

March 2024

STUDY OF THE PROCESS OF ETHERIFICATION OF HEXENE ISOMERS WITH ACETIC ACID

Feruzha MAKHMUDOVA

Tashkent Chemical-Technological Institute, Tashkent, Uzbekistan, feruza_ahmadjonovna@mail.ru

Aytura MAKSUMOVA

Tashkent Chemical-Technological Institute, Tashkent, Uzbekistan, omaksumovas@mail.ru

Follow this and additional works at: <https://cce.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

MAKHMUDOVA, Feruzha and MAKSUMOVA, Aytura (2024) "STUDY OF THE PROCESS OF ETHERIFICATION OF HEXENE ISOMERS WITH ACETIC ACID," *CHEMISTRY AND CHEMICAL ENGINEERING*: Vol. 2023: No. 1, Article 5.

DOI: 10.34920/cce202315

Available at: <https://cce.researchcommons.org/journal/vol2023/iss1/5>

This Article is brought to you for free and open access by Chemistry and Chemical Engineering. It has been accepted for inclusion in CHEMISTRY AND CHEMICAL ENGINEERING by an authorized editor of Chemistry and Chemical Engineering. For more information, please contact zuchra_kadirova@yahoo.com.

STUDY OF THE PROCESS OF ESTERIFICATION OF HEXENE ISOMERS WITH ACETIC ACID

Feruza MAKHMUDOVA (feruza_ahmadjonovna@mail.ru),
Aytura MAKSUMOVA (omaksumovas@mail.ru)
Tashkent Chemical-Technological Institute, Tashkent, Uzbekistan

The aim of this work is to study the reaction of esterification of liquid olefins with acetic acid in the presence of catalysts and to study the structure and properties of the synthesized saturated esters. 1-hexene, 2-methyl-1-pentene, 2-ethyl-1-pentene, 3-methyl-1-pentene, 3-methyl-2-pentene were used as liquid olefins, and acid catalysts were used as catalysts for the esterification reaction: H_2SO_4 and HCl . The influence of various factors (nature of catalysts, relative activity of olefins, and temperature) on the rate of the esterification reaction has been studied. It is shown that in the presence of sulfuric acid the reaction rate is much higher than in HCl . It has been established that in the reaction of esterification of olefins with acetic acid, with an increase in the length of the side aliphatic substituent of 2-methyl-1-pentene olefins on 2-ethyl-1-pentene, the rate of the ester formation reaction decreases. The mechanisms of esterification reactions are presented. A basic technological scheme for the production of esters is proposed.

Keywords: olefin, acetic acid, ester, reaction, esterification, catalyst

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ЭТЕРИФИКАЦИИ ГЕКСЕНОВЫХ ИЗОМЕРОВ С УКСУСНОЙ КИСЛОТОЙ

Феруза Махмудова (feruza_ahmadjonovna@mail.ru),
Айтюра Максумова (omaksumovas@mail.ru)
Ташкентский химико-технологический институт, Ташкент, Узбекистан

Целью данной работы является изучение реакции этерификации жидких олефинов уксусной кислотой в присутствии катализаторов и исследование строения и свойств синтезированных предельных эфиров. В качестве жидких олефинов использованы 1-гексен, 2-метил-1-пентен, 2-этил-1-пентен, 3-метил-1-пентен, 3-метил-2-пентен, а катализаторов реакции этерификации применены кислотные катализаторы: H_2SO_4 и HCl . Изучено влияние разных факторов (природа катализаторов, относительная активность олефинов и температура) на скорость реакции этерификации. Показано, что в присутствии серной кислоты скорость реакции намного выше, по сравнению с HCl . Установлено, что в реакции этерификации олефинов с уксусной кислотой с увеличением длины бокового алифатического заместителя олефинов 2-метил-1-пентена на 2-этил-1-пентен скорость реакции образования эфиров снижается. Представлены механизмы реакций этерификации. предложена принципиальная технологическая схема получения сложных эфиров.

Ключевые слова: олефин, уксусная кислота, сложный эфир, реакция, этерификация, катализатор

GEKZEN IZOMERLARINING SIRKA KISLOTA BILAN ETERIFIKASSIYASI JARAYONINI O'RGANISH

Feruza MAXMUDOVA (feruza_ahmadjonovna@mail.ru),
Aytura MAKSUMOVA (omaksumovas@mail.ru)
Toshkent kimyo-texnologiya instituti, Toshkent, O'zbekiston

Ishning maqsadi katalizatorlar ishtirokida suyuq olefinlarni sirka kislotasi bilan eterifikatsiya reaksiyalarini o'rganish hamda sintez qilingan to'yinagan murakkab efilarning tuzilishi va xossalari tadqiq qilishdan iborat. Esterifikatsiya reaksiyalarida suyuq olefinlar sifatida 1-gexsen, 2-metil-1-penten, 2-etil-1-penten, 3-metil-1-penten, 3-metil-2-pentenlar, katalizatorlar sifatida esa H_2SO_4 va HCl kabi kislotali katalizatorlar qo'llanildi. Reaksiya tezligiga turli omillarning (katalizatorlarning tabiati, olefinlarning nisbiy faolligi va harorat) ta'siri aniqlandi. Sulfat kislotasi ishtirokida olib borilgan reaksiyaning tezligi HCl ga qaraganda ancha yuqori ekanligi ko'rsatildi. Olefinlarning sirka kislotasi bilan eterifikatsiyasi reaksiyasida olefinlar yon zanjiridagi o'rin bosarning uzunligi 2-metil-1-pentendan 2-etil-1-pentengacha ortishi bilan efir hosil bo'lish reaksiya tezligi kamayishi aniqlandi. Esterifikatsiya reaksiyalarining mexanizmlari keltirildi. Efilarni ishlab chiqarishning asosiy texnologik sxemasi taklif etiladi.

Kalit so'zlar: olefin, sirka kislotasi, murakkab efir, reaksiya, eterifikatsiya, katalizator

DOI: 10.34920/ccc202315

Введение

Сложные эфиры применяются в качестве растворителей, экстрагентов, лекарственных препаратов, сырья для полимеров, фармацевтических препаратов, флотореагентов, присадок для масел и др., что являются ценными продуктами органического синтеза [1]. Известно, что сложные эфиры, например, различные эфиры циклогексанкарбоновой кислоты, находят применение в качестве пластификаторов, полупродуктов синтеза фармакологических препаратов, жидких кри-

сталлов, душистых веществ [2-5]. Исследование процесса этерификации кислот олефинами имеет преимущества по сравнению с этерификацией кислот со спиртами: при этом стадия получения спиртов из олефинов исключается; применяемые катализаторы реакции этерификации являются более эффективными; в процессе реакции побочный продукт не образуется; образуемый эфир получается высокой чистоты. Кроме того, прямая реакция этерификации олефинов играет важную роль в производстве органических сложных

эфиров [6-10]. В частности, он не только снижает себестоимость производства органических эфиров, но и устраняет ряд недостатков, связанных с побочным продуктом [11-15]. Например, Ли и др. [16] синтезировали втор-бутилацетат путем этерификации 2-бутена уксусной кислотой и обнаружили, что кислотный центр Бренстеда является основным центром активности. Автор считал, что добавление в реакционную систему определенного количества воды может затормозить образование олефиновых полимеров и повысить селективность продуктов. Для линейных олефинов, содержащих более восьми атомов углерода, эти реакции весьма интересны, так как этерификация происходит параллельно с изомеризацией двойной связи в исходном олефине, и поскольку в реакции не образуется вода, жидкая фаза остается однородной. Вторичные сложные эфиры, полученные этим способом применяются в качестве биоразлагаемых смазок или растворителей [17]. Втор-бутилацетат, который может быть напрямую синтезирован путем этерификации 1-бутена уксусной кислотой [18], является потенциальным вариантом для замены метил-трет-бутилового эфира, который применяется в качестве присадки к чистому бензину с высоким октановым числом, так как от отличается нетоксичностью, неагрессивностью и низким содержанием кислорода. В связи с этим исследование процесса этерификации олефинов представляет значительный теоретический и практический интерес.

На основании вышеизложенного целью работы является исследование процесса взаимодействия уксусной кислоты с жидкими олефинами в присутствии катализаторов и полученные изогексил- и изогептилацетатов [19].

Методы исследования

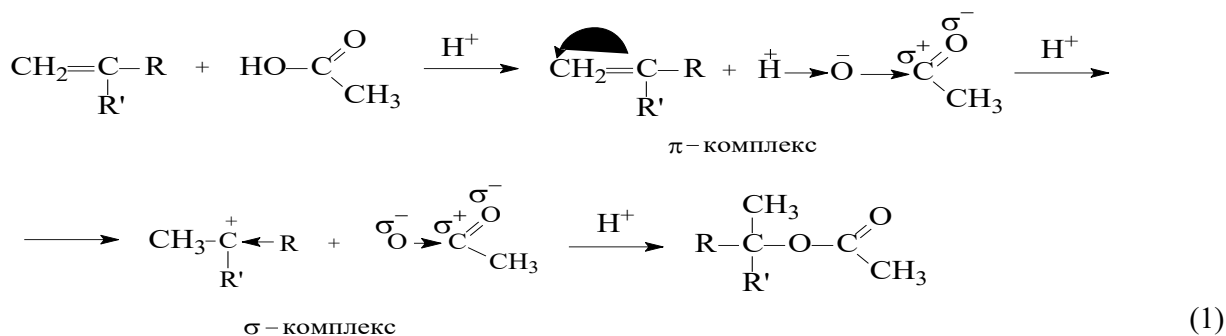
В проведенных исследованиях использовались свежеперегнанные органические реагенты и растворители, очистку которых производили по известным методам. Исследуемую смесь олефинов разделяли ректификацией. Лабораторный прибор для ректификации состоит из колбы для испарения жидкости, колонки, головки колонки, паук для смены. Главная часть колонки – длинная вертикальная трубка, заполненная специальной

насадкой, через которую проходят пары и частично конденсируются. Конденсат стекает обратно в колбу. В колонке стекающая вниз жидкость тесно соприкасается с поднимающимся вверх паром, при этом пары обогащаются более летучим компонентом А, а конденсат – менее летучим компонентом В. Таким образом, уже в самом дефлегматоре или колонке комбинируется повторная ректификация и дефлегмация в течение одной перегонки. Наличие двойных связей в олефинах определяли физико-химическими методами исследования. Химическое определение количества двойных связей в олефинах производили путем галоидирования бромом.

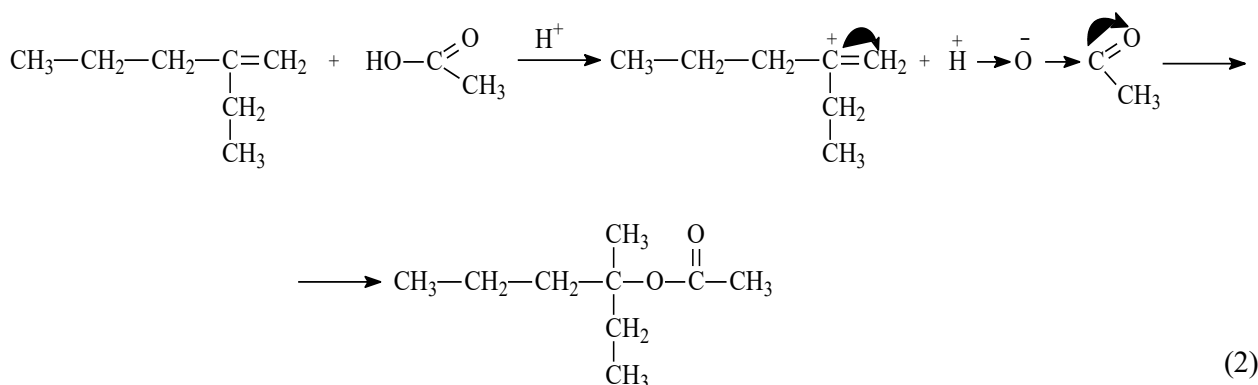
В трехгорлую колбу, снабженной механической мешалкой, холодильником и капельной воронкой, помещали расчетное количество олефина и при постоянном перемешивании через капельную воронку добавляли уксусную кислоту. Колба погружена в термостат «WITEG» заполненный дистиллированной водой (температурная погрешность $\pm 0,1$ °C). В присутствии катализатора температуру реакции этерификации поддерживали при 60 °C в течение 10 ч. После окончания реакции, отделяли катализатор, и смесь подвергали перегонке в вакууме. Выход продукта реакции составляет 94 % от теоретического. Синтезированные сложные эфиры представляют собой бесцветные жидкости с характерным запахом; хорошо растворимы в таких органических растворителях, как этанол, ацетон. Чистоту синтезированных соединений контролировали методом тонкослойной хроматографии на пластинках Silufol: элюент-бензол-ацетон, проявление - парами йода. Измерения показателя преломления жидких реагентов проводились с помощью цифрового рефрактометра Dr301-95. Техническая характеристика: диапазон измерений 1,3330-1,5318; точность $\pm 0,00015$; компенсация температур 5-40. ИК спектры исходных реагентов и синтезированных эфиров регистрировали на Фурье-спектрофотометре "SISTEM-200".

Результаты и обсуждение

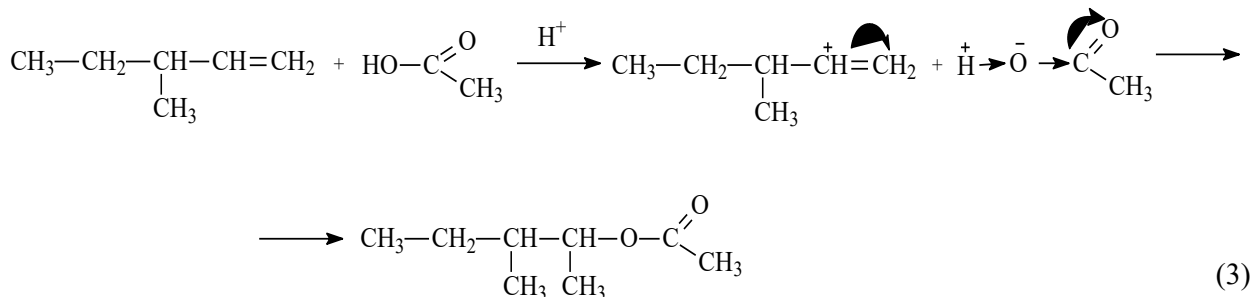
Реакция этерификации уксусной кислоты с 2-метил-1-пентеном происходит по следующей схеме [20, 21]:



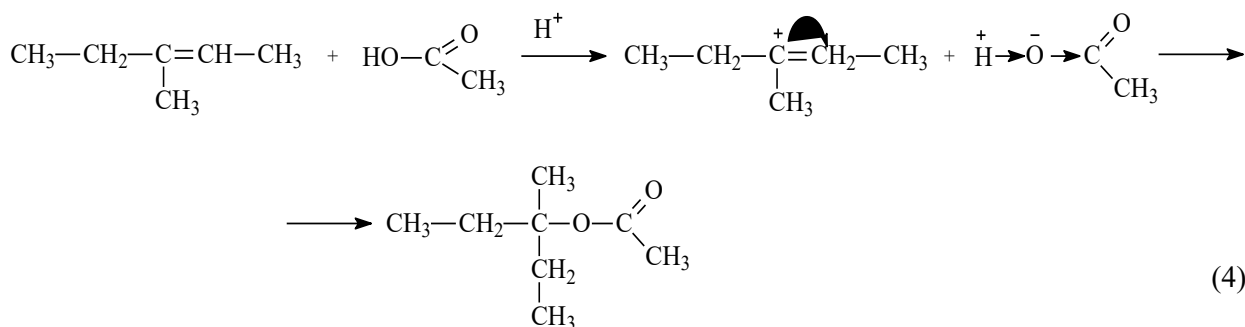
Реакция образования сложных эфиров на основе уксусной кислоты с 2-этил-1-пентеном можно описать по следующей схеме:



Этерификация уксусной кислоты с 3-метил-1-пентеном:



Этерификация уксусной кислоты с 3-метил-2-пентеном:



Известно, что успешное осуществление реакций этерификации зависит от активности катализатора. Жидкие кислоты часто используются в качестве катализаторов реакции

этерификации для снижения кислотного числа сырого масла и облегчения последующей реакции переэтерификации [22], которые имеют преимущества низкой стоимости и

высокой каталитической активности [23]. Однако гомогенный катализ также может вызвать такие проблемы, как трудности разделения продукта и катализаторов, образование большого количества кислых сточных вод [24] и коррозию оборудования катализаторами. Твердокислотные катализаторы на основе углерода обладают высокими гидротермическими и механическими свойствами, но имеют более низкие каталитические характеристики и стабильность. Поэтому необходимо провести более всесторонние исследования для оптимизации их каталитических характеристик [25, 26].

В качестве катализаторов реакции этерификации нами применялись кислотные катализаторы: H_2SO_4 и HCl . Изучено влияние природы, концентрации катализатора, соотношения исходных реагентов и температуры на скорость реакции и выход конечного продукта.

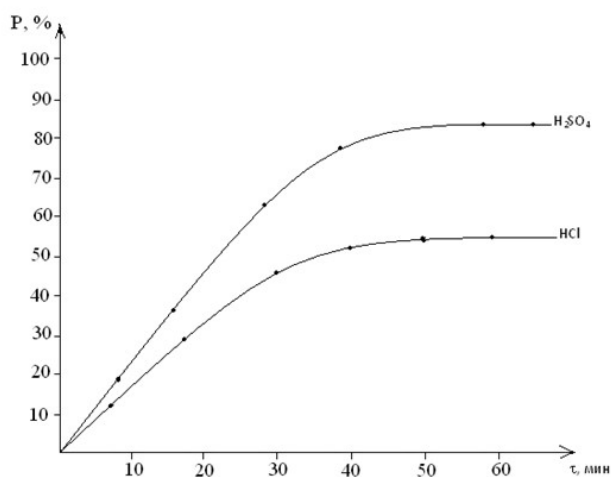


Рисунок 1. Влияние природы катализаторов при этерификации 2-метил-1-пентена с уксусной кислотой на выход эфира. Температура 60 °С.

Для сравнения относительной активности кислотных катализаторов нами исследована реакция этерификации 2-метил-1-пентена с уксусной кислотой в присутствии кислотных катализаторов (рис. 1).

Из рисунка 1 видно, что в присутствии серной кислоты скорость реакции намного выше, по сравнению с HCl . По-видимому, скорость образования комплекса 2-метил-1-пентен с катализатором в начальной стадии больше у H_2SO_4 из-за его большей активности по сравнению с HCl . Относительно низ-

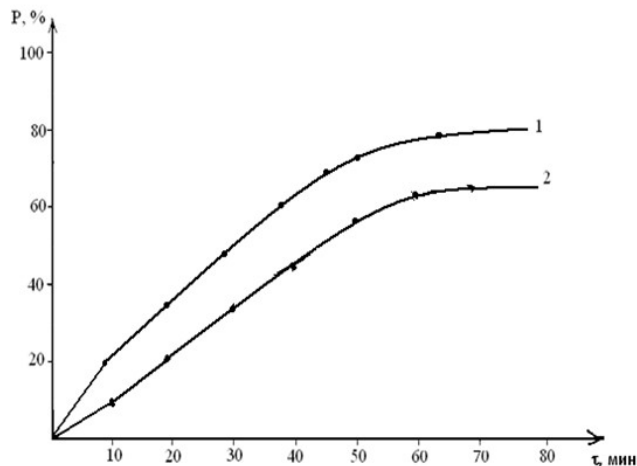


Рисунок 2. Относительная активность 2-метил-1-пентен (1) и 2-этил-1-пентена (2) в реакциях этерификации с CH_3COOH . $[H_2SO_4]=5 \cdot 10^{-2}$ моль/л, $T=60$ °С.

кая скорость реакции в случае HCl объясняется его меньшей комплексообразующей способностью и малой электрофильностью образующегося комплекса.

С целью сравнения относительной активности олефинов в реакции этерификации нами исследовано взаимодействие 2-метил-1-пентен, 2-этил-1-пентен с уксусной кислотой в присутствии H_2SO_4 (рис. 2).

Как видно из рисунка 2, в реакции этерификации олефинов с уксусной кислотой с увеличением длины бокового алифатического заместителя олефинов с 2-метил-1-пентена на 2-этил-1-пентен скорость реакции образования эфиров снижается.

Изучено влияние температуры на скорость реакции этерификации 2-метил-1-пентена с уксусной кислотой (рис. 3).

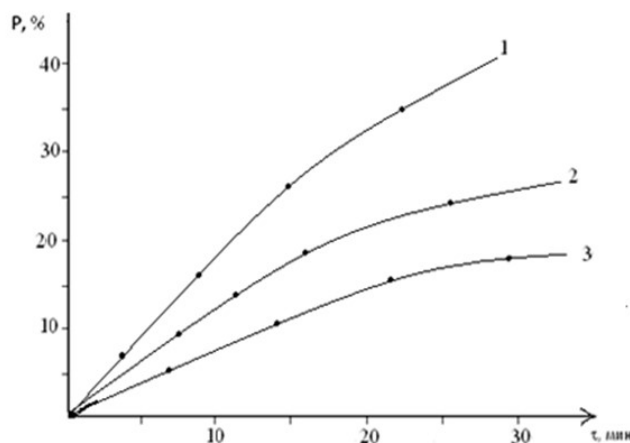


Рисунок 3. Зависимость выхода сложных эфиров на основе 2-этил-1-пентена с уксусной кислотой от температуры, °С: 1-60; 2-70; 3-80.

Взаимодействием 2-метил-1-пентен (1); 2-этил-1-пентен (2); 3-метил-1-пентен (3) с

Таблица 1

Физико – химические свойства синтезированных сложных эфиров

Наименование сложного эфира	Брутто формула	T _{кип} , °C	Выход, %
1,1-диметил бутил пропил этаноат	C ₈ H ₁₆ O ₂	96	79%
1-метил-1-этил бутил этаноат	C ₉ H ₁₈ O ₂	98	94%
1-метил 1-этил пропил этаноат	C ₈ H ₁₆ O ₂	94	78%

уксусной кислотой в присутствии $1 \cdot 10^{-2}$ моль H₂SO₄ при температуре 60 °C в массе с хорошими выходами синтезированы соответствующие сложные эфиры (табл. 1).

При проведении реакции при температурах выше температуры кипения олефинов, выход сложных эфиров снижался из-за потери олефинов.

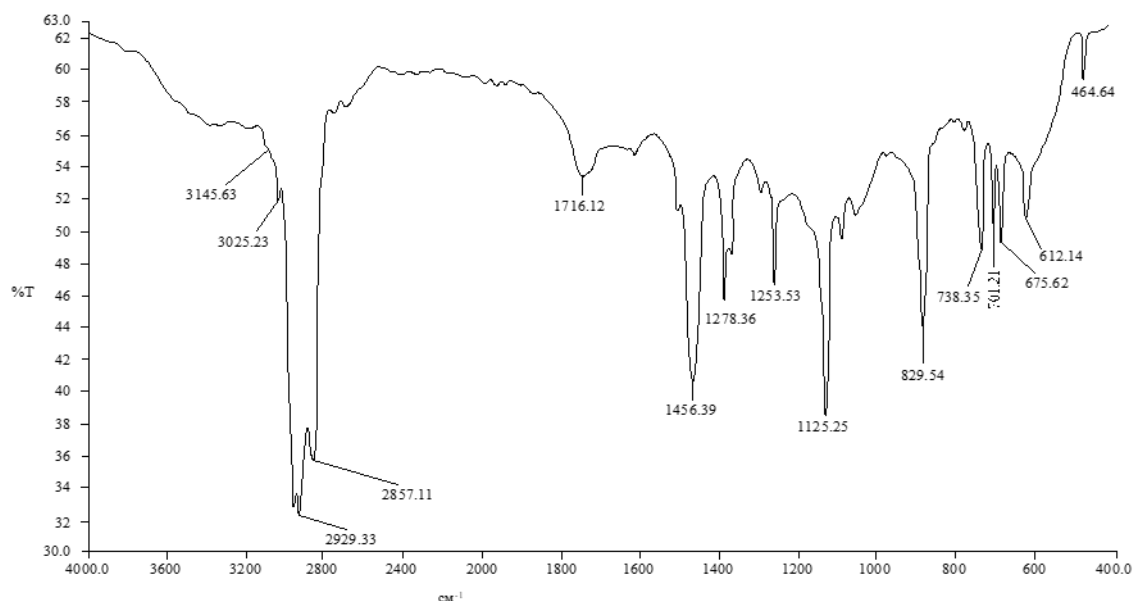


Рисунок 4. ИК спектр сложного эфира, полученного на основе взаимодействия 2-метил-1-пентена с уксусной кислотой.

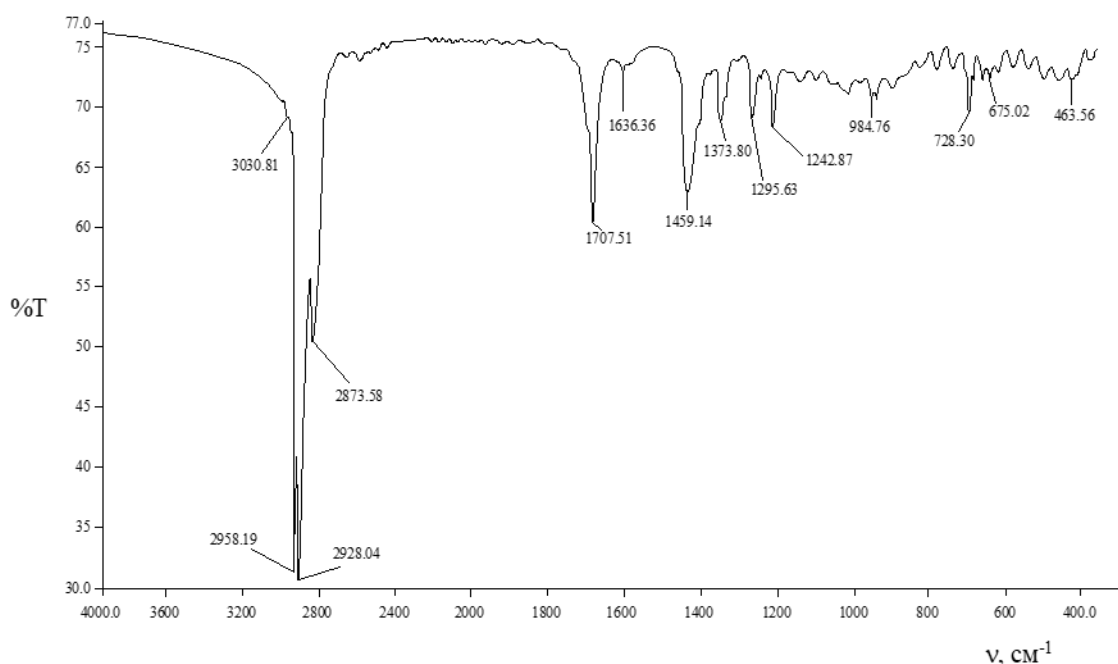


Рисунок 5. ИК спектр сложного эфира, полученного на основе взаимодействия 2-этил-1-пентена с уксусной кислотой.

Строение синтезированных эфиров подтверждено ИК спектральным анализом (рис. 4).

В ИК спектрах сложного эфира, полученного на основе взаимодействия 2-метил-1-пентена с уксусной кислотой обнаружены новые полосы поглощения валентных колебаний С–О–С связи области 1125 см^{-1} , валентные колебания карбонильной группы, имеющие сопряжение с двойной связью наблюдаются в области 1736 см^{-1} , широкий спектр карбоксильных групп в области 3600 см^{-1} отсутствует [28].

В ИК спектре сложного эфира, синтезированного на основе взаимодействия 2-этил-1-пентена с уксусной кислотой, обнаружены новые полосы поглощения валентных колебаний С–О–С связи в области 1242 см^{-1} , валентные колебания карбонильной группы, имеющие сопряжение с двойной связью наблюдаются в области 1707 см^{-1} , полосы поглощения CH_3 -, CH_2 - групп при $2928 - 2958\text{ см}^{-1}$ и широкий спектр карбоксильных групп в области 3600 см^{-1} отсутствует (рис. 5).

В результате описанных выше исследо-

ваний была предложена принципиальная технологическая схема синтеза сложного эфира (рис. 6). Синтез сложных эфиров на основе взаимодействия гексеновых изомеров с уксусной кислотой осуществляется в смешительном реакторе с внутренним подогревом [29, 30]. В реактор (1) вводится катализатор, олефин и уксусная кислота.

Процесс этерификации проводится при постоянном перемешивании в течение 10 часов при $60\text{ }^\circ\text{C}$. После окончания синтеза перемешивание останавливается, и реакционная масса передается в колонну (2) для отгонки. Невступившие в реакцию исходные реагенты, в том числе олефин и пары уксусной кислоты из верхней части колонны поступают в конденсатор (3) для охлаждения. Сложный эфир с нижней части колонны (2) через дроссельный вентиль поступает в холодильник (5). Охлажденный сложный эфир собирается в сборнике (6) и отправляется на расфасовку.

Заключение

Таким образом, изучен способ получения предельных сложных эфиров реакцией этерификации жидких олефинов с уксусной

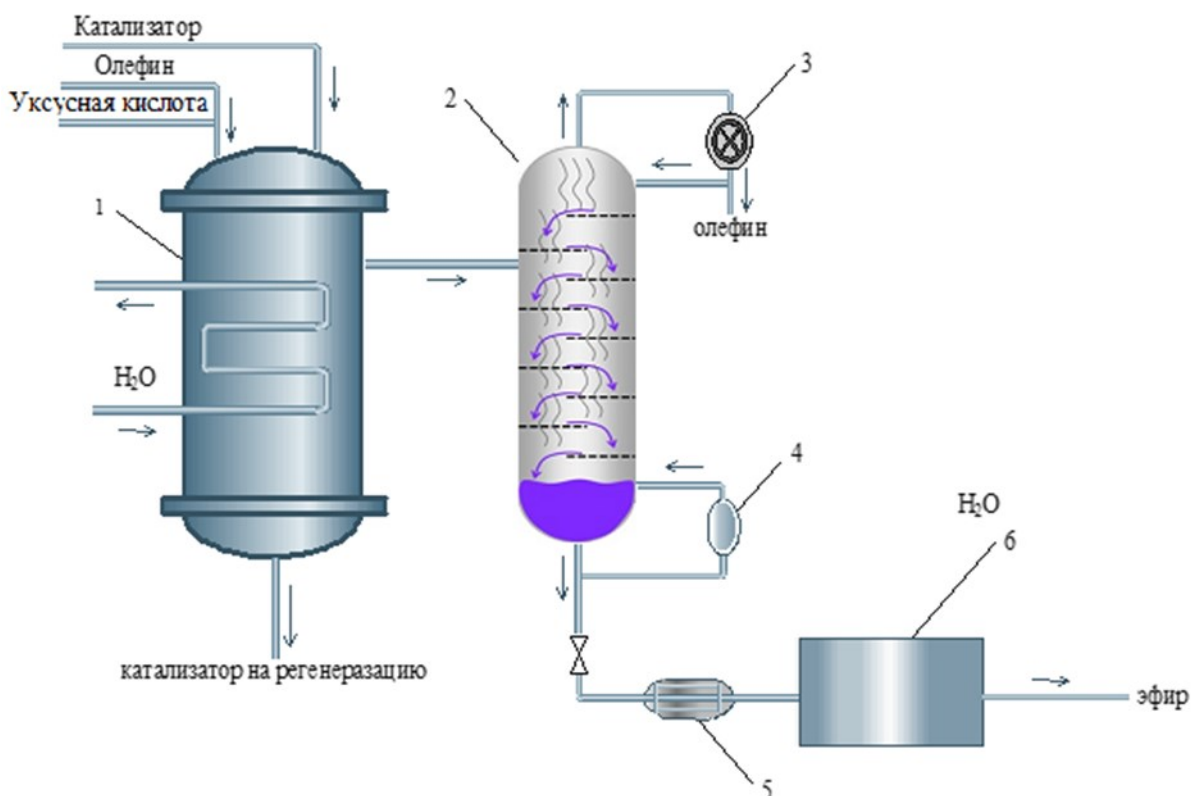


Рисунок 6. Принципиальная технологическая схема получения сложных эфиров на основе гексеновых изомеров и уксусной кислоты: 1-эфиризатор (реактор); 2-перегонная колонна; 3-конденсатор; 4-кипятильник; 5-холодильник; 6-сборник.

кислотой. Изучено влияние различных факторов на процесс этерификации жидких олефинов. Установлено, что скорость реакции и выход конечного продукта зависят от строения используемого олефина. Предложен механизм реакции этерификация, в котором

карбоновая кислота в объемной фазе быстро реагирует с ионами карбения и последний изомеризуется с образованием комплекса с катализатором. Предложена принципиальная технологическая схема непрерывного производства сложных эфиров.

REFERENCES

- Speshshayiz R.K., Gars V., Reymond Dj.K., Filipp D.K. *Novyye slozhnyye efiry fosfonokarbonovoy kisloty*. [New esters of phosphonocarbonic acid]. Patent RU, 2005101765, 2005.
- Nifantev I.E., Tavtorkin A.N., Averyanov V.A. *Difosfyny, katalizator sinteza slozhnykh efirov na ikh osnove i sposob sinteza slozhnykh efirov v yego prisutstvii* [Diphosphines, a catalyst for the synthesis of esters based on them and a method for the synthesis of esters in its presence]. Patent RU, 2540079, 2015.
- Xue X., Sun Y., Sun Q., Bao W., Zhang Z., Chang L., Wang J., Xie K. Esterification of 1-hexene and acetic acid using resin-supported phosphotungstic acid catalysts. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 2022, 7, 1-10. DOI:10.1016/j.jsamd.2022.100486
- Berdnikov Ye.A., Mamedov V.A. Dimetilovyy efir dikhlormalonovoy kisloty - novyy sinteticheskiy ekvivalent metilovogo efira dikhloroksusnoy kisloty v kondensatsii darzana [Dichloromalonic acid dimethyl ester - a new synthetic equivalent of dichloroacetic acid methyl ester in darzan condensation]. *Izvestiya akademii nauk. Seriya Khimicheskaya*, 1995, 8, 1544-1545.
- Oliva C., Huang W., Lee M., Ronholm J., Chen L., Wang Y. Concentrated sulfuric acid aqueous solution enables rapid recycling of cellulose from waste paper into antimicrobial packaging. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 241, 116256. DOI:10.1016/j.carbpol.2020.116256
- Zhang H., Luo X., Shi K., Yang H., Zhang Sh., Peng Ch. Nanocarbon-based catalysts for esterification: Effect of carbon dimensionality and synergistic effect of the surface functional groups. *Carbon*, 2019, 147, 134-145. DOI: 10.1016/j.carbon.2019.02.079
- Jyoti Gh., Soni R. Kinetics study of esterification reaction of acrylic acid with n-butanol. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 2023, 72/5, 2720-2722. DOI:10.1016/j.matpr.2022.09.232
- Dong K., Fang X., Gülak S., Franke R., Spannenberg A., Neumann H. Jackstell R., Beller M. Highly active and efficient catalysts for alkoxy-carbonylation of alkenes. *Nature communications*, 2017, 8, 1-7. DOI: 10.1038/ncomms14117
- Baum J.C., Milne J.E., Murry J.A., Thiel O.R. An efficient and scalable ritter reaction for the synthesis of tert-butyl amides. *Organic chemistry*, 2009, 74, 2207-2209. DOI: 10.1021/jo8024797
- Gee J.C., Small B.L., Stansifer R.D., Franklin R.R. Olefin esterification on Amberlyst® 15 catalyst: does the esterification site defy thermodynamics? *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 2020, 130/2, 591-616. DOI:10.1007/s11444-020-01794-9
- Cuesta P.J., Martinez E.R., Perez F.I., Sarria F.R. Esterification of ethenyl benzene and its derivatives with acetic acid in the presence of perchloric acid as a catalyst. *The canadian journal of chemical engineering*, 1999, 77/6, 1169-1175. DOI:10.1002/cjce.5450770613
- Zhang Y., Ni L., Yao H., Chen Q., Jiang J., Shu Ch.M. Reaction mechanism and process safety assessment of acid-catalyzed synthesis of tert-butyl peracetate. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2023, 81, 104944. DOI:10.1016/j.jlp.2022.104944
- Kim S., Yun J., Cho J.H., Choi H., Shin Y.S., Jeong H., Jung J.Ch. Self-catalyzed esterification of 2-hydroxyisobutyric acid: A simple method to produce methyl 2-hydroxyisobutyrate. *Molecular Catalysis*, 2022, 532/11, 21-27. DOI:10.1016/j.mcat.2022.112721
- Zhang B., Gao M., Tang W., Wang X., Wu Ch., Wang Q., Cheung S.M., Chen X. Esterification efficiency improvement of carbon-based solid acid catalysts induced by biomass pretreatments: Intrinsic mechanism. *Energy*, 2023, 263/15, 25606. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125606
- Yagmur E., Inal I.G., Gokce Y., Ghobadi T. G., Aktar T., Aktas Z. Examination of gas and solid products during the preparation of activated carbon using phosphoric acid. *Journal of Environmental Management*, 2018, 228, 328-335. DOI:10.1016/j.jenvman.2018.09.046
- Li Q., Liu Y., Zhou Y., Liu C. Esterification of 2-butylene with acetic acid catalyzed by silica-supported heteropolyacid, petrochem. *Petrochemical Technology*, 2007, 36/12, 1220-1224.
- Gee J.C., Fisher Sh. Direct esterification of olefins: The challenge of mechanism determination in heterogeneous catalysis. *Journal of Catalysis*, 2015, 331, 13-24. DOI: 10.1016/j.jcat.2015.08.010
- Tkachenko T.V., Baran M.M., Yevdokymenko V.O., Kamenskykh D.S., Kashkovsky V.I. Optimization of ether production by proton current. *Materials today: proceedings*, 2022, 62, 7643-7649. DOI:10.1016/j.matpr.2022.02.004
- Makhmudova F.A., Gulyamova M.Kh., Maksumova A.S. Izucheniye protsessa eterifikatsii olefinov s uksusnoy kislotoy. [Study of the process of esterification of olefins with acetic acid]. *Uzbekskiy khimicheskij jurnal*, 2012, 6, 24-27.
- Yao H., Jiang J., Li B., Ni L. Investigation of pyrolysis kinetics, mechanism and thermal stability of tert-butyl peroxy-2-ethyl hexanoate. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 160, 734-748. DOI:10.1016/j.psep.2022.02.059
- Zhang B., Gao M., Geng J., Cheng Y., Wang X. Catalytic performance and deactivation mechanism of a one-step sulfonated carbon-based solid-acid catalyst in an esterification reaction. *Renewable Energy*, 2021, 164, 824-832. DOI: 10.1016/j.renene.2020.09.076
- Sun K., Bian Z., Cheng S., Wang G., Zhang L., Huang W. Effect of Si content on the performance of direct synthesis of dimethyl ether over slurry CuZnAl catalyst prepared by complete liquid phase technology. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2021, 49, 791-798. DOI: 10.1016/S1872-5813(21)60068-3
- Shikada T., Miyoshi Y., Mogi Y., Inoue N., Ohno Y. 23 - New Direct Synthesis Technology of Dimethyl Ether. *Studies in Surface Science and Catalysis*, 2007, 172, 137-140. DOI:10.1016/B978-0-444-53202-2.50023-3
- Brondani L.N., Ribeiro J.S., Castilhos F. A new kinetic model for simultaneous interesterification and esterification reactions from methyl acetate and highly acidic oil. *Renewable Energy*, 2020, 156, 579-590. DOI: 10.1016/j.renene.2020.04.063
- Chin S.Y., Ahmad M.A., Kamaruzaman M.R., Cheng C.K. Kinetic studies of the esterification of pure and dilute acrylic acid with 2-ethyl hexanol catalysed by Amberlyst 15. *Chemical Engineering Science*, 2015, 129, 116-125. DOI:10.1016/j.ces.2015.02.006
- Viana W.O., Bernal M.D., Fontalvo J., Gomez I.D., Garcia M.A. Kinetic study on the catalytic esterification of acetic acid with isoamyl alcohol over Amberlite IR-120. *Chemical Engineering Science*, 2013, 101, 755-763. DOI:10.1016/j.ces.2013.07.009
- Kiss J.T., Felföldi K., Kortvelyesi T., Palinko I. Hydrogen bonding interactions in α -substituted cinnamic acid ester derivatives studied by FT-IR spectroscopy and calculations. *Vibrational Spectroscopy*, 2000, 22, 63-73. DOI: 10.1016/S0924-2031(99)00054-5
- Kiss J.T., Felföldi K., Palinko I. Changes in the aggregation patterns of Z-2,3-diphenylpropenoic acid and its methyl ester on substituting the olefinic hydrogen with CF₃ group—an FT-IR study. *Journal of Molecular Structure*, 2005, 744, 207-210. DOI: 10.1016/j.molstruc.2004.11.034
- Wander Y., Perez S., Warna J., Eränen K., Tolvanen P., Estel L., Leveneur S., Salmi T. Use of semibatch reactor technology for the investigation of reaction mechanism and kinetics: Heterogeneously catalyzed epoxidation of fatty acid esters. *Chemical Engineering Science*, 2021, 230, 116206. DOI: 10.1016/j.ces.2020.116206
- Rani N.V., Kunta R. Acetic acid promoted an efficient and eco-friendly one-pot synthesis of functionalized novel isoxazolyl amino chromenopyrrole derivatives in aqueous medium. *Synthetic Communications*, 2021, 51, 601-610. DOI: 10.1080/00397911.2020.1846058