталей [9, 10].

Один из наиболее распространённых путей утилизации отходов производства — сжигание. Данный подход относится к весьма затратным и не отличается высокой экологичностью, поскольку процессы сжигания сопровождаются выделением в воздушную среду токсичных выбросов, для нейтрализации негативного эффекта которых необходимы специальные газоочистные установки. Более перспективный путь переработки твёрдых промышленных отходов, в том числе отработанных катализаторов, — пиролиз, позволяющий не только снизить техногенную нагрузку на окружающую среду, но и одновременно с экологичной утилизацией отходов получать полезные продукты (топливо, топливное сырьё и др.) [11–13].

Выбор дальнейшего пути использования отработанных катализаторов, а именно термический крекинг тяжёлых остатков либо извлечение ценных металлов в ходе вторичной переработки, обусловлен характером и степенью износа. При этом определение класса опасности отходов (если данные сведения отсутствуют в классификаторе отходов для позиций с выбранным производителем кодом и заявленным технологическим процессом их образования) — обязательный этап обеспечения безопасного обращения на территории Республики Беларусь.

Следует учитывать, что промышленные отходы, отнесённые производителями к одному и тому же классификационному коду, но различающиеся по технологическим условиям образования (следовательно, и по физико-химическим свойствам, в том числе компонентному составу), могут обладать разной степенью опасности. Кроме того, информация о химическом (компонентном) составе многих видов промышленных отходов, имеющаяся у производителя, зачастую

имеет неполный характер, то есть известны лишь основные компоненты. Это обуславливает актуальность проведения экотоксикологических исследований отходов производства [14–17].

Цель исследования — оценить использование альтернативных тест-моделей в практике лабораторного биотестирования отходов химической промышленности по показателю экотоксичности.

Материал и методы

В качестве первого объекта экотоксикологических исследований был выбран отход химической промышленности — шлам ёмкостей для хранения смолы пиролизной тяжёлой, продукта пиролиза тяжёлого (код отходов 5492500 по ОКРБ 021–2019 «Классификатор отходов, образующихся в Республике Беларусь»)¹. Шлам представляет собою вязкую жидкость чёрно-коричневого цвета с резким специфическим запахом. К основным компонентам отходов производства данного вида относятся нафталин, метилнафталины, полициклические ароматические и нафтеновые вещества (в том числе асфальтены и другие смолистые соединения), вода и механические примеси (частицы кокса, тяжёлые металлы).

Вторым объектом экотоксикологических исследований стали отработанные катализаторы, содержащие окись алюминия (код отходов 5950101)¹. Основные компоненты указанных отходов производства — оксиды алюминия, кремния, магния, кальция, а также сульфиды никеля, молибдена, кобальта и вольфрама. Незначительное количество загрязнений, образующихся в ходе эксплуатации катализаторов в промышленном производстве, также присутствует в составе отходов данного вида. Это кокс, соединения серы и фосфора, тяжёлые металлы.

Для проведения исследований отходов химического производства были отобраны тест-модели, представленные двумя видами беспозвоночных водных организмов лабораторного разведения: брюхоногим моллюском *Lymnaea stagnalis* (прудовиком большим) и ресничными инфузориями *Tetrahymena pyriformis*, что позволило оценить воздействие на водную среду и гидробионтов, отличающихся высокой степенью уязвимости к влиянию антропогенных факторов химической природы, в том числе отходов производства.

¹ Классификатор отходов, образующихся в Республике Беларусь ОКРБ 021-2019. [Электронный ресурс]: Утв. Постановлением М-ва природ. ресурсов и охраны окруж. среды Респ. Беларусь 09.09.2019 № 3-Т. Минск, 2019. 88 с. Национальный правовой интернет-портал Республики Беларусь, 27.09.2019, 8/34631.

В экспериментальных исследованиях также были использованы тест-модели, позволяющие в практике лабораторного биотестирования оценить возможное негативное воздействие на почвенную среду, в том числе её флору и фауну. Так, экотоксичность определяли на семенах высших растений в фитотесте и на лабораторной культуре дождевых червей *Eisenia foetida*. Использовали половозрелые особи дождевых червей из популяции лабораторного разведения. После взвешивания их случайным образом распределяли по заранее подготовленным контейнерам, заполненным субстратом для контрольных групп или смесью субстрата с отходом. Заданные концентрации нефтехимических шламов и отработанных катализаторов составили от 10,0 до 60,0 г/кг для опытных групп *Eisenia foetida*. Исследования проводили в трёх параллелях для каждой концентрации промышленных отходов. Длительность экспозиционного периода составляла семь суток, в течение которых фиксировали изменения в поведении, морфологические изменения, а также гибель беспозвоночных. Ключевым показателем при ранжировании отходов по классам опасности было значение среднелетальной концентрации (LC_{50})².

Для изучения нефтехимических шламов использовали кладки половозрелых особей *Lymnaea stagnalis*, содержащие зародыши в капсулах на ранних стадиях эмбрионального развития. Фрагменты кладок с жизнеспособными эмбрионами моллюска случайным образом распределяли на экспериментальные группы и добавляли отход. До начала эксперимента определяли количество зародышевых капсул, содержащих по одному эмбриону, после чего инкубировали все экспериментальные группы до полного выклева (выхода молоди улиток из кладок). Используя метод регрессионного анализа, оценивали полученные экспериментальные данные².

Токсичность отработанных катализаторов изучали с применением лабораторной культуры *Tetrahymena pyriformis* в остром, подостром и хроническом экспериментах. Изучение отхода проводили в двух параллелях в концентрациях от 10,0 до 200,0 мг/мл в остром и подостром экспериментах. По истечении срока инкубации под микроскопом оценивали токсическое действие. Количество инфузорий определяли с помощью

счётной камеры Фукса — Розенталя. По доле погибших организмов оценивали токсичность.

В хроническом эксперименте отработанные катализаторы изучали в широком диапазоне концентраций, охватывающих токсичные, пороговые и малые дозы от 0,00001 до 50,0 мг/мл. Оценку общего состояния популяции и учёт погибших организмов проводили через 24–96 часов, на основании чего оценивали токсическое действие и ранжировали отход по показателям: доза, вызывающая угнетение генеративной функции на 50%, через 24 и 72 часа инкубации; коэффициент адаптогенности, характеризующий адаптационный потенциал популяции ($K_{ад}$); кислотная резистентность; мутагенная активность; максимальная недеятельная доза (МНД) и коэффициент кумуляции ($K_{кум}$)².

Стоит особо отметить, что использованные нами всесторонние критерии оценки опасности отходов производства для окружающей природной среды (в условиях острого, подострого и хронического воздействия), разработанные и применяемые в рамках высокочувствительного и экспрессного метода на ресничных инфузориях, представляют собой незаменимый инструмент в арсенале санитарной гидробиологии и экотоксикологии. *Tetrahymena pyriformis* широко применяются как для оценки безопасности питьевой воды, продуктов и кормов, состояния поверхностных водоисточников, так и в системе контроля качества очистки сточных вод.

Для проведения исследований по параметрам фитотоксического действия нефтехимических шламов и отработанных катализаторов первоначально получали водные вытяжки из отходов. Исследование проводили с использованием семян сельскохозяйственных культур, широко распространённых в Республике Беларусь, — редиса, овса и огурцов. Семена инкубировали и измеряли длину корешков проростков после добавления к ним отходов. После вычисления средних значений длины корней в трёх повторностях для каждой культуры семян в опыте и контроле определяли эффект торможения (E_T)².

Отнесение отходов к классу опасности на основании показателей токсического действия, установленных в ходе исследований с применением тест-моделей (водные, почвенные беспозвоночные животные и высшие растения), проводили с использованием критериев, разработанных для каждой тест-модели². Статистическую обработку полученных данных выполняли стандартными методами.

² Метод экспериментального определения токсичности отходов производства: инструкция: утв. постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь 07.04.2016, № 044-1215. Введ. с 20.06.2016. Минск, 2015. 56 с.

Таблица 1 / Table 1

Выживаемость *Eisenia foetida* после воздействия нефтехимических шламов и отработанных катализаторов
Survival of *Eisenia foetida* after exposure to petrochemical sludge and spent catalysts

Показатель Index	Концентрация, г/кг Concentration, g/kg	Гибель Death	
		Абсолютные значения, шт. Absolute values, pcs.	Относительные значения, % Relative values, %
Нефтехимические шламы Petrochemical sludge	Контроль Control	1	4,76
	10,0	1	4,76
	15,0	6	28,57
	30,0	16	76,19
	60,0	19	90,48
Отработанные катализаторы Spent catalysts	Контроль Control	1	4,76
	5,0	1	4,76
	15,0	5	23,81
	30,0	13	61,90
	50,0	20	95,24

Результаты

По итогам проведённых исследований на тест-модели *Eisenia foetida* отмечено значительное снижение выживаемости олигохет в условиях воздействия нефтехимических шламов в диапазоне концентраций 15,0–60,0 г/кг и отработанных катализаторов в концентрациях 15,0–50,0 г/кг (табл. 1).

На основании результатов субхронического воздействия в течение семи суток нефтехимических шламов и отработанных катализаторов установлены значения LC_{50} : 21,94 (14,95–32,22) и 21,71 (14,20–33,19) г/кг соответственно. На основании классификации отходов производства оба изученных химических отхода могут быть отнесены к умеренно опасным отходам (3-й класс) по опасному свойству экотоксичности.

Результаты оценки токсичности шлама ёмкостей для хранения смолы пиролизной тяжёлой на тест-модели *Lymnaea stagnalis* представлены в табл. 2.

В соответствии с критериями классификации опасных отходов производства по классам опасности с использованием тест-модели *Lymnaea stagnalis* изученный шлам нефтехимический может быть отнесён к умеренно опасным отходам (3-й класс).

После экспозиции отработанных катализаторов в остром и подостром экспериментах в концентрациях от 10,0 до 50,0 мг/мл наблюдались изменения формы тела и характера движения инфузорий *Tetrahymena pyriformis*, в поле зрения также встречались погибшие организмы. При трёхчасовой экспозиции отхода в концентрации 100,0 мг/мл выявлена гибель всех инфузорий. Значения средней летальной концентрации отхода в остром и подостром экспериментах составляли $94,5 \pm 0,05$ и $43,7 \pm 0,01$ мг/мл соответственно, на основании чего отработанные катализаторы могут быть отнесены к малоопасным отходам (4-й класс). Однако значение $K_{\text{кум}}$, установленное

Таблица 2 / Table 2

Показатели выклева молоди моллюска *Lymnaea stagnalis* после воздействия нефтехимических шламов
Hatching rates of juvenile *Lymnaea stagnalis* after exposure to petrochemical sludge

Концентрация, г/кг Concentration, g/kg	Успешный выклев, % Successful hatching, %	Коэффициент вариации, % Coefficient of variation, %	Угнетение выклева, % Hatching inhibition, %
Контроль Control	90,38	1,42	—
0,5	83,50	5,27	7,61
1,0	39,43	5,45	56,37
5,0	17,48	7,56	80,66
10,0	1,88	9,12	97,92

Таблица 3 / Table 3

Оценка хронической токсичности отработанных катализаторов на популяцию *Tetrahymena pyriformis*
Evaluation of chronic toxicity of spent catalysts on the population of *Tetrahymena pyriformis*

Показатель Index	Концентрация, г/кг Concentration, g/kg	Длительность экспозиции, ч Exposure duration, h			
		24	48	72	96
Число поколений Number of generations $M \pm m$	Контроль Control	3,78 ± 0,18	6,41 ± 0,01	7,10 ± 0,01	7,37 ± 0,00
	0,00001	4,08 ± 0,06	6,46 ± 0,09	7,41 ± 0,09	7,42 ± 0,01
	0,0001	4,09 ± 0,07	6,64 ± 0,04	7,23 ± 0,03	7,56 ± 0,02
	0,001	4,84 ± 0,02	7,10 ± 0,04	9,64 ± 0,03	7,77 ± 0,05
	0,01	4,95 ± 0,02	7,75 ± 0,03	8,96 ± 0,14	7,83 ± 0,10
	0,1	4,86 ± 0,07	7,81 ± 0,02	8,05 ± 0,07	7,77 ± 0,08
	1,0	3,74 ± 0,04	7,96 ± 0,07	7,91 ± 0,09	7,95 ± 0,00
	10,0	0,79 ± 0,12	3,35 ± 0,10	5,01 ± 0,06	5,56 ± 0,09
	25,0	0,70 ± 0,16	0,79 ± 0,12	1,89 ± 0,17	3,58 ± 0,10
Численность популяции (% относительно контроля) Population size (% relative to control)	Контроль Control	100	100	100	100
	0,00001	121	104	125	104
	0,0001	123	116	115	113
	0,001	201	163	126	130
	0,01	221	254	193	138
	0,1	208	264	193	133
	1,0	96	293	175	149
	10,0	15	11	21	19
	25,0	4	2	5	7
	50,0	0	0	0	0

в подостром эксперименте, составило 0,46, что определяет отнесение изученного отхода к умеренно опасным (3-й класс).

Основные результаты влияния отработанных катализаторов в хроническом эксперименте на популяционную динамику тест-объекта, представленного культурой ресничных инфузорий, отражены в табл. 3, 4.

Мутагенная активность на тест-модели *Tetrahymena pyriformis* установлена для отработанных

катализаторов в концентрациях от 1,0 до 25,0 мг/мл на фоне развития ряда других признаков токсического действия.

На основании биотестирования отхода в хроническом эксперименте на *Tetrahymena pyriformis* были установлены $K_{\text{кум}}$ (0,90) и значение МНД (0,1 мг/мл). Таким образом, по результатам хронического воздействия на культуру ресничных инфузорий отработанные катализаторы могут быть отнесены к 3-му классу опасности.

Таблица 4 / Table 4

Оценка показателей биологического действия отработанных катализаторов на популяцию *Tetrahymena pyriformis*
Evaluation of biological activity of spent catalysts on the population of *Tetrahymena pyriformis*

Концентрация, г/кг Concentration, g/kg	$K_{\text{ад}}$ $K_{\text{ад}}$	Кислотная резистентность Acid resistance	Мутагенность Mutagenicity
Контроль Control	1,00 ± 0,00	1,00 ± 0,00	Отрицательная Negative
0,00001	1,12 ± 0,02	1,00 ± 0,00	Отрицательная Negative
0,0001	1,13 ± 0,01	1,00 ± 0,00	Отрицательная Negative
0,001	1,40 ± 0,02	0,90 ± 0,00	Отрицательная Negative
0,01	1,85 ± 0,09	0,90 ± 0,00	Отрицательная Negative
0,1	1,84 ± 0,07	0,90 ± 0,00	Отрицательная Negative
1,0	1,87 ± 0,07	0,90 ± 0,00	Положительная Positive
10,0	0,02 ± 0,00	0,80 ± 0,00	Положительная Positive
25,0	0,01 ± 0,00	0,50 ± 0,00	Положительная Positive

Таблица 5 / Table 5

**Изучение фитотоксичности нефтехимических
шламов и отработанных катализаторов**
**Study of phytotoxicity of petrochemical sludge
and spent catalysts**

Химические отходы Chemical waste	Культура Culture	Ет, %
Нефтехимические шламы Petrochemical sludge	Редис Radish	13,93
	Огурец Cucumber	10,37
	Овёс Oats	9,71
Отработанные катализаторы Spent catalysts	Редис Radish	13,51
	Огурец Cucumber	12,05
	Овёс Oats	19,66

Экспериментальные данные, полученные в ходе оценки фитотоксического действия отработанных катализаторов и нефтехимических шламов, свидетельствуют об относительно низкой степени токсичности отходов указанных видов для роста и развития высших растений в заданных концентрациях. Эффекты торможения развития корешков проростков семян были выявлены на уровне, не превышающем 20%, то есть по степени выраженности не достигали порога токсического действия (условно принятого согласно методу исследований), что определяет отнесение изученных отходов к неопасным по показателю фитотоксичности (табл. 5).

Обсуждение

Высокую чувствительность к тестируемым отходам производства показала тест-модель одноклеточных организмов *Tetrahymena pyriformis*, цитоплазматическая мембрана которых служила единственным барьерным органом с функцией поддержания постоянства внутренней среды инфузорий и регуляцией системы защиты и детоксикации в условиях влияния токсикантов, присутствующих в водной вытяжке из отходов, — отработанных катализаторов. По-видимому, ионы тяжёлых металлов (никеля, молибдена, кобальта, вольфрама), содержащиеся в отработанных катализаторах, в условиях влияния отходов в наивысших заданных концентрациях оказали значительное цитотоксическое действие, зафиксированное при оценке таких показателей у одноклеточных организмов *T. pyriformis*, как выживаемость, рост и размножение (10,0–100,0 г/кг), кислотная резистентность, мутагенность (1,0–25,0 г/кг) (см. табл. 3, 4).

Оценка показателя адаптационной реакции *Tetrahymena pyriformis* по результатам воздействия промышленных отходов в концентрациях

0,00001–1,0 мг/мл позволила выявить активацию адаптационно-приспособительных механизмов популяции инфузорий на основании дозозависимого возрастания коэффициента адаптогенности. Вместе с тем в условиях хронической 96-часовой экспозиции тест-объекта отработанными катализаторами в концентрациях 10,0 и 25,0 мг/мл отмечено значительное увеличение смертности организмов, при этом у выживших инфузорий присутствовали признаки несостоятельности реализации адаптационных механизмов наряду со снижением устойчивости клеточных мембран к негативному воздействию отхода, на что указывало снижение показателя кислотной резистентности (см. табл. 3, 4).

Одной из предполагаемых причин отсутствия выраженного токсического влияния изученных отходов в фитотесте может быть удовлетворение потребности проростков культур в рост-стимулирующих компонентах, содержащихся в подобных продуктах и отходах нефтехимической промышленности, — микроэлементах и других биологически активных веществах. В пользу данного предположения свидетельствует также ростостимулирующее действие отработанных катализаторов, выявленное в условиях 96-часовой экспозиции лабораторной популяции инфузорий *Tetrahymena pyriformis* в концентрациях от 0,00001 до 1,0 мг/мл. В то же время угнетение жизнеспособности дождевых червей *Eisenia foetida*, установленное в условиях субхронического воздействия нефтехимических шламов и отработанных катализаторов, очевидно, обусловлено как анатомо-физиологическими особенностями, так и образом жизни данного представителя почвенной фауны, — практически постоянным контактом организма с содержащим отходы субстратом посредством прямого касания всей поверхностью тела при передвижении олихохет наряду с пропусканием грунта через желудочно-кишечный тракт.

Следует отметить, что наиболее выраженные токсические эффекты отработанных катализаторов были выявлены для различных тест-моделей в сопоставимых концентрациях: значительное снижение выживаемости дождевых червей наблюдалось в 7-суточном эксперименте при концентрациях от 5,0 до 50,0 мг/мл, а увеличение смертности инфузорий отмечено в 4-суточном эксперименте при воздействии отхода в концентрациях от 10,0 до 50,0 мг/мл. Полученные результаты косвенно свидетельствуют о сходном механизме реализации токсических эффектов промышленных отходов данного вида на биологические объекты.

Выявленное эмбриотоксическое действие нефтехимических шламов в концентрациях 1,0 и 10,0 мг/мл на зародышевые капсулы *Lymnaea stagnalis* (большого прудовика) может быть следствием высокой уязвимости растущего и развивающегося эмбриона к воздействию токсичных химических веществ (нафталинов, метилнафталинов, бензапирена и других ароматических углеводородов), входящих в состав нефтехимических шламов. Очевидно, что выраженный эффект угнетения выклева молоди *L. Stagnalis* как интегральный показатель токсического действия, отмеченный при действии отходов в наивысших заданных концентрациях (1,0–10,0 мг/кг), является следствием серьёзных нарушений эмбрионального развития — мальформаций и эмбриональной гибели.

Отнесение отходов производства к классу опасности на основании результатов оценки нескольких показателей на одной тест-модели либо показателей, оценённых на нескольких альтернативных тест-моделях, предполагает следование принципу оценки степени токсичности по лимитирующему показателю (наименее «благополучному» результату, полученному в наиболее чувствительной тест-модели или тест-моделях). Так, при установлении класса опасности для нефтехимических шламов лимитирующими показателями стали параметры оценки экотоксичности в тест-моделях *Eisenia foetida* (3-й класс) и *Lymnaea stagnalis* (3-й класс), для отработанных катализаторов — *Eisenia foetida* (3-й класс) и *Tetrahymena pyriformis* (3-й класс) [14, 15].

Ограничение исследования. Исследование ограничено оцениваемыми отходами химической про-

мышленности, а также используемыми альтернативными тест-моделями для биотестирования.

Заключение

1. Результаты проведённых экотоксикологических исследований свидетельствуют о целесообразности использования комплексного подхода к проведению биотестирования отходов химической промышленности по показателю экотоксического действия. Применение нескольких тест-моделей, представленных организмами, занимающими в естественной среде обитания различные экологические ниши, а также отличающимися по анатомическим, физиологическим и поведенческим характеристикам, позволяет оценить степень токсичности опасных отходов химической промышленности и исследовать характер их воздействия на представителей флоры и фауны по различным фиксируемым биологическим откликам.

2. При использовании альтернативных тест-моделей для биотестирования отходов нефтехимических шламов и отработанных катализаторов по показателю экотоксичности установлен итоговый 3-й класс опасности (умеренно опасные отходы).

3. Развитие экологических и экономических направлений экотоксикологического биотестирования отходов предприятий химической промышленности вносит весомый вклад в поддержание санитарно-эпидемиологического благополучия населения и сохранение экологического баланса окружающей природной среды, в том числе видового разнообразия естественных и урбанизированных биогеоценозов.

ЛИТЕРАТУРА

- Мануйлова Т.А., Панков Н.Ф. Основные направления деятельности по повышению уровня экологизации предприятий. *Пищевая промышленность*. 2007; (7): 16–9. <https://elibrary.ru/iadzbr>
- Зорин А.Д., Каратаев Е.Н., Занозина В.Ф. Разработка мобильной установки переработки отходов нефтехимии в жидкое топливо. *Записки Горного института*. 2005; 166: 45–6.
- Гагарина Е.С. Зеленая инфраструктура и экосистемные услуги в устойчивом развитии городов. *Архитектура и современные информационные технологии*. 2023; (1): 228–46. <https://doi.org/10.24412/1998-4839-2023-1-228-247> <https://elibrary.ru/yicsur>
- Гудкова Е.А., Широков П.Н. Токсичное загрязнение: актуальные аспекты обращения с отходами из пластмасс, оптимальные пути решения без применения запретительных мер. *Токсикологический вестник*. 2024; 32(1): 5–13. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2024-32-1-5-13> <https://elibrary.ru/fqjfbj>
- Хамидулина Х.Х., Назаренко А.К., Тарасова Е.В., Рабикова Д.Н., Петрова Е.С., Филин А.С. Подходы Европейского законодательства к регулированию обращения с отходами (обзор). *Токсикологический вестник*. 2022; 30(4): 255–66. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2022-30-4-255-266> <https://elibrary.ru/crlfra>
- Хамидулина Х.Х., Тарасова Е.В., Назаренко А.К., Рабикова Д.Н., Проскурина А.С. Предложения по совершенствованию методической и нормативно-правовой базы Российской Федерации в области химической безопасности. *Токсикологический вестник*. 2023; 31(4): 214–25. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2023-31-4-214-225> <https://elibrary.ru/musrlk>
- Бурла И.В. *Основы технологии нефтехимического синтеза*. Новополоцк; 2013.
- Солодова Н.Л., Черкасова Е.И. Тенденции развития нефтепереработки в России. *Вестник Технологического университета*. 2016; 19(21): 57–63. <https://elibrary.ru/xccjud>
- Тархов Л.Г., Морозов М.С., Лузина Н.Н. Исследование влияния параметров регенерации на характеристику структуры катализаторов гидропроцессов. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология*. 2019; (1): 45–58. <https://doi.org/10.15593/2224-9400/2019.1.5> <https://elibrary.ru/cwvscsk>
- Фатхутдинов А.И., Ибрагимова Д.А., Иванова И.А., Шарафиева З.Ф., Мухаметзянова А.А., Павлов А.В. Катализаторы в процессах гидрокрекинга остаточного сырья. *Вестник Технологического университета*. 2017; 20(7): 74–7. <https://elibrary.ru/ykxjxtj>
- Юсевич А.И., Грушова Е.И., Куис О.В. *Вторичные виды сырья в технологии органического синтеза*. Минск; 2012. <https://elibrary.ru/ugiaso>
- Петрова С.Ю., Гомолко Т.Н., Ильюкова И.И., Грынчак В.А. Комплексная гигиеническая оценка опасности отходов производства. *Современные проблемы гигиены, радиационной и экологической медицины*. 2015; (5): 209–18. <https://elibrary.ru/vmnisz>
- Никитина Е.В., Наумова Р.П., Якушева О.И., Гарусов А.В. Токсикологические аспекты биоремедиации нефтехимического шлама. *Ученые записки Казанского государственного университета. Серия: Естественные науки*. 2005; 147(2): 161–71. <https://elibrary.ru/hqtvxn>
- Камлюк С.Н., Борис О.А., Петрова С.Ю., Анисович М.В., Васильева М.М., Июла В.И. Применение водных и почвенных беспозвоночных животных в системе определения класса опасности отходов производства — шлама камнеобработки. *Медицина труда и экология человека*. 2021; (1): 49–54. <https://doi.org/10.24412/2411-3794-2021-10104> <https://elibrary.ru/phahuw>
- Камлюк С.Н., Борис О.А., Ильюкова И.И. Оценка токсичности отходов гальванического производства с применением беспозвоночных животных. *Вестник Фонда фундаментальных исследований*. 2020; (1): 59–68.

16. Грынчак В.А., Сычик С.И. Особенности токсического действия диизонилфталата и его регламентирование в полимерных материалах и изделиях медицинского назначения. *Анализ риска здоровью*. 2020; (1): 118–25. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.1.13> <https://elibrary.ru/khexhm>
17. Морозов А.Д., Горленко А.С., Лунегова Л.И., Яковлев А.С. Влияние состава и происхождения золошлаковых отходов угольной генерации на отклик организмов, применяемых в биотестировании. *Токсикологический вестник*. 2024; 32(4): 239–47. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2024-32-4-239-247> <https://elibrary.ru/nnwvcv>

REFERENCES

1. Manuilova T.A., Pankov N.F. The main activities aimed at improving the level of greening enterprises. *Pishcheyaya promyshlennost'*. 2007; (7): 16–9. <https://elibrary.ru/iadzbr> (in Russian)
2. Zorin A.D., Karataev E.N., Zanozina V.F. The main activities aimed at improving the level of greening enterprises. *Zapiski Gornogo instituta*. 2005; 166: 45–6. (in Russian)
3. Gagarina E.S. Green infrastructure and ecosystem services in sustainable urban development. *Arkhitektura i sovremennye informatsionnye tekhnologii*. 2023; (1): 228–46. <https://doi.org/10.24412/1998-4839-2023-1-228-247> <https://elibrary.ru/yicsur> (in Russian)
4. Gudkova E.A., Shirokov P.N. Toxic pollution: current aspects of plastic waste management, optimal solutions without prohibitive measures usage. *Toksikologicheskii vestnik*. 2024; 32(1): 5–13. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2024-32-1-5-13> <https://elibrary.ru/fqjfbj> (in Russian)
5. Khamidulina Kh.Kh., Nazarenko A.K., Tarasova E.V., Rabikova D.N., Petrova E.S., Filin A.S. Approaches of European to the regulation of waste management (review). *Toksikologicheskii vestnik*. 2022; 30(4): 255–66. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2022-30-4-255-266> <https://elibrary.ru/crlfra> (in Russian)
6. Khamidulina Kh.Kh., Tarasova E.V., Nazarenko A.K., Rabikova D.N., Proskurina A.S. Proposals for improving the methodic and regulatory framework of the Russian Federation in the field of chemical safety. *Toksikologicheskii vestnik*. 2023; 31(4): 214–25. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2023-31-4-214-225> <https://elibrary.ru/musrlk> (in Russian)
7. Buraya I.V. *Fundamentals of Petrochemical Synthesis Technology [Osnovy tekhnologii neftekhimicheskogo sinteza]*. Novopolotsk; 2013. (in Russian)
8. Solodova N.L., Cherkasova E.I. Trends in the development of oil refining in Russia. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*. 2016; 19(21): 57–63. <https://elibrary.ru/xccjud> (in Russian)
9. Tarkhov L.G., Morozov M.S., Luzina N.N. Research of the influence of parameters of regeneration on the structure characteristics of the hydroprocesses catalyst. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya*. 2019; (1): 45–58. <https://doi.org/10.15593/2224-9400/2019.1.5> <https://elibrary.ru/cwvscj> (in Russian)
10. Fatkhutdinov A.I., Ibragimova D.A., Ivanova I.A., Sharafieva Z.F., Mukhametzhanova A.A., Pavlov A.V. Catalysts in residual raw material hydrocracking processes. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*. 2017; 20(7): 74–7. <https://elibrary.ru/ykjtjx> (in Russian)
11. Yusevich A.I., Grushova E.I., Kuis O.V. *Secondary Raw Materials in Organic Synthesis Technology [Vtorichnye vidy syr'ya v tekhnologii organicheskogo sinteza]*. Minsk; 2012. <https://elibrary.ru/ugiaco> (in Russian)
12. Petrova S.Y., Gomolko T.N., Ilyukova I.I., Grynychak V.A. Complex hygienic evaluation of the risk of production waste. *Sovremennye problemy gigieny, radiatsionnoi i ekologicheskoi meditsiny*. 2015; (5): 209–18. <https://elibrary.ru/vmnisz> (in Russian)
13. Nikitina E.V., Naumova R.P., Yakusheva O.I., Garusov A.V. Toxicological aspects of petrochemical sludge bioremediation. *Uchenye zapiski Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki*. 2005; 147(2): 161–71. <https://elibrary.ru/hgtvxn> (in Russian)
14. Kamliuk S.N., Boris O.A., Petrova S.Yu., Anisovich M.V., Vasilyeva M.M., Ioda V.I. Application of aquatic and soil invertebrate animals in the system for determining the class of hazard of production waste: stone sludge. *Meditsina truda i ekologiya cheloveka*. 2021; (1): 49–54. <https://elibrary.ru/phahuw> <https://doi.org/10.24412/2411-3794-2021-10104> (in Russian)
15. Kamlyuk S.N., Boris O.A., Il'yukova I.I. Assessment of the toxicity of electroplating waste using invertebrates. *Vestnik Fonda fundamental'nykh issledovaniy*. 2020; (1): 59–68. (in Russian)
16. Hrynychak V.A., Sychik S.I. Peculiarities of toxic effects produced by diisonyl phthalate and regulation over it in polymer materials and medical products. *Health Risk Analysis*. 2020; (1): 118–125. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.1.13> <https://elibrary.ru/ofzaof> (in Russian)
17. Morozov A.D., Gorlenko A.S., Lunegova L.I., Yakovlev A.S. The influence of the composition and origin of ash and slag waste from coal generation on the response of organisms used in biotesting. *Toksikologicheskii vestnik*. 2024; 32(4): 239–47. <https://doi.org/10.47470/0869-7922-2024-32-4-239-247> <https://elibrary.ru/nnwvcv> (in Russian)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Грынчак Виталий Александрович — кандидат медицинских наук, доцент, заведующий лабораторией профилактической и экологической токсикологии Научно-исследовательского института гигиены, токсикологии, эпидемиологии, вирусологии и микробиологии государственного учреждения «Республиканский центр гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья», 220012, Минск, Республика Беларусь. E-mail: ecoltox@rspch.by

Камлюк Светлана Николаевна — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории профилактической и экологической токсикологии Научно-исследовательского института гигиены, токсикологии, эпидемиологии, вирусологии и микробиологии государственного учреждения «Республиканский центр гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья», 220012, Минск, Республика Беларусь. E-mail: ecoltox@rspch.by

Ильюкова Ирина Ивановна — кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории профилактической и экологической токсикологии Научно-исследовательского института гигиены, токсикологии, эпидемиологии, вирусологии и микробиологии государственного учреждения «Республиканский центр гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья», 220012, Минск, Республика Беларусь. E-mail: ecoltox@rspch.by

Гомолко Татьяна Николаевна — старший научный сотрудник лаборатории профилактической и экологической токсикологии Научно-исследовательского института гигиены, токсикологии, эпидемиологии, вирусологии и микробиологии государственного учреждения «Республиканский центр гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья», 220012, Минск, Республика Беларусь. E-mail: ecoltox@rspch.by

Юркевич Елена Станиславовна — кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории профилактической и экологической токсикологии Научно-исследовательского института гигиены, токсикологии, эпидемиологии, вирусологии и микробиологии государственного учреждения «Республиканский центр гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья», 220012, Минск, Республика Беларусь. E-mail: ecoltox@rspch.by

Петрова Светлана Юрьевна — кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории профилактической и экологической токсикологии Научно-исследовательского института гигиены, токсикологии, эпидемиологии, вирусологии и микробиологии государственного учреждения «Республиканский центр гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья», 220012, Минск, Республика Беларусь. E-mail: ecoltox@rspch.by

Ляппо Лидия Геннадьевна — научный сотрудник лаборатории профилактической и экологической токсикологии Научно-исследовательского института гигиены, токсикологии, эпидемиологии, вирусологии и микробиологии государственного учреждения «Республиканский центр гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья», 220012, Минск, Республика Беларусь. E-mail: lida_lappo@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vitaliy A. Hrynychak — Cand. Sci. (Medicine), Associate Professor, Head of the Laboratory of Preventive and Environmental Toxicology at the Research Institute of Hygiene, Toxicology, Epidemiology, Virology and Microbiology of the Republican Center for Hygiene, Epidemiology and Public Health, Minsk, 220012, Republic of Belarus, <https://orcid.org/0000-0002-4119-1793> E-mail: ecoltox@rspch.by

Svetlana N. Kamliuk — Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher at the Laboratory of Preventive and Environmental Toxicology at the Research Institute of Hygiene, Toxicology, Epidemiology, Virology and Microbiology of the Republican Center for Hygiene, Epidemiology and Public Health, 220012, Minsk, Republic of Belarus, <https://orcid.org/0009-0006-4771-4037> E-mail: ecoltox@rspch.by

Irina I. Ilyukova — Cand. Sci. (Medicine), Leading Researcher at the Laboratory of Preventive and Environmental Toxicology at the Research Institute of Hygiene, Toxicology, Epidemiology, Virology and Microbiology of the Republican Center for Hygiene, Epidemiology and Public Health, Minsk, 220012, Republic of Belarus, <https://orcid.org/0000-0002-0897-8340> E-mail: ecoltox@rspch.by

Tatyana N. Gomolko — Senior Researcher at the Laboratory of Preventive and Environmental Toxicology at the Research Institute of Hygiene, Toxicology, Epidemiology, Virology and Microbiology of the Republican Center for Hygiene, Epidemiology and Public Health, Minsk, 220012, Republic of Belarus, <https://orcid.org/0000-0002-0404-4081> E-mail: ecoltox@rspch

Elena S. Yurkevich — Cand. Sci. (Medicine), Leading Researcher at the Laboratory of Preventive and Environmental Toxicology at the Research Institute of Hygiene, Toxicology, Epidemiology, Virology and Microbiology of the Republican Center for Hygiene, Epidemiology and Public Health, Minsk, 220012, Republic of Belarus, <https://orcid.org/0009-0003-7115-0364> E-mail: ecoltox@rspch.by

Svetlana Yu. Petrova — Cand. Sci. (Medicine), Leading Researcher at the Laboratory of Preventive and Environmental Toxicology at the Research Institute of Hygiene, Toxicology, Epidemiology, Virology and Microbiology of the Republican Center for Hygiene, Epidemiology and Public Health, Minsk, 220012, Republic of Belarus, <https://orcid.org/0000-0001-8685-7440> E-mail: ecoltox@rspch.by

Lidia G. Lappo — Researcher at the Laboratory of Preventive and Environmental Toxicology at the Research Institute of Hygiene, Toxicology, Epidemiology, Virology and Microbiology of the Republican Center for Hygiene, Epidemiology and Public Health, Minsk, 220012, Republic of Belarus, <https://orcid.org/0009-0009-0312-3982> E-mail: lida_lappo@bk.ru