

Химия и технология органических веществ
Chemistry and technology of organic substances

УДК 661.727.6+547.562.1

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2025-20-1-7-17>

EDN HWFSVA



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Гидропероксидный способ совместного получения метилэтилкетона и фенола

В.С. Кабанова✉, Е.А. Курганова, А.С. Фролов, Г.Н. Кошель, А.А. Смурова, Е.И. Баёв

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, 150023 Россия

✉ Автор для переписки, e-mail: kabanovavs@ystu.ru

Аннотация

Цели. Разработка научных и прикладных основ химии и технологии гидропероксидного способа совместного получения метилэтилкетона и фенола. Исследование закономерностей протекания отдельных стадий разрабатываемого процесса и подбор условий, обеспечивающих максимальный выход промежуточных и целевых продуктов.

Методы. Методологию исследования составили основные положения о способах синтеза промежуточных и целевых продуктов кумольной технологии получения фенола совместно с ацетоном. Качественный и количественный анализ полученных промежуточных и целевых продуктов осуществлялся с применением современных физико-химических методов анализа. Газожидкостная хроматография проводилась на аппаратно-программном комплексе Хроматэк-Кристалл 5000.2. Инфракрасные (ИК) спектры синтезируемых соединений были записаны на приборе ИК Фурье Spectrum RX-1, анализ веществ методом спектроскопии ядерного магнитного резонанса (ЯМР) ^1H был проведен с помощью ЯМР-спектрометра Bruker DRX 400. Количественное определение содержания гидропероксида *втор*-бутилбензола проводилось с использованием йодометрического титрования.

Результаты. Исследованы основные стадии разрабатываемого способа совместного получения метилэтилкетона и фенола на основе гидропероксидного окисления *втор*-бутилбензола. Алкилированием бензола бутанолом-1 в присутствии концентрированной серной кислоты синтезирован *втор*-бутилбензол с выходом около 82%. Данный углеводород подвергнут аэробному жидкофазному окислению, катализируемому *N*-гидроксифталимидом, до соответствующего гидропероксида с содержанием основного вещества 30–35 мас. % при конверсии исходного сырья 34–37% и селективности образования гидропероксида выше 95%. Исследованы закономерности протекания заключительной стадии разрабатываемого метода — кислотного разложения гидропероксида до метилэтилкетона и фенола. Определены условия, позволяющие получать целевые продукты с высокими выходами.

Выводы. Гидропероксидным способом получены метилэтилкетон и фенол высокой степени чистоты с выходами 72 и 74% соответственно. Структуры синтезированных веществ подтверждены методами ИК- и ^1H ЯМР-спектроскопии.

Ключевые слова

метилэтилкетон, фенол, *втор*-бутилбензол, гидропероксид, алкилирование, аэробное жидкофазное окисление, *N*-гидроксифталимид, кислотное разложение

Поступила: 05.09.2024
Доработана: 27.09.2024
Принята в печать: 19.12.2024

Для цитирования

Кабанова В.С., Курганова Е.А., Фролов А.С., Кошель Г.Н., Смурова А.А., Баёв Е.И. Гидропероксидный способ совместного получения метилэтилкетона и фенола. *Тонкие химические технологии*. 2025;20(1):7–17. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2025-20-1-7-17>

RESEARCH ARTICLE

Hydroperoxide method for the co-production of methyl ethyl ketone and phenol

Viktoriya S. Kabanova✉, Ekaterina A. Kurganova, Aleksandr S. Frolov, Georgiy N. Koshel,
Alina A. Smurova, Egor I. Bayov

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, 150023 Russia

✉ Corresponding author, e-mail: kabanovavs@ystu.ru

Abstract

Objectives. Applying the hydroperoxide method for the co-production of methyl ethyl ketone and phenol, the work studies the kinetic and other characteristics of the individual stages of the developed process to select the optimal conditions for producing the maximum yield of intermediate and target products.

Methods. The research relied on the main theoretical and methodological provisions for the synthesis of intermediate and target products of the cumene technology for the co-production of phenol and acetone. The obtained intermediate and target products were qualitatively and quantitatively analyzed according to modern physicochemical approaches. Gas-liquid chromatography was performed with a Chromatec-Crystal 5000.2 hardware and software complex. The infrared (IR) spectra of the synthesized compounds were recorded with a Spectrum RX-1 IR Fourier spectrometer. ¹H nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy of substances was conducted using a Bruker DRX 400 NMR spectrometer. A quantitative determination of the content of *sec*-butylbenzene hydroperoxide was carried out using iodometric titration.

Results. The main stages of the developed method for the co-production of methyl ethyl ketone and phenol based on the hydroperoxide oxidation of *sec*-butylbenzene were investigated. *sec*-Butylbenzene was synthesized by alkylation of benzene with 1-butanol in the presence of concentrated sulfuric acid at a yield of about 82%. The hydrocarbon compound was subjected to aerobic liquid-phase oxidation catalyzed by *N*-hydroxyphthalimide to the corresponding hydroperoxide with a main substance content of 30–35 wt %, feedstock conversion of 34–37%, and selectivity of hydroperoxide formation above 95%. The kinetic and other characteristics were studied for the final stage of the developed method, comprising the acid decomposition of hydroperoxide to methyl ethyl ketone and phenol. Suitable conditions for obtaining target products with high yields were identified.

Conclusions. Methyl ethyl ketone and phenol of high purity with yields of 72 and 74%, respectively, were obtained by the hydroperoxide method. The structures of the synthesized substances were confirmed by IR and ¹H NMR spectroscopy.

Keywords

methyl ethyl ketone, phenol, *sec*-butylbenzene, hydroperoxide, alkylation, aerobic liquid-phase oxidation, *N*-hydroxyphthalimide, acid decomposition

Submitted: 05.09.2024

Revised: 27.09.2024

Accepted: 19.12.2024

For citation

Kabanova V.S., Kurganova E.A., Frolov A.S., Koshel G.N., Smurova A.A., Bayov E.I. Hydroperoxide method for the co-production of methyl ethyl ketone and phenol. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2025;20(1):7–17. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2025-20-1-7-17>

ВВЕДЕНИЕ

Метилэтилкетон (МЭК) — крупнотоннажный продукт основного органического синтеза, используемый в производстве полимерных и лакокрасочных материалов [1]. В промышленности МЭК широко известен как эффективный растворитель многих веществ и материалов, например, печатных красок и эпоксидных смол [2]. МЭК используют в производстве клея, магнитных лент, искусственной кожи, бездымных порохов и антиоксидантов резины [3–5]. В тонком органическом синтезе МЭК используют

в качестве исходного сырья для получения ряда соединений, являющихся мономерами для органического стекла [4].

В промышленности МЭК получают несколькими способами, наиболее распространенными из которых являются окисление бутанола-2, катализируемое серебром на цеолитном носителе [6, 7] и дегидрирование бутилового спирта в присутствии цинк-медных катализаторов [8, 9]. Характерные особенности указанных методов производства МЭК заключаются в проведении процессов при температурах порядка 500°C в присутствии дорогостоящих

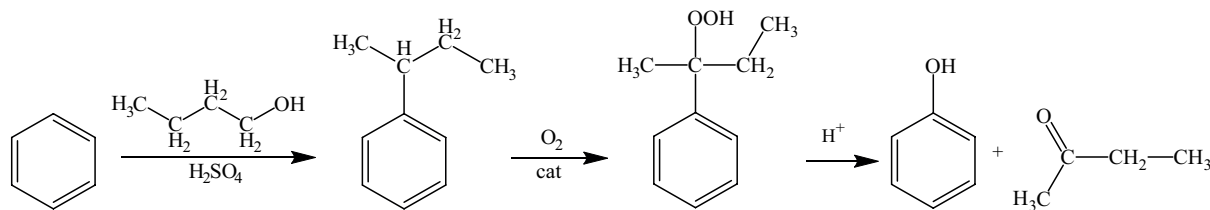


Схема. Гидропероксидный способ получения МЭК и фенола

Scheme. Hydroperoxide method for the synthesis of methyl ethyl ketone and phenol

и низкостабильных катализаторов. Известны и способы получения МЭК на основе бутиленовых фракций, одним из примеров которых может служить прямое окисление *n*-бутиленов [4, 10], где в качестве катализатора выступает водный раствор комплекса палладия(II) и Мо-V-фосфорной гетерополиокислоты (ГПК) общего состава $\text{H}_{3+x}\text{P}_x\text{Mo}_{12-x}\text{O}_{40}$ (ГПК-*x*, $2 \leq x \leq 6$).

В настоящей работе в качестве альтернативного предложен гидропероксидный способ совместного получения МЭК и фенола — важного мономера нефтехимии, применяемого в производстве пластмасс, волокон, красителей, косметических и лекарственных средств [11, 12]. Основу предлагаемого метода составляет кумольная технология по производству фенола и ацетона, главным недостатком которой, несмотря на ее хорошую эффективность, является производимое избыточное количество ацетона, не имеющего соответствующего спроса на рынке химической продукции [13].

Разрабатываемый метод включает в себя стадии синтеза исходного *втор*-бутилбензола (*в*-ББ) алкилированием бензола бутанолом-1 в присутствии

концентрированной серной кислоты, аэробного жидкофазного окисления данного углеводорода до его гидропероксида (ГП) с применением эффективного органического катализатора *N*-гидроксифталимида (*N*-ГФИ), а также кислотного разложения ГП *в*-ББ в целевые продукты по схеме.

Основным закономерностям протекания данных стадий и посвящена настоящая статья.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При выполнении настоящего исследования были использованы следующие реактивы: бензол (х.ч., ГОСТ 5955-75¹) и бутанол-1 (х.ч., ГОСТ 6006-78²) фирмы «ЭКОС-1» (Россия), серная кислота (х.ч., ГОСТ 4204-77³) фирмы «Сигма Тек» (Россия), гидроокись натрия (ч.д.а., ГОСТ 4328-77⁴) фирмы «Компонент-Реактив» (Россия), кальций хлористый (ч.д.а., ГОСТ 450-77⁵) производства «Москреактив» (Россия), кислород сжатый (техн., ГОСТ 5583-78⁶), *N*-гидроксифталиимид фирмы «Sisco Research Laboratories» (Индия), уксусная кислота (х.ч., ГОСТ 61-75⁷) и калий йодистый (х.ч., ГОСТ 4232-74⁸)

- ¹ ГОСТ 5955-75. Государственный стандарт Союза ССР. Реактивы. Бензол. Технические условия. Москва: Издательство стандартов; 1994. [GOST 5955-75. State Standard of the USSR. Reagents. Benzene. Specifications. Moscow: Izdatelstvo standartov; 1994 (in Russ.).]
- ² ГОСТ 6006-78. Государственный стандарт Союза ССР. Реактивы. Бутанол-1. Технические условия. Москва: ИПК Издательство стандартов; 1998. [GOST 6006-78. State Standard of the USSR. Reagents. 1-Butanol. Specifications. Moscow: IPK Izdatelstvo standartov; 1998 (in Russ.).]
- ³ ГОСТ 4204-77. Государственный стандарт Союза ССР. Реактивы. Кислота серная. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2006. [GOST 4204-77. State Standard of the USSR. Reagents. Sulphuric acid. Specifications. Moscow: Standartinform; 2006 (in Russ.).]
- ⁴ ГОСТ 4328-77. Межгосударственный стандарт. Реактивы. Натрия гидроокись. Технические условия. Москва: ИПК Издательство стандартов. 1978. [GOST 4328-77. Interstate Standard. Reagents. Sodium hydroxide. Specifications. Moscow: IPK Izdatelstvo standartov; 1978 (in Russ.).]
- ⁵ ГОСТ 450-77. Государственный стандарт Союза ССР. Реактивы. Кальций хлористый. Технические условия. Москва: ИПК Издательство стандартов; 1997. [GOST 450-77. State Standard of the USSR. Reagents. Calcium chloride. Specifications. Moscow: IPK Izdatelstvo standartov; 1997 (in Russ.).]
- ⁶ ГОСТ 5583-78. Межгосударственный стандарт. Кислород газообразный технический и медицинский. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2005. [GOST 5583-78. Interstate Standard. Technical and medical oxygen gas Specifications. Moscow: Standartinform; 2005 (in Russ.).]
- ⁷ ГОСТ 61-75. Межгосударственный стандарт. Реактивы. Уксусная кислота. Технические условия. Москва: Стадартинформ; 2006. [GOST 61-75. Interstate Standard. Reagents. Acetic acid. Specifications. Moscow: Standartinform; 2006 (in Russ.).]
- ⁸ ГОСТ 4232-74. Межгосударственный стандарт. Реактивы. Калий йодистый. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2006. [GOST 4232-74. Interstate Standard. Reagents. Potassium iodide. Specifications. Moscow: Standartinform; 2006 (in Russ.).]

фирмы «Спектр Хим» (Россия), гипосульфит натрия (ч.д.а., ГОСТ 27068-865⁹) фирмы «Уралхиминвест» (Россия).

Качественный и количественный анализ синтезированных промежуточных и целевых продуктов осуществлялся с применением современных физико-химических методов анализа. Определение содержания синтезируемых соединений было проведено с применением метода газожидкостной хроматографии с использованием аппаратно-программного комплекса Хроматэк-Кристалл 5000.2 (СКБ Хроматэк, Россия). Идентификация полученных соединений была проведена методами инфракрасной (ИК) спектроскопии и спектроскопии ядерного магнитного резонанса (ЯМР) ¹H. ИК-спектры были записаны на приборе ИК Фурье Spectrum RX-1 (PerkinElmer, США) в области 4000–400 см⁻¹ в виде микрослоя между стеклами, выполненными из бромида калия. Математическая обработка ИК-спектров выполнена с использованием программного обеспечения Spektrum v. 5.0.1. ¹H ЯМР-спектроскопия осуществлена с применением ЯМР-спектрометра Bruker DRX 400 с частотой прибора 400.4 МГц. В качестве растворителя была использована смесь диметилсульфоксид d₆-CCl₄, в качестве внутреннего стандарта — тетраметилсилан.

Содержание ГП *в*-ББ в продуктах окисления *в*-ББ, а также в ходе процесса кислотного разложения ГП определялось методом йодометрического титрования [14].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Сернокислотное алкилирование бензола бутанолом-1 проводили в круглодонной трехгорлой колбе, снабженной термометром и погруженной в водяную баню, при заданном мольном соотношении реагентов, температуре и продолжительности реакции при непрерывном перемешивании реакционной массы по методике, описанной в работе [15]. Целевой продукт выделяли из реакционной массы методом вакуумной ректификации при температуре 85–87°C и остаточном давлении 15–30 мм рт. ст.

Аэробное жидкофазное окисление *в*-ББ проводили на установке проточно-замкнутого типа в стеклянном реакторе при атмосферном давлении, непрерывной подаче кислорода и перемешивании по методике [16]. По окончании реакции выпавший после охлаждения реакционной смеси в осадок

катализатор (*N*-ГФИ) отделяли фильтрованием. Оксидат анализировали на предмет содержания в нем ГП *в*-ББ методом йодометрического титрования.

Экстракционное концентрирование полученного ГП *в*-ББ 75%-ным раствором этилового спирта проводили в колбе с обратным холодильником при непрерывном интенсивном перемешивании при температуре 20–23°C в течение 1 ч, выдерживая смесь до полного расслоения реакционной массы. Методом вакуумной ректификации при температуре 20–23°C и остаточном давлении 15–30 мм рт. ст. из экстракта отгоняли воду и спирт, получая при этом концентрированный ГП.

Кислотное разложение ГП *в*-ББ было проведено в термостатируемом стеклянном реакторе по методике [17]. Процесс проводили при заданной температуре и непрерывном перемешивании. За ходом реакции следили по расходу ГП *в*-ББ, отбирая пробы для анализа через каждые 10 мин от начала реакции. МЭК был выделен из реакционной массы методом вакуумной ректификации при температуре 36–40°C и остаточном давлении 15–20 мм рт. ст.; фенол — экстракцией 10%-ным водным раствором этанола с последующим выпариванием воды и спирта из так называемого спиртово-фенольного слоя, образовавшегося при разделении смеси.

Характеристики синтезированных промежуточных и целевых продуктов представлены ниже.

***в*-ББ.** Выход на загруженный спирт 82%, содержание основного вещества 99.3%. ИК-спектр, см⁻¹: 3083, 3063, 3028 (ν C–H_{аром}); 2961, 2875 (ν CH₃); 2929, 2859 (ν CH₂); 1603, 1493 (ν C=C_{аром}); 1451 (δ CH₂); 1378 (δ CH₃); 758, 697 (монозамещение в ароматическом кольце). ¹H ЯМР (400 МГц), δ, м.д.: 0.75 т (3H, CH₃), 1.17 д (3H, CH₃), 1.57 м (2H, CH₂), 2.55 м (1H, CH), 7.16 м (3H, CH_{аром}), 7.27 м (2H, CH_{аром}).

ГП *в*-ББ. Содержание основного вещества 95%. ИК-спектр, см⁻¹: 3401 (ν O–OH); 2973 (ν CH₃); 2939 (ν CH₂); 1601, 1496 (ароматическое кольцо); 1447 (δ CH₂); 1372 (δ CH₃); 758 и 698 (монозамещение в бензольном кольце).

МЭК. Выход на загруженный ГП *в*-ББ 72%. ИК-спектр, см⁻¹: 2980 (ν CH₂); 2941 (ν CH₃); 1709 (ν C=O); 1365 (δ CH₂). ЯМР ¹H (400 МГц), δ, м.д.: 2.43 (кв, 2H), 2.06 (с, 3H), 0.90 (тр, 3H).

Фенол. Выход на загруженный ГП *в*-ББ 74%. ИК-спектр, см⁻¹: 3221 (ν O–H); 3050–3020 (ν C–H_{аром}); 1594, 1473 (ν C–C_{аром}). ¹H ЯМР (400 МГц), δ, м.д.: 9.33 (с, 1H), 7.15 (т, 2H), 6.80–6.72 (м, 3H).

⁹ ГОСТ 27068-86. Межгосударственный стандарт. Реактивы. Натрий серноватистокислый (тиосульфат натрия) 5-водный. Технические условия. Москва: ИПК Издательство стандартов. 1987. [GOST 27068-86. Interstate Standard. Reagents. Sodium thiosulphate, 5-aqueous. Specifications. Moscow: IPK Izdatelstvo standartov; 1998 (in Russ.).]

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из научно-технической литературы известно несколько способов получения *в*-ББ с применением непредельных углеводородов [18, 19], основным недостатком которых является относительно невысокий выход целевого продукта (40–60%). В качестве альтернативного способа синтеза *в*-ББ может выступать его получение реакцией алкилирования бензола бутанолом-1. Привлекательность данного метода заключается в возможности осуществления этого процесса в лабораторных условиях. В связи с тем, что в литературе практически отсутствует информация о проведении этой реакции, нами был проведен ряд исследований, направленных на изучение влияния некоторых параметров на процесс образования *в*-ББ алкилированием бензола бутанолом-1. В качестве исходных условий было выбрано молярное соотношение реагентов бензол : бутанол-1 : серная кислота = 3 : 1 : 3. Температура процесса варьировалась от 50 до 70°C, а продолжительность реакции составляла 2–4 ч. Результаты изучения влияния данных параметров на образование *в*-ББ представлены в табл. 1.

Таблица 1. Влияние температуры и продолжительности реакции на процесс образования *в*-ББ алкилированием бензола бутанолом-1. Молярное соотношение бензол : бутанол-1 : серная кислота = 3 : 1 : 3

Table 1. Effect of temperature and reaction duration on the formation of *sec*-butylbenzene (*sec*-BB) by alkylation of benzene with 1-butanol. The benzene : 1-butanol : sulfuric acid molar ratio is 3 : 1 : 3

Температура, °C Temperature, °C	Время реакции, ч Reaction duration, h	Выход <i>в</i> -ББ на загруженный спирт, % Yield of <i>sec</i> -BB on the basis of loaded alcohol, %	Конверсия бензола, % Conversion of benzene, %
50	2	21.6	7.4
	4	30.7	11.1
60	2	48.9	16.5
	4	54.7	18.4
70	2	75.1	25.2
	4	81.7	28.8

Из табл. 1 видно, что повышение температуры и продолжительности реакции способствует увеличению конверсии бензола и выхода целевого *в*-ББ. Установлено, что проведение реакции алкилирования бензола бутиловым спиртом при температуре 50°C сопровождается крайне низким выходом целевого продукта (не более 30% на загруженный спирт).

Большого выхода *в*-ББ можно достичь в ходе реакции при 70°C в течение 4 ч. Именно эти условия являются наиболее благоприятными и обеспечивают высокий выход *в*-ББ — около 82%. Проведение реакции при более высоких температурах или большем времени приводит к образованию повышенного содержания в реакционной массе дизамещенного *в*-ББ, являющегося в разрабатываемой технологии побочным продуктом.

По результатам укрупненного синтеза *в*-ББ в выбранных условиях составлен материальный баланс, представленный в табл. 2.

Таблица 2. Материальный баланс процесса алкилирования бензола бутанолом-1. Молярное соотношение бензол : бутанол-1 : серная кислота = 3 : 1 : 3. Температура 70°C. Продолжительность процесса 4 ч

Table 2. Material balance of alkylation of benzene with 1-butanol. The molar ratio of benzene : 1-butanol : sulfuric acid is 3 : 1 : 3. The temperature is 70°C. The reaction duration is 4 h

Вещество Substance	Молярная масса, г/моль Molar mass, g/mol	Загружено Loaded		Получено Obtained	
		г g	мас. % wt %	г g	мас. % wt %
Бензол Benzene	78.1	175.8	38.9	125.1	27.7
Бутанол-1 1-Butanol	74.1	55.6	12.3	5.0	1.1
H ₂ SO ₄ *	98.1	220.7	48.8	230.8	51.1
<i>в</i> -ББ <i>sec</i> -BB	134.2	0.0	0.0	82.3	18.2
Побочные продукты Byproducts	—	0.0	0.0	6.4	1.4
Потери Losses	—	0.0	0.0	2.5	0.5
Всего Total	—	452.1	100.0	452.1	100.0

* Масса кислотного слоя, содержащая образовавшуюся в ходе реакции воду. / Mass of the acid layer containing the water formed during the reaction.

Целевой продукт выделен методом вакуумной ректификации, его выход составил около 82% на загруженный бутанол-1 при конверсии бензола около 29%. Характеристики соединения представлены в экспериментальной части настоящей работы.

Ключевой стадией разрабатываемого метода совместного получения МЭК и фенола является

окисление полученного *в*-ББ до его третичного ГП: именно от эффективности протекания данной стадии зависит экономика всего процесса. Первоначально были проведены исследования аэробного окисления *в*-ББ в отсутствие каких-либо добавок, так называемый процесс автоокисления. Как показали результаты, даже при столь высокой температуре как 140°C за 60 мин реакции удается накопить лишь 2 мас. % ГП (рис. 2, кривая 1), что не является приемлемым для проведения дальнейших исследований.

В работе [20] предложен способ совместного аэробного окисления *в*-ББ и изопропилбензола, где образующийся ГП изопропилбензола выступает в качестве инициатора окисления. Установлено, что скорость окисления *в*-ББ в таком процессе составляет около 1.7 мас. %/ч при конверсии *в*-ББ около 15% и селективности образования ГП *в*-ББ не более 70%. С технологической точки зрения такие результаты являются малоэффективными.

В этой связи была предпринята попытка интенсификации изучаемого процесса. Для достижения этой цели в качестве катализатора был использован *N*-ГФИ. К преимуществам использования данного соединения можно отнести его нетоксичность, относительно простую методику синтеза на основе доступного фталевого ангидрида, а также высокую эффективность *N*-ГФИ по отношению к различным типам субстратов [21, 22]. Кроме того, установлено, что применение *N*-ГФИ позволяет существенно повысить конверсию подвергаемого окислению углеводорода, а также достичь высокой селективности образования соответствующего ГП (свыше 90%) [21].

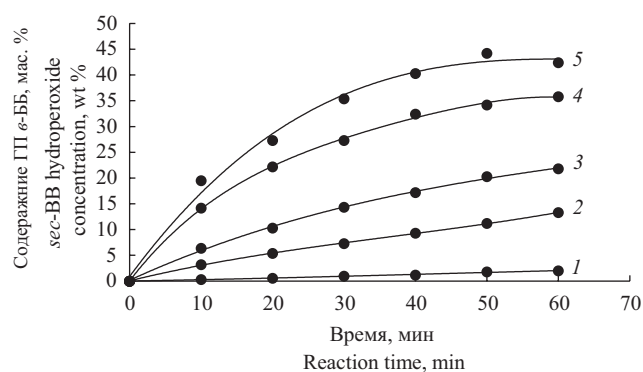


Рис. 1. Закономерности аэробного жидкофазного окисления *в*-ББ до ГП. Содержание *N*-ГФИ, мас. %: (1) 0.0; (2)–(5) 2.0. Температура, °C: (1) 140; (2) 120; (3) 130; (4) 140; (5) 150

Fig. 1. Kinetics of aerobic liquid-phase oxidation of *sec*-BB to hydroperoxide at *N*-HPI concentrations of (1) 0.0 and (2)–(5) 2.0 wt % and temperatures of (1) 140, (2) 120, (3) 130, (4) 140, and (5) 150°C

В работе изучено влияние температуры и содержания катализатора на процесс окисления *в*-ББ до его ГП. Процесс проводили по методике, описанной в экспериментальной части, при температурах 120–150°C и содержании катализатора 1–4 мас. % от загрузки *в*-ББ. Содержание ГП в продуктах окисления определяли йодометрическим титрованием. Полученные результаты представлены на рис. 1 и 2.

Согласно полученным результатам, повышение температуры способствует накоплению ГП в продуктах реакции. Так, например, за 40 мин при температуре 130°C удастся получить ГП *в*-ББ с содержанием основного вещества около 17 мас. % при конверсии *в*-ББ 18% и селективности образования ГП 97.2%. При увеличении температуры всего лишь на 10°C за те же 40 мин содержание ГП *в*-ББ увеличивается до 32 мас. %, при этом селективность его образования по-прежнему остается довольно высокой (95.5%). Дальнейшее повышение температуры приводит к резкому снижению селективности образования ГП *в*-ББ, значение которой может снижаться и до 90%. Причиной этому является преобладание процесса термического распада образующегося в ходе реакции ГП, что приводит к образованию побочных продуктов окисления.

На основании результатов исследования влияния содержания катализатора на процесс окисления *в*-ББ было установлено, что повышение концентрации катализатора приводит к увеличению содержания ГП *в*-ББ. Наглядно это можно видеть при повышении концентрации *N*-ГФИ с 1.0 до 2.0 мас. % (рис. 2). Так, при 130°C за 40 мин реакции в присутствии 1.0% *N*-ГФИ удастся накопить ГП до 17 мас. %.

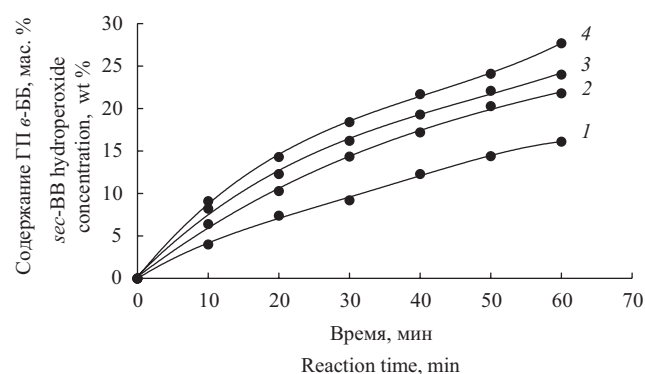


Рис. 2. Влияние содержания катализатора на процесс аэробного жидкофазного окисления *в*-ББ до ГП. Температура 130°C. Содержание катализатора, мас. %: (1) 1.0; (2) 2.0; (3) 3.0; (4) 4.0

Fig. 2. Effect of the catalyst concentration on aerobic liquid-phase oxidation of *sec*-BB to hydroperoxide at a temperature of 130°C and catalyst concentrations of (1) 1.0, (2) 2.0, (3) 3.0, and (4) 4.0 wt %

Увеличение содержания катализатора на один процент приводит к повышению скорости окисления *в*-ББ в 1.3 раза. Использование катализатора *N*-ГФИ в количестве 3 мас. % и более не является экономически целесообразным, поскольку в продуктах реакции наблюдается незначительное увеличение содержания ГП.

Таким образом, при проведении процесса окисления *в*-ББ при температуре 130–140°C и концентрации катализатора *N*-ГФИ 2 мас. % за 1 ч реакции представляется возможным получить ГП *в*-ББ с содержанием от 22 до 35 мас. % и селективностью около 94–97%.

Для того, чтобы удостовериться в том, что в ходе окислительных превращений *в*-ББ действительно образуется именно третичный ГП, был проведен процесс пятиступенчатой экстракции полученного оксидата с содержанием в нем ГП *в*-ББ 24 мас. %. В качестве экстрагента был выбран 75%-ный раствор этанола, эффективность которого в процессах извлечения и концентрирования ГП доказана в [12]. Материальный баланс данного процесса представлен в табл. 3.

В результате вакуумной ректификации объединенного экстракта, был получен 95%-ный *трет*-ГП *в*-ББ, структура которого подтверждена методом ИК-спектроскопии. Ценность данного процесса заключается в том, что выделенный

концентрированный ГП может быть использован в качестве инициатора процессов полимеризации и аэробного окисления.

Заключительным этапом нашей работы являлось изучение закономерностей протекания процесса кислотного разложения ГП *в*-ББ до МЭК и фенола. Проведена серия экспериментов при температурах 40–70°C, начальной концентрации ГП *в*-ББ 10–20 мас. % и содержании серной кислоты, используемой в качестве катализатора, 0.8–1.4 мас. % от количества загружаемого ГП. Контроль за протеканием реакции осуществляли по расходу ГП *в*-ББ методом йодометрического титрования. Начальные скорости реакции определены по тангенсу угла наклона касательной к кинетической кривой в начальный момент времени [17], поскольку именно в этот период времени концентрации продуктов реакции имеют малые численные значения и незначительно влияют на протекание процесса. Результаты исследования закономерностей обсуждаемого процесса представлены в табл. 4.

Показано, что с повышением температуры значительно повышается начальная скорость реакции. Более того, при переходе от 40 к 70°C в реакционной массе наблюдается увеличение содержания побочных продуктов. Этот факт объясняет и резкое

Таблица 3. Материальный баланс процесса пятиступенчатой экстракции ГП *в*-ББ из продуктов окисления *в*-ББ 75%-ным раствором этанола

Table 3. Material balance of five-stage extraction of *sec*-BB HP from *sec*-BB oxidation products with 75% ethanol solution

Компонент Component	Молярная масса, г/моль Molar mass, g/mol	Загружено Loaded		Получено Obtained			
		г g	мас. % wt %	Рафинат Raffinate		Объединенный экстракт Combined extract	
				г g	мас. % wt %	г g	мас. % wt %
<i>в</i> -ББ <i>sec</i> -BB	134.1	78.9	18.7	78.0	99.7	0.0	0.0
ГП <i>в</i> -ББ <i>sec</i> -BB hydroperoxide	166.1	13.9	3.3	0.2	0.3	13.5	4.0
Этанол Ethanol	46.1	260.0	61.5	0.0	0.0	259.0	75.8
Вода Water	18.0	70.0	16.5	0.0	0.0	69.2	20.2
Потери Losses	—	0.0	0.0	2.9			
Всего Total	—	422.8	100.0	78.2	100.0	341.7	100.0

Таблица 4. Влияние температуры, концентрации ГП и катализатора на процесс кислотно-каталитического разложения ГП *в*-ББ**Table 4.** Effect of temperature and concentrations of hydroperoxide and catalyst on the acid-catalytic decomposition of *sec*-BB hydroperoxide

Начальная концентрация ГП <i>в</i> -ББ, мас. % Initial concentration of <i>sec</i> -BB hydroperoxide, wt %	Концентрация катализатора H ₂ SO ₄ , мас. % Concentration of H ₂ SO ₄ catalyst, wt %	Температура, °C Temperature, °C	Начальная скорость реакции, моль/(л·мин) Initial reaction rate, mol/(L·min)	Конверсия ГП, % Hydroperoxide conversion, %	Выход на прореагировавший ГП, мас. % Yield on basis of reacted, wt %	
					Фенол Phenol	МЭК MEK*
20	0.8	40	0.024	98.0	73	71
		50	0.054	98.5	74	72
		60	0.133	98.3	75	68
		70	0.239	99.5	73	66
10	0.8	50	0.034	99.0	36	29
15			0.038	98.7	70	69
20	1.0	50	0.067	99.5	78	70
	1.2		0.080	98.5	76	68
	1.4		0.110	97.5	75	64

*MEK is methyl ethyl ketone.

снижение выхода целевого МЭК вплоть до 66%. По этой причине было принято решение о проведении дальнейших исследований при температуре 50°C. Наряду с температурой к повышению скорости процесса приводит и увеличение начальной концентрации ГП. Так, например, с изменением концентрации ГП *в*-ББ с 10 до 20 мас. % скорость реакции повышается в 1.6 раза. При этом наиболее высокий выход целевых продуктов достигается именно при разложении 20%-ного ГП. Повышение начальной концентрации ГП свыше 20 мас. % нецелесообразно по причине выделения большого количества тепла в процессе разложения ГП, что является небезопасным. Что касается увеличения концентрации катализатора, то даже небольшое ее изменение (с 0.8 до 1.4 мас. %) в значительной мере снижает селективность образования целевых продуктов.

Данные, полученные в ходе проведения серии экспериментов по влиянию различных параметров на обсуждаемый процесс, позволили определить условия его проведения, обеспечивающие высокий выход продуктов. При температуре 50°C, концентрации ГП 20 мас. % и содержании катализатора в реакционной массе 0.8 мас. % проведен укрупненный процесс кислотного разложения ГП *в*-ББ, результаты которого представлены в табл. 5.

Выход МЭК и фенола составил 72 и 74% соответственно при конверсии ГП 99.5%.

Таблица 5. Материальный баланс сернокислотного каталитического разложения ГП *в*-ББ. Температура 50°C. Начальная концентрация ГП 20 мас. %. Концентрация катализатора 0.8 мас. %**Table 5.** Material balance of sulfuric acid catalytic decomposition of *sec*-BB hydroperoxide at a temperature of 50°C, an initial concentration of hydroperoxide of 20 wt %, and a catalyst concentration of 0.8 wt %

Вещество Substance	Молярная масса, г/моль Molar mass, g/mol	Загружено Loaded		Получено Obtained	
		г g	мас. % wt %	г g	мас. % wt %
<i>в</i> -ББ <i>sec</i> -BB	134.2	66.4	79.9	66.4	79.9
ГП <i>в</i> -ББ <i>sec</i> -BB hydroperoxide	166.1	16.6	20.0	0.1	0.1
H ₂ SO ₄	98.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Фенол Phenol	94.1	0.0	0.0	7.0	8.4
МЭК MEK	72.1	0.0	0.0	5.2	6.3
Побочные продукты Byproducts	—	0.0	0.0	1.2	1.4
Потери Losses	—	0.0	0.0	3.1	3.8
Всего Total	—	83.1	100.0	83.1	100.0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны научные и прикладные основы химии и технологии гидропероксидного способа получения МЭК и фенола. Изучено влияние некоторых параметров на процесс протекания основных стадий разрабатываемого метода. По реакции алкилирования бензола бутанолом-1 при мольном соотношении бензол : бутанол-1 : $\text{H}_2\text{SO}_4 = 3 : 1 : 3$, температуре 70°C и продолжительности реакции 4 ч синтезирован *o*-ББ с выходом около 82% при конверсии исходного углеводорода около 30%.

Исследовано влияние таких параметров, как температура, продолжительность реакции и концентрация катализатора на процесс жидкофазного окисления *o*-ББ до его третичного ГП. Установлено, что проведение аэробного окисления *o*-ББ в присутствии *N*-ГФИ позволяет получать ГП *o*-ББ с селективностью около 95% при конверсии *o*-ББ 35–40%.

Апробировано извлечение ГП *o*-ББ из продуктов окисления *o*-ББ методом экстракции 75%-ным раствором этанола. Получен сконцентрированный до 95% ГП, который в дальнейшем может быть использован в процессах полимеризации или инициированного окисления алкилароматических углеводородов.

Сернокислотным каталитическим разложением ГП *o*-ББ с содержанием основного вещества 20 мас. % при 50°C и концентрации катализатора 0.8 мас. % получены МЭК и фенол с выходами 72 и 74% соответственно.

Результаты проведенных исследований подтверждают технологическую эффективность данного способа по сравнению с отдельными производствами МЭК и фенола и могут являться альтернативой уже существующим технологиям получения данных соединений. Предлагаемый гидропероксидный метод синтеза МЭК и фенола позволяет адаптировать кумольную технологию под получение широкого спектра алкилфенолов и кетонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Егизарян А.М., Головачев В.А., Клейменов А.В., Мирошкина В.Д., Носков А.С., Пирютко Л.В., Русских А.В., Чернявский В.С., Харитонов А.С. *Способ получения метилэтилкетона*: пат. РФ 2623435. Заявка № 2016130246; заявл. 22.07.2016; опубл. 26.06.2017.
- Матвеев К.И., Жижина Е.Г., Одяков В.Ф. Катализатор и способ получения метилэтилкетона: пат. РФ 2230612. Заявка № 2003109070/04; заявл. 31.03.2003; опубл. 20.06.2004.
- Матвеев К.И., Жижина Е.Г., Одяков В.Ф., Пармон В.Н. Гомогенные катализаторы окислительно-восстановительных процессов на основе растворов гетерополиоксидов. I. Результаты пилотных испытаний катализатора и процесса синтеза метилэтилкетона. *Катализ в промышленности*. 2014;3:32–42.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Ярославской области в рамках научного проекта № 4НП/2024.

Acknowledgments

The reported study was funded by the Government of the Yaroslavl oblast according to the research project No. 4NP/2024.

Вклад авторов

В.С. Кабанова — разработка концепции исследования, получение и интерпретация экспериментальных данных, обсуждение результатов, написание текста статьи.

Е.А. Курганова — разработка концепции исследования, разработка эксперимента, обсуждение результатов, написание текста статьи.

А.С. Фролов — обработка результатов, написание текста статьи.

Г.Н. Кошель — разработка концепции исследования, обсуждение результатов, написание текста статьи.

А.А. Смурова — проведение экспериментальных исследований.

Е.И. Баёв — проведение экспериментальных исследований.

Authors' contributions

V.S. Kabanova — research concept, conducting experiments, data processing, analysis of the results, writing the text of the manuscript.

E.A. Kurganova — research concept, design of the experiments, analysis of the results, writing the text of the manuscript.

A.S. Frolov — research concept, data processing, writing the text of the manuscript.

G.N. Koshel — research concept, analysis of the results, writing the text of the manuscript.

A.A. Smurova — conducting the experiments.

E.I. Bayov — conducting the experiments.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interest.

REFERENCES

- Egizaryan A.M., Golovachev V.A., Kleimenov A.V., Miroshkina V.D., Noskov A.S., Piryutko L.V., Russkikh A.V., Chernyavskii V.S., Kharitonov A.S. *Method of Obtaining Methyl Ethyl Ketone*: RF Pat. RU 2623435. Publ. 26.06.2017 (in Russ.).
- Matveev K.I., Zhizhina E.G., Odyakov V.F. *Catalyst and Methyl Ethyl Ketone Production Process*: RF Pat. RU 2230612. Publ. 20.06.2004 (in Russ.).
- Matveev K.I., Zhizhina E.G., Odyakov V.F., et al. Homogeneous redox catalysts based on heteropoly acid solutions: I. Pilot testing of a catalyst and methyl ethyl ketone synthesis. *Cat. Ind.* 2014;6(3):202–211. <https://doi.org/10.1134/S207005041403009X>

4. Жижина Е.Г., Одыков В.Ф., Балашов А.Л., Матвеев К.И. Разработка новой технологии каталитического синтеза метилэтилкетона окислением *n*-бутиленов. *Катализ в промышленности*. 2005;5:28–35.
5. Агагусейнова М.М., Амануллаева Г.И., Байрамова З.Э. Катализаторы окисления бутена-1 в метилэтилкетон. *Известия вузов: Химия и хим. технология*. 2018;61(2): 53–57. <https://doi.org/10.6060/tcct.20186102.5693>
6. Torres-Vinces L., Contreras-Zarazua G., Huerta-Rosas B., Sanchez-Ramirez E., Segovia-Hernandez J.G. Methyl Ethyl Ketone Production through an Intensified Process. *Chem. Eng. Technol.* 2020;43(7):1433–1441. <https://doi.org/10.1002/ceat.201900664>
7. Азизов М.А., Каримов Р.Х. Превращение спиртов в карбонильные соединения на катализаторе Д-53. *Химическая промышленность*. 1982;10:7–12.
8. Zak T.S. *Preparation of Methyl Ethyl Ketone*: USA Pat. 4075128. Publ. 21.02.1978.
9. Halawy S.A., Osman A.I., Abdelkader A., Yang H. Boosting NiO Catalytic Activity by x wt % F-ions and K₂O for the Production of Methyl Ethyl Ketone (MEK) via Catalytic Dehydrogenation of 2-Butanol. *ChemCatChem*. 2021;13(9):2200–2214. <https://doi.org/10.1002/cctc.202001954>
10. Галанов С.И., Головачев В.А., Дубков К.А., Зубер В.И., Мирошкина В.Д., Мутас И.Н., Решетников Д.М., Федотов К.В., Харитонов А.С. *Способ получения метилэтилкетона*: пат. РФ 2731903. Заявка № 2020112471; заявл. 27.03.2020; опублик. 09.09.2020.
11. Торлова А.С., Виткалова И.А., Пикалов Е.С. Технологии производства, свойства и области применения композиций на основе фенолформальдегидных смол. *Научное обозрение. Технические науки*. 2017;2:96–114.
12. Харлампович Г.Д., Чуркин Ю.В. *Фенолы*. М.: Химия; 1974. 376 с.
13. Кружалов Б.Д., Голованенко Б.И. *Совместное получение фенола и ацетона*. М.: Госхимиздат; 1963. 200 с.
14. Антоновский В.Л., Бузланова М.М. *Аналитическая химия органических пероксидных соединений*. М.: Химия; 1978. 309 с.
15. Яркина Е.М., Курганова Е.А., Фролов А.С., Кошель Г.Н., Нестерова Т.Н., Шакун В.А., Спиридонов С.А. Синтез пара-трет-бутилкумола. *Тонкие химические технологии*. 2020;16(1):26–35. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2020-16-1-26-35>
16. Sapunov V.N., Kurganova E.A., Koshel G.N. Kinetics and Mechanism of Cumene Oxidation Initiated by *N*-Hydroxyphthalimide. *Int. J. Chem. Kinet.* 2018;50(1):3–14. <https://doi.org/10.1002/kin.21135>
17. Кabanova B.C., Kurganova E.A., Frolov A.C., Koshel G.N., Smurova A.A., Baev E.I., Danilova A.C. Кислотно-каталитическое разложение гидропероксида втор-бутилбензола до фенола и метилэтилкетона. *Химическая промышленность сегодня*. 2024;4:77–84.
18. Миначев Х.М., Кононов Н.Ф., Мортиков Е.С., Лентьев А.С., Папко Т.С., Жомов А.К., Хлопочкин Б.П., Маслобоев-Шведов А.А. *Способ получения втор-бутилбензола*: А.с. СССР 265349. Заявка № 1262711/23-4; заявл. 03.08.1968; опублик. 05.10.1976.
19. Исаков Я.И., Миначев Х.М., Эйдуз Я.Т., Липидус А.Л., Калинин В.П. *Способ совместного получения этилбензола и вторичного бензола*: А.с. СССР 417405. Заявка № 1789169/23-4; заявл. 26.05.1972; опублик. 28.02.1974.
20. Закошанский В.М. *Фенол и ацетон. Анализ технологий, кинетики и механизма основных реакций*. СПб.: Химиздат; 2009. 590 с.
- [Original Russian Text: Matveev K.I., Zhizhina E.G., Odyakov V.F., Parmon V.N. Homogeneous catalysts of redox processes based on solutions of heteropoly acids. I. Results of pilot tests of the catalyst and the synthesis process of methyl ethyl ketone. *Kataliz v promyshlennosti*. 2014;3:32–42 (in Russ.).]
4. Zhizhina E.G., Odyakov V.F., Balashov A.L., Matveev K.I. Development of new technology of catalytic synthesis of methyl ethyl ketone by oxidation of *n*-butylenes. *Kataliz v promyshlennosti*. 2005;5:28–35 (in Russ.).
5. Agaguseynova M.M., Amanullayeva G.I., Bayramova Z.E. Catalysts of oxidation reaction of butene-1 to methyl ethyl ketone. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. = ChemChemTech*. 2018;61(2):53–57 (in Russ.). <https://doi.org/10.6060/tcct.20186102.5693>
6. Torres-Vinces L., Contreras-Zarazua G., Huerta-Rosas B., Sanchez-Ramirez E., Segovia-Hernandez J.G. Methyl Ethyl Ketone Production through an Intensified Process. *Chem. Eng. Technol.* 2020;43(7):1433–1441. <https://doi.org/10.1002/ceat.201900664>
7. Azizov M.A., Karimov R.H. Transformation of alcohols into carbonyl compounds on the D-53 catalyst. *Khimicheskaya promyshlennost' = Chemical Industry*. 1982;10:7–12 (in Russ.).
8. Zak T.S. *Preparation of Methyl Ethyl Ketone*: USA Pat. 4075128. Publ. 21.02.1978.
9. Halawy S.A., Osman A.I., Abdelkader A., Yang H. Boosting NiO Catalytic Activity by x wt % F-ions and K₂O for the Production of Methyl Ethyl Ketone (MEK) via Catalytic Dehydrogenation of 2-Butanol. *ChemCatChem*. 2021;13(9):2200–2214. <https://doi.org/10.1002/cctc.202001954>
10. Galanov S.I., Golovachev V.A., Dubkov K.A., Zuber V.I., Miroshkina V.D., Mutas I.N., Reshetnikov D.M., Fedotov K.V., Kharitonov A.S. *Method of Producing Methyl Ethyl Ketone*: RF Pat. RU 2731903. Publ. 09.09.2020 (in Russ.).
11. Torlova A.S., Vitkalova I.A., Pikalov E.S. Production technology, properties and applications of compositions based on phenol-formaldehyde resins. *Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki = Scientific Review. Technical Sciences*. 2017;2:96–114 (in Russ.).
12. Kharlampovich G.D., Churkin Yu.V. *Fenoly (Phenols)*. Moscow: Khimiya; 1974. 376 p. (in Russ.).
13. Kruzhalov B.D., Golovanenko B.I. *Sovmestnoe poluchenie fenola i atsetona (Joint Production of Phenol and Acetone)*. Moscow: Goskhimizdat; 1963. 200 p. (in Russ.).
14. Antonovskii V.L., Buzlanova M.M. *Analiticheskaya khimiya organicheskikh peroksidnykh soedinenii (Analytical Chemistry of Organic Peroxide Compounds)*. Moscow: Khimiya; 1978. 309 p. (in Russ.).
15. Yarkina E.M., Kurganova E.A., Frolov A.S., Koshel G.N., Nesterova T.N., Shakun V.A., Spiridonov S.A. *Para-tert-butylcumyl synthesis. Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2020;16(1):26–35. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2020-16-1-26-35>
16. Sapunov V.N., Kurganova E.A., Koshel G.N. Kinetics and Mechanism of Cumene Oxidation Initiated by *N*-Hydroxyphthalimide. *Int. J. Chem. Kinet.* 2018;50(1):3–14. <https://doi.org/10.1002/kin.21135>
17. Kabanova V.S., Kurganova E.A., Frolov A.S., Koshel G.N., Smurova A.A., Baev E.I., Danilova A.S. Acid-catalyzed decomposition of *sec*-butylbenzene hydroperoxide to phenol and methyl ethyl ketone. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya = Chemical Industry Developments*. 2024;4:77–84 (in Russ.).
18. Minachev Kh.M., Kononov N.F., Mortikov E.S., Lent'ev A.S., Papko T.S., Zhomov A.K., Khlopochkin B.P., Maslboev-Shvedov A.A. *Method of Obtaining Second-Butylbenzene*: USSR Pat. 265349. Publ. 05.10.1976 (in Russ.).

21. Кошель Г.Н., Смирнова Е.В., Курганова Е.А., Екимова И.Д., Лебедева Н.В., Кошель С.Г., Плахтинский В.В. Интенсификация процесса окисления изопропилбензола. *Катализ в промышленности*. 2010;(3):26–29.
22. Курганова Е.А., Кабанова В.С., Фролов А.С., Кошель Г.Н., Смурова А.А., Баёв Е.И. Гидропероксидный способ синтеза фенола и его алкильных производных совместно с кетонами алифатического и алициклического ряда. *Neftegaz.RU*. 2023;137(5):34–40.
19. Isakov Ya.I., Minachev Kh.M., Eidus Ya.T., Lapidus A.L., Kalinin V.P. *Method of Co-Production of Ethylbenzene and Secondary Benzene*: USSR Pat. 417405. Publ. 28.02.1974 (in Russ.).
20. Zakoshanskii V.M. *Fenol i atseton. Analiz tekhnologii, kinetiki i mekhanizma osnovnykh reaktsii (Phenol and Acetone. Analysis of Technologies, Kinetics and Mechanisms of Main Reactions)*. St. Petersburg: Khimizdat; 2009. 590 p. (in Russ.).
21. Koshel G.N., Smirnova E.V., Kurganova E.A., Ekimova I.D., Lebedeva N.V., Koshel S.G., Plakhtinskii V.V. Intensification of the isopropylbenzene oxidation process. *Kataliz v Promyshlennosti*. 2010;3:26–29 (in Russ.).
22. Kurganova E.A., Kabanova V.S., Frolov A.S., Koshel G.N., Smurova A.A., Baev E.I. Hydroperoxide method of synthesis of phenol and its alkyl derivatives together with ketones of the aliphatic and alicyclic series. *Neftegaz.RU*. 2023;137(5): 34–40 (in Russ.).

Об авторах

Кабанова Виктория Сергеевна, аспирант, кафедра «Общая и физическая химия», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет» (150023, Россия, Ярославль, Московский пр-т, д. 88). E-mail: kabanovavs@ystu.ru. Scopus Author ID 57749250400, SPIN-код РИНЦ 1221-0200, <https://orcid.org/0000-0001-6635-6315>

Курганова Екатерина Анатольевна, д.х.н., доцент, профессор кафедры «Общая и физическая химия», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет» (150023, Россия, Ярославль, Московский пр-т, д. 88). E-mail: kurganovaea@ystu.ru. Scopus Author ID 24338325800, ResearcherID B-4021-2018, SPIN-код РИНЦ 2617-8020, <https://orcid.org/0000-0002-0087-1784>

Фролов Александр Сергеевич, к.х.н., доцент кафедры «Общая и физическая химия», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет» (150023, Россия, Ярославль, Московский пр-т, д. 88). E-mail: frolovas@ystu.ru. Scopus Author ID 56412435400, ResearcherID I-8533-2018, SPIN-код РИНЦ 4081-9087, <https://orcid.org/0000-0002-0491-7452>

Кошель Георгий Николаевич, д.х.н., профессор, профессор кафедры «Общая и физическая химия», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет» (150023, Россия, Ярославль, Московский пр-т, д. 88). E-mail: koshelgn@ystu.ru. Scopus Author ID 6602886373, ResearcherID I-7782-2017, SPIN-код РИНЦ 1119-6642, <https://orcid.org/0000-0002-1020-4643>

Смурова Алина Александровна, аспирант, кафедра «Общая и физическая химия», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет» (150023, Россия, Ярославль, Московский пр-т, д. 88). E-mail: smurovaaa@mail.ru. Scopus Author ID 58870183900, SPIN-код РИНЦ 2706-8704, <https://orcid.org/0000-0002-5280-7573>

Баёв Егор Игоревич, аспирант, кафедра «Общая и физическая химия», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет» (150023, Россия, Ярославль, Московский пр-т, д. 88). E-mail: baevei@mail.ru. ResearcherID JOK-1491-2023, SPIN-код РИНЦ 4586-8520, <https://orcid.org/0009-0009-3997-1641>

About the authors

Viktoriya S. Kabanova, Postgraduate Student, Department of General and Physical Chemistry, Yaroslavl State Technical University (88, Moskovskii pr., Yaroslavl, 150023, Russia). E-mail: kabanovavs@ystu.ru. Scopus Author ID 57749250400, RSCI SPIN-code 1221-0200, <https://orcid.org/0000-0001-6635-6315>

Ekaterina A. Kurganova, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Department of General and Physical Chemistry, Yaroslavl State Technical University (88, Moskovskii pr., Yaroslavl, 150023, Russia). E-mail: kurganovaea@ystu.ru. Scopus Author ID 24338325800, ResearcherID B-4021-2018, RSCI SPIN-code 2617-8020, <https://orcid.org/0000-0002-0087-1784>

Aleksandr S. Frolov, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Department of General and Physical Chemistry, Yaroslavl State Technical University (88, Moskovskii pr., Yaroslavl, 150023, Russia). E-mail: frolovas@ystu.ru. Scopus Author ID 56412435400, ResearcherID I-8533-2018, RSCI SPIN-code 4081-9087, <https://orcid.org/0000-0002-0491-7452>

Georgiy N. Koshel, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Department of General and Physical Chemistry, Yaroslavl State Technical University (88, Moskovskii pr., Yaroslavl, 150023, Russia). E-mail: koshelgn@ystu.ru. Scopus Author ID 6602886373, ResearcherID I-7782-2017, RSCI SPIN-code 1119-6642, <https://orcid.org/0000-0002-1020-4643>

Alina A. Smurova, Postgraduate Student, Department of General and Physical Chemistry, Yaroslavl State Technical University (88, Moskovskii pr., Yaroslavl, 150023, Russia). E-mail: smurovaaa@mail.ru. Scopus Author ID 58870183900, RSCI SPIN-code 2706-8704, <https://orcid.org/0000-0002-5280-7573>

Egor I. Bayov, Postgraduate Student, Department of General and Physical Chemistry, Yaroslavl State Technical University (88, Moskovskii pr., Yaroslavl, 150023, Russia). E-mail: baevei@mail.ru. ResearcherID JOK-1491-2023, RSCI SPIN-code 4586-8520, <https://orcid.org/0009-0009-3997-1641>