
ХИМИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ
CHEMISTRY AND TECHNOLOGY OF ORGANIC SUBSTANCES

ISSN 2410-6593 (Print), ISSN 2686-7575 (Online)

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2023-18-3-187-218>

УДК 661.7+006.065.2+504.062



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

**Оценка ресурсосберегающих технологий
малотоннажных химических производств на соответствие
принципам наилучших доступных технологий**

Н.А. Костикова[✉], Е.Н. Глухан, П.В. Казаков, М.М. Антонова, Д.И. Климов

Государственный научно-исследовательский институт органической химии и технологии,
Москва, 111024 Россия

[✉] Автор для переписки, e-mail: kutkin@gosniiokht.ru

Аннотация

Цели. Разработать методику количественной оценки новых технологий в соответствии с принципами наилучших доступных технологий (НДТ). Провести оценку разработанных технологий малотоннажных химических производств тетраметилтиурамдисульфида, N-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамида, диизопропилксантогендисульфида и N-фенил-2-нафтиламина на соответствие принципам НДТ и сравнить с альтернативными (реализованными, известными) технологиями по уровню воздействия на окружающую среду (ОС).

Методы. Методика количественной оценки новых технологий производства органических веществ в соответствии с принципами НДТ.

Результаты. Разработанная методика количественной оценки новых технологий в соответствии с принципами НДТ на основании расчета комплексных индексов сравнения с альтернативными технологиями по технологическим и экологическим показателям позволила определить уровень внедряемых технологий получения тетраметилтиурамдисульфида, N-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамида, диизопропилксантогендисульфида и N-фенил-2-нафтиламина по минимизации воздействия на ОС, в том числе за счет разработки специальных технологических решений по ресурсосбережению

и снижению отходности, и провести количественную оценку достигаемого экологического результата. Установлено, что рассмотренные новые технологии малотоннажных химических производств соответствуют принципам НДТ и являются более экологически совершенными по сравнению с альтернативными, ранее реализованными в СССР. **Выводы.** Впервые предложена методика количественной оценки новых технологий в соответствии с принципами НДТ и показана возможность ее использования на этапе принятия основных технологических решений по внедряемому способу производства для обеспечения выполнения законодательных требований к технологиям в сфере экологической безопасности по достижению целей охраны ОС на примере созданных во ФГУП «ГосНИИОХТ» малотоннажных технологий производства тетраметилтиурамдисульфида, N-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамида, диизопропилксантогендисульфида и N-фенил-2-нафтиламина.

Ключевые слова: технологии малотоннажных химических производств, методика количественной оценки, принципы наилучших доступных технологий, НДТ, тетраметилтиурамдисульфид, N-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамид, диизопропилксантогендисульфид, N-фенил-2-нафтиламин

Для цитирования: Костикова Н.А., Глухан Е.Н., Казаков П.В., Антонова М.М., Климов Д.И. Оценка ресурсосберегающих технологий малотоннажных химических производств на соответствие принципам наилучших доступных технологий. *Тонкие химические технологии*. 2023;18(3):187–218. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2023-18-3-187-218>

RESEARCH ARTICLE

Assessment of resource-saving technologies in low-tonnage chemical industries for compliance with best available technologies principles

Natalia A. Kostikova✉, Elena N. Glukhan, Pavel V. Kazakov, Maria M. Antonova, Dmitry I. Klimov

GosNIIOKhT, State Scientific Center of the Russian Federation, Moscow, 111024 Russia

✉Corresponding author, e-mail: kutkin@gosniiocht.ru

Abstract

Objectives. To develop a methodology for the quantitative assessment of new technologies in accordance with the principles of best available technologies (BAT). To evaluate the developed technologies of low-tonnage chemical production of tetramethylthiuram disulfide, N-cyclohexyl-2-benzothiazolylsulfenamide, diisopropyl xanthogen disulfide, and N-phenyl-2-naphthylamine for compliance with BAT principles and compare with alternative (implemented, known) technologies in terms of environmental impact.

Methods. A methodology for the quantitative assessment of new technologies for the production of organic substances in accordance with BAT principles was used.

Results. The developed methodology for the quantitative assessment of new technologies in accordance with BAT principles based on the calculation of comprehensive comparison indicators with alternative technologies for technological and environmental indicators allowed us to determine the level of implemented technologies for the production of tetramethylthiuram disulfide, N-cyclohexyl-2-benzothiazolylsulfenamide, diisopropyl xanthogen disulfide, and N-phenyl-2-naphthylamine to minimize the impact on the environment, including through the development of special technological solutions for resource conservation and waste reduction, and to conduct a quantitative assessment of the achieved environmental outcome. It is established that the

considered new technologies of low-tonnage chemical production comply with BAT principles and are more environmentally advanced compared to alternative ones previously implemented in the USSR.

Conclusions. For the first time, a methodology for quantifying new technologies in accordance with BAT principles is proposed. The possibility of its use at the stage of making basic technological decisions on the implemented production method in order to ensure compliance with legislative requirements for technologies in the field of environmental safety to achieve environmental protection goals is shown on the example of low-tonnage technologies for the production of tetramethylthiuram disulfide, N-cyclohexyl-2-benzothiazolylsulfenamide, diisopropyl xanthogen disulfide, and N-phenyl-2-naphthylamine created in GosNIIOKhT.

Keywords: low-tonnage chemical production technologies, quantitative assessment methodology, best available technologies (BAT) principles, tetramethylthiuram disulfide, N-cyclohexyl-2-benzothiazolylsulfenamide, diisopropyl xanthogen disulfide, N-phenyl-2-naphthylamine

For citation: Kostikova N.A., Glukhan E.N., Kazakov P.V., Antonova M.M., Klimov D.I. Assessment of resource-saving technologies in low-tonnage chemical industries for compliance with best available technologies principles. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2023;18(3):187–218 (Russ., Eng.). <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2023-18-3-187-218>

ВВЕДЕНИЕ

Положениями Федерального закона от 31 декабря 2014 г. № 488-ФЗ «О промышленной политике в Российской Федерации» внедрение ресурсосберегающих и экологически безопасных технологий является одной из задач государственной промышленной политики в области производства. Реализация этой политики осуществляется, в том числе, путем отказа от использования устаревших и неэффективных технологий, перехода на принципы наилучших доступных технологий (НДТ) и внедрения современных технологий, причем критерии НДТ законодательно определены как критерии оценки используемых технологий по уровню воздействия на окружающую среду (ОС). В настоящее время выбор НДТ осуществляется на основе экспертных оценок¹.

Для обоснования НДТ [1], отображения процесса выбора НДТ [2], идентификации технологий как НДТ [3] предлагаются различные модели, основанные на системном подходе и использовании математического аппарата, а также на проведении эколого-экономического анализа НДТ. Очевидно, что в условиях государственного реформирования системы экологического регулирования и в соответствии с концепцией внедрения НДТ как основного механизма реализации государственной политики в сфере экологической безопасности, уже на стадии разработки новых технологий должно уделяться особое внимание решению вопросов, связанных с определением уровня вредного воздействия на ОС и его минимизации до нормативных значений, соответствующих НДТ. Это тем более актуально, поскольку производство основных органических химических веществ законодательно отнесено

¹ Постановление Правительства РФ от 23.12.2014 № 1458 «О порядке определения технологии в качестве наилучшей доступной технологии, а также разработки, актуализации и опубликования информационно-технических справочников по наилучшим доступным технологиям» (в ред. Постановлений Правительства Российской Федерации от 9 сентября 2015 г. № 954, от 28 декабря 2016 г. № 1508, от 09 марта 2019 г. № 250). URL: <http://www.consultant.ru/> (дата обращения 13.02.2022). [Decree of the Government of the Russian Federation of December 23, 2014, No. 1458 “On the procedure for determining technology as the best available technology, as well as the development, updating and publication of information and technical reference books on the best available technologies” (as amended by Decrees of the Government of the Russian Federation of September 9, 2015, No. 954; dated December 28, 2016, No. 1508; dated March 09, 2019, No. 250). URL: <http://www.consultant.ru/>. Accessed February 13, 2022 (in Russ.).]

к областям применения НДТ² и к объектам I категории по уровню негативного воздействия на ОС (значительное)³.

Указанные факторы определяют актуальность проведения предварительной оценки новых технологий для определения их соответствия современным экологическим требованиям. Однако методическая база для проведения такой оценки отсутствует. Разработка и внедрение в условиях малотоннажного промышленного производства высокоэффективных ресурсосберегающих технологий получения востребованных промышленным комплексом Российской Федерации материалов является одним из основных направлений научно-практической деятельности ФГУП «ГосНИИОХТ». Обеспечение современного уровня внедряемых технологий по минимизации воздействия на ОС достигается, в том числе, разработкой специальных технологических решений по ресурсосбережению и снижению отходности. Для оценки достигаемого экологического результата нами разработана «Методика количественной оценки новых технологий производства органических веществ в соответствии с принципами НДТ» [4].

В основу подхода для оценки новых технологий положены принципы НДТ⁴, соответствие которым

² Распоряжение Правительства Российской Федерации от 24 декабря 2014 г. (ред. от 24.05.2018) № 2674-р. «Об утверждении Перечня областей применения наилучших доступных технологий». URL: <http://www.consultant.ru/> (дата обращения 17.02.2020). [Decree of the Government of the Russian Federation dated December 24, 2014 (as amended on May 24, 2018) No. 2674-r. "On Approval of the List of Areas of Application of the Best Available Technologies." URL: <http://www.consultant.ru/>. Accessed February 17, 2020 (in Russ.).]

³ Постановление Правительства Российской Федерации «Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий» от 28 сентября 2015 г. № 1029. URL: <http://www.consultant.ru/> (дата обращения 17.02.2020). [Decree of the Government of the Russian Federation "On approval of the criteria for classifying objects that have a negative impact on the environment as objects of categories I, II, III and IV" dated September 28, 2015, No. 1029. URL: <http://www.consultant.ru/>. Accessed February 17, 2020 (in Russ.).]

⁴ Постановление Правительства Российской Федерации от 23.12.2014 № 1458 «Об утверждении правил определения технологии в качестве наилучшей доступной технологии, а также разработки, актуализации и опубликования информационно-технических справочников по наилучшим доступным технологиям». URL: <http://www.consultant.ru/> (дата обращения 13.09.2022). [Decree of the Government of the Russian Federation of December 23, 2014, No. 1458 "On approval of the rules for determining technology as the best available technology, as well as the development, updating and publication of information and technical reference books on the best available technologies." URL: <http://www.consultant.ru/>. Accessed September 09, 2022 (in Russ.).]

определяется на основании расчета комплексных индексов сравнения с альтернативными (реализованными, известными) технологиями по технологическим (количество отходов, выбросов и сбросов) и экологическим показателям (степени использования сырья и отходов и эффективности мероприятий по очистке газовых выбросов и сбросов в водоемы).

Оценка новых технологий на соответствие экологическим требованиям по уровню достижения целей охраны ОС является необходимым, но не достаточным элементом разработки. Одним из ключевых целевых показателей является достижение высокого уровня эффективности. Разработанная нами «Методика количественной оценки новых технологий производства органических веществ в соответствии с критериями экономической и экологической эффективности» [5] позволяет определить наиболее эффективный вариант организации производства по результатам расчета коэффициентов сравнительной экономической и экологической эффективности. Коэффициент сравнительной экономической эффективности включает оценку затрат на сырье и аппаратное оформление технологического процесса. Коэффициент сравнительной экологической эффективности отражает достигнутый уровень минимизации негативного воздействия на ОС при реализации технологии, а также эффективность затрат, обеспечивающих получение данного экологического результата. При этом оценка экономической эффективности экологических затрат позволяет исключить необоснованно затратные варианты по сравнению с полученным экологическим результатом и обеспечить соответствие разработанных технологических решений критериям НДТ.

В настоящей статье рассмотрены разработанные в ФГУП «ГосНИИОХТ» новые технологии получения тетраметилтиурамдисульфида, *N*-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамида, диизопропилксантогендисульфида и *N*-фенил-2-нафтиламина, проведен их анализ с использованием вышеуказанной методики, по результатам которого сделано заключение об экологическом уровне новых технологий, а также определены возможные направления их модернизации.

МЕТОДЫ

Расчет основных и дополнительных показателей [4] для сравнения разработанных технологий (табл. 1) выполнялся нами с использованием данных технологических регламентов производств.

Итоговая оценка разрабатываемой технологии проводилась путем сопоставления показателей данной технологии с показателями альтернативной

Таблица 1.⁵ Основные и дополнительные технологические показатели для сравнения технологий производства
Table 1.⁵ Main and additional technological indicators for comparing production technologies

Показатель Indicator	Характеристика показателя и методика его расчета Indicator characteristics and calculation method
Основные технологические показатели производства	
A_T	Норма образования твердых и жидких отходов, т/т (по данным регламента)
B_T	Удельные выбросы в атмосферу, т/т (по данным регламента)
C_T	Норма образования сточных вод, т/т (по данным регламента)
Дополнительные технологические показатели производства	
J_K	Степень комплексности и полноты извлечения полезных компонентов из исходного сырья. Рассчитывается как сумма коэффициентов извлечения компонентов исходного сырья с учетом выхода и без учета технологических потерь продукта, т/т $J_K = \sum_{i=1}^K J_i = \sum_{i=1}^K \frac{\sum_{i3=1}^N \Pi_i^{\text{из}}}{\sum_{C=1}^M \Pi_i^C},$ где K – количество ценных компонентов в сырье; N – количество продуктовых потоков; M – количество сырьевых потоков; $\Pi_i^{\text{из}}$ – количество i-го полезного вещества, перешедшего в готовые продукты, т; Π_i^C – количество i-го полезного вещества, содержащегося в исходном сырье, т
J_O	Степень использования образующихся отходов. Рассчитывается как доля регенерированного компонента в общей массе отхода, т/т. Рассчитывается по данным материального баланса операции регенерации в расчете на одну операцию. $J_O = \frac{\sum Q^{\text{п}} + \sum Q^{\text{р}}}{\sum Q^{\text{о}}},$ где $\sum Q^{\text{п}}$ – сумма отходов, используемых в производстведругой продукции, т/год; $\sum Q^{\text{р}}$ – количество реализованных отходов, т/год; $\sum Q^{\text{о}}$ – количество образующихся отходов, т/год
J_A	Степень очистки выбросов вредных веществ в атмосферу. Рассчитывается как доля уловленных газов и паров в общей массе абгазов производства, т/т. Может быть рассчитана по данным материальных балансов в расчете на одну операцию. $J_A = \frac{\sum V_i}{\sum V_j},$ где $\sum V_i$ – общая масса уловленных компонентов выбросов, т/год; $\sum V_j$ – общая масса веществ, содержащихся в образовавшихся в процессе производства газовых выбросах, т/год
J_B	Степень очистки сбросов в водоемы. Рассчитывается отнесением массы очищенных от вредных примесей сбросов к общей массе их образования, т/т. Может быть рассчитана по данным материальных балансов в расчете на одну операцию. $J_B = \frac{\sum W_l}{\sum W_k},$ где $\sum W_l$ – общая масса сбросов, т/год; $\sum W_k$ – общая масса образовавшихся сточных вод, т/год

⁵ Все таблицы на английском языке можно увидеть в PDF ENG. / You can see all tables in English in the PDF ENG file.

(реализованной, известной), при этом на основании материальных балансов этих технологий определялись расходные коэффициенты по сырью и вспомогательным материалам, нормы образования отходов производства, основные и дополнительные технологические показатели.

Далее рассчитывались комплексные индексы сравнения разработанной и альтернативной технологий производства и итоговый показатель оценки разработанной технологии на соответствие принципам НДТ (табл. 2).

Показатель K_1 характеризует степень снижения отходности новой технологии по сравнению с альтернативной. Целевым показателем является минимизация количества отходов. Поэтому для обеспечения соотношения $K_1 < 1$ величины, относящиеся к разрабатываемой технологии, приводятся в числителе.

Показатель K_2 характеризует степень повышения комплексности и полноты извлечения полезных компонентов по новой технологии по сравнению с альтернативной. Целевым показателем является увеличение уровня использования сырья. Поэтому для обеспечения соотношения $K_2 < 1$ величины, относящиеся к разрабатываемой технологии, приводятся в знаменателе.

Значение итогового показателя оценки новой (разработанной) технологии $I < 2$ позволяет сделать заключение о том, что разработанная технология отвечает принципам НДТ и является более экологически совершенной по сравнению с альтернативной [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка соответствия технологии производства тетраметилтиурамдисульфида принципам НДТ

В основу технологии производства тетраметилтиурамдисульфида положен разработанный нами одностадийный способ его получения [6], который включает конденсацию диметиламина с сероуглеродом с последующим перекисным окислением образующейся диметилдитиокарбаминовой кислоты без ее выделения.

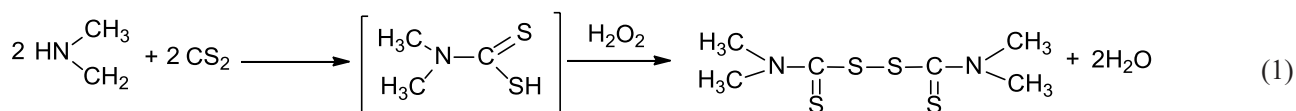
Реакция образования тетраметилтиурамдисульфида описывается уравнением (1).

Конденсация диметиламина с сероуглеродом проводится при эквимольном соотношении компонентов, перекисное окисление образующейся

Таблица 2. Комплексные индексы сравнения и итоговый показатель оценки разработанной технологии на соответствие принципам НДТ

Table 2. Comprehensive comparison indicators and the final indicator of the assessment of the developed technology for compliance with BAT principles

Показатель Indicator	Формула для расчета индекса Formula for calculating the indicator
Комплексный индекс сравнения основных технологических показателей разработанной и альтернативной технологий K_1	$K_1 = \frac{1}{3} \left(\frac{A_{T,P}}{A_{T,A}} + \frac{B_{T,P}}{B_{T,A}} + \frac{C_{T,P}}{C_{T,A}} \right),$ где $A_{T,P}$, $B_{T,P}$, $C_{T,P}$ и $A_{T,A}$, $B_{T,A}$, $C_{T,A}$ – удельные показатели отходов, выбросов в атмосферу и сбросов в природные воды для разработанной и для альтернативной технологии соответственно
Комплексный индекс сравнения дополнительных технологических показателей разработанной и альтернативной технологий K_2	$K_2 = \frac{1}{4} \left(\frac{J_{K,A}}{J_{K,P}} + \frac{J_{O,A}}{J_{O,P}} + \frac{J_{A,A}}{J_{A,P}} + \frac{J_{B,A}}{J_{B,P}} \right),$ где $J_{K,P}$, $J_{O,P}$, $J_{A,P}$, $J_{B,P}$ и $J_{K,A}$, $J_{O,A}$, $J_{A,A}$, $J_{B,A}$ – дополнительные технологические показатели для разработанной и альтернативной технологии соответственно
Итоговый показатель оценки разработанной технологии I	$I = K_1 + K_2$



диметилдитиокарбаминовой кислоты проводится при мольном соотношении диметиламин : сероуглерод : пероксид водорода, равном 1 : 1 : 0.55–0.57. Процесс проводится в среде метанола.

Расчет основных и дополнительных технологических показателей производства тетраметилтиурамдисульфида выполнен нами с использованием данных «Временного технологического регламента опытного малотоннажного производства тетраметилтиурамдисульфида на основе отечественного сырья, № ВТР-3-350» о расходных коэффициентах по сырью (табл. 3) и нормах образования отходов (табл. 4). Данные расчета основных и дополнительных технологических показателей производства тетраметилтиурамдисульфида представлены в табл. 5.

Итоговую оценку разработанной технологии производства тетраметилтиурамдисульфида мы проводили путем ее сопоставления с альтернативной, основанной на способе получения продукта окислением пероксидом водорода в присутствии серной кислоты натриевой соли диметилдитиокарбаминовой кислоты, синтезируемой по реакции диметиламина с сероуглеродом в присутствии щелочи при мольном отношении сероуглерод : диметиламин : гидрооксид натрия, равном 1 : 1 : 1.03 [7]. Выпавший осадок тетраметилтиурамдисульфида отфильтровывали, промывали, гранулировали и высушивали [8]. Данный процесс был реализован в СССР на Волгоградском производственном объединении «Химпром» [9].

Таблица 3. Расходные коэффициенты по сырью и вспомогательным материалам при производстве тетраметилтиурамдисульфида

Table 3. Consumption coefficients for raw materials and auxiliary materials in the tetramethylthiuram disulfide production

Наименование исходного сырья и материалов Name of raw materials	Расходные коэффициенты Expense coefficients		Примечание Note
	кг/операцию kg/operation	т/т t/t	
Диметиламин (33%)	72.2	1.29	–
Сероуглерод	40.2	0.73	–
Пероксид водорода (37%)	27.8	0.50	–
Метанол	4.5	0.08	с учетом регенерации
	565.4	10.10	без учета регенерации

Таблица 4. Нормы образования отходов, выбросы и сбросы при производстве тетраметилтиурамдисульфида

Table 4. Waste generation standards, emissions, and discharges in the tetramethylthiuram disulfide production

Вид отхода Type of waste	Агрегатное состояние отхода Aggregate state of waste	Состав Composition	Количество, % Amount, %	Норма образования отходов производства Production waste generation rate	
				кг/операцию kg/operation	т/т t/t
Кубовый остаток регенерации метанола	Жидкое	Кубовый остаток, в т.ч.:	100.00	83.9	1.50
		Вода	91.18	76.5	1.37
		Органическая примесь	4.17	3.5	0.06
		Тетраметилтиурам-дисульфид	4.65	3.9	0.07
Выбросы в атмосферу		отсутствуют			
Сброс сточных вод		отсутствует			

Таблица 5. Основные и дополнительные технологические показатели, рассчитанные для разработанной и альтернативной технологий производства тетраметилтиурамдисульфида**Table 5.** Basic and additional technological indicators calculated for the developed and existing alternative technologies used in the tetramethylthiuram disulfide production

Показатель Indicator	Методика расчета и значение показателя Calculation method and indicator value	
	Разработанная технология Developed technology	Альтернативная технология Alternative technology
Основные технологические показатели производства		
Норма образования твердых и жидких отходов	$A_{T,P} = 1.5$ т/т (табл. 4)	$A_{T,A} = 4.58$ т/т (табл. 7)
Удельные выбросы в атмосферу	Абгазы проходят локальную очистку в контактных аппаратах, эффективность очистки 100%, таким образом, выбросы в атмосферу отсутствуют (табл. 4, 7)	
	$B_{T,P} = 0$ т/т	$B_{T,A} = 0$ т/т
Норма образования сточных вод	Сброс сточных вод отсутствует (табл. 4, 7)	
	$C_{T,P} = 0$ т/т	$C_{T,A} = 0$ т/т
Дополнительные технологические показатели		
Степень комплексности и полноты извлечения полезных компонентов из исходного сырья	Рассчитывается как сумма коэффициентов извлечения диметиламина $П_{DMA}$ и сероуглерода $П_{CS_2}$ с учетом выхода тетраметилтиурамдисульфида (56.1 кг на операцию, 95%) без учета технологических потерь продукта в фильтрате и промывном растворе. $П_{DMA} = 0.41/0.43 = 0.95$ т/т $П_{CS_2} = 0.69/0.73 = 0.95$ т/т $J_{K,P} = 0.95 + 0.95 = 1.90$ т/т $J_{K,P} = 1.90$ т/т	$J_{K,A} = 1.90$ т/т
Степень использования образующихся отходов	Рассчитывается как доля регенерированного метанола в общей массе отхода по данным материального баланса стадии регенерации метанола в расчете на одну операцию $J_{O,P} = 558.2/644.9 = 0.87$ т/т	$J_{O,A} = 0.69$ т/т
Степень очистки выбросов вредных веществ в атмосферу	Рассчитывается как доля уловленных паров метанола в ловушке и в процессе локальной очистки в контактных аппаратах в общей массе абгазов с учетом 100%-ной эффективности их очистки (табл. 4, 7)	
	$J_{A,P} = 1.00$	$J_{A,A} = 1.00$ т/т
Степень очистки сбросов в водоемы	Сброс сточных вод отсутствует (табл. 4, 7)	
	$J_{B,P} = 0$ т/т	$J_{B,A} = 0$ т/т

Реакция образования диметилдитиокарбата натрия может быть описана схемой (2).

Дальнейшие превращения диметилдитиокарбата натрия с образованием тетраметилтиурамдисульфида представлены схемой (3).

На основании рассчитанных материальных балансов определялись расходные коэффициенты по сырью и вспомогательным материалам (табл. 6) и нормы образования отходов производства тетраметилтиурамдисульфида (табл. 7) по альтернативной технологии.

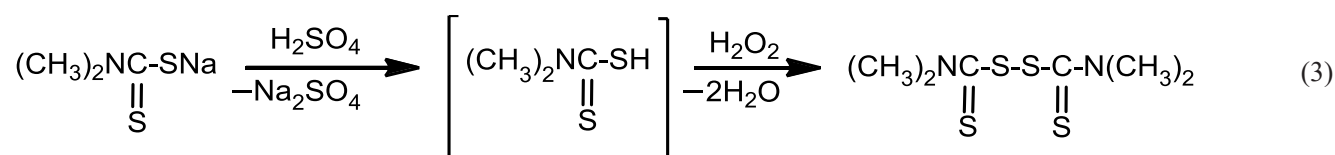
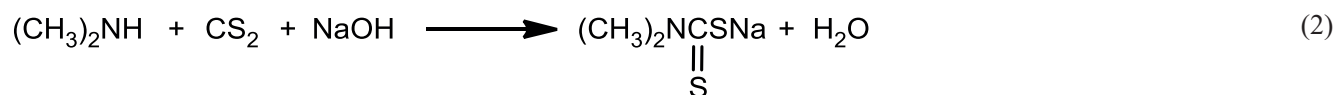


Таблица 6. Расходные коэффициенты по сырью и вспомогательным материалам при производстве тетраметилтиурамдисульфида по альтернативной технологии

Table 6. Consumption coefficients for raw materials and auxiliary materials in the tetramethylthiuram disulfide production using an alternative technology

Наименование исходного сырья и материалов Name of raw materials	Расходные коэффициенты Expense coefficients		Примечание Note
	кг/операцию kg/operation	т/т t/t	
Диметиламин (33%)	72.20	1.29	—
Сероуглерод	40.20	0.73	—
Пероксид водорода (37%)	27.80	0.50	—
Гидроксид натрия (44%)	50.92	0.91	—
Серная кислота (60%)	45.75	0.82	—
Метанол (99.47%)	1.81	0.03	регенерация
	240.00	4.28	без учета регенерации
Вода	76.97	1.37	регенерация
	412.00	7.34	без учета регенерации

Таблица 7. Нормы образования отходов, выбросы и сбросы для альтернативной технологии производства тетраметилтиурамдисульфида (с регенерацией метанола и воды)

Table 7. Waste generation standards, emissions, and discharges in the alternative tetramethylthiuram disulfide production technology (with methanol and water regeneration)

Вид отхода Type of waste	Агрегатное состояние отхода Aggregate state of waste	Состав Composition	Количество, % Amount, %	Норма образования отходов производства Production waste generation rate	
				кг/операцию kg/operation	т/т t/t
Кубовый остаток (операция регенерации метанола)	Жидкое	Кубовый остаток, в т.ч.:	100.00	7.57	0.13
		Вода	91.17	2.71	0.05
		Органическая примесь	8.83	4.86	0.09

Таблица 7. Окончание

Table 7. Continued

Вид отхода Type of waste	Агрегатное состояние отхода Aggregate state of waste	Состав Composition	Количество, % Amount, %	Норма образования отходов производства Production waste generation rate	
				кг/операцию kg/operation	т/т t/t
Кубовый остаток (операция регенерации воды)	Жидкое	Кубовый остаток, в т.ч.:	100.00	249.46	4.45
		Сульфат натрия	15.95	39.78	0.71
		Вода	83.06	207.19	3.69
		Органическая примесь	1.00	2.49	0.04
Выбросы в атмосферу		отсутствуют			
Сброс сточных вод		отсутствует			

Далее нами были рассчитаны комплексные индексы сравнения разработанной и альтернативной технологий производства тетраметилтиурамдисульфида и итоговый показатель оценки разработанной технологии на соответствие принципам НДТ (табл. 8).

Значение итогового показателя I оценки новой технологии $1.04 < 2$ позволяет сделать заключение о том, что разработанная нами технология производства тетраметилтиурамдисульфида отвечает принципам НДТ и является более экологически совершенной по сравнению с альтернативной, реализованной в СССР [4]. Внедрена разработанная

нами технология в филиале ФГУП «ГосНИИОХТ» «Обособленный завод № 4» (г. Новочебоксарск, Чувашской Республики), мощность опытного малотоннажного производства тетраметилтиурамдисульфида составляет 5000 кг/год.

Высокая эффективность ($K_1 = 0.11$) разработанной технологии производства тетраметилтиурамдисульфида (табл. 8) определялась низким уровнем отходности технологического процесса. Достигнутый уровень экологичности производства ($K_2 = 0.93$) обеспечивался проведением регенерации сырья (метанола).

Таблица 8. Комплексные индексы и итоговый показатель оценки разработанной технологии производства тетраметилтиурамдисульфида

Table 8. Comprehensive indicators and the final evaluation indicator of the developed tetramethylthiuram disulfide production technology

Показатель Indicator	Методика расчета и значение показателя Calculation method and indicator value
Комплексный индекс сравнения основных технологических показателей разработанной и альтернативной технологии K_1	В связи с тем, что выбросы в атмосферу и сбросы в водоемы вредных веществ для разработанной и альтернативной технологии отсутствуют, сравнение удельных показателей выбросов в атмосферу и сбросов в водоемы не проводится. $K_1 = (A_{T,P}/A_{T,A})/3$ $K_1 = (1.50/4.58)/3 = 0.11$
Комплексный индекс сравнения дополнительных технологических показателей разработанной и альтернативной технологии K_2	В связи с отсутствием сбросов вредных веществ в водоемы для разработанной и альтернативной технологии, расчет и сравнение степеней очистки сбросов в водоемы не проводится. $K_2 = (J_{K,A}/J_{K,P} + J_{O,A}/J_{O,P} + J_{A,A}/J_{A,P})/3$ $K_2 = (1.9/1.9 + 0.69/0.87 + 1.00/1.00)/3$ $K_2 = 0.93$
Итоговый показатель оценки технологии I	$I = 0.11 + 0.93 = 1.04$

Оценка соответствия технологии производства *N*-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамида принципам НДТ

В основу технологии производства *N*-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамида положен разработанный нами одностадийный способ его получения [9], который включает конденсацию 2-меркаптобензотиазола и циклогексиламина с последующим перекисным окислением образующегося промежуточного соединения – циклогексиламмония 1,3-бензотиазол-2-тиолата без его выделения. Процесс проводится в водной среде при мольном соотношении 2-меркаптобензотиазол : циклогексил-амин : пероксид водорода, равном 1 : 3 : 1.1, и описывается схемой (4).

Расчет основных и дополнительных технологических показателей производства *N*-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамида проводился нами с использованием данных «Временного технологического регламента опытного малотоннажного производства *N*-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамида, № ВТР-5-350»

о расходных коэффициентах по сырью (табл. 9) и нормам образования отходов производства (табл. 10). Результаты расчета основных и дополнительных технологических показателей представлены в табл. 11.

Итоговая оценка разрабатываемой технологии производства *N*-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамида проводилась путем сопоставления этой технологии с альтернативной, основанной на способе его получения взаимодействием натриевой соли 2-меркаптобензотиазола (каптакса) с циклогексиламином в присутствии гипохлорита натрия. Натриевую соль каптакса смешивали с циклогексиламином, реакцию массу подкисляли 37%-ной соляной кислотой. При этом получали циклогексиламиновую соль каптакса, которую окисляли гипохлоритом натрия в присутствии щелочи. Непрореагировавший циклогексиламин из сточных вод выделяли продувкой азотом при температуре 120–130 °С. Описанный способ получения *N*-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамида был реализован в СССР на Новокемеровском химическом комбинате [11].

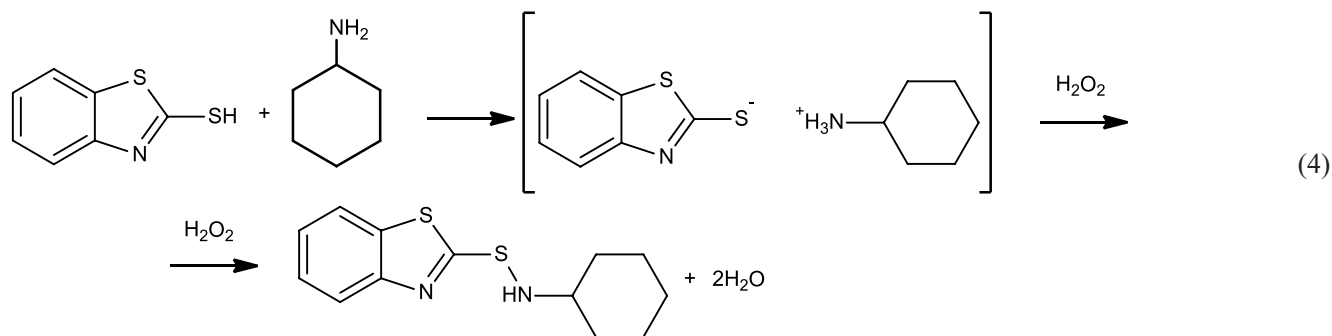


Таблица 9. Расходные коэффициенты по сырью и вспомогательным материалам при производстве *N*-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамида

Table 9. Consumption coefficients for raw materials and auxiliary materials in the *N*-cyclohexyl-2-benzothiazolylsulfenamide production

Наименование исходного сырья и материалов Name of raw materials	Расходные коэффициенты Expense coefficients		Примечание Note
	кг/операцию kg/operation	т/т t/t	
2-Меркаптобензотиазол (97%)	68.80	0.872	–
Циклогексиламин (99%)	33.31	0.422	регенерация
	119.99	1.521	без учета регенерации
Пероксид водорода (37%)	39.60	0.502	–
Вода	0.00	0.000	регенерация
	800.00	10.139	без учета регенерации

Таблица 10. Нормы образования отходов, выбросы и сбросы при производстве *N*-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамида (с регенерацией воды и циклогексиламина)**Table 10.** Waste generation standards, emissions, and discharges in the *N*-cyclohexyl-2-benzothiazolylsulfenamide production (with regeneration of water and cyclohexylamine)

Вид отхода Type of waste	Агрегатное состояние отхода Aggregate state of waste	Состав Composition	Количество, % Amount, %	Норма образования отходов производства Production waste generation rate	
				кг/операцию kg/operation	т/т t/t
Кубовый остаток (операция регенерации воды)	Жидкое	Кубовый остаток, в т.ч.:	100.00	64.76	0.821
		Вода	62.25	40.31	0.511
		Суммарная органическая примесь	37.75	24.45	0.310
Выбросы в атмосферу		отсутствуют			
Сброс сточных вод		отсутствует			

Таблица 11. Основные и дополнительные технологические показатели, рассчитанные для разработанной и альтернативной технологий производства *N*-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамида**Table 11.** Basic and additional technological indicators calculated for the developed and existing alternative technologies used in the *N*-cyclohexyl-2-benzothiazolylsulfenamide production

Показатель Indicator	Методика расчета и значение показателя Calculation method and indicator value	
	Разработанная технология Developed technology	Альтернативная технология Alternative technology
Основные технологические показатели		
Норма образования твердых и жидких отходов	$A_{T,P} = 0.821 \text{ т/т}$ (табл. 10)	$A_{T,A} = 4.45 \text{ т/т}$ (табл. 13)
Удельные выбросы в атмосферу	Абгазы отсутствуют, выбросы в атмосферу отсутствуют (табл. 10, 13)	
	$B_{T,P} = 0$	$B_{T,A} = 0$
Норма образования сточных вод	Сброс сточных вод отсутствует (табл. 10, 13)	
	$C_{T,P} = 0$	$C_{T,P} = 0$
Дополнительные технологические показатели		
Степень комплексности и полноты извлечения полезных компонентов из исходного сырья	Рассчитывается как сумма коэффициентов извлечения 2-меркаптобензотиазола $P_{МБТ}$ и циклогексиламина $P_{ЦГА}$ с учетом выхода <i>N</i>-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамида (78.9 кг на операцию, 75%) и регенерации циклогексиламина $P_{МБТ} = 0.632/0.846 = 0.75 \text{ т/т}$ $P_{ЦГА} = 1.447/1.506 = 0.96 \text{ т/т}$ $J_{K,P} = 0.75 + 0.96 = 1.71 \text{ т/т}$	
	$J_{K,A} = 1.64 \text{ т/т}$	

Таблица 11. Окончание

Table 11. Continued

Показатель Indicator	Методика расчета и значение показателя Calculation method and indicator value	
	Разработанная технология Developed technology	Альтернативная технология Alternative technology
Степень использования образующихся отходов	Рассчитывается как доля регенерированных циклогексиламина и воды в общей массе отхода (маточного раствора) в расчете на одну операцию: $J_{O,P} = (84.64 + 800)/949.40 = 0.93$ т/т	$J_{O,A} = 0.55$ т/т
Степень очистки выбросов вредных веществ в атмосферу	Абгазы отсутствуют, выбросы в атмосферу отсутствуют (табл. 10, 13)	
	$J_{A,P} = 0$ т/т	$J_{A,A} = 0$ т/т
Степень очистки сбросов в водоемы	Сточные воды отсутствуют (табл. 10, 13)	
	$J_{B,P} = 0$ т/т	$J_{B,A} = 0$ т/т

Реакция получения натриевой соли 2-меркапто-бензотиазола описывается схемой (5).

Образование *N*-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамида может быть описано схемой (6).

На основании рассчитанных нами материальных балансов определялись расходные коэффициенты по сырью и вспомогательным материалам (табл. 12) и нормы образования отходов производства

N-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамида (табл. 13) по альтернативной технологии.

Далее нами были рассчитаны комплексные индексы сравнения разработанной и альтернативной технологий производства этого продукта и итоговый показатель оценки разработанной технологии на соответствие принципам НДТ (табл. 14).

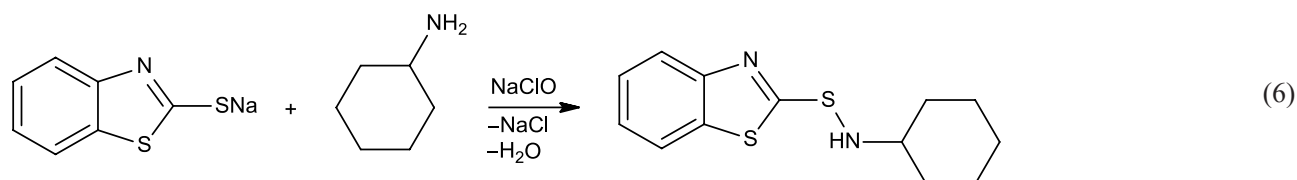
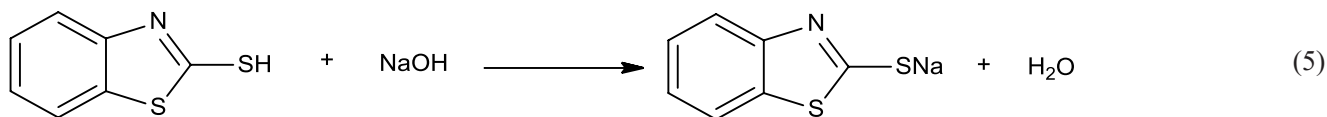


Таблица 12. Расходные коэффициенты по сырью и вспомогательным материалам для альтернативной технологии производства *N*-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамида

Table 12. Consumption coefficients for raw materials and auxiliary materials in the *N*-cyclohexyl-2-benzothiazolylsulfenamide production using an alternative technology

Наименование исходного сырья и материалов Name of raw materials	Расходные коэффициенты Expense coefficients		Примечание Note
	кг/операцию kg/operation	т/т t/t	
2-Меркаптобензотиазол, 97%	68.80	0.73	—
Гидроксид натрия, 44%-ный раствор	44.46	0.47	—
Вода	581.04	6.16	без учета регенерации
	52.24	0.55	регенерация

Таблица 12. Окончание

Table 12. Continued

Наименование исходного сырья и материалов Name of raw materials	Расходные коэффициенты Expense coefficients		Примечание Note
	кг/операцию kg/operation	т/т t/t	
Циклогексиламин, 99%	47.98	0.51	без учета регенерации
	40.12	0.42	регенерация
Соляная кислота, 37%-ный раствор	51.30	0.54	–
Гипохлорит натрия, 15%-ный раствор	253.96	2.69	–
Сульфит натрия	14.69	0.16	–

Таблица 13. Нормы образования отходов, отходов, выбросов и сбросов при производстве *N*-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамида по альтернативной технологии (с регенерацией воды и циклогексиламина)Table 13. Waste generation standards, emissions, and discharges in the *N*-cyclohexyl-2-benzothiazolylsulfenamide production using an alternative technology (with water and cyclohexylamine regeneration)

Вид отхода Type of waste	Агрегатное состояние отхода Aggregate state of waste	Состав Composition	Количество, % Amount, %	Норма образования отходов производства Production waste generation rate	
				кг/операцию kg/operation	т/т t/t
Сточная вода	Жидкое	Кубовый остаток, в т.ч.:	100.00	420.38	4.45
		Суммарная органическая примесь	3.19	13.41	0.14
		Хлорид натрия	14.47	60.84	0.64
		Сульфат натрия	3.94	16.56	0.18
		Вода	78.40	329.57	3.49
Выбросы в атмосферу		отсутствуют			
Сброс сточных вод		отсутствует			

Таблица 14. Комплексные индексы и итоговый показатель оценки разработанной технологии производства *N*-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамидаTable 14. Comprehensive indicators and the final evaluation of the developed technology for the production of *N*-cyclohexyl-2-benzothiazolylsulfenamide

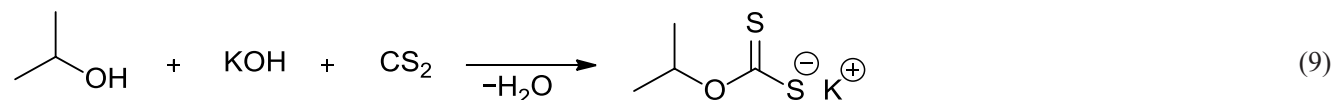
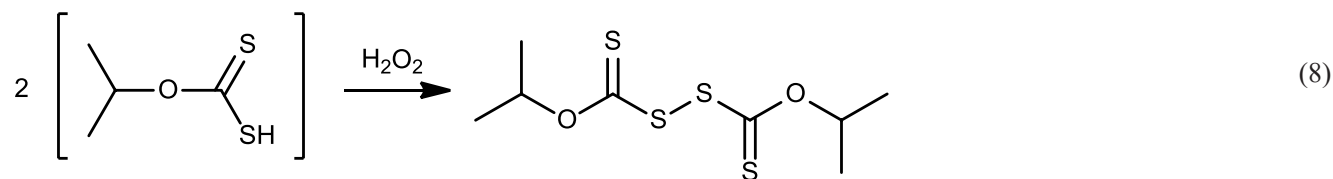
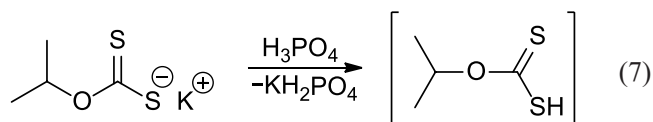
Показатель Indicator	Методика расчета и значение показателя Calculation method and indicator value
Комплексный индекс сравнения основных технологических показателей разработанной и альтернативной технологий K_1	В связи с тем, что выбросы вредных веществ в атмосферу и сброс стоков для разработанной и альтернативной технологии отсутствуют, сравнение удельных показателей выбросов в атмосферу и сбросов в водоемы не проводится. $K_1 = (A_{T,P}/A_{T,A})/3$ $K_1 = (0.82/4.45)/3 = 0.06$
Комплексный индекс сравнения дополнительных технологических показателей разработанной и альтернативной технологий K_2	В связи с отсутствием сбросов вредных веществ в водоемы и выбросов вредных веществ в атмосферу для разработанной и альтернативной технологии, расчет и сравнение степеней очистки сбросов в водоемы и выбросов вредных веществ в атмосферу не проводится. $K_2 = (J_{K,A}/J_{K,P} + J_{O,A}/J_{O,P})/4$ $K_2 = (1.64/1.71 + 0.55/0.93)/4 = 0.39$
Итоговый показатель оценки технологии I	$I = 0.06 + 0.39 = 0.45$

Значение итогового показателя оценки технологии $I = 0.45 \ll 2$ позволяет сделать заключение о том, что разработанная нами технология производства *N*-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамида отвечает принципам НДТ и является значительно более экологически совершенной по сравнению с альтернативной [11], реализованной в СССР. Внедрен данный процесс в филиале ФГУП «ГосНИИОХТ» «Обособленный завод № 4» (г. Новочебоксарск Чувашской Республики), мощность опытного малотоннажного производства составляет 5000 кг/год.

Отличительной особенностью разработанной нами технологии производства *N*-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамида по сравнению с реализованной ранее в СССР является значительное снижение уровня образования отходов и высокая степень рекуперации сырья, что позволяет охарактеризовать новую технологию как гораздо более эффективную ($K_1 = 0.06$). Высокий уровень экологичности разработанной технологии ($K_2 = 0.39$) обеспечивается минимизацией потерь благодаря высоким показателям ресурсосбережения (конверсии сырья) и рекуперации растворителя (вода) и избыточного сырьевого компонента (циклогексиламин).

Оценка соответствия технологии производства диизопропилксантогендисульфида принципам НДТ

В основу технологии производства диизопропилксантогендисульфида положен разработанный нами способ его получения [12], основанный на окислении изопропилового ксантогената калия (ИКК) [13] пероксидом водорода в присутствии ортофосфорной кислоты в воде [14]. Взаимодействие ИКК с ортофосфорной кислотой с образованием соответствующей ксантогеновой кислоты описывается схемой (7).



Окисление полученной ксантогеновой кислоты пероксидом водорода с образованием диизопропилксантогендисульфида представлен схемой (8).

Полученную суспензию фильтровали, промывали водой и сушили. Промывные воды повторно использовали в следующем синтезе в качестве растворителя. ИКК получали взаимодействием изопропанола, гидроксида калия и сероуглерода по схеме (9).

Процесс вели в изопропанол при молярном соотношении изопропанол : сероуглерод : гидроксид калия, равном 7 : 1 : 1, и температуре 25–35 °С. Для восстановления качества спирта использовался метод двухступенчатой ректификация фильтрата.

Расчет основных и дополнительных технологических показателей производства диизопропилксантогендисульфида для оценки соответствия технологии принципам НДТ проводился с использованием данных «Временного технологического регламента опытного малотоннажного производства изопропилового ксантогената калия, № ВТР-12-350» и «Временного технологического регламента опытного малотоннажного производства диизопропилксантогендисульфида, № ВТР-13-350» о расходных коэффициентах по сырью (табл. 15) и нормах образования отходов производства (табл. 16). Результаты расчета основных и дополнительных технологических показателей производства диизопропилксантогендисульфида по альтернативной технологии представлены в табл. 17.

Итоговая оценка разрабатываемой технологии производства диизопропилксантогендисульфида проводилась путем сопоставления разработанной технологии с альтернативной, основанной на известном способе его получения окислением ксантогената щелочного металла нитритом натрия в присутствии минеральных кислот (HCl , H_2SO_4) [15]: один моль кислоты используется для разложения нитрита натрия до оксидов азота, а второй моль — на образование ксантогеновой кислоты из соответствующей соли. Выделяющийся оксид азота (IV) выступает окислителем в данном процессе, который в общем виде можно описать схемами реакций (10)–(13):

Таблица 15. Расходные коэффициенты по сырью и вспомогательным материалам для производства диизопропилксантогендисульфида**Table 15.** Consumption coefficients for raw materials and auxiliary materials in the production of diisopropyl xanthogen disulfide

Наименование исходного сырья и материалов Name of raw materials	Расходные коэффициенты Expense coefficients		Примечание Note
	кг/операцию kg/operation	т/т t/t	
Получение ИКК (98.88%)			
Изопропиловый спирт (99.59%)	416.16	2.593	—
	145.89	0.909	с учетом регенерации
Сероуглерод (100%)	72.68	0.453	—
Гидроксид калия (86.11%)	61.70	0.384	—
Регенерация изопропанола			
Толуол (99.5%)	98.63	0.616	—
Получение диизопропилксантогендисульфида			
ИКК (98.88%) PIX (98.88%)	150.00	1.42	—
Пероксид водорода (37%)	43.56	0.41	—
Ортофосфорная кислота (85%)	99.39	0.94	—
Вода	850.00	8.03	—
	440.00	4.16	с учетом возврата промывных вод

Таблица 16. Нормы образования отходов, выбросы и сбросы при производстве диизопропилксантогендисульфида (с регенерацией изопропанола и возвратом промывной воды)**Table 16.** Waste generation standards, emissions, and discharges in the diisopropyl xanthogen disulfide production (with isopropanol regeneration and return of washing water)

Вид отхода Type of waste	Агрегатное состояние отхода Aggregate state of waste	Состав Composition	Количество, % Amount, %	Норма образования отходов производства Production waste generation rate	
				кг/операцию kg/operation	т/т t/t
Кубовый остаток после проведения ректификации фильтрата (стадия получения ИКК)	Жидкое	Кубовый остаток, в т.ч.:	100.00	12.89	0.086
		Изопропанол	51.32	5.42	0.039
		Примесь	48.68	7.47	0.047

Таблица 16. Окончание
Table 16. Continued

Вид отхода Type of waste	Агрегатное состояние отхода Aggregate state of waste	Состав Composition	Количество, % Amount, %	Норма образования отходов производства Production waste generation rate	
				кг/операцию kg/operation	т/т t/t
Азеотроп, выделенный на стадии абсолютирования ректификата (стадия получения ИКК)	Жидкое	Азеотроп, в т.ч.:	100.00	201.53	1.260
		Изопропанол	38.20	76.98	0.481
		Вода	13.10	26.40	0.165
		Толуол	48.70	98.14	0.613
Кубовый остаток после проведения абсолютирования ректификата (стадия получения ИКК)	Жидкое	Кубовый остаток, в т.ч.:	100.00	9.29	0.021
		Изопропанол	85.71	8.80	0.018
		Примесь	14.29	0.49	0.003
Сточная вода (стадия получения диизопропилксантоген-дисульфида)	Жидкое	Фильтрат, в т.ч.:	100.00	620.63	5.862
		Вода	79.03	490.47	4.632
		Примеси	20.97	130.16	1.229
Выбросы в атмосферу	отсутствуют				
Сброс сточных вод	отсутствует				

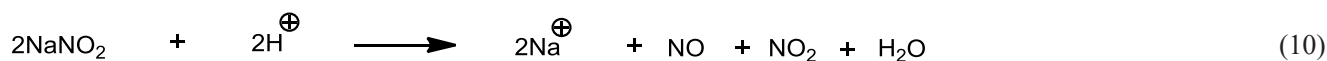
Таблица 17. Основные и дополнительные технологические показатели, рассчитанные для разработанной и альтернативной технологий производства диизопропилксантогендисульфида
Table 17. Basic and additional technological indicators calculated for the developed and alternative technologies used in the diisopropyl xanthogen disulfide production

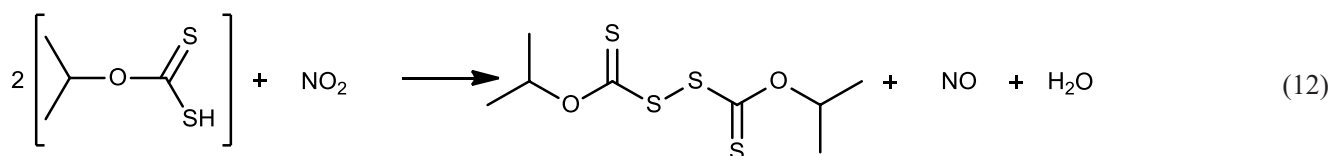
Показатель Indicator	Методика расчета и значение показателя Calculation method and indicator value	
	Разработанная технология Developed technology	Альтернативная технология Alternative technology
Основные технологические показатели		
Норма образования твердых и жидких отходов	$A_{\text{ТР}} = 7.228 \text{ т/т (табл. 16)}$	$A_{\text{ТА}} = 7.337 \text{ т/т (табл. 20, 21)}$
Удельные выбросы в атмосферу	Абгазы процесса это пары воды. Выбросы вредных веществ в атмосферу отсутствуют (табл. 16) $B_{\text{ТР}} = 0 \text{ т/т}$	Абгазы представляют собой смесь азота и диоксида углерода. Выбросы вредных веществ в атмосферу отсутствуют (табл. 20, 21) $B_{\text{ТА}} = 0 \text{ т/т}$

Таблица 17. Окончание
Table 17. Continued

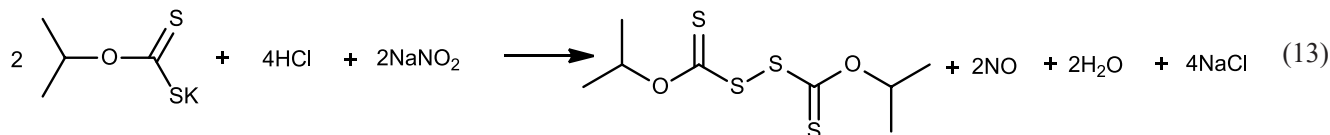
Показатель Indicator	Методика расчета и значение показателя Calculation method and indicator value	
	Разработанная технология Developed technology	Альтернативная технология Alternative technology
Норма образования сточных вод	Сброс сточных вод отсутствует в связи с высоким классом опасности для водных объектов рыбохозяйственного значения (2 класс опасности*). $C_{Т,Р} = 0$ т/т	Сброс сточных вод отсутствует в связи с высоким классом опасности фильтрата для водных объектов рыбохозяйственного значения (1 класс опасности*). $C_{Т,А} = 0$ т/т
Дополнительные технологические показатели		
Степень комплексности и полноты извлечения полезных компонентов из исходного сырья	Рассчитывается как сумма коэффициентов извлечения изопропанола $П_{ИПС}$, гидроксида калия $П_{КОН}$, сероуглерода $П_{CS_2}$, ИКК $П_{ИКК}$, пероксида водорода $П_{H_2O_2}$ и ортофосфорной кислоты $П_{H_3PO_4}$ с учетом выхода диизопропилксантогендисульфида (105.88 кг на операцию, 90%). $П_{ИПС} = 0.341/0.358 = 0.95$ т/т $П_{КОН} = 0.319/0.334 = 0.95$ т/т $П_{CS_2} = 0.433/0.453 = 0.95$ т/т $П_{ИКК} = 1.261/1.401 = 0.90$ т/т С учетом степени извлечения компонентов процесса получения ИКК: $П_{ИКК} = 0.95 \times 0.90 = 0.86$ т/т $П_{H_2O_2} = 0.123/0.152 = 0.81$ т/т $П_{H_3PO_4} = 0.713/0.798 = 0.89$ т/т $J_{К,Р} = 0.86 + 0.81 + 0.89 = 2.56$ т/т	Коэффициенты извлечения сероуглерода $П_{CS_2}$, изопропанола $П_{ИПС}$, гидроксида калия $П_{КОН}$ для стадии получения ИКК: $П_{ИПС} = 0.341/0.358 = 0.95$ т/т $П_{КОН} = 0.319/0.334 = 0.95$ т/т $П_{CS_2} = 0.433/0.453 = 0.95$ т/т Коэффициенты извлечения ИКК, нитрита натрия $П_{NaNO_2}$ и ортофосфорной кислоты $П_{H_3PO_4}$ с учетом выхода продукта (108.25 кг на операцию, 94.1 %). $П_{ИКК} = 0.95 \times 0.94 = 0.89$ т/т $П_{NaNO_2} = 0.44/0.47 = 0.94$ т/т $П_{H_3PO_4} = 0.611/0.611 = 1.00$ т/т $J_{К,А} = 0.89 + 0.94 + 1.00 = 2.83$ т/т
Степень использования образующихся отходов	Рассчитывается как доля регенерированного изопропанола в общей массе отхода (фильтрата и конденсата). По данным материального баланса регенерации изопропанола в расчете на 1 т продукта: $J_{О,Р} = (0.984 + 0.700)/3.049 = 0.55$ т/т	Рассчитывается как доля возвращаемой воды в общей массе отхода (фильтрата, промывных вод и отработанного абсорбента). По данным материального баланса в расчете на 1 т продукта: $J_{О,А} = 4.610/9.772 = 0.47$ т/т
Степень очистки выбросов вредных веществ в атмосферу	Абгазы процесса это пары воды. Выбросы вредных веществ в атмосферу отсутствуют. $J_{А,Р} = 1.00$ т/т	Рассчитывается как доля уловленного оксида азота в общей массе абгазов: $J_{А,А} = 0.030/0.030 = 1.00$ т/т
Степень очистки сбросов в водоемы	Сброс сточных вод отсутствует (табл. 16, 20, 21)	
	$J_{В,Р} = 0$ т/т	$J_{В,А} = 0$ т/т

* Приказ Минприроды России от 04.12.2014 № 536 «Об утверждении Критериев отнесения отходов к I–V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду» (Зарегистрировано в Минюсте России 29.12.2015 № 40330).





Суммарно:



Очистка газовых выбросов осуществляется путем абсорбции абгазов водным раствором мочевины. Процесс поглощения окислов азота может быть описан уравнением (14):



На основании рассчитанных нами материальных балансов определялись расходные коэффициенты по сырью и вспомогательным материалам (табл. 18, 19) и нормы образования отходов производства диизопропилксантогендисульфида (табл. 20, 21) по альтернативной технологии.

Таблица 18. Расходные коэффициенты по сырью и вспомогательным материалам при производстве ИКК

Table 18. Consumption coefficients for raw materials and auxiliary materials in the potassium isopropyl xanthate production

Наименование исходного сырья и материалов Name of raw materials	Расходные коэффициенты Expense coefficients		Примечание Note
	кг/операцию kg/operation	т/т t/t	
Получение ИКК			
Изопропиловый спирт (99.6%)	416.16	2.593	—
	145.89	0.909	с учетом регенерации
Сероуглерод (100%)	72.68	0.453	—
Гидроксид калия (86.8%)	61.70	0.384	—
Регенерация изопропанола			
Толуол (99.5%)	98.63	0.616	—

Таблица 19. Расходные коэффициенты по сырью и вспомогательным материалам при производстве диизопропилксантогендисульфида по альтернативной технологии

Table 19. Consumption coefficients for raw materials and auxiliary materials in the diisopropyl xanthogen disulfide production using an alternative technology

Наименование исходного сырья и материалов Name of raw materials	Расходные коэффициенты Expense coefficients		Примечание Note
	кг/операцию kg/operation	т/т t/t	
ИКК (98.88%)	150.00	1.355	—
Нитрит натрия (98.50%)	59.60	0.552	—
Ортофосфорная кислота (85%)	127.10	1.196	—

Таблица 19. Окончание

Table 19. Continued

Наименование исходного сырья и материалов Name of raw materials	Расходные коэффициенты Expense coefficients		Примечание Note
	кг/операцию kg/operation	т/т t/t	
Вода	850.00	7.870	—
	433.86	4.017	с учетом возврата промывной воды и конденсата процесса сушки осадка
Мочевина (100%)*	133.02*	0.172	с учетом рециркуляции
	121.63*	0.157	с учетом регенерации абсорбента
Вода для приготовления абсорбента*	399.06*	0.515	с учетом рециркуляции

* Из расчета на 7 операций получения диизопропилксантогендисульфида.

Таблица 20. Нормы образования отходов, выбросы и сбросы при производстве ИКК

Table 20. Waste generation standards, emissions, and discharges in the potassium isopropyl xanthate production

Вид отхода Type of waste	Агрегатное состояние отхода Aggregate state of waste	Состав Composition	Количество, % Amount, %	Норма образования отходов производства Production waste generation rate	
				кг/операцию kg/operation	т/т t/t
Кубовый остаток после проведения ректификации фильтрата	Жидкое	Кубовый остаток, в т.ч.:	100.00	12.89	0.086
		Изопропанол	51.32	5.42	0.039
		Примесь	48.68	7.47	0.047
Азеотроп, выделенный на стадии абсолютирования ректификата	Жидкое	Азеотроп, в т.ч.:	100.00	201.53	1.260
		Изопропанол	38.20	76.98	0.481
		Вода	13.10	26.40	0.165
		Толуол	48.70	98.14	0.613
Кубовый остаток после проведения абсолютирования ректификата	Жидкое	Кубовый остаток, в т.ч.:	100.00	9.29	0.021
		Изопропанол	85.71	8.80	0.018
		Примесь	14.29	0.49	0.003
Выбросы в атмосферу		отсутствуют			
Сброс сточных вод		отсутствует			

Таблица 21. Нормы образования отходов, выбросы и сбросы при производстве диизопропилксантогендисульфида по альтернативной технологии**Table 21.** Waste generation standards, emissions, and discharges in the diisopropyl xanthogen disulfide production using an alternative technology

Вид отхода Type of waste	Агрегатное состояние отхода Aggregate state of waste	Состав Composition	Количество, % Amount, %	Норма образования отходов производства Production waste generation rate	
				кг/операцию kg/operation	т/т t/t
Сточная вода	Жидкое	Фильтрат, в т.ч.:	100.00	629.60	5.830
		Вода	74.13	466.72	4.321
		Примеси	1.25	7.87	0.073
		Натриевые и калиевые соли ортофосфорной кислоты	24.62	155.01	1.435
Сточная вода	Жидкое	Отработанный абсорбент, в т.ч.:	100.00	15.45	0.140
		Мочевина	2.78	0.43	0.004
		Вода	97.22	15.02	0.136
Абгазы	Газообразное	Абгазы, в т.ч.:	100.00	13.82	0.125
		Азот	10.34	1.43	0.013
		Диоксид углерода	89.66	12.39	0.112
Выбросы в атмосферу		отсутствуют			
Сброс сточных вод		отсутствует			

Затем нами были рассчитаны комплексные индексы сравнения разработанной и альтернативной технологий производства диизопропилксантогендисульфида и итоговый показатель оценки разработанной технологии на соответствие принципам НДТ (табл. 22).

Значение итогового показателя оценки технологии $I = 1.97 < 2$ позволяет сделать заключение о том, что разработанная нами технология производства диизопропилксантогендисульфида отвечает принципам НДТ и является более экологически совершенной по сравнению с альтернативной [4]. Внедрена эта технология в филиале ФГУП «ГосНИИОХТ» «Обособленный завод № 4» (г. Новочебоксарск Чувашской Республики), мощность опытного малотоннажного производства

составляет 2000 кг/год по диизопропилксантогендисульфиду и 3000 кг/год по ИКК.

Таким образом, разработанная технология является более экологически совершенной по сравнению с альтернативной благодаря высокому уровню экологичности, достигнутому за счет регенерации изопропанола на стадии получения ИКК. Однако удельный показатель образования отходов по данной технологии достаточно высок (7.23 т/т, табл. 17), причем основным отходом производства является фильтрат стадии получения диизопропилксантогендисульфида (5.862 т/т, табл. 21), содержание воды в котором составляет 79.03%. Следует отметить, что в процессе разработки нам удалось снизить класс опасности⁶ данного отхода с 1-го до 2-го, что, по нашему мнению, является значимым результатом

⁶ Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 (ред. от 10.03.2020) «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (Зарегистрировано в Минюсте России 13.01.2017 № 45203). [Order of the Ministry of Agriculture of Russia dated December 13, 2016, No. 552 (as amended on March 10, 2020) "On approval of water quality standards for fishery water bodies, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of fishery water bodies" (Registered with the Ministry of Justice of Russia on January 13, 2017, No. 45203) (in Russ.).]

Таблица 22. Комплексные индексы и итоговый показатель оценки разработанной технологии производства диизопропилксантогендисульфида**Table 22.** Comprehensive indicators and the final evaluation indicator of the developed diisopropyl xanthogen disulfide production technology

Показатель Indicator	Методика расчета и значение показателя Calculation method and indicator value
Комплексный индекс сравнения основных технологических показателей разработанной и альтернативной технологий K_1	Поскольку выбросы вредных веществ в атмосферу и сбросы в водоемы для этих технологий отсутствуют, сравнение удельных показателей выбросов в атмосферу и сбросов в водоемы не проводится. $K_1 = A_{T,P}/A_{T,A} = 7.23/7.34 = 0.98$
Комплексный индекс сравнения дополнительных технологических показателей разработанной и альтернативной технологий K_2	В связи с отсутствием сбросов вредных веществ в водоемы по данным технологиям расчет и сравнение степеней очистки сбросов в водоемы не проводится. $K_2 = (2.83/2.56 + 0.47/0.55 + 1.00/1.00)/3 = (1.11 + 0.85 + 1.00)/3 = 0.99$
Итоговый показатель оценки технологии I	$I = 0.98 + 0.99 = 1.97$

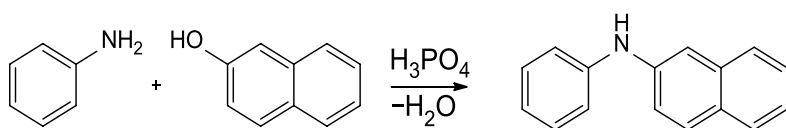
в достижении целей охраны ОС и повышает уровень экологичности разработанной нами технологии производства диизопропилксантогендисульфида. Как возможное направление модернизации технологии может рассматриваться регенерация растворителя (воды) из отхода (фильтрата), что приведет к снижению удельного показателя отходности производства и позволит увеличить степень использования сырья и образующихся отходов.

Оценка соответствия разработанной технологии производства *N*-фенил-2-нафтиламина принципам НДТ

В основу технологии производства *N*-фенил-2-нафтиламина был положен разработанный нами одностадийный способ его получения арамированием

2-нафтола анилином [16] в присутствии каталитических количеств ортофосфорной кислоты при мольном соотношении 2-нафтол : анилин : ортофосфорная кислота, равном 1 : 1.065 : 0.017, в течение 2–2.5 ч [17, 18]. Возврат исходного анилина в сферу реакции обеспечивается путем разделения азеотропной смеси анилин/вода и выделением *N*-фенил-2-нафтиламина в виде порошка кристаллизацией из реакционной массы в смеси изобутанол/ксилол [16, 17]. Процесс получения *N*-фенил-2-нафтиламина описывается схемой (15).

Расчет основных и дополнительных технологических показателей [4] производства *N*-фенил-2-нафтиламина проводился нами с использованием данных о расходных коэффициентах по сырью (табл. 23) и нормах образования отходов производства, указанных во «Временном технологическом



(15)

Таблица 23. Расходные коэффициенты по сырью и вспомогательным материалам при производстве *N*-фенил-2-нафтиламина

Наименование исходного сырья и материалов Name of raw materials	Расходные коэффициенты Expense coefficients		Примечание Note
	кг/операцию kg/operation	т/т t/t	
Анилин (99.9%)	121.00	0.475	–
2-Нафтол (99.5%)	175.00	0.686	–
Кислота ортофосфорная (85%)	2.40	0.009	–
Изобутанол (99.3%)	433.42	1.700	без учета регенерации
	1.90	0.007	регенерация
Ксилол нефтяной (99.6%)	82.91	0.325	без учета регенерации
	32.27	0.127	регенерация

регламенте опытного малотоннажного производства *N*-фенил-2-нафтиламина, № ВТР-8-350» (табл. 24). Результаты расчета основных и дополнительных технологических показателей представлены в табл. 25.

Итоговая оценка разработанной технологии производства *N*-фенил-2-нафтиламина проводилась также путем сопоставления этой технологии с альтернативной, которая была реализована в 60-х годах XX века на Новомосковском анилино-красочном заводе (Новомосковском заводе

органического синтеза) [19]. Технология была основана на конденсации 2-нафтола с анилином в присутствии катализатора бензолсульфокислоты при молярном соотношении 2-нафтола к анилину, равному 1 : 1.5. Процесс образования *N*-фенил-2-нафтиламина может быть описан схемой (16).

Конденсацию 2-нафтола и анилина вели при температуре 240 ± 5 °С до содержания 2-нафтола 0.8%. Пары анилина частично возвращали в реактор за счет дефлегмации. Реакционную

Таблица 24. Нормы образования отходов, выбросы и сбросы при производстве *N*-фенил-2-нафтиламина (с регенерацией смеси изобутанол – *o*-ксилол)

Table 24. Waste generation standards, emissions, and discharges in the *N*-phenyl-2-naphthylamine production (with regeneration of isobutanol–*o*-xylene mixture)

Вид отхода Type of waste	Агрегатное состояние отхода Aggregate state of waste	Состав Composition	Количество, % Amount, %	Норма образования отходов производства Production waste generation rate	
				кг/операцию kg/operation	т/т t/t
Кубовый остаток после проведения регенерации смеси изобутанол–ксилол	Жидкое	1. Кубовый остаток, в т.ч.:	100.00	54.23	0.213
		<i>N</i> -фенил-2-нафтиламин	8.32	10.03	0.039
		Фосфат анилина	3.30	3.98	0.016
		<i>o</i> -Ксилол	81.07	31.90	0.125
		Анилин	5.09	6.14	0.024
		Примеси	1.14	2.18	0.009
Водная фаза (азеотроп)	Жидкое	2. Вода	100.00	22.15	0.087
Органическая фаза (азеотроп)	Жидкое	3. Органическая фаза, в т.ч.:	100.00	2.61	0.010
		Анилин	13.08	0.34	0.001
		Изобутанол	70.11	1.90	0.007
		Ксилол	16.81	0.37	0.001
Выбросы в атмосферу	отсутствуют				
Сброс сточных вод	отсутствует				

Таблица 25. Основные и дополнительные технологические показатели, рассчитанные для разработанной и альтернативной технологий производства *N*-фенил-2-нафтиламина

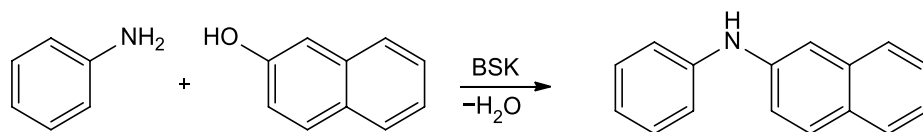
Table 25. Basic and additional technological indicators calculated for the developed and alternative technologies used in the *N*-phenyl-2-naphthylamine production

Показатель Indicator	Методика расчета и значение показателя Calculation method and indicator value	
	Разработанная технология Developed technology	Альтернативная технология Alternative technology
Основные технологические показатели		
Норма образования твердых и жидких отходов	$A_{\text{т.р}} = 0.310$ т/т (табл. 24)	$A_{\text{т.р}} = 1.85$ т/т (табл. 27)

Таблица 25. Окончание

Table 25. Continued

Показатель Indicator	Методика расчета и значение показателя Calculation method and indicator value	
	Разработанная технология Developed technology	Альтернативная технология Alternative technology
Удельные выбросы в атмосферу	Выбросы в атмосферу отсутствуют (табл. 24, 27)	
	$B_{T,P} = 0$ т/т	$B_{T,A} = 0$ т/т
Норма образования сточных вод	Сброс сточных вод отсутствует (табл. 24, 27)	
	$C_{T,P} = 0$ т/т	$C_{T,A} = 0$ т/т
Дополнительные технологические показатели		
Степень комплексности и полноты извлечения полезных компонентов из исходного сырья	Рассчитывается как сумма коэффициентов извлечения 2-нафтола и анилина с учетом выхода <i>N</i> -фенил-2-нафтиламина (255.00 кг на операцию, 96%) $P_{2\text{-Нафтол}} = 0.659/0.683 = 0.96$ т/т $P_{\text{Анилин}} = 0.424/0.474 = 0.89$ т/т $J_{K,P} = 0.96 + 0.89 = 1.85$ т/т	$J_{K,A} = 1.59$ т/т
Степень использования образующихся отходов	Рассчитывается как доля регенерированных изобутанола и ксилола в общей массе отхода (фильтрата, промывного раствора и конденсата). Может быть рассчитана по данным материального баланса регенерации смеси изобутанол/ксилол в расчете на одну операцию. $J_{O,P} = (431.47 + 50.60)/538.39 = 0.90$ т/т	$J_{O,A} = 0.31$ т/т
Степень очистки выбросов вредных веществ в атмосферу	Выбросы в атмосферу отсутствуют (табл. 24, 27)	
	$J_{A,P} = 0$ т/т	$J_{A,A} = 0$ т/т
Степень очистки сбросов в водоемы	Сброс сточных вод отсутствует (табл. 24, 27)	
	$J_{B,P} = 0$ т/т	$J_{B,A} = 0$ т/т



(16)

массу нейтрализовали твердой каустической содой. Непрореагировавший анилин отгоняли острым паром до полного отсутствия его в реакционной массе. Выделение целевого *N*-фенил-2-нафтиламина осуществлялось в виде плава с последующими дистилляциями и чешуированием.

Регенерация избыточного анилина, не вступившего в реакцию с 2-нафтолом, осуществлялась с использованием методов вакуумной дистилляции и ректификации. Извлечение анилина из анилиновой воды осуществлялось в процессе ректификации азеотропной отгонкой с последующим разделением гетероазетропа центрифугированием.

На основании рассчитанных нами материальных балансов определялись расходные коэффициенты по сырью и вспомогательным материалам (табл. 26) и нормы образования отходов производства *N*-фенил-2-нафтиламина (табл. 27) по альтернативной технологии.

Далее нами были рассчитаны комплексные индексы сравнения разработанной и альтернативной технологий и итоговый показатель оценки новой технологии на соответствие принципам НДТ (табл. 28).

Значение итогового показателя оценки технологии $I = 0.90 \ll 2$ позволяет сделать заключение о том, что разработанная нами технология

Таблица 26. Расходные коэффициенты по сырью и вспомогательным материалам при производстве *N*-фенил-2-нафтиламина по альтернативной технологии**Table 26.** Consumption coefficients for raw materials and auxiliary materials in the *N*-phenyl-2-naphthylamine production using an alternative technology

Наименование исходного сырья и материалов Name of raw materials	Расходные коэффициенты Expense coefficients		Примечание Note
	кг/операцию kg/operation	т/т t/t	
Анилин технический, 99.8%	1854.55	0.663	без учета регенерации
	1185.99	0.424	регенерация
2-Нафтол, 98.5%	1940.00	0.693	–
Бензолсульфокислота, 95%	8.90	0.003	–
Гидроксид натрия технический, 98.5%	2.30	0.001	–
Вода	3500.00	1.250	без учета регенерации
	2659.57	0.950	регенерация
Водяной пар	2238.24	0.800	–

Таблица 27. Нормы образования отходов, выбросы и сбросы при производстве *N*-фенил-2-нафтиламина по альтернативной технологии (с регенерацией воды и анилина)**Table 27.** Waste generation standards, emissions, and discharges in the *N*-phenyl-2-naphthylamine production using an alternative technology (with water and aniline regeneration)

Вид отхода Type of waste	Агрегатное состояние отхода Aggregate state of waste	Состав Composition	Количество, % Amount, %	Норма образования отходов производства Production waste generation rate	
				кг/операцию kg/operation	т/т t/t
Сточная вода	Жидкое	Фильтрат, в т.ч.:	100.00	121.099	0.433
		2-Нафтол	0.09	0.114	0.0004
		Натриевая соль бензолсульфокислоты	0.60	0.722	0.0026
		Натриевая соль серной кислоты	0.02	0.029	0.0001
		Вода	95.06	115.117	0.4113
		Примеси	4.23	5.118	0.0183
Сточная вода	Жидкое	Промывная вода, в т.ч.:	100.00	255.532	0.913
		2-Нафтол	0.09	0.222	0.0008
		Натриевая соль бензолсульфокислоты	0.09	0.241	0.0009
		Натриевая соль серной кислоты	0.004	0.010	0.00004
		Вода	99.31	253.779	0.9067
		Примеси	0.50	1.280	0.0046
Кубовый остаток	Жидкое	Кубовый остаток, в т.ч.:	100.00	0.400	0.001
		Смолы	100.00	0.400	0.001
Сточная вода	Жидкое	Вода, в т.ч.:	100.00	141.110	0.504
		Анилин	0.15	0.210	0.0008
		Вода	99.85	140.900	0.5034
Выбросы в атмосферу		отсутствуют			
Сброс сточных вод		отсутствует			

Таблица 28. Комплексные индексы и итоговый показатель оценки разработанной технологии производства *N*-фенил-2-нафтиламина**Table 28.** Comprehensive indicators and the final evaluation indicator of the developed *N*-phenyl-2-naphthylamine production technology

Показатель Indicator	Методика расчета и значение показателя Calculation method and indicator value
Комплексный индекс сравнения основных технологических показателей разработанной и альтернативной технологий K_1	В связи с тем, что выбросы вредных веществ в атмосферу и сбросы в водоемы для рассматриваемых технологий отсутствуют, формула для расчета индекса преобразуется следующим образом: $K_1 = A_{\text{Т.Р}}/A_{\text{Т.А}}$ $K_1 = 0.31/1.85 = 0.17$
Комплексный индекс сравнения дополнительных технологических показателей разработанной и альтернативной технологий K_2	В связи с отсутствием выбросов вредных веществ в атмосферу для рассматриваемых технологий, расчет и сравнение степеней очистки выбросов вредных веществ в атмосферу не проводится. $K_2 = (J_{\text{К.А}}/J_{\text{К.Р}} + J_{\text{О.А}}/J_{\text{О.Р}} + J_{\text{В.А}}/J_{\text{В.Р}})/3$ $K_2 = (1.59/1.85 + 0.31/0.90 + 1.00/1.00)/3 = 0.73$
Итоговый показатель оценки технологии I	$I = 0.17 + 0.73 = 0.90$

производства *N*-фенил-2-нафтиламина отвечает принципам НДТ и гораздо экологически совершеннее [4] по сравнению с альтернативной, реализованной в СССР. Внедрена разработанная нами технология в филиале ФГУП «ГосНИИОХТ» «Обособленный завод № 4» (г. Новочебоксарск Чувашской Республики), мощность опытного малотоннажного производства составляет 5000 кг/год.

Анализ результатов оценки разработанной нами технологии производства *N*-фенил-2-нафтиламина позволяет определить ее как высокоэффективную ($K_1 = 0.17$) и имеющую высокий уровень экологичности ($K_2 = 0.73$). Новая технология отличается значительно более низким (практически в 6 раз) уровнем образования отходов по сравнению с альтернативной технологией, реализованной в СССР, а также характеризуется высокой степенью ресурсосбережения (использования сырья) и рекуперации образующихся отходов. Обеспечивается полученный результат принятыми технологическими решениями по возврату анилина в сферу реакции после разделения сконденсировавшихся во флорентине паров азеотропной смеси «анилин–вода», а также регенерацией смеси растворителей (изобутанол/ксилол).

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ разработанных в ФГУП «ГосНИИОХТ» новых технологий малотоннажных химических производств по критериям достижения целей охраны ОС с использованием методики [4] позволил сделать заключение о высокой эффективности принятых технологических решений по ресурсосбережению и охране ОС.

Методология количественной оценки [4] основана на определении достигнутых уровней технологичности и экологичности новых технологий и расчете комплексных индексов сравнения с альтернативными (НДТ) технологиями (табл. 29). Рассчитанные значения основных технологических показателей характеризуют достигнутый уровень эффективности технологий, при этом чем меньше значение индекса K_1 , тем выше эффективность новой технологии по сравнению с альтернативной (реализованной, известной). В свою очередь, значения дополнительных технологических показателей технологий отражают достигнутый уровень экологичности технологии, при этом критерием эффективности разработки (по сравнению с существующей технологией) также является достижение минимальных значений индекса K_2 . Эффективность разработки в целом характеризует итоговый показатель сравнения I : чем меньше его значение, тем выше достигнутая степень соответствия новой технологии принципам НДТ и современному уровню разработки по критериям достижения целей охраны ОС.

В связи с отсутствием в настоящее время НДТ производства тетраметилпирамдисульфида (тиурама Д), *N*-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамида (сульфенамида Ц), диизопропилксантгендисульфида (дипроксид) и *N*-фенил-2-нафтиламина (неозона Д), в качестве альтернативных рассмотрены производства указанных материалов, ранее реализованные в СССР.

В результате расчетов установлено, что все разработанные нами новые технологии экологически более совершенны по сравнению с реализованными ранее в СССР и соответствуют принципам НДТ (табл. 30). Наиболее эффективные

Таблица 29. Критерии разработки и показатели оценки новых технологий в соответствии с принципами НДТ
Table 29. Criteria for the development and evaluation indicators of new technologies in accordance with BAT principles

Критерии разработки в соответствии с принципами НДТ Criteria for development in accordance with BAT principles	Показатели оценки разработанной и альтернативной технологий производства в соответствии с принципами НДТ Evaluation indicators for developed and alternative production technologies in accordance with BAT principles		
	K_1 (достигнутый уровень эффективности технологии) K_1 (achieved level of technology efficiency)	K_2 (достигнутый уровень экологичности технологии) K_2 (achieved level environmental friendliness of the technology)	I (эффективность разработки в целом) I (overall development efficiency)
Критерий эффективности разработки	$K_1 < 1$ Достижение минимальных значений K_1	$K_2 < 1$ Достижение минимальных значений K_2	$I < 2$ Достижение минимальных значений I
Характеристика показателей оценки разработки	Комплексный индекс сравнения основных технологических показателей технологий производства	Комплексный индекс сравнения дополнительных технологических показателей разработанной и альтернативной технологий производства	Итоговый показатель сравнения разработанной и альтернативной технологий производства
Смысловое содержание показателей оценки разработки	Уровень образования отходов, выбросов в атмосферу и сбросов в водоемы.	Степень комплексности и полноты извлечения полезных компонентов из исходного сырья, использования образующихся отходов, очистки выбросов вредных веществ в атмосферу и сбросов в водоемы.	Степень соответствия новой технологии принципам НДТ и современному уровню разработки по критериям достижения целей охраны ОС
Заключение по результатам оценки разработки	$K_1 < 1$. Чем меньше индекс K_1 , тем выше достигнутый уровень эффективности разработанной технологии по сравнению с альтернативной.	$K_2 < 1$. Чем меньше индекс K_2 , тем выше достигнутый уровень экологичности разработанной технологии по сравнению с альтернативной.	$I < 2$. Чем меньше I , тем в большей степени разработанная технология соответствует принципам НДТ и является более экологически совершенной по сравнению с альтернативной.

Таблица 30. Результаты количественной оценки разработанных технологий производства материалов в соответствии с принципами НДТ
Table 30. Results of the quantitative assessment of the developed technologies for the production of materials in accordance with BAT principles

Показатели оценки разработки в соответствии с принципами НДТ Development evaluation indicators in accordance with BAT principles	Предмет разработки – технология производства Subject of development – production technology			
	Тетраметилтиурам-дисульфид Tetramethylthiuram disulfide	<i>N</i> -циклогексил-2-бензотиазилсульфен-амид <i>N</i> -cyclohexyl-2-benzothiazolylsulfenamide	Диизопропил-ксантогендисульфид Diisopropyl xanthogen disulfide	<i>N</i> -фенил-2-нафтиламин <i>N</i> -phenyl-2-naphthylamine
Результаты оценки разработки				
K_1	0.11	0.06	0.98	0.17
K_2	0.93	0.39	0.99	0.73
I	1.04	0.45	1.97	0.90

Таблица 30. Окончание

Table 30. Continued

Показатели оценки разработки в соответствии с принципами НДТ Development evaluation indicators in accordance with BAT principles	Предмет разработки – технология производства Subject of development – production technology			
	Тетрамелтиурам-дисульфид Tetramethylthiuram disulfide	<i>N</i> -циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамид <i>N</i> -cyclohexyl-2-benzothiazolylsulfenamide	Диизопропилксантогендисульфид Diisopropyl xanthogen disulfide	<i>N</i> -фенил-2-нафтиламин <i>N</i> -phenyl-2-naphthylamine

Заключение по результатам оценки разработки:

Достигнутый уровень эффективности	Очень высокий	Очень высокий	Сравнимый	Очень высокий
Достигнутый уровень экологичности	Сравнимый	Очень высокий	Сравнимый	Высокий
Эффективность разработки в целом	Очень высокая	Очень высокая	Сравнимая	Очень высокая
Соответствие принципам НДТ	Соответствует	Соответствует	Соответствует	Соответствует

Определение возможных направлений модернизации разработки

Возможные мероприятия по модернизации	Регенерация воды из отхода (фильтрата)	—	Регенерация растворителя (воды) из отхода (фильтрата)	—
Ожидаемый результат мероприятий по модернизации	Снижение удельного показателя отходности производства	—	Снижение удельного показателя отходности производства	—
	Увеличение степени использования образующихся отходов	—	Увеличение степени использования образующихся отходов	—
	Дополнительное повышение экологичности разработки	—	Дополнительное повышение эффективности и экологичности	—

технологические решения разработаны для получения тетрамелтиурамдисульфида ($K_1 = 0.11 \ll 1$), *N*-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамида ($K_1 = 0.06 \ll 1$) и *N*-фенил-2-нафтиламина ($K_1 = 0.17 \ll 1$). Максимальная степень использования сырья и очистки выбросов и сбросов достигаются при реализации технологий производства *N*-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамида ($K_2 = 0.39 < 1$) и *N*-фенил-2-нафтиламина ($K_1 = 0.73 < 1$). Достигнутые уровни технологичности (K_1) и экологичности (K_2) обеспечивают высокий уровень эффективности и соответствие принципам НДТ технологий производства тетрамелтиурамдисульфида ($I = 1.04 \ll 2$), *N*-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамида ($I = 0.45 \ll 2$) и *N*-фенил-2-нафтиламина ($I = 0.9 \ll 2$).

Разработанная новая технология производства диизопропилксантогендисульфида характеризуется сравнимыми с альтернативным вариантом уровнями технологичности ($K_1 = 0.98 \approx 1$) и экологичности ($K_2 = 0.99 \approx 1$). Эффективность разработанных технологических решений также сравнима с эффективностью альтернативного варианта ($I = 1.97$). Тем не менее, соответствие критерию эффективности разработки ($I = 1.97 < 2$) позволяет сделать заключение о некотором преимуществе новой технологии по достигнутому уровню ресурсосбережения и охраны ОС в соответствии с принципам НДТ.

Возможным направлением модернизации этой разработки является поиск новых технологических решений по регенерации растворителя (воды)

из отхода (фильтрата), что позволит повысить ее эффективность и экологичность за счет снижения удельного показателя отходности производства и увеличения степени использования образующихся отходов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение в промышленном масштабе современных технологий малотоннажных химических производств является комплексной системной задачей, успешное решение которой обеспечивается достижением высоких уровней эффективности, безопасности и качества разработки. Решение о перспективности для промышленной реализации возможных новых технологий должно приниматься по результатам их анализа по критериям, позволяющим определить достигаемый при внедрении результат и его соответствие нормативным и законодательным требованиям. Для объективной оценки необходимо наличие научной методической базы, которая была бы построена с учетом технологических, экономических, экологических факторов, и содержала бы алгоритм, позволяющий оценить достигаемые показатели, сравнить с целевыми и сделать заключение об уровне разработки.

Для оценки соответствия новых технологий современным экологическим требованиям нами разработана «Методика количественной оценки новых технологий производства органических веществ в соответствии с принципами НДТ», которая используется в процессе разработки для принятия решений по ресурсосбережению и снижению отходности.

На примере созданных во ФГУП «ГосНИИОХТ» малотоннажных технологий производства тетраметилтиурамдисульфида, *N*-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамида, диизопропилксантогендисульфида и *N*-фенил-2-нафтиламина показано, что количественная оценка новых технологий на основании расчета комплексных индексов сравнения с альтернативными технологиями по технологическим (количеству отходов, выбросов и сбросов) и экологическим показателям (степени использования сырья и отходов и эффективности мероприятий по очистке газовых выбросов и сбросов в водоемы) позволяет оценить соответствие новых технологий принципам НДТ, а также определить направления модернизации действующих производств.

Разработанные «Методика комплексной оценки возможных технологических решений по критериям экономической и экологической эффективности» и «Методика количественной оценки новых технологий производства материалов в соответствии с принципами НДТ» позволили нам создать методическую базу для использования на этапе принятия основных технологических решений по внедряемому спосо-

бу производства для обеспечения высокого уровня его экономической и экологической эффективности, а также выполнения законодательных требований к технологиям в сфере экологической безопасности по достижению целей охраны ОС.

Вклад авторов

Н.А. Костикова – разработка и промышленное внедрение технологий получения тетраметилтиурамдисульфида, *N*-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамида, диизопропилксантогендисульфида, *N*-фенил-2-нафтиламина; разработка «Методики количественной оценки новых технологий получения материалов в соответствии с принципами НДТ», апробация указанной методики, сравнительная оценка разработанных и альтернативных (реализованных ранее в СССР) технологий по уровню воздействия на окружающую среду.

Е.Н. Глухан – формирование научной концепции количественной оценки новых технологий в соответствии с принципами НДТ, разработка «Методики количественной оценки новых технологий получения материалов в соответствии с принципами НДТ».

П.В. Казаков – разработка технологии получения тетраметилтиурамдисульфида, промышленное внедрение технологий получения тетраметилтиурамдисульфида, *N*-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамида, диизопропилксантогендисульфида, *N*-фенил-2-нафтиламина.

М.М. Антонова – разработка и промышленное внедрение технологий получения диизопропилксантогендисульфида и *N*-фенил-2-нафтиламина.

Д.И. Климов – разработка и промышленное внедрение технологий получения *N*-циклогексил-2-бензотиазолилсульфенамида и *N*-фенил-2-нафтиламина.

Authors' contributions

N.A. Kostikova – development and industrial implementation of technologies for the production of tetramethylthiuram disulfide, *N*-cyclohexyl-2-benzothiazolylsulfenamide, diisopropyl xanthohol disulfide, and *N*-phenyl-2-naphthylamine; development of the “Methodology for the quantitative assessment of new technologies for the production of organic substances in accordance with BAT principles,” approbation of this technique, and the comparative evaluation of developed and alternative (previously implemented in the USSR) technologies by the level of environmental impact.

E.N. Glukhan – formation of the scientific concept of quantitative assessment of new technologies in accordance with BAT principles, development of “Methodology for the quantitative assessment of new technologies for the production of organic substances in accordance with BAT principles.”

P.V. Kazakov – development of technology for obtaining tetramethylthiuram disulfide, industrial introduction of technologies for obtaining tetramethylthiuram disulfide, *N*-cyclohexyl-2-benzothiazolylsulfenamide, diisopropyl xanthohol disulfide, and *N*-phenyl-2-naphthylamine.

M.M. Antonova – development and industrial implementation of technologies for the production of diisopropyl xanthohol disulfide and *N*-phenyl-2-naphthylamine.

D.I. Klimov – development and industrial implementation of technologies for the production of *N*-cyclohexyl-2-benzothiazolylsulfenamide and *N*-phenyl-2-naphthylamine.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interest.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко В.И., Ерёменко О.В., Третьякова Ю.В. Алгоритм выбора наилучшей доступной технологии. *Тонкие химические технологии*. 2011;6(4):113–115.
2. Ерушева К.И., Колыбанов К.Ю., Тишаева И.Р. Функциональное моделирование процесса выбора наилучшей доступной технологии. *Тонкие химические технологии*. 2017;12(4):98–105. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2017-12-4-98-105>
3. Панова С.А., Тишаева И.Р. Системная модель наилучшей доступной технологии. *Тонкие химические технологии*. 2014;9(5):83–85.
4. Глухан Е.Н., Костикова Н.А. Методика количественной оценки новых технологий производства органических веществ в соответствии с принципами наилучших доступных технологий. *Химия и технология органических веществ*. 2018;2(6):36–42. https://doi.org/10.54468/25876724_2018_2_36
5. Костикова Н.А., Глухан Е.Н. Методика количественной оценки новых технологий производства органических веществ в соответствии с критериями экономической и экологической эффективности. *Химия и технология органических веществ*. 2021;4(20):54–63. https://doi.org/10.54468/25876724_2021_4_54
6. Зинина Е.А., Костикова Н.А., Кондратенко С.М., Сазонова З.Г. Высокоэффективный способ получения тетраметилтиурамдисульфида. *Химия и технология органических веществ*. 2017;3(3):20–29. https://doi.org/10.54468/25876724_2017_3_20
7. Горбунов Б.Н., Гуревич Я.А., Маслова И.П. *Химия и технология стабилизаторов полимерных материалов*. М.: Химия; 1981. 368 с.
8. Блох Г.А. *Органические ускорители вулканизации каучуков*; под ред. П.И. Захарченко. М.-Л.: Химия; 1964. С. 43–44.
9. Гурвич Я.А. *Справочник молодого аппаратчика-химика*. М.: Химия; 1991. 253 с.
10. Сазонова З.Г., Щекина М.П., Костикова Н.А., Голиков А.Г. Малоотходный способ получения N-циклогексил-2-бензотиазолсульфенамида. *Химия и технология органических веществ*. 2018;1(5):27–34. https://doi.org/10.54468/25876724_2018_1_27
11. Розина Е.А., Анохина Д.И., Романова П.С., Дмитриев К.В., Муканин В.М., Кудерский О.В. *Способ получения N-циклогексил-2-бензотиазолсульфенамида*: А.С. СССР № 271524. заявка № 1297876/23-4; заявл. 14.01.1969; опубл. 26.05.1970.
12. Кондратьев В.Б., Голиков А.Г., Костикова Н.А., Антонова М.М., Кондратенко С.М., Корнеева О.И. *Способ получения диизопропилксантогендисульфида*: Пат. RU 2713402. заявка № 2019135649, заявл. 07.11.2019, опубл. 05.02.2020.
13. Антонова М.М., Кондратенко С.М., Костикова Н.А., Корнеева О.И., Шибков О.О., Черенков М.А., Климов Д.И., Приходько В.В. Разработка способа получения изопропилового ксантогената калия, перспективного для промышленной реализации. *Химия и технология органических веществ*. 2021;3(19):14–26. https://doi.org/10.54468/25876724_2021_3_14
14. Антонова М.М., Кондратенко С.М., Костикова Н.А., Корнеева О.И., Шибков О.О., Черенков М.А., Климов Д.И., Приходько В.В. Новый способ получения диизопропилксантогендисульфида с использованием перекиси водорода в качестве окислителя. *Химическая промышленность сегодня*. 2022;(1):26–35. https://doi.org/10.53884/27132854_2022_1_26

REFERENCES

1. Bondarenko V.I., Eremenko O.V., Tret'yakova Yu.V. Algorithm for choosing the best available technology. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2011;6(4):113–115 (in Russ.).
2. Erusheva K.I., Kolybanov K.Yu., Tishaeva I.R. Functional modeling of the process of choosing the best available technique. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2017;12(4):98–105 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2017-12-4-98-105>
3. Panova S.A., Tishaeva I.R. System model for identification of best available technology (BAT). *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2014;9(5):83–85 (in Russ.).
4. Glukhan E.N., Kostikova N.A. Methodology for assessment of new technologies for of organic substances production according to the best available technologies principles. *Khimiya i tekhnologiya organicheskikh veshchestv = Chemistry and Technology of Organic Substance*. 2018;2(6):36–42 (in Russ.). https://doi.org/10.54468/25876724_2018_2_36
5. Kostikova N.A., Glukhan E.N. Methodology of quantitative assessment of new technologies for the production of organic substances in accordance with the criteria of economic and environmental efficiency. *Khimiya i tekhnologiya organicheskikh veshchestv = Chemistry and Technology of Organic Substances*. 2021;4(20):54–63 (in Russ.). https://doi.org/10.54468/25876724_2021_4_54
6. Zinina E.A., Kostikova N.A., Kondratenko S.M., Sazonova Z.G. High-efficient method of tetramethylthiuramdisulfide production. *Khimiya i tekhnologiya organicheskikh veshchestv = Chemistry and Technology of Organic Substances*. 2017;3(3):20–29 (in Russ.). https://doi.org/10.54468/25876724_2017_3_20
7. Gorbunov B.N., Gurevich Ya.A., Maslova I.P. *Khimiya i tekhnologiya stabilizatorov polimernykh materialov = Chemistry and Technology of Stabilizers of Polymeric Materials*. Moscow: Khimiya; 1981. 368 p. (in Russ.).
8. Blokh G.A. *Organicheskie uskoriteli vulkanizatsii kauchukov*. In: Zakharchenko P.I. (Ed.). *Organic Rubber Vulcanization Accelerators*. Moscow-Leningrad: Khimiya; 1964. P. 43–44 (in Russ.).
9. Gurvich Ya.A. *Spravochnik molodogo apparatchika-khimika (Handbook of a Young Apparatchik-Chemist)*. Moscow: Khimiya; 1991. 253 p. 197 (in Russ.).
10. Sazonova Z.G., Shchekina M.P., Kostikova N.A., Golikov A.G. Low-waste method of N-cyclohexyl-2-benzothiazolesulfenamide obtaining. *Khimiya i tekhnologiya organicheskikh veshchestv = Chemistry and Technology of Organic Substances*. 2018;1(5):27–34 (in Russ.). https://doi.org/10.54468/25876724_2018_1_27
11. Rozina E.A., Anokhina D.I., Romanova P.S., Dmitriev K.V., Mukanin V.M., Kuderskii O.V. *Method of Obtaining N-cyclohexyl-2-benzthiazolylsulfenamide*: USSR Inventor's Certificate No. 271524. Publ. 26.05.1970 (in Russ.).
12. Kondrat'ev V.B., Golikov A.G., Kostikova N.A., Antonova M.M., Kondratenko S.M., Korneeva O.I. *The method for obtaining diisopropylxanthogendisulfide*: RF Pat. RU 2713402. Publ. 05.02.2020.
13. Antonova M.M., Kondratenko S.M., Kostikova N.A., Korneeva O.I., Shibkov O.O., Cherenkov M.A., Klimov D.I., Prihod'ko V.V. Development of a production method isopropyl potassium xanthate, promising for industrial implementation. *Khimiya i tekhnologiya organicheskikh veshchestv = Chemistry and Technology of Organic Substances*. 2021;3(19):14–26 (in Russ.). https://doi.org/10.54468/25876724_2021_3_14

15. Cambron A., Whitby G.S. The oxidation of xanthates and some new dialkyl sulphur- and disulphur-dicarbothionates. *Canadian Journal of Research*. 1930;2(2):144–152. <https://doi.org/10.1139/cjr30-011>

16. Кондратьев В.Б., Голиков А.Г., Казаков П.В., Костикова Н.А., Климов Д.И., Антонова М.М. *Способ получения N-фенил-2-нафтиламина*: Пат. RU 2676692 С1. заявка № 2018128083; заявл. 01.08.2018, опубл. 10.01.2019.

17. Антонова М.М., Костикова Н.А., Голиков А.Г., Климов Д.И. Высокоэффективный способ получения неозона Д. *Химия и технология органических веществ*. 2018;1(5):9–18. https://doi.org/10.54468/25876724_2018_1_9

18. Климов Д.И., Костикова Н.А., Каабак Л.В., Шибков О.О., Черенков М.А., Пыжъянов И.В. Исследование механизма кислотного катализа реакции получения N-фенил-2-нафтиламина из анилина и 2-нафтола. *Химия и технология органических веществ*. 2020;2(14):69–89. https://doi.org/10.54468/25876724_2020_2_69

19. Магергут В.З., Масленников И.М., Стальнов П.И., Санаев В.С., Дорохин П.Н., Коршаков М.К., Дружбин Н.Н. *Способ получения неозона Д*: А.С. СССР № 781201. заявка № 2677374/23-04; заявл. 09.10.78; опубл. 23.11.1980.

14. Antonova M.M., Kondratenko S.M., Kostikova N.A., Korneeva O.I., Shibkov O.O., Cherenkov M.A., Klimov D.I., Prikhod'ko V.V. A new method for the production of diisopropylxanthogen disulfide using hydrogen peroxide as an oxidant. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya = Chemical Industry Developments*. 2022;(1):26–35 (in Russ.). https://doi.org/10.53884/27132854_2022_1_26

15. Cambron A., Whitby G.S. The oxidation of xanthates and some new dialkyl sulphur- and disulphur-dicarbothionates. *Canadian Journal of Research*. 1930;2(2):144–152. <https://doi.org/10.1139/cjr30-011>

16. Kondrat'ev V.B., Golikov A.G., Kazakov P.V., Kostikova N.A., Klimov D.I., Antonova M.M. *The method for obtaining N-phenyl-2-naphthylamine*: RF Pat. RU2676692 S1. Publ. 10.01.2019 (in Russ.).

17. Antonova M.M., Kostikova N.A., Golikov A.G., Klimov D.I. Highly efficient method of producing neozone D. *Khimiya i tekhnologiya organicheskikh veshchestv = Chemistry and Technology of Organic Substances*. 2018;1(5):9–18 (in Russ.). https://doi.org/10.54468/25876724_2018_1_9

18. Klimov D.I., Kostikova N.A., Kaabak L.V., Shibkov O.O., Cherenkov M.A., Pyzh'yanov I.V. Research of acid catalysis mechanism of the reaction of obtaining N-phenyl-2-naphthylamine from 2-naphthol and aniline. *Khimiya i tekhnologiya organicheskikh veshchestv = Chemistry and Technology of Organic Substances*. 2020;2(14):69–89 (in Russ.). https://doi.org/10.54468/25876724_2020_2_69

19. Magergut V.Z., Maslennikov I.M., Stal'nov P.I., Sanaev V.S., Dorokhin P.N., Korshakov M.K., Druzhbin N.N. *Method for Producing Neozone D*: USSR Inventor's Certificate No. 781201. Publ. 23.11.1980 (in Russ.).

Об авторах:

Костикова Наталья Алексеевна, к.х.н., начальник отдела, ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт органической химии и технологии» (ФГУП «ГосНИИОХТ»), Государственный научный центр Российской Федерации (111024, Россия, Москва, шоссе Энтузиастов, 23). E-mail: kutkin@gosniiocht.ru. SPIN-код РИНЦ 1540-8520, <https://orcid.org/0000-0001-8796-124X>

Глухан Елена Николаевна, д.т.н., доцент, советник генерального директора, ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт органической химии и технологии» (ФГУП «ГосНИИОХТ»), Государственный научный центр Российской Федерации (111024, Россия, Москва, шоссе Энтузиастов, 23). E-mail: dir@gosniiocht.ru. Scopus Author ID 8706397600, SPIN-код РИНЦ 6274-1908, <https://orcid.org/0000-0002-2369-5648>

Казаков Павел Васильевич, д.х.н., доцент, заместитель генерального директора, ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт органической химии и технологии» (ФГУП «ГосНИИОХТ»), Государственный научный центр Российской Федерации (111024, Россия, Москва, шоссе Энтузиастов, 23). E-mail: kutkin@gosniiocht.ru. SPIN-код РИНЦ 1920-2930, <https://orcid.org/0000-0001-8164-274X>

Антонова Мария Михайловна, к.х.н., начальник научно-исследовательского отделения, ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт органической химии и технологии» (ФГУП «ГосНИИОХТ»), Государственный научный центр Российской Федерации (111024, Россия, Москва, шоссе Энтузиастов, 23). E-mail: kutkin@gosniiocht.ru. Scopus Author ID 56165662600, SPIN-код РИНЦ 4136-5290, <https://orcid.org/0000-0001-6492-2483>

Климов Дмитрий Игоревич, к.х.н., начальник сектора, ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт органической химии и технологии» (ФГУП «ГосНИИОХТ»), Государственный научный центр Российской Федерации (111024, Россия, Москва, шоссе Энтузиастов, 23). E-mail: kutkin@gosniiocht.ru. SPIN-код РИНЦ 7113-2691, <https://orcid.org/0000-0002-0649-1440>

About the authors:

Natalya A. Kostikova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of Department, State Research Institute of Organic Chemistry and Technology (GosNIIOkht), State Scientific Center of the Russian Federation (23, sh. Entuziastov, Moscow, 111024, Russia). E-mail: kutkin@gosniiocht.ru. RSCI SPIN-code 1540-8520, <https://orcid.org/0000-0001-8796-124X>

Elena N. Glukhan, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Adviser to the Director-General, State Research Institute of Organic Chemistry and Technology (GosNIIOKhT), State Scientific Center of the Russian Federation (23, sh. Entuziastov, Moscow, 111024, Russia). E-mail: dir@gosniiokht.ru. Scopus Author ID 8706397600, RSCI SPIN-code 6274-1908, <https://orcid.org/0000-0002-2369-5648>

Pavel V. Kazakov, Dr. Sci. (Chem.), Assistant Professor, Deputy General Director, State Research Institute of Organic Chemistry and Technology (GosNIIOKhT), State Scientific Center of the Russian Federation (23, sh. Entuziastov, Moscow, 111024, Russia). E-mail: kutkin@gosniiokht.ru. RSCI SPIN-code 1920-2930, <https://orcid.org/0000-0001-8164-274X>

Mariya M. Antonova, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Research Department, State Research Institute of Organic Chemistry and Technology (GosNIIOKhT), State Scientific Center of the Russian Federation (23, sh. Entuziastov, Moscow, 111024, Russia). E-mail: kutkin@gosniiokht.ru. Scopus Author ID 56165662600, RSCI SPIN-code 4136-5290, <https://orcid.org/0000-0001-6492-2483>

Dmitry I. Klimov, Cand. Sci. (Eng.), Head of Sector, State Research Institute of Organic Chemistry and Technology (GosNIIOKhT), State Scientific Center of the Russian Federation (23, sh. Entuziastov, Moscow, 111024, Russia). E-mail: kutkin@gosniiokht.ru. RSCI SPIN-code 7113-2691, <https://orcid.org/0000-0002-0649-1440>

*Поступила: 14.11.2022; получена после доработки: 20.02.2023; принята к опубликованию: 20.06.2023.
The article was submitted: November 14, 2022; approved after reviewing: February 20, 2023; accepted for publication: June 20, 2023.*