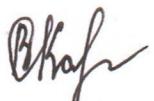


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Российский химико-технологический университет  
имени Д.И. Менделеева»



На правах рукописи

**Кабанова Виктория Сергеевна**

**Совместный синтез метилэтилкетона и фенола  
на основе окислительных превращений *втор*-бутилбензола**

2.6.10. Технология органических веществ

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата химических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре «Общая и физическая химия»  
в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего  
образования «Ярославский государственный технический университет»

Научный руководитель:

Доктор химических наук, доцент  
**Курганова Екатерина Анатольевна,**  
профессор кафедры «Общая и физическая химия»  
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный  
технический университет»

Официальные оппоненты:

Доктор химических наук, профессор  
**Зотов Юрий Львович,**  
профессор кафедры технологии органического и  
нефтехимического синтеза ФГБОУ ВО  
«Волгоградский государственный технический  
университет»

Кандидат химических наук, доцент  
**Степачёва Антонина Анатольевна,**  
доцент кафедры биотехнологии, химии и  
стандартизации ФГБОУ ВО «Тверской  
государственный технический университет»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Казанский национальный исследовательский  
технологический университет»

Защита состоится «15» декабря 2025 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета РХТУ.2.6.01 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (125047 Москва, Миусская пл., д. 9) в аудитории 443 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре и на сайте [https://www.muctr.ru/university/departments/ods/inhouse/inhouse\\_announcements/](https://www.muctr.ru/university/departments/ods/inhouse/inhouse_announcements/) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева».

Автореферат диссертации разослан

«\_\_\_» 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета РХТУ.2.6.01,  
к.х.н.



Воронов М.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Метилэтилкетон (МЭК) является коммерчески важным продуктом основного органического и нефтехимического синтеза. Данное соединение широко используется в качестве экстрагента в процессах депарафинизации смазочного масла и обезжиривателя для металлических поверхностей и электронных устройств. Обладая хорошей растворяющей способностью по отношению ко многим веществам, МЭК применяется при производстве лакокрасочных, полимерных и строительных материалов и покрытий, клеевых составов. В фармацевтической промышленности МЭК совместно со спиртами используется при получении антисептических и некоторых лекарственных средств. В лабораторном химическом анализе известно его применение в контроле качества готовой продукции по показателю «Остаточные органические растворители» методом газовой хроматографии. Также МЭК является промежуточным продуктом в синтезе других органических соединений.

В настоящее время существует два промышленных метода получения МЭК, заключающихся в получении бутанола-2 сернокислотной или прямой гидратацией *n*-бутилена с последующим каталитическим окислением в присутствии серебра на цеолитном носителе или дегидрированием спирта с использованием цинк-медных катализаторов. Основными недостатками данных процессов являются их проведение в жестких условиях (при температуре 480-550 °C), использование дорогостоящих каталитических систем, низкая производительность и высокие энергозатраты. Кроме того, стоит отметить, что технологии по получению МЭК реализованы только в странах Западной Европы, Латинской Америки и Азии. Потребности предприятий РФ практически полностью удовлетворяются зарубежными поставками, в связи с чем МЭК, по данным на 2024 г., входит в Перечень критических комплектующих изделий<sup>1</sup>.

Указанные выше обстоятельства обуславливают актуальность проведения исследований, направленных на разработку альтернативной существующим технологиям получения МЭК на основе доступного нефтехимического сырья, базирующейся на жидкофазном окислении *втор*-бутилбензола (*в*-ББ) до его гидропероксида (ГП), подвергаемого кислотному разложению в целевые продукты.

---

<sup>1</sup> Приложение № 3 к Протоколу заседания Комиссии по вопросам развития производства критических комплектующих от 25 апреля 2024 г. № КП-3.

Разрабатываемый метод позволяет наряду с МЭК получать фенол, широко применяемый в производстве пластмасс и синтетических волокон, пестицидов, различных взрывчатых веществ, красителей и текстиля, а также достаточно часто используемый в производстве лекарственных препаратов.

**Степень разработанности темы.** Предложен гидропероксидный способ получения МЭК, включающий в себя синтез исходного  $\alpha$ -ББ, его аэробное жидкофазное окисление до ГП  $\alpha$ -ББ в присутствии органических *N*-гидроксифталимидных катализаторов и последующее кислотное разложение ГП  $\alpha$ -ББ в целевые продукты.

Аналогом разрабатываемой технологии синтеза МЭК является кумольный процесс совместного получения фенола и ацетона, разработанный в 40-х годах XX века советскими учеными Р.Ю. Удрисом, Б.Д. Кружаловым, П.Г. Сергеевым и Б.И. Голованенко, хорошо отработанный и успешно реализованный во всем мире. Существенным недостатком данного метода является образование избыточного количества ацетона, не находящего эквивалентного фенолу рынка сбыта. В настоящее время в Ярославском государственном техническом университете (ЯГТУ) на кафедре «Общая и физическая химия» ведутся исследования, направленные на усовершенствование кумольной технологии, позволяющей получать фенол и его алкильные производные совместно с кетонами алифатического и алициклического ряда. Замена ГП изопропилбензола (ИПБ) на его ближайший гомолог ГП  $\alpha$ -ББ дает возможность наряду с фенолом получать более ценный продукт – МЭК.

Анализ информации, имеющейся в научно-технической литературе, показывает практически полное отсутствие сведений о закономерностях протекания основных стадий предлагаемой технологии.

**Цель работы** – разработка научных и прикладных основ химии и технологии гидропероксидного способа совместного получения МЭК и фенола на основе доступного нефтехимического сырья.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие **задачи**:

- изучить закономерности процесса синтеза  $\alpha$ -ББ реакцией алкилирования;
- исследовать закономерности протекания процесса аэробного жидкофазного окисления  $\alpha$ -ББ до гидропероксида;
- составить кинетическую модель процесса жидкофазного окисления  $\alpha$ -ББ до ГП в присутствии *N*-гидроксифталимида (*N*-ГФИ);

- определить влияние основных параметров на процесс кислотного разложения ГП  $\alpha$ -ББ до МЭК и фенола;
- составить кинетическую модель кислотного разложения ГП  $\alpha$ -ББ.

**Научная новизна** заключается в том, что предложен и экспериментально обоснован способ получения МЭК совместно с фенолом на основе гидропероксидного окисления  $\alpha$ -ББ в присутствии *N*-ГФИ. Впервые получены закономерности протекания основных стадий разрабатываемого процесса и определены лучшие условия их проведения.

Исследованы закономерности реакции аэробного жидкофазного окисления  $\alpha$ -ББ до его *трем*-ГП. Впервые проведена экспериментальная оценка относительной реакционной способности  $\alpha$ -ББ в реакции жидкофазного окисления путем определения параметра  $(k_2/\sqrt{2k_6})$ . Показано, что  $\alpha$ -ББ обладает меньшей реакционной способностью по сравнению с его ближайшим гомологом ИПБ. Установлено, что использование органических *N*-гидроксифталимидных катализаторов позволяет существенно интенсифицировать изучаемый процесс по сравнению с инициированным окислением  $\alpha$ -ББ. Впервые исследованы кинетические закономерности окисления  $\alpha$ -ББ в присутствии *N*-ГФИ и составлена математическая модель, адекватно описывающая данный процесс. Изучено влияние температуры, концентрации катализатора и начальной концентрации ГП  $\alpha$ -ББ на процесс его кислотного разложения в целевые продукты.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Результаты проведенных исследований подтверждают технологическую эффективность разрабатываемого способа получения МЭК по сравнению с альтернативными методами синтеза данного продукта. Обсужден механизм каталитического окисления  $\alpha$ -ББ до ГП в присутствии *N*-ГФИ. Установлено, что использование данного катализатора в процессе окисления позволяет достичь конверсии  $\alpha$ -ББ 35-40 % при селективности образования ГП  $\alpha$ -ББ выше 95 %. На основе предложенного механизма реакции составлена кинетическая модель, которая может быть использована для создания аппаратурного оформления данного процесса. Найдены условия, позволяющие синтезировать МЭК и фенол высокой степени чистоты с выходами 72 и 74 %, соответственно. Предлагаемый гидропероксидный способ совместного получения этих продуктов позволяет расширить потенциальные возможности данного метода благодаря адаптации

кумольной технологии под получение широкого спектра фенолов и кетонов в зависимости от особенностей рынка химической продукции отдельных регионов РФ.

**Методология и методы исследования.** Методологию исследования составили основные положения о способах синтеза промежуточных и целевых продуктов кумольной технологии получения фенола и ацетона, а также представления о протекании реакции аэробного жидкотвердого окисления алкилароматических углеводородов по радикально-цепному механизму. Идентификация и характеристика синтезированных соединений выполнены с применением физико-химических методов анализа: газожидкостная и высокоэффективная жидкостная хроматография, ИК- и ЯМР  $^1\text{H}$ -спектроскопия, йодометрическое титрование, определение показателя преломления. Оценка каталитической активности  $N$ -гидроксифталимида, используемого в процессе окисления  $\alpha$ -ББ в качестве катализатора, осуществлена с использованием квантово-химического метода Хартри-Фока (PM7).

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Способ совместного получения МЭК и фенола на основе гидропероксидного окисления  $\alpha$ -ББ, включающий синтез  $\alpha$ -ББ, его аэробное жидкотвердое окисление до ГП и кислотное разложение последнего в целевые продукты.
2. Закономерности реакции аэробного жидкотвердого окисления  $\alpha$ -ББ до гидропероксида.
3. Обоснование роли  $N$ -ГФИ и его производных в процессе окисления  $\alpha$ -ББ до гидропероксида.
4. Закономерности кислотного каталитического разложения ГП  $\alpha$ -ББ в МЭК и фенол.

**Личный вклад** состоит в постановке цели и задач исследования, проведении поиска и анализа научно-технической литературы, выполнении экспериментальных исследований, проведении статистической обработки с использованием современных пакетов программ и интерпретации полученных экспериментальных данных, формулировании общих положений, выводов и рекомендаций, а также подготовке публикаций по теме исследований. Все представленные в диссертационной работе результаты получены соискателем лично или при его непосредственном участии.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность представленных результатов обеспечена их воспроизводимостью и согласованностью

с имеющимися литературными данными, а также комплексным использованием надежных физико-химических методов анализа.

Основные положения и результаты работы представлены и обсуждены на: Семьдесят пятой всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием (2022, г. Ярославль); VI, VII Всероссийской молодежной конференции «Проблемы и достижения химии кислород- и азотсодержащих биологически активных соединений» (2022, 2023, г. Уфа); XXIV Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Химия и химическая технология в XXI веке» имени выдающихся химиков Л.П. Кулёва и Н.М. Кижнера, посвященной 85-летию со дня рождения профессора А.В. Кравцова (2023, г. Томск); XXVII, XXVIII Всероссийской конференции молодых ученых-химиков с международным участием (2024, 2025, г. Нижний Новгород); XII International Conference «Mechanisms of Catalytic Reactions» (2024, г. Владимир); XXII Менделеевском съезде по общей и прикладной химии (2024, федеральная территория Сириус) и др.

**Публикации.** Основные положения диссертации получили полное отражение в 6 статьях, 4 из которых опубликованы в ведущих рецензируемых журналах, индексируемых в международных базах данных Scopus, Web of Science, Chemical Abstracts, Springer, 8 тезисах докладов на научных конференциях всероссийского и международного уровней. Получен 1 патент РФ на изобретение.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка используемой литературы, состоящего из 210 наименований. Диссертационная работа изложена на 152 страницах, содержит 59 рисунков и 32 таблицы.

**Финансовая поддержка.** Настоящее исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (договор № 17337ГУ/2022 от 14.04.2022 г.), а также Правительства Ярославской области в рамках научного проекта № 4НП/2024 от 25.12.2024 г.

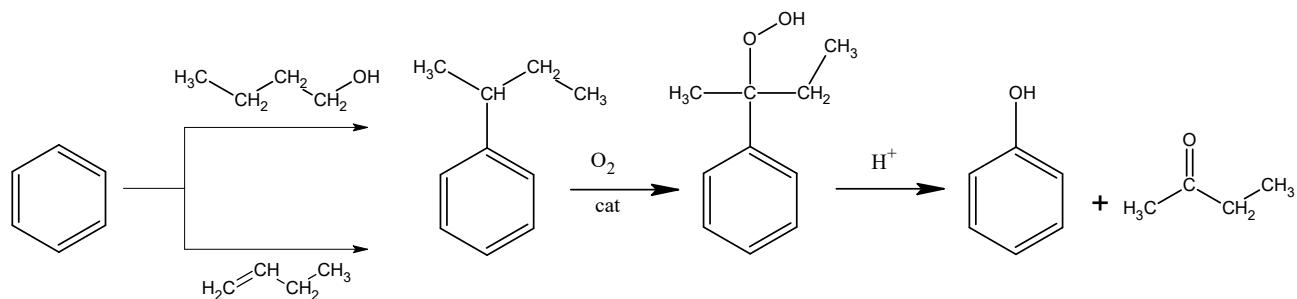
## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, изложена научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе** обобщена информация, представленная в научно-технической литературе, касающейся областей применения и способов получения МЭК и фенола, а также анализ закономерностей протекания реакции аэробного жидкофазного окисления алкилароматических углеводородов в присутствии различных инициирующих/катализитических систем.

**В второй главе** приведены характеристики используемых в диссертационном исследовании веществ, методики выполнения химических экспериментов, а также применяемых методов анализа синтезированных промежуточных и целевых продуктов.

**В третьей главе** представлены результаты и обсуждение проведенных исследований разрабатываемого способа получения МЭК и фенола по схеме:



**Рисунок 1 – Схема разрабатываемой технологии**

### 3.1 Синтез *втор*-бутилбензола

Первой стадией разрабатываемого метода получения МЭК является синтез *в*-ББ. Несмотря на большой массив информации, содержащейся в научно-технической литературе, по вопросам алкилирования ароматических углеводородов различными агентами, данные относительно получения *в*-ББ практически отсутствуют.

В работе исследован метод синтеза *в*-ББ реакцией алкилирования бензола бутанолом-1 в присутствии концентрированной серной кислоты. Изучено влияние соотношения реагентов бензол : бутанол-1 : серная кислота, температуры и времени реакции. Установлено, что наиболее благоприятными условиями, обеспечивающими выход *в*-ББ около 82 % при конверсии бензола 28 %, являются соотношение реагентов бензол : бутанол-1 :  $\text{H}_2\text{SO}_4 = 3 : 1 : 3$ , температура 70 °С и продолжительность процесса 4 ч. Полученный в данных условиях *в*-ББ с чистотой 99,3 %, по данным газожидкостной хроматографии, выделен из реакционной массы методом вакуумной ректификации. Структура соединения подтверждена методами ИК- и ЯМР  $^1\text{H}$ -спектроскопии. Также были исследованы закономерности алкилирования бензола бутанолом-2.

Рассмотрен способ синтеза  $\omega$ -ББ алкилированием бензола бутеном-1 на сульфокатионите А-36 Dry. Установлено, что при соотношении бутен/бензол = 0,4 моль/моль и температуре 110 °C за 2,5 ч удается получить  $\omega$ -ББ при следовых количествах изобутилбензола и полном отсутствии нормальных и третичных структур.

### **3.2 Исследование закономерностей аэробного жидкофазного окисления $\omega$ -бутилбензола до гидропероксида**

Ключевой стадией разрабатываемого метода получения МЭК совместно с фенолом является аэробное жидкофазное окисление  $\omega$ -ББ: именно от протекания данной стадии зависит эффективность всей технологии.

Первоначально проведено исследование окисления  $\omega$ -ББ в отсутствие каких-либо добавок (т.н. процесс «автоокисление») и установлено, что даже в высокотемпературных условиях ( $T = 140$  °C) за 1 ч реакции удается накопить ГП с содержанием не более 2 мас. %. Незначительного повышения скорости окисления и конверсии  $\omega$ -ББ удается добиться за счет использования инициаторов (ГП ИПБ и ГП  $\omega$ -ББ), однако, полученные при этом показатели процесса являются малоэффективными с технологической точки зрения (таблица 1).

**Таблица 1 – Влияние различных факторов на процесс жидкофазного окисления  $\omega$ -ББ**

| Инициатор       | Содержание инициатора | Темпера-тура, °C | Время реакции, мин | Содержание ГП $\omega$ -ББ в продуктах реакции, мас. % | Селективность образования ГП $\omega$ -ББ, % | Конверсия $\omega$ -ББ, % |
|-----------------|-----------------------|------------------|--------------------|--|--|---------------------------|
| —*              | —                     | 140              | 60                 | 2,0  | 88,9   | 2,3                       |
| ГП ИПБ          | 2,0                   | 130              | 30                 | 3,9  | 89,4   | 4,4                       |
| ГП ИПБ          | 2,0                   | 140              | 60                 | 8,6  | 87,4   | 9,8                       |
| ГП $\omega$ -ББ | 2,0                   | 140              | 30                 | 7,4  | 88,2   | 8,4                       |
| ГП $\omega$ -ББ | 2,0                   | 140              | 60                 | 13,5   | 85,7   | 15,8                      |

\* – в отсутствие каких-либо добавок.

Проведена оценка реакционной способности  $\omega$ -ББ в сравнении с его ближайшим гомологом ИПБ: в результате изучения кинетических закономерностей инициированного окисления данных углеводородов в присутствии АИБН определены скорости инициирования ( $W_i$ ) и окисления ( $W_0$ ), а также параметр ( $k_2/\sqrt{2k_6}$ ), представляющий собой отношение констант скоростей продолжения цепи ( $k_2$ ) и

обрыва цепи ( $k_6$ ) и являющийся мерой относительной реакционной способности углеводорода в процессе жидкофазного окисления (таблица 2).

**Таблица 2 – Кинетические параметры инициированного окисления  $\alpha$ -ББ и ИПБ.**

Температура 50 °C

| Окисляемый углеводород | [АИБН], моль/л | $W_i \cdot 10^8$ , моль·л <sup>-1</sup> ·с <sup>-1</sup> | $W_0 \cdot 10^6$ , моль·л <sup>-1</sup> ·с <sup>-1</sup> | $(k_2 / \sqrt{2k_6}) \cdot 10^3$ |
|------------------------|----------------|--|--|----------------------------------|
| ИПБ                    | 0,0091         | 2,0  | 3,142  | 3,108                            |
|                        | 0,0227         | 5,0  | 4,622  | 2,883                            |
|                        | 0,0455         | 10,0   | 6,684  | 2,948                            |
| $\alpha$ -ББ           | 0,0091         | 2,0  | 0,488  | 0,536                            |
|                        | 0,0227         | 5,0  | 0,832  | 0,557                            |
|                        | 0,0455         | 10,0   | 1,065  | 0,523                            |

Установлено, что  $\alpha$ -ББ обладает более низкой относительной реакционной способностью по сравнению с ИПБ примерно в 5-6 раз, что согласуется с полученными ранее экспериментальными данными.

Интенсифицировать процесс окисления  $\alpha$ -ББ становится возможным благодаря использованию органического катализатора *N*-ГФИ: его применение позволяет существенно повысить конверсию подвергаемого окислению углеводорода, а также достичь высокой селективности образования соответствующего гидропероксида. Установлено, что за 40 мин реакции при температуре 140 °C и концентрации катализатора 2,0 мас. % от загрузки углеводорода содержание ГП  $\alpha$ -ББ в оксидате составляет около 32 мас. % при конверсии  $\alpha$ -ББ 33,9 % и селективности образования ГП 95,5 %. (таблица 3).

**Таблица 3 – Влияние температуры и содержания *N*-ГФИ на процесс образования ГП  $\alpha$ -ББ**

| Время реакции, мин | Содержание <i>N</i> -ГФИ, мас. % | Темпера-тура, °C | Содержание ГП $\alpha$ -ББ в продуктах реакции, мас. % | Селективность образования ГП $\alpha$ -ББ, % | Конверсия $\alpha$ -ББ, % |
|--------------------|----------------------------------|------------------|--|--|---------------------------|
| 40                 | 2,0                              | 120              | 9,3  | 97,5   | 9,5                       |
|                    |                                  | 130              | 17,2   | 97,2   | 17,7                      |
|                    |                                  | 140              | 32,4   | 95,5   | 33,9                      |
|                    |                                  | 150              | 40,3   | 93,8   | 42,9                      |
|                    |                                  | 160              | 49,3   | 91,7   | 53,8                      |
| 40*                | 2,0                              | 140              | 32,3   | 95,3   | 33,9                      |
| 20                 | 1,0                              | 130              | 7,4  | 98,0   | 7,6                       |
|                    | 2,0                              |                  | 10,3   | 97,7   | 10,5                      |
|                    | 3,0                              |                  | 12,3   | 97,0   | 12,7                      |
|                    | 4,0                              |                  | 14,3   | 96,2   | 14,9                      |

\* – пятый цикл использования катализатора.

*N*-ГФИ, выпадающий в осадок при охлаждении оксида до комнатной температуры, может быть выделен из реакционной массы вакуумным фильтрованием и вновь использован в процессе окисления  $\alpha$ -ББ. Потери катализатора при выделении составляют не более 5 %, а каталитическая активность данного соединения сохраняется на протяжении, как минимум, 5 циклов работы.

**Оценка каталитической активности *N*-ГФИ и его производных** была осуществлена посредством расчета  $\Delta E_{\text{озмо}}$  – разности энергий однократно занятой молекулярной орбитали радикалов углеводорода и катализатора – с использованием программного комплекса MOPAC 2016 (таблица 4).

**Таблица 4** – Содержание гидропероксида в продуктах реакции окисления *втор*-бутилбезола и значение  $\Delta E_{\text{озмо}}$  в зависимости от структуры *N*-гидроксифталimidного катализатора\*

| Катализатор                          | Структура катализатора | $\Delta E_{\text{озмо}}$ , эВ | Содержание ГП $\alpha$ -ББ в продуктах реакции, мас. % | Селективность образования ГП $\alpha$ -ББ, % | Конверсия $\alpha$ -ББ, % |
|--------------------------------------|------------------------|-------------------------------|--|--|---------------------------|
| <i>N</i> -ГФИ                        |                        | 1,68                          | 32,4   | 95,5   | 33,9                      |
| 4-фенил- <i>N</i> -ГФИ               |                        | 1,63                          | 35,9   | 94,8   | 37,9                      |
| 4-метил- <i>N</i> -ГФИ               |                        | 1,61                          | 39,4   | 93,2   | 42,3                      |
| 4- <i>трет</i> -бутил- <i>N</i> -ГФИ |                        | 1,56                          | 40,1   | 92,9   | 43,2                      |
| 4-Br- <i>N</i> -ГФИ                  |                        | 1,84                          | 23,9   | 93,7   | 25,5                      |

|                                   |  |      |      |      |      |
|-----------------------------------|--|------|------|------|------|
| 4-Cl- <i>N</i> -ГФИ               |  | 1,86 | 20,8 | 94,3 | 22,1 |
| 4-NO <sub>2</sub> - <i>N</i> -ГФИ |  | 2,0  | 14,0 | 97,7 | 14,3 |

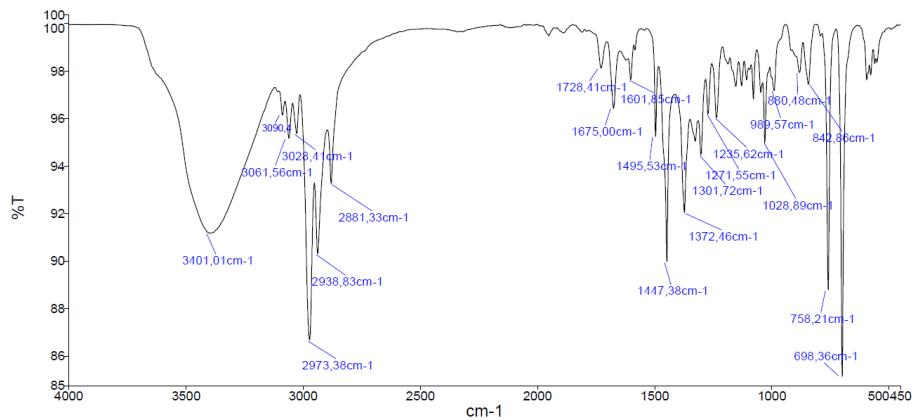
\* – окисление  $\alpha$ -ББ проведено при температуре 140 °С и времени реакции 40 мин. Содержание катализатора составляет 2,0 мас. % от загрузки  $\alpha$ -ББ.

Установлено, что фталимидные соединения, характеризующиеся низкими значениями  $\Delta E_{\text{озмо}}$ , обладают высокой катализитической активностью, что хорошо согласуется с полученными экспериментальными данными. Наиболее высокой эффективностью в процессе окисления  $\alpha$ -ББ обладают производные *N*-ГФИ, содержащие в ароматическом кольце электронодонорные заместители.

В работе предложен **способ выделения третичного ГП  $\alpha$ -ББ из продуктов аэробного жидкофазного окисления  $\alpha$ -ББ** методом экстракции водными растворами метанола, этанола, изопропанола, ДМФА, ацетона и ацетонитрила различных концентраций. Об эффективности процесса экстракции судили по численным значениям коэффициентов распределения гидропероксида в углеводородном и спиртовом слоях. На основании полученных экспериментальных данных установлено, что наиболее эффективными в процессе экстракции оказались 75 %-ные растворы метанола и этанола, для которых коэффициенты распределения являются достаточно высокими и составляют 1,24 и 1,17, соответственно.

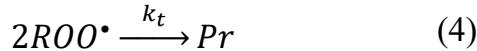
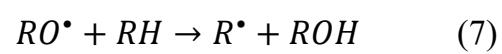
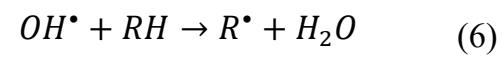
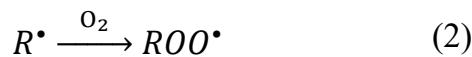
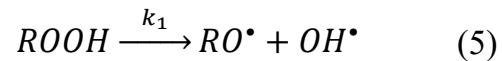
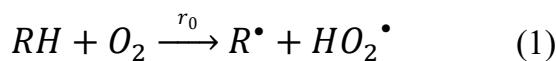
Установлено, что путем однократной экстракции удается извлечь до 60 % гидропероксида. Проведение пятиступенчатой экстракции продуктов жидкофазного окисления  $\alpha$ -ББ 75 %-ным раствором этанола позволило выделить ГП  $\alpha$ -ББ с содержанием основного вещества около 95 %. ИК-спектр,  $\text{см}^{-1}$ : 3401 ( $\nu$  O–OH); 2973 ( $\nu$  CH<sub>3</sub>); 2939 ( $\nu$  CH<sub>2</sub>); 1601, 1496 (ароматическое кольцо); 1447 ( $\delta$  CH<sub>2</sub>); 1372 ( $\delta$  CH<sub>3</sub>); 758 и 698 (монозамещение в бензольном кольце) (рисунок 2).

Выделенный в ходе экстракции непрореагировавший углеводород, чистотой не менее 98 %, по данным газожидкостной хроматографии, был подвергнут повторному окислению с сохранением высокой скорости, конверсии сырья и селективности образования гидропероксида.



**Рисунок 2 – ИК спектр гидропероксида *втор*-бутилбензола**

Полученные кинетические закономерности аэробного жидкофазного окисления *в*-ББ до его ГП позволили провести **математическое моделирование изучаемого процесса**. Как известно, схему окислительных превращений углеводородов (RH) можно представить в следующем виде:



Проведение окисления *в*-ББ в присутствии *N*-ГФИ (NHPI) в качестве катализатора не изменяет общей схемы цепного процесса. Однако, *N*-ГФИ, участвуя в реакции, перехватывает гидропероксидные радикалы ROO<sup>•</sup> с образованием *N*-оксифталимидного радикала (PINO<sup>•</sup>), продолжая тем самым развитие цепи:



В результате уменьшения концентрации гидропероксидных радикалов [ROO<sup>•</sup>] снижается скорость квадратичного обрыва цепи (4), за счет чего повышается селективность образования гидропероксида.

За основу математического моделирования изучаемого процесса была взята известная модель окисления кумола, включающая в себя уравнения скоростей расходования углеводорода RH (10), образования гидропероксида ROOH (11) и побочных продуктов реакции Pr (13). Приведенные ниже дифференциальные

уравнения были дополнены составляющими, отражающими новые маршруты реакции, ввиду проведения процесса в присутствии участвующего в развитии цепи *N*-ГФИ:

$$-d[RH]/dt = (k_0[ROO^\bullet] + k_{01}[PINO^\bullet]) \cdot [RH] + f \cdot k_1[ROOH] + r_0 \quad (10)$$

$$d[ROOH]/dt = (k_0[RH] + k_{02}[NHPI]) \cdot [ROO^\bullet] - k_1[ROOH] \quad (11)$$

$$[ROO^\bullet] = \sqrt{r_0 + f \cdot k_1[ROOH]} / \sqrt{2k_t} \quad (12)$$

$$d[Pr]/dt = r_0 + (f + 1) \cdot k_1[ROOH] \quad (13)$$

где  $ROO^\bullet$  – гидропероксидный радикал;  $r_0$  – скорость окисления углеводорода кислородом;  $k_0$  – константа скорости взаимодействия гидропероксидного радикала  $ROO^\bullet$  с молекулой углеводорода;  $k_{01}$  – константа скорости взаимодействия *N*-оксифталимидного радикала  $PINO^\bullet$  с молекулой углеводорода;  $k_{02}$  – константа скорости взаимодействия гидропероксидного радикала  $ROO^\bullet$  с молекулой *N*-гидроксифтамида;  $k_1$  – константа скорости гомолитического разложения гидропероксида;  $k_t$  – константа скорости квадратичного обрыва цепи;  $f$  – доля радикалов, образующихся из гидропероксида, которые ведут цепной процесс.

Принимая во внимание то, что концентрацию *N*-оксифталимидных радикалов  $[PINO^\bullet]$  можно выразить через концентрацию гидропероксидных  $[ROO^\bullet]$  ввиду быстро достигаемого равновесия в системе, а скорость инициирования  $r_0$  в уравнении (12) значительно меньше значения выражения  $(f \cdot k_1[ROOH])$ , это позволяет аппроксимировать концентрацию гидропероксидного радикала как  $[ROO^\bullet] \approx \sqrt{[ROOH]}$ , выражения (10) и (11) принимают следующий вид:

$$-d[RH]/dt = K[RH] \cdot \sqrt{[ROOH]} + f \cdot k_1[ROOH] + r_0 \quad (14)$$

$$d[ROOH]/dt = K[RH] \cdot \sqrt{[ROOH]} - k_1[ROOH] \quad (15)$$

где  $K$  включает в себя соотношение начальных концентраций катализатора и углеводорода  $[NHPI]/[RH]$ , величину  $(f \cdot k_1)$  и константу скорости квадратичного обрыва цепи  $k_t$ .

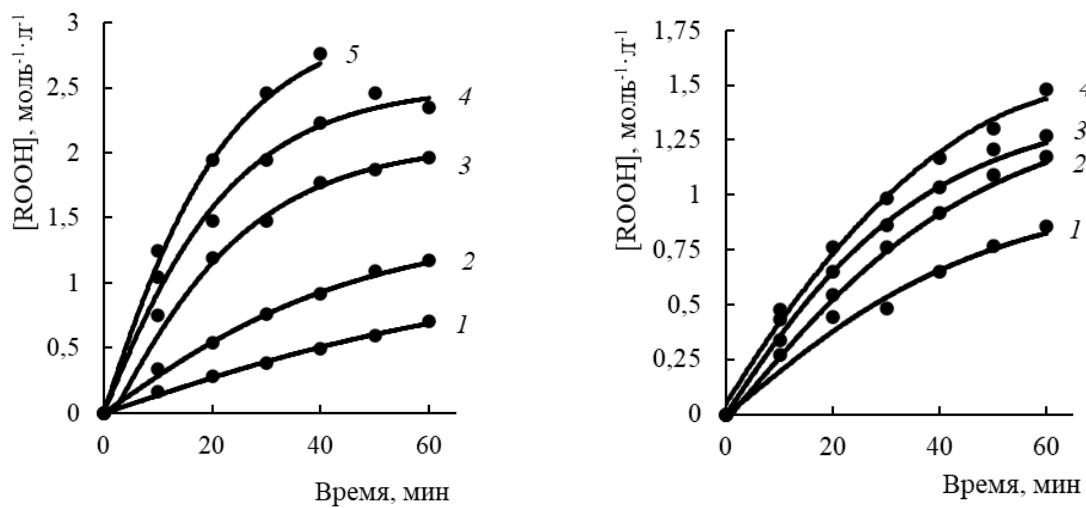
В соответствии с этим, путем минимизации разности экспериментальных и расчетных значений концентраций гидропероксида и побочных продуктов численные значения  $((f + 1) \cdot k_1)$  были определены как тангенс угла наклона прямых  $d[Pr]/dt$  от  $[ROOH]$ , а  $r_0$  – как отрезок, отсекаемый на оси ординат этих зависимостей. Значения констант  $k_1$ ,  $K$  и  $(f \cdot k_1)$ , а также  $r_0$  и  $((f + 1) \cdot k_1)$  представлены в таблице 5.

**Таблица 5** – Значения параметров  $r_0$ ,  $((f + 1) \cdot k_1)$ ,  $k_1$ ,  $K$  и  $(f \cdot k_1)$  в системе уравнений (10)-(15) при разных температурах и концентрациях катализатора

| Температура, К  | 393   | 403                     |      |      |      | 413   | 423  | 433  |
|---|-------|-------------------------|------|------|------|-------|------|------|
| Содержание <i>N</i> -ГФИ, моль·л <sup>-1</sup>                                | 0,102 | 0,051 0,102 0,153 0,205 |      |      |      | 0,102 |      |      |
| $r_0 \cdot 10^5$ , ( $\pm 5\%$ ), моль·л <sup>-1</sup> ·с <sup>-1</sup>       | 0,48  | 0,56                    | 1,01 | 1,48 | 2,00 | 2,98  | 4,00 | 5,19 |
| $((f + 1) \cdot k_1) \cdot 10^5$ , ( $\pm 5\%$ ), с <sup>-1</sup>             | 0,22  | 0,27                    | 0,34 | 0,33 | 0,35 | 0,67  | 1,70 | 2,70 |
| $k_1 \cdot 10^3$ , ( $\pm 10\%$ ), с <sup>-1</sup>                            | 0,57  | 0,95                    | 0,94 | 1,10 | 1,21 | 1,55  | 1,68 | 1,78 |
| $K$ , ( $\pm 10\%$ ), моль <sup>1/2</sup> ·л <sup>-1/2</sup> ·с <sup>-1</sup> | 0,10  | 0,13                    | 0,15 | 0,16 | 0,17 | 0,23  | 0,26 | 0,29 |
| $(f \cdot k_1) \cdot 10^5$ , ( $\pm 10\%$ ), с <sup>-1</sup>                  | 3,21  | 5,09                    | 5,18 | 5,85 | 6,49 | 7,99  | 8,74 | 9,78 |

Расчеты показали, что скорость инициирования  $r_0$  увеличивается при увеличении и температуры, и концентрации *N*-ГФИ, что согласуется с ранее установленным выводом об ускоряющем влиянии катализатора на скорость инициирования.

Представленные данные отражают зависимость образования ГП *в*-ББ при окислении *в*-ББ в присутствии *N*-ГФИ от температуры и концентрации катализатора, хорошо описываются выведенными дифференциальными уравнениями (14)-(15) и подтверждаются высокой степенью достоверности корреляции ( $R^2 \approx 0,99$ ) экспериментальных и расчетных значений концентрации гидропероксида (рисунок 3).



**Рисунок 3** – Корреляционная зависимость экспериментальных (точки) и расчетных (линии) значений концентрации ГП *в*-ББ: а – при различных температурах, К: 1 – 393, 2 – 403, 3 – 413, 4 – 423, 5 – 433 и содержании катализатора 0,102 моль·л<sup>-1</sup>; б – при различном содержании катализатора, моль·л<sup>-1</sup>: 1 – 0,051, 2 – 0,102, 3 – 0,153, 4 – 0,205 и температуре 403 К

Таким образом, полученная кинетическая модель процесса жидкофазного окисления  $\alpha$ -ББ в присутствии  $N$ -ГФИ адекватно описывает изменение концентрации основных компонентов в ходе реакции и может быть использована для расчета реакционного узла.

### 3.3 Кислотно-катализитическое разложение гидропероксида $\alpha$ -торбутилбензола

Заключительной стадией предлагаемого метода получения МЭК является кислотное разложение гидропероксида  $\alpha$ -ББ. В работе изучено влияние температуры, начальной концентрации гидропероксида и концентрации катализатора (конц.  $H_2SO_4$ ) на данный процесс. Кислотное разложение ГП  $\alpha$ -ББ проводили в интервале температур 40-70 °С, начальная концентрация ГП варьировалась от 0,54 до 1,14 моль/л, а концентрация катализатора – от 0,8 до 1,4 мас. % от загрузки ГП.

За ходом реакции следили по расходу ГП методом йодометрического титрования. Содержание целевых продуктов определяли с помощью газожидкостной хроматографии. Начальные скорости  $W_0$  определяли по тангенсу угла наклона касательной к кинетической кривой в начальный момент времени. Результаты исследования влияния технологических параметров на изучаемый процесс представлены в таблице 6.

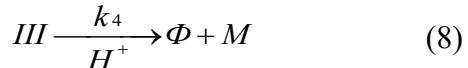
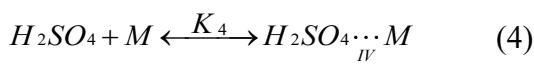
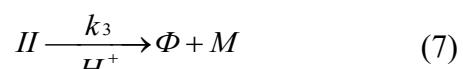
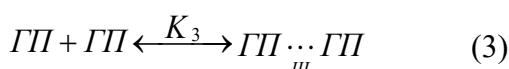
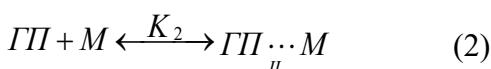
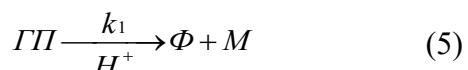
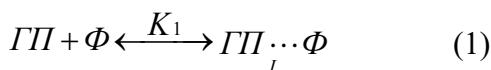
**Таблица 6** – Влияние основных технологических параметров на процесс кислотного разложения ГП  $\alpha$ -ББ

| Начальная концентрация ГП $\alpha$ -ББ, моль/л | Концентрация катализатора $H_2SO_4$ , мас. % | Температура, °С | Начальная скорость реакции $W_0$ , моль/л·мин | Конверсия гидропероксида, % | Выход на прореагировавший гидропероксид, мас. % |     |
|--|--|-----------------|---|-----------------------------|---|-----|
|  |  |                 |   |                             | фенол   | МЭК |
| 1,14   | 0,8  | 40              | 0,024   | 98,0                        | 73  | 71  |
|  |  | 50              | 0,054   | 98,5                        | 74  | 72  |
|  |  | 60              | 0,133   | 98,25                       | 75  | 68  |
|  |  | 70              | 0,239   | 99,5                        | 73  | 66  |
| 0,54   | 0,8  | 50              | 0,034   | 99,0                        | 36  | 29  |
| 0,78   |  |                 | 0,038   | 98,7                        | 70  | 69  |
| 1,14   | 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  |

Установлено, что повышение температуры, как и увеличение начальной концентрации ГП, способствует повышению скорости процесса кислотного разложения. При этом проведение процесса при повышенных температурах, как и при больших концентрациях подвергаемого разложению ГП, является небезопасным ввиду высокой экзотермичности реакции. Увеличение концентрации катализатора выше 1 мас. % также нежелательно по причине образования побочных продуктов разложения, затрудняющих в дальнейшем выделение целевых соединений.

В условиях, обеспечивающих максимально возможный выход целевых продуктов (температура 50 °С, начальная концентрация ГП *в*-ББ 1,14 моль/л или 20 мас. %, концентрация H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,8 мас. % от загрузки ГП) синтезированы МЭК и фенол с выходами 72 и 74 %, соответственно. МЭК выделен из реакционной массы методом вакуумной ректификации, а фенол – экстракцией 10 %-ным водным раствором этанола с последующим выпариванием спирта и воды. Структуры синтезированных соединений подтверждены методами ИК- и ЯМР <sup>1</sup>H-спектроскопии.

Для обоснования механизма процесса кислотного разложения ГП *в*-ББ в МЭК и фенол построена кинетическая модель, включающая в себя стадии образования комплексов ГП с продуктами реакции, а также его димера, вероятность образования которых доказана в большом количестве работ. В ходе реакции кислотного разложения параллельно с разложением индивидуального гидропероксида, протекает и разложение комплексов ГП и димера. В общем виде описываемые превращения можно представить следующим образом:



где K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub>, K<sub>4</sub> – константы равновесия образования комплексов I, II, III, IV; k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>, k<sub>3</sub>, k<sub>4</sub> – константы скорости распада ГП и комплексов I, II, III; ГП – гидропероксид *втор*-бутилбензола; Φ – фенол; М – метилэтилкетон.

Поскольку величины K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub>, K<sub>4</sub> принимают малые численные значения, можно допустить, что их концентрации значительно меньше начальной концентрации ГП, тогда уравнение материального баланса принимает вид:

$$\begin{aligned} C_{0\text{ГП}} &= C_{\text{ГП}} + (C_{\Phi} + C_M) / 2 \\ C_{\Phi} &= C_M \end{aligned} \quad (9)$$

$$C_{0\kappa} = C_{\kappa} + C_{\text{IV}} \quad (10)$$

$$C_I = K_1 \cdot C_{\text{ГП}} \cdot C_{\Phi} \quad (11)$$

$$C_{\text{II}} = K_2 \cdot C_{\text{ГП}} \cdot C_M \quad (12)$$

$$C_{\text{III}} = K_3 \cdot C_{\text{ГП}}^2 \quad (13)$$

$$C_{\text{IV}} = K_4 \cdot C_K \cdot C_M \quad (14)$$

где  $C_K$  – текущая концентрация катализатора;  $C_{0K}$  – начальная концентрация катализатора;  $C_I$ ,  $C_{\text{II}}$ ,  $C_{\text{III}}$ ,  $C_{\text{IV}}$  – текущие концентрации комплексов I, II, III, IV;  $C_{0\text{ГП}}$  – начальная концентрация гидропероксида;  $C_{\text{ГП}}$ ,  $C_{\Phi}$ ,  $C_{M\text{ЭК}}$  – текущие концентрации гидропероксида, фенола и метилэтилкетона, соответственно.

Общая скорость процесса представляет собой сумму скоростей разложения индивидуального ГП, а также его димера и комплексов с продуктами реакции, которые пропорциональны концентрации кислоты в степени  $n$ , и соответственно концентрации ГП и указанных комплексов:

$$-\frac{dC_{\text{ГП}}}{dt} = C_K^n (k_1 C_{\text{ГП}} + k_2 C_I + k_3 C_{\text{II}} + k_4 C_{\text{III}}), \text{ где } n \text{ – порядок реакции по катализатору.}$$

С учетом уравнений материального баланса (9)-(14), данное уравнение приобретает следующий вид:

$$-\frac{dC_{\text{ГП}}}{dt} = k_1 \left( \frac{C_{0\kappa}}{K_4(C_{0\text{ГП}} - C_{\text{ГП}}) + 1} \right)^n \cdot C_{\text{ГП}} [1 + a(C_{0\text{ГП}} - C_{\text{ГП}}) + bC_{\text{ГП}}],$$

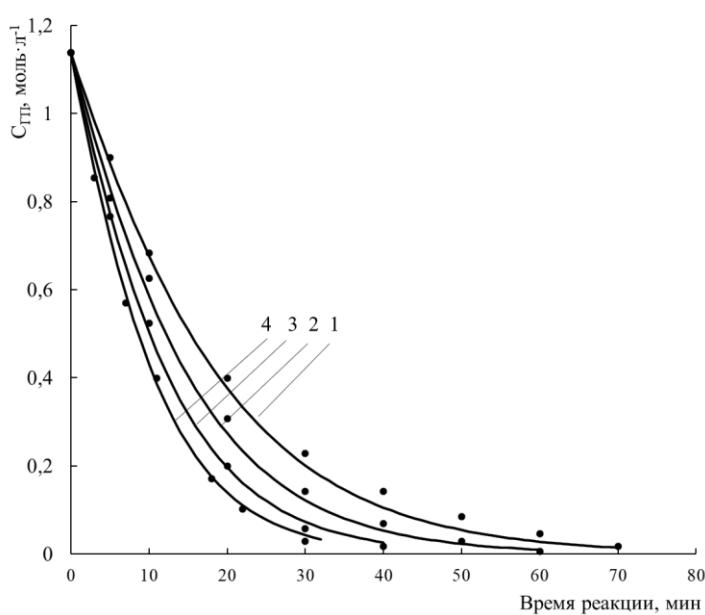
где  $a = \frac{K_1 k_2 + K_2 k_3}{k_1}$ ;  $b = \frac{K_3 k_4}{k_1}$

Применение численных методов для решения данного дифференциального уравнения позволило получить набор констант скоростей отдельных стадий процесса (таблица 7), а также графическую зависимость концентрации ГП  $\omega$ -ББ от времени (рисунок 4).

**Таблица 7** – Значения констант скоростей отдельных стадий процесса кислотного разложения ГП  $\omega$ -ББ

| $k_1$   | $k_2$ | $k_3$ | $k_4$ | $K_4$                           | $a$ | $b$ | $n$ |
|---|-------|-------|-------|---------------------------------|-----|-----|-----|
| $\text{Л}\cdot\text{МОЛЬ}^{-1}\cdot\text{МИН}^{-1}$ |       |       |       | $\text{Л}\cdot\text{МОЛЬ}^{-1}$ |     |     |     |
| 0,9   | 3,3   | 215,8 | 56,5  | 0,1                             | 3,5 | 2,0 | 1   |

Погрешность определения констант не превышала  $\pm 4\%$ .



**Рисунок 4 – Кинетические кривые реакции кислотного разложения ГП  $\alpha$ -ББ при различной концентрации катализатора. Линия – расчетная зависимость, точки – экспериментальные данные. Концентрация катализатора ( $H_2SO_4$ ) от загрузки гидропероксида, мас. %: 1 – 0,8; 2 – 1,0; 3 – 1,2; 4 – 1,4**

Порядок реакции  $n$  был определен графическим методом по тангенсу угла наклона касательной к логарифмической зависимости начальной скорости реакции от концентрации катализатора. Согласно полученным результатам математического моделирования, наибольший вклад в образование целевых продуктов кислотного разложения ГП  $\alpha$ -ББ вносит распад комплекса ГП с МЭК, о чем свидетельствует высокое численное значение константы скорости  $k_3$ .

Составленная на основе предложенного механизма реакции и полученных экспериментальных данных математическая модель кислотного разложения ГП  $\alpha$ -ББ адекватно описывает изучаемый процесс.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований сформулированы следующие выводы:

1. Разработаны научные и прикладные основы химии и технологии гидропероксидного способа совместного получения МЭК и фенола на основе доступного нефтехимического сырья.

2. Изучены закономерности процесса синтеза  $\alpha$ -ББ реакцией алкилирования. Установлено, что алкилированием бензола бутеном-1 с использованием катализатора Amberlist-36 Dry при соотношении реагентов бутен/бензол = 0,4 моль/моль, температуре 110 °C и времени контакта 150 мин удается получить  $\alpha$ -ББ при следовых количествах ИББ и полном отсутствии нормальных и третичных структур. В лабораторных условиях  $\alpha$ -ББ синтезирован реакцией алкилирования бензола

бутанолом-1 в присутствии концентрированной серной кислоты с выходом 82 % при конверсии бензола около 30 %.

**3.** Экспериментально определена относительная реакционная способность *в*-ББ в реакции жидкофазного окисления путем расчета параметра ( $k_2/\sqrt{2k_6}$ ). Показано, что скорость окисления *в*-ББ примерно в 6 раз ниже по сравнению с его ближайшим гомологом ИПБ. Изучено влияние температуры, продолжительности реакции, содержания и структуры катализатора на процесс жидкофазного окисления *в*-ББ. Установлено, что использование *N*-ГФИ позволяет окислить *в*-ББ до конверсии 35-40 % при селективности образования ГП *в*-ББ выше 95 %, что в значительной степени превышает показатели инициированного окисления данного углеводорода. Проведенные квантово-химические расчеты показали, что наибольшей эффективностью в процессе окисления *в*-ББ обладают производные *N*-ГФИ, содержащие в своей структуре электронодонорные заместители.

**4.** Методом пятиступенчатой экстракции 75 %-ным раствором этанола извлечен *трет*-ГП *в*-ББ из продуктов аэробного жидкофазного окисления *в*-ББ с содержанием основного вещества около 95 %.

**5.** Исследованы кинетические закономерности аэробного жидкофазного окисления *в*-ББ до ГП в присутствии *N*-ГФИ в качестве катализатора. На основе полученных экспериментальных данных составлена кинетическая модель изучаемого процесса, адекватно описывающая изменение концентрации основных компонентов в ходе реакции. Рассчитаны значения констант скоростей основных стадий процесса.

**6.** Изучено влияние технологических параметров (начальная концентрация ГП, температура, концентрация катализатора) на процесс кислотного разложения ГП *в*-ББ. Определены условия, обеспечивающие максимальный выход МЭК и фенола. В выбранных условиях проведен укрупненный синтез и выделение целевых продуктов, структуры которых подтверждены современными физико-химическими методами анализа.

**7.** Составлена кинетическая модель реакции кислотного разложения ГП *в*-ББ в присутствии концентрированной серной кислоты, которая адекватно описывает изучаемый процесс.

Дальнейшие исследования будут направлены на идентификацию побочных продуктов, образующихся на стадиях окисления и кислотного разложения. На

основании полученных экспериментальных данных и построенных на их основе математических моделей указанных выше процессов будет предложено аппаратурное оформление и составлена принципиальная технологическая схема разрабатываемого способа совместного получения МЭК и фенола.

### **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ**

1. **Kabanova V.S.** Studying the Kinetic Laws of the Liquid-Phase Oxidation of *sec*-Butylbenzene in the Presence of *N*-Hydroxyphthalimide / V.S. Kabanova, A.S. Frolov, E.A. Kurganova, V.N. Sapunov, G.N. Koshel, E.I. Bayov // Catalysis in Industry. – 2024. – Vol. 16, No. 4. – P.433-442. DOI:10.1134/S2070050424700272. (*Scopus, Web of Science*)
2. **Кабанова В.С.** Гидропероксидный способ совместного получения метилэтилкетона и фенола / В.С. Кабанова, Е.А. Курганова, А.С. Фролов, Г.Н. Кошель, А.А. Смуррова, Е.И. Баёв // Тонкие химические технологии. – 2025. – Т. 20, № 1. – С. 7-17. DOI:10.32362/2410-6593-2025-20-1-7-17. (*Scopus, Chemical Abstracts*)
3. Kurganova E.A. Aerobic liquid-phase oxidation of *sec*-butylbenzene to the hydroperoxide / E.A. Kurganova, **V.S. Kabanova**, G.N. Koshel, A.S. Frolov // Russ Chem Bull. – 2025. – Vol. 74. – P. 1001-1006. DOI:10.1007/s11172-025-4594-6(*Scopus, Web of Science, Springer*)
4. **Кабанова В.С.** Кислотно-кatalитическое разложение гидропероксида *втор*-бутилбензола до фенола и метилэтилкетона / В.С. Кабанова, Е.А. Курганова, А.С. Фролов, Г.Н. Кошель, А.А. Смуррова, Е.И. Баёв, А.С. Данилова // Химическая промышленность сегодня. – 2024. – № 4. – С. 77-84. (*Chemical Abstracts*)
5. **Кабанова В.С.** Выделение гидропероксида *втор*-бутилбензола из продуктов жидкофазного окисления *втор*-бутилбензола методом экстракции / В.С. Кабанова, Е.А. Курганова // Вестник технологического университета. – 2024. – Т. 27, № 5. – С. 31-36. DOI:10.55421/1998-7072\_2024\_27\_5\_31.
6. **Кабанова В.С.** Прогнозирование каталитической активности фталимидных соединений в процессе жидкофазного аэробного окисления алкилароматических углеводородов / В.С. Кабанова, Е.А. Курганова, А.С. Фролов, В.В. Плахтинский, В.А. Шакун // От химии к технологии шаг за шагом. – 2024. – Т. 5, № 2. – С. 8-16. DOI:10.52957/2782-1900-2024-5-2-8-16.

7. Патент №2801047 С1 Российская Федерация, МПК C07C 407/00, C07C 409/08.

Способ получения гидропероксида *втор*-бутилбензола: № 2023104580: заявл. 27.02.2023: опубл. 01.08.2023 / **В.С. Кабанова**, Е.А. Курганова, А.С. Фролов, Г.Н. Кошель; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный технический университет» ФГБОУ ВО «ЯГТУ».

8. **Кабанова В.С.** Разработка гидропероксидного способа совместного получения фенола и метилэтилкетона / В.С. Кабанова, Е.И. Баев, Е.А. Курганова, А.С. Фролов, Г.Н. Кошель // Проблемы и достижения химии кислород- и азотсодержащих биологически активных соединений: сборник тезисов VI Всероссийской молодежной конференции. 17-18 ноября 2022 г., Уфа. – Уфа: РИЦ УУНиТ, 2022. – С. 35-36.

9. **Кабанова В.С.** Модернизация гидропероксидного способа получения фенола / В.С. Кабанова, Е.Р. Швайковская, Д.М. Немиров, Е.А. Курганова, А.С. Фролов // XXVII Всероссийская конференция молодых учёных-химиков (с международным участием): тезисы докладов. 16-18 апреля 2024 г., Нижний Новгород. – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2024. – С. 636.

10. **Kabanova V.S.** Kinetics and Mechanism of Liquid-Phase Aerobic Oxidation *sec*-Butylbenzene in the Presence of *N*-Hydroxyphthalimide / V.S. Kabanova, D.M. Nemirov, A.A. Smurova, E.I. Baev, E.A. Kurganova, A.S. Frolov, G.N. Koshel // Mechanisms of Catalytic Reactions. XII International Conference: Abstracts. June 17-21, 2024, Vladimir, Russia. – P. 256-257.

11. **Кабанова В.С.** Высокоэффективная технология получения метилэтилкетона – ценного продукта нефтехимического синтеза / В.С. Кабанова, В.О. Шелия, Е.А. Курганова, А.С. Фролов // XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. Сборник тезисов докладов в 7 томах. Том 1. 7-12 октября 2024 г., Федеральная территория «Сириус», Россия. – М.: ООО «Адмирал Принт», 2024. – С. 405.

12. **Кабанова В.С.** Аэробное жидкофазное окисление *втор*-бутилбензола до гидропероксида / В.С. Кабанова, Е.А. Курганова, А.С. Фролов, Г.Н. Кошель // XXVIII Всероссийская конференция молодых учёных-химиков (с международным участием): тезисы докладов. 15-17 апреля 2025 г., Нижний Новгород. – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2025. – С. 634.