

ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

CHEMISTRY AND CHEMICAL TECHNOLOGIES

Научная статья

УДК 541.64:541.124.7

<https://doi.org/10.24143/1812-9498-2025-2-7-15>

EDN WTTHSG

Выбор оптимальных условий проведения реакции метатезиса гексена-1

Рауф Камил оглы Бабаев[✉], Солтан Аскерали оглы Алиев, Севиндж Низами кызы Гулиева

*Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности,
Баку, Азербайджанская Республика, babayevrauf59@mail.ru[✉]*

Аннотация. Научно-технический прогресс в промышленности органического синтеза в значительной степени основывается как на совершенствовании действующих производств, так и на разработке и внедрении новых более эффективных процессов получения углеводородных соединений, удовлетворяющих современным требованиям потребителей. Открытие реакции метатезиса стало значительным событием в химии, поскольку появилась возможность селективно преобразовывать одни олефины в другие большей или меньшей молекулярной массы. Интенсивное исследование возможностей метатезиса сопровождалось не только наработкой серийных теоретических и практических результатов, но и стимулировало развитие работ в области каталитических реакций различных углеводородов. Кроме того, реакция метатезиса высших олефинов является высокоэффективным механизмом при синтезе различных углеводородов, в т. ч. и таких, которые синтезировать классическими методами весьма проблематично. Проблемы, связанные с разработкой эффективных методов изомеризации и диспропорционирования олефинов, являются актуальными. Ранее проведенный термодинамический расчет позволил значительно сузить область поиска оптимальных условий проведения метатезиса гексена-1, ограничив ее интервалами температуры 110–160 °C и давления 0,7–1,0 МПа. Для выбора оптимальных условий проведения реакции метатезиса гексена-1 проведено исследование зависимости показателей процесса от температуры реакции и массовой скорости по сырью. Влияние температуры на основные показатели процесса жидкокристаллического метатезиса гексена-1 исследовалось на различных алюмомолибденовых катализаторах. Выбранные оптимальные условия процесса: температура – 120–130 °C, массовая скорость подачи сырья – 4–4,5 ч⁻¹, давление – 0,7–1,0 МПа. При этом суммарная конверсия гексена-1 в олефины составляет около 65 % при селективности, близкой к 70 %.

Ключевые слова: метатезис, скорость по сырью, катализатор, температура, высшие линейные олефины

Для цитирования: Бабаев Р. К., Алиев С. А., Гулиева С. Н. Выбор оптимальных условий проведения реакции метатезиса гексена-1 // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2025. № 2. С. 7–15. <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2025-2-7-15>. EDN WTTHSG.

Original article

Selection of optimal conditions for carrying out the reaction of hexene-1 metathesis

Rauf K. Babayev[✉], Soltan A. Aliyev, Sevindzh N. Guliyeva

*Azerbaijan State Oil and Industry University,
Baku, Republic of Azerbaijan, babayevrauf59@mail.ru[✉]*

Abstract. Scientific and technical progress in the organic synthesis industry is largely based on both the improvement of existing production facilities and the development and implementation of new, more efficient processes for obtaining hydrocarbon compounds that meet modern consumer requirements. The discovery of the metathesis reaction was a significant event in chemistry, since it became possible to selectively convert some olefins into others of greater or lesser molecular weight. Intensive research into the possibilities of metathesis was accompanied not only by the development of serious theoretical and practical results, but also stimulated the development of work in the field of catalytic reactions of various hydrocarbons. In addition, the metathesis reaction of higher olefins is a highly efficient mechanism for the synthesis of various hydrocarbons, including those that are very problematic to synthesize using classical methods. Problems associated with the development of efficient methods for isomerization and disproportionation of olefins are relevant. The previously performed thermodynamic calculation allowed to significantly narrow the search area for the optimal conditions for carrying out the metathesis of hexene-1, limiting it to the temperature ranges of 110–160 °C and pressure of 0.7–1.0 MPa. To select the optimal conditions for the hexene-1 metathesis reaction, a study was conducted of the dependence of the process parameters on the reaction temperature and the mass flow rate of the feedstock. The effect of temperature on the main parameters of the liquid-phase metathesis of hexene-1 was studied on various aluminum-molybdenum catalysts. The optimal process conditions were selected: temperature of 120–130 °C, mass flow rate of the feedstock of 4–4.5 h⁻¹, pressure of 0.7–1.0 MPa. In this case, the total conversion of hexene-1 into olefins is about 65% with a selectivity close to 70%.

Keywords: metathesis, feedstock rate, catalyst, temperature, higher linear olefins

For citation: Babayev R. K., Aliyev S. A., Guliyeva S. N. Selection of optimal conditions for carrying out the reaction of hexene-1 metathesis. *Oil and gas technologies and environmental safety*. 2025;2:7-15. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2025-2-7-15>. EDN WTTHSG.

Введение

В последние годы в решении проблемы получения высших линейных олефинов наблюдается значительный прогресс, благодаря чему получен мощный импульс для дальнейшего развития и совершенствования в химической и нефтехимической промышленности. Реакция метатезиса высших олефинов является высокоэффективным механизмом при синтезе различных углеводородов, в т. ч. и таких, которые синтезировать классическими методами весьма проблематично [1–6].

По мере развития метатезиса практически каждый год знаменовался значительным событием, расширявшим представления об этой реакции и пополнявшим знания в области гомо- и гетерогенного катализа [5, 7]. В работах [8–13] сообщается о процессе метатезиса при участии различных катализаторов. В статье [8] отмечается, что в реакциях метатезиса олефинов широко используются различные катализаторы, особое место среди которых занимают катализаторы типа Ховейда – Граббса.

Авторами статьи [9] указывается, что метатезис углерод-углеродных двойных связей – «перетасовка» составляющих их карбеновых фрагментов – чрезвычайно важный подготовительный инструмент в промышленности и научных кругах.

Метатезис более тяжелых гомологов алкенов ограничен случайными непродуктивными примерами в химии фосфора и перекрестным метатезисом со смешанными более тяжелыми алкинами. Сообщается о термически индуцированном метатезисе специально созданных несимметрично замещенных дигерменов без использования переходных металлов.

Линейные олефины относятся к одним из наиболее употребляемых продуктов, интерес к которым неуклонно возрастает. Особо крупной областью потребления высших олефинов является производство ПАВ различных классов, используемых

в качестве действующего начала синтетических моющих средств, присадок к маслам, реагентов для интенсификации нефтедобычи, ингибиторов коррозии и т. д. [14]. В зависимости от целей и областей применения продуктов диспропорционирования может быть рекомендована определенная каталитическая система [15–17].

Выбранные оптимальные условия протекания процесса, результаты исследования кинетических закономерностей могут быть использованы для решения вопросов практической реализации процесса.

Целью работы является исследование зависимости показателей процесса метасинтеза гексена-1 от температуры реакции и массовой скорости по сырью.

Экспериментальная часть

Подготовка сырья

В опытах по метатезису гексена-1 в качестве сырья использовали гексен-1 (или гексан-гексеновую фракцию, выделенную из продуктов термокаталитической олигомеризации этилена в присутствии триэтилалюминия). Гексен-1 предварительно засыпали прокаленным при 350–400 °C гамма-оксидом алюминия примерно на 1/10 часть объема жидкости и оставляли в течение суток. Эту операцию повторяли три раза. После такой очистки анализ сырья на содержание «перекисных» соединений показал отсутствие последних. Гексен-1 (или гексан-гексеновую фракцию) и газообразные продукты реакции анализировали с помощью хроматографа ЛХМ-72 на капиллярной колонке. Анализ проводили при температуре 50 °C, используя в качестве газоносителя азот.

Содержание компонентов в смеси рассчитывалось по площадям пиков $S = HB$, где H – высота пика; B – ширина пика, измеренная на середине его высоты.

Проведение реакции метатезиса гексена-1 осуществлялось, согласно следующей методике.

Свежеперегнанный гексен-1 загружали под азотом в сырьевую емкость, из которой он забирался насосом и прокачивался через адсорбер, заполненный силикагелем в реактор.

Реактор представляет собой трубку из нержавеющей стали диаметром 40 мм длиной 500 мм, снабженную электрообмоткой, карманом для термопары, на который крепится сетка для поддержания катализаторного слоя. Для уменьшения «мертвого» объема реактор до и после катализаторного слоя заполнялся кварцевой насадкой. Давление в реакторе создавалось дозировочным насосом и регулировалось вентилем тонкой регулировки на выходе из реактора. Расход сырья устанавливался с помощью дозировочной головки насоса. Газообразные продукты реакции собирались в сосуд Мариотта, жидкие продукты – во взвешиваемые приемники.

Приготовление, активация катализатора

Алюмомолибденовый катализатор готовили импрегнированием промышленного оксида алюминия 15 %-м раствором парамолибдата аммония, затем его сушили при 120 °C до воздушно-сухого состояния и прокаливали 5 ч при 480 °C. Активацию полученного катализатора проводили при 580 °C сухим воздухом в течение 1,5 ч, затем сухим обескислороженным азотом при 580 °C в течение 1,5 ч, объемной скорости подачи газов активации 5 000–10 000 ч⁻¹. Далее катализатор охлаждали в токе азота до температуры реакции. После проведения опытов охлаждения до комнатной температуры, промывали гексан-гексеновой (или пентан-пентеновой) фракцией, продували азотом и нагревали в токе азота до 350 °C. Затем постепенно азот заменяли на воздух (во избежание разогрева катализатора) и при температуре 350–450 °C проводили выжиг кокса

в течение примерно 30 мин. Далее температура поднималась до 580 °C, и проводилась активация катализатора по вышеописанной методике.

Введение модификаторов в состав катализаторов осуществляли их пропиткой водными растворами соответствующих солей заданной концентрации. В исследовании было использовано два катализатора: алюмомолибденкалиевый и алюмомономильмолибденсиликатный.

Результаты и их обсуждение

Основными параметрами, оказывающими влияние на протекание реакции диспропорционирования, являются температура и время контакта. В установившемся состоянии, когда реакция достигает равновесия, давление не должно оказывать влияние на процесс. С другой стороны, изменение давления воздействует на фазовое равновесие и в конечном итоге может привести к изменению соотношения между образовавшимися продуктами реакции.

Рассмотрим зависимость показателей процесса от температуры реакции. Влияние температуры на основные показатели процесса жидкофазного метатезиса гексена-1 исследовалось в алюмомолибденкалиевом катализаторе в интервале 110–160 °C, в жидкой фазе, массовой скорости по сырью 4–4,5 ч⁻¹. Из таблицы видно, что полученные нами ранее результаты по влиянию температуры на диспропорционирование гексена-1 ($P = 0,7$ МПа, $V = 4,5$ ч⁻¹) показали, что максимальная конверсия гексена-1 была получена при температуре 120 °C. Выше этой температуры конверсия падает с 64,9 до 39,3 %. В интервале 130–160 °C изменение температуры не оказывает существенного влияния на этот показатель.

**Влияние температуры на диспропорционирование гексена-1
($P = 0,7$ МПа, $V = 4,5$ ч⁻¹, алюмомолибденкалиевый катализатор)**

**Effect of temperature on the disproportionation of hexene-1
($P = 0.7$ MPa, $V = 4.5$ h⁻¹, aluminum-molybdenum-potassium catalyst)**

Температура, °C	Суммарная конверсия K, %	Селективность по C ₇ –C ₁₈	Выход фракции на пропущенный гексен-1, % масс.						
			C ₂ –C ₅	C ₇ –C ₁₀	C ₁₁ –C ₁₈				
110	11,0	70,0	3,3	7,7	–				
120	64,9	69,9	14,3	43,9	1,5				
130	39,3	76,1	9,4	23,6	6,3				
160	41,4	41,0	24,6	13,5	3,5				
Состав полученного продукта, % масс.									
Температура, °C	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁ –C ₁₈
110	15,0	9,0	6,0	–	–	6,6	21,7	41,7	–
120	5,7	5,2	5,2	7,7	12,7	8,0	14,3	40,7	2,3
130	5,7	3,6	5,7	8,9	13,0	4,2	10,0	32,8	16,1
140	5,2	2,8	19,8	31,6	10,4	4,2	7,1	10,4	8,5

Наиболее высокая селективность образования углеводородов C_7 – C_{14} приходится на 130 °C. Дальнейший рост температуры приводит к значительному ее падению, и при 160 °C она составляет всего 41 %. При этом увеличивается выход газообразных продуктов C_2 – C_5 на пропущенный гексен-1, что позволяет предположить усиление реакций деструкции. Существенное влияние повышение температуры оказывает на состав полученного продукта.

Концентрация этилена и децена-5 уменьшается с повышением температуры. Суммарная концентрация продуктов кросс-метатезиса гексена-1, а именно пар C_3 – C_9 , C_4 – C_8 , C_5 – C_7 , с ростом темпе-

туры увеличивается. Вполне вероятно, что повышение температуры увеличивает скорость изомеризации гексена-1 в позиционные изомеры. Как показали исследования [3], при диспропорционировании смесей углеводородов скорость кросс-метатезиса значительно превышает скорость гомометатезиса-олефинов.

Кривые зависимости концентраций продуктов метатезиса гексена-1 от времени при различных температурах представлены на рис. 1, из которого видно, что содержание этилена и децена-5 проходит через максимум.

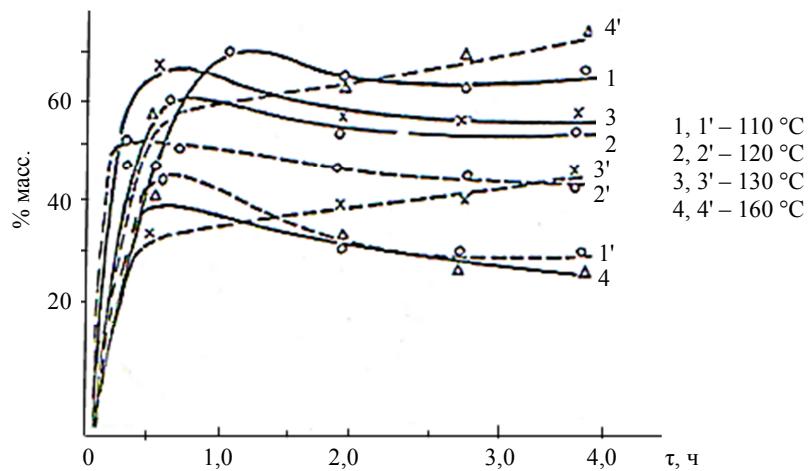


Рис. 1. Зависимость концентрации продуктов гомо- (сплошная линия) и кросс-метатезиса (пунктирная линия) гексена-1 от продолжительности реакции при различных температурах ($P = 0,7$ МПа, $V = 4,5$ ч⁻¹, алюмомолибденкалиевый катализатор)

Fig. 1. Dependence of the concentration of gmo products (solid line) and cross-metathesis (dotted line) of hexene-1 on the duration of the reaction at different temperatures ($P = 0,7$ MPa, $V = 4.5$ h⁻¹, aluminum-molybdenum-potassium catalyst)

При относительно низких температурах (110 °C) он достигается через 1 ч от начала эксперимента, а при более высоких температурах смещается до 30 мин. При температурах 130 и 160 °C содержание продуктов сометатезиса первые 30 мин не меняется, затем начинает линейно расти. При 110 и 120 °C первые 30 мин оно увеличивается, но затем наблюдается снижение. Через 2 ч содержание продуктов стабилизируется.

Этим стабилизированным отрезкам соответствуют также стационарные участки кривых гомометатезиса, на которых концентрация C_2 – C_{10} составляет 54–55 % при 120 °C и 64–65 % при 110 °C. Это говорит о наличии индукционного периода в работе катализатора, длительность которого увеличивается при снижении температуры реакции.

Известно, что в некоторых катализитических реакциях предварительный катализатор должен претерпеть преобразование с образованием активного

катализатора прежде, чем катализатор сможет по-действовать.

Таким образом, анализ полученных результатов показывает, что оптимальная температура процесса метатезиса гексена-1 в присутствии алюмомолибденкалиевого катализатора при массовой скорости по сырью 4,5 ч⁻¹ близка к 120 °C.

Влияние температуры на метатезис гексена-1 в присутствии алюмомолибденкалиевого катализатора, содержащего 0,5 % оксида калия, определяли в интервале 100–200 °C, давлении 0,7 МПа и массовой скорости по гексену-1 4,5 ч⁻¹.

При сопоставлении данных, приведенных на рис. 2, с результатами изучения влияния температуры на поведение алюмомолибденкалиевого катализатора видно, что характер кривых несколько изменился.

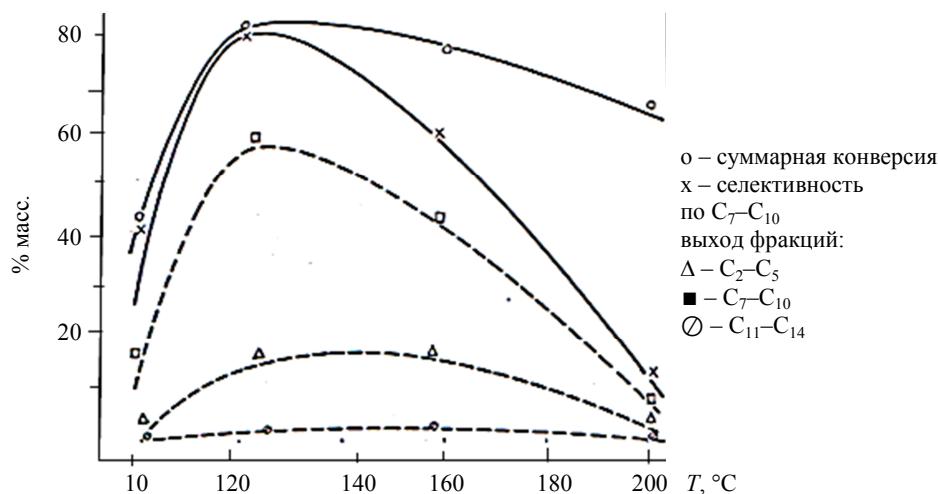


Рис. 2. Зависимость основных показателей процесса от температуры (катализатор АНМС) ($P = 0,7$ МПа, $V = 4,5$ ч⁻¹)

Fig. 2. The dependence of the main process parameters on temperature (ANMS catalyst) ($P = 0.7$ MPa, $V = 4.5$ h⁻¹)

При постановке исследования, прежде всего, необходимо было выбрать каталитические системы, которые позволили бы варьировать молекулярно-массовое распределение получаемых продуктов в зависимости от потребности в тех или иных алкенах.

Известно, что с целью повышения активности базовой каталитической системы в ее состав вводят модифицирующие добавки. Именно под влиянием модификаторов одни катализаторы работают лучше других. Так как модификаторы отличаются по своей природе от базовой каталитической системы, они и изменяют характер и соотношение продуктов метатезиса. Кроме того, при промотированном катализаторе может иметь место и синергетический эффект. Следует учитывать и время деактивации катализатора.

Для обоих катализаторов наилучшие показатели были получены при 120 °C. Однако дальнейшее повышение температуры в присутствии катализатора АНМС не вызывает столь резкого падения конверсии, которое наблюдалось для Al-Mo катализатора. Можно предположить, что дополнительное содержание оксида металла делает его более стойким к температурным воздействиям. Также следует учитывать и время его деактивации.

Выход фракции C₇–C₁₀ и селективность их образования значительно снижаются при температурах выше 120 °C.

В интервале температур 120–160 °C примерно вдвое увеличивается образование газообразных углеводородов. Выше 160 °C концентрация «легких» продуктов C₂–C₅ снижается. Вероятно, снижение показателей выше 160 °C связано с необратимой дезактивацией катализатора.

На рис. 3 показано как изменяется соотношение между выходами продуктов гомо- и кросс-метатезиса при изменении относительного содержания изомеров гексена-1 во фракции C₆.

Как видно, уменьшение содержания «внутренних» изомеров гексена при снижении температуры реакции от 200 до 100 °C приводит к увеличению концентрации продуктов гомо-метатезиса. При повышении температуры, наоборот, растет относительное содержание продуктов кросс-метатезиса.

Можно предположить, что с ростом температуры скорости реакции изомеризации и сометатезиса изомеров гексена растут быстрее, чем скорость гомо-метатезиса гексена-1.

Таким образом, проведенные исследования показали, что оптимальная температура реакции метатезиса гексена-1 как в присутствии алюмомолибденкалиевого, так и в присутствии алюмоникельмолибденосиликатного катализатора близка к 120 °C. Однако катализатор АНМС обладает большей термической стабильностью. Поэтому в промышленности процесс целесообразнее проводить в присутствии алюмоникельмолибденосиликатного катализатора.

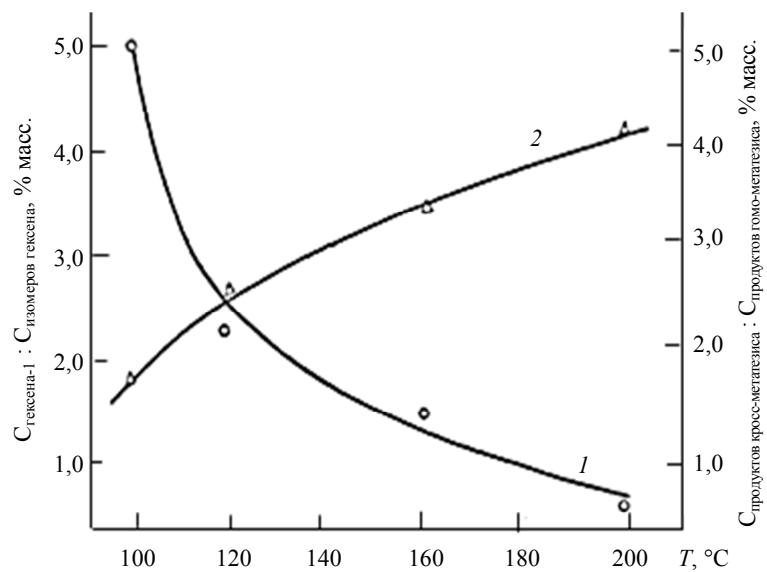


Рис. 3. Зависимость основных показателей процесса от температуры (катализатор АНМС):

1 – массовое отношение концентрации гексена-1 к его изомерам;

2 – массовое отношение концентрации продуктов кросс-метатезиса к гомо-метатезису ($P = 0,7 \text{ МПа}$, $V = 4,5 \text{ ч}^{-1}$)

Fig. 3. The dependence of the main process parameters on temperature (ANMS catalyst):

1 – is the mass ratio of hexene-1 concentration to its isomers;

2 – is the mass ratio of the concentration of cross-metathesis products to homo-metathesis ($P = 0.7 \text{ MPa}$, $V = 4.5 \text{ h}^{-1}$)

Рассмотрим зависимость показателей процесса метатезиса гексена-1 от массовой скорости по сырью. Влияние массовой скорости на диспропорционирование гексена-1 изучалось в интервале $2,5\text{--}8 \text{ ч}^{-1}$ при температуре $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении $0,7 \text{ МПа}$ в присутствии алюмомолибденкалиевого катализатора.

При исследовании влияния массовой скорости на диспропорционирование гексена-1 показано, что в изученных условиях ($P = 0,7 \text{ МПа}$, $T = 120 \text{ }^{\circ}\text{C}$) оптимальные скорости близки к $4,5 \text{ ч}^{-1}$.

Из таблицы видно, что в этих условиях конверсия составила 64,9 % при селективности образования углеводородов $C_7\text{--}C_{10}$ – 69,9 %.

Повышение массовой скорости подачи сырья и, соответственно, уменьшение времени контакта привело к снижению суммарной конверсии, селективность же практически не изменилась. Наоборот, уменьшение массовой скорости привело к росту селективности по $C_7\text{--}C_{18}$.

Обращает на себя внимание резкое падение конверсии гексена-1 при уменьшении массовой скорости подачи сырья от $3,5$ до $2,5 \text{ ч}^{-1}$. До настоящего времени не найдено удовлетворительного объяснения такой аномалии в поведении катализа-

торов метатезиса. По-видимому, это связано с явлениями массопереноса.

Образование углеводородов выше C_{11} наблюдалось при массовой скорости $4,5 \text{ ч}^{-1}$, выше и ниже этого значения указанные углеводороды не были обнаружены в продуктах реакции.

Вероятно, при низких массовых скоростях протекают вторичные реакции диспропорционирования C_{11+} с легкими углеводородами с образованием $C_7\text{--}C_{10}$. При больших же массовых скоростях время контакта оказывается недостаточным для протекания вторичных реакций. Концентрация деценов во фракции $C_7\text{--}C_{10}$ растет с увеличением массовой скорости подачи гексена-1, достигая 60 % при $V = 4,5 \text{ ч}^{-1}$, а затем снижается до 47 % при 8 ч^{-1} .

Для наглядности и легкого сравнения полученных результатов показана зависимость концентрации продуктов метатезиса гексена-1 от продолжительности процесса при массовых скоростях подачи сырья в пределах $2,5\text{--}8 \text{ ч}^{-1}$. Зависимость концентрации продуктов от продолжительности реакции при различных массовых скоростях показана на рис. 4.

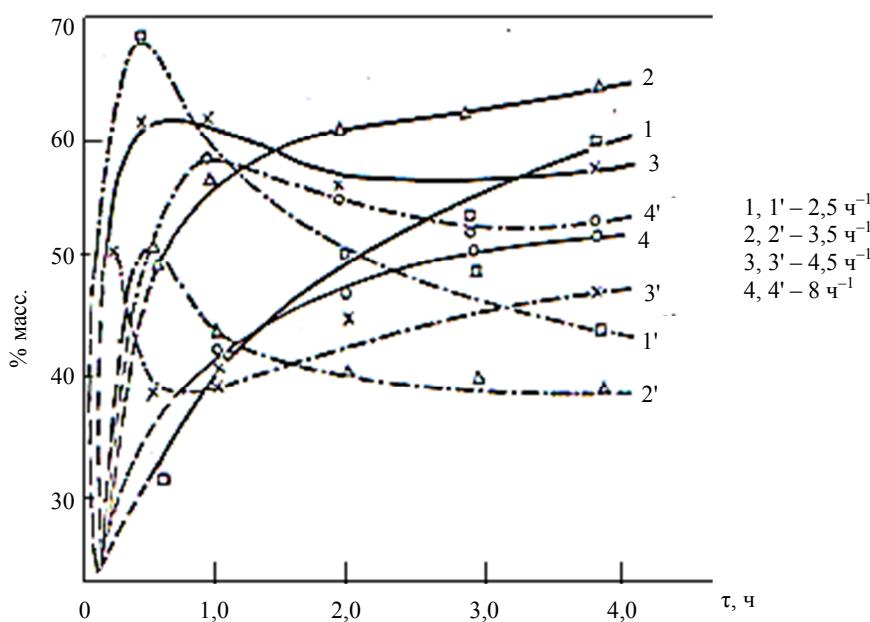


Рис. 4. Зависимость концентрации продуктов гомо- (сплошная линия) и кросс-метатезиса (пунктирная линия) гексена-1 от продолжительности реакции при различных массовых скоростях ($P = 0,7$ МПа, $T = 120$ °С, алюмомолибденкалиевый катализатор)

Fig. 4. Dependence of the concentration of gmo products (solid line) and cross-metathesis (dotted line) of hexene-1 on the reaction duration at various mass rates ($P = 0.7$ MPa, $T = 120$ °C, aluminum-molybdenum-potassium catalyst)

Как видно из рис. 4, при массовой скорости $2,5\text{--}3,5$ и 8 ч^{-1} концентрация продуктов гомо-метатезиса плавно растет с увеличением длительности работы алюмомолибденкалиевого катализатора. Через 30 мин после начала опыта при 120 °С концентрации продуктов гомо-метатезиса достигают своего максимального значения.

Изменение концентрации продуктов сометатезиса гексена-1 с его изомерами также проходит через максимум при 30 мин (массовые скорости $2,5\text{--}3,5\text{ ч}^{-1}$).

При уменьшении времени контакта (увеличение массовой скорости до 8 ч^{-1}) максимум концентрации продуктов кросс-метатезиса достигается через 1 ч. При массовой скорости $4,5\text{ ч}^{-1}$ точка смещается к 15 мин, а через 2 ч от начала работы катализатора концентрация продуктов как гомо-, так и кросс-метатезиса стабилизируется.

Следует отметить, что в статье основное внимание уделено изучению зависимости показателей процесса от температуры реакции и массовой скорости подачи сырья. Выбор оптимальных условий определен лишь на основе результатов эксперимента (а не на основе математической модели), т. е. исследована зависимость показателей процес-

са от температуры реакции и массовой скорости по сырью. Следовательно, оптимальными условиями процесса являются: температура $120\text{--}130$ °С, массовая скорость подачи сырья $4\text{--}4,5\text{ ч}^{-1}$, давление $0,7\text{--}1,0$ МПа.

Заключение

Исследована зависимость показателей процесса метасинтеза гексена-1 от температуры реакции и массовой скорости по сырью. Выявлено влияние основных технологических факторов на показатели процесса получения высших линейных олефинов метатезисом гексена-1 в присутствии алюмомолибденкалиевого и алюмникельмолибденсиликатного катализаторов.

Проведенные исследования показали, что оптимальная температура реакции метатезиса гексена как в присутствии алюмомолибденкалиевого, так и в присутствии алюмникельмолибденсиликатного катализатора близка к 120 °С. Выбраны оптимальные условия процесса: температура $120\text{--}130$ °С, массовая скорость подачи сырья $4\text{--}4,5\text{ ч}^{-1}$, давление $0,7\text{--}1,0$ МПа. При этом суммарная конверсия гексена-1 в олефины составляет около 65 % при селективности, близкой к 70 %.

Список источников

1. Харлампий Х. Э., Черкунов Э. В., Плакунов Т. К. Ефанова Э. А. Лаптев Т. Ю. Синтез и применение продуктов на основе высших олефинов // Рос. хим. журн. 2009. Т. 53, № 2. С. 142–150.
2. Кашковский В. М., Григорьев А. А. Метатезис олефинов прошлое, настоящее, будущее // Катализ и нефтехимия. 2006. № 14. С. 1–10.
3. Engelhard J., Golvaseer J., Hall W. L. A trace study of the metathesis of simple olefins over molybdenum – aluminoscatalysts // Journal of Catalysis. 1981. Vol. 70, N. 2. P. 364–374.
4. Финкельштейн Е. Ш., Грингольц М. Л. Олефиновый метатезис и родственные реакции в синтезе новых полимерных материалов // Высокомолекулярные соединения. Сер. С. 2019. Т. 61, № 1. С. 3.
5. Rouhi A. M. Olefin metathesis: the early days // Chemical and Engineering News. 2002. Vol. 80, N. 51. P. 34–38.
6. Rouhi A. M. Olefin metathesis: big-deal reaction // Chemical and Engineering News. 2002. Vol. 80, N. 51. P. 29–33.
7. Moll J. C. Industrial application of olefin metathesis // Journal of Molecular Catalysis A: Chemical. 2004. Vol. 213. P. 39–45.
8. Кумадин П. А., Полянский К. Б., Антонов А. С., Алексеев К. А., Зубков Ф. И. Синтез стабильных, высокоэффективных рутениевых катализаторов реакции метатезиса олефинов с координационными связями N-Ru в шестичленном цикле // Актуальные вопросы органической химии и биотехнологии: материалы очных докл. международ. науч. конф. (Екатеринбург, 18–21 ноября 2020 г.). Екатеринбург: АМБ, 2020. С. 226–228.
9. Klemmer L., Thommes A., Zimmer M., Scheschewitz D. Metathesis of Ge=Ge double bonds // Nature Chemistry. 2021. Vol. 13 (4). P. 373–377.
10. Такебаяши С., Айрон М., Мильштейн Д. Катализируемая железом метатезисная полимеризация олефинов с раскрытием кольца и механические исследования // Природ. катализ. 2022. № 5. С. 194–502.
11. Бабаев Р. К. Исследование кинетики и механизма реакции метатезиса изобутилена в паровой фазе в присутствии промышленного кремневольфрамового катализатора // Universum: технические науки. 2017. № 11 (44). URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/5268> (дата обращения: 23.04.2023).
12. Derun Hua, Zheng Zhou, Qianqian Hua, Jian Li, Xinning Lu, Yongrong Xie, Hong Xiao, Mei Li, Jin Yang. Transformation of 2-Butene into Propene on WO₃/MCM-48: Metathesis and Isomerization of n-Butene // Catalysts. 2018. Vol. 5 (12). P. 585. <https://doi.org/10.3390/cata18120585>.
13. Otroshchenko T., Zhang Q., Kondratenko E. V. Room-Temperature Metathesis of Ethylene with 2-Butene to Propene Over MoO_x-Based Catalysts: Mixed Oxides as Perspective Support Materials // Catalysis Letters. 2022. Vol. 152. P. 2366–2374.
14. Mol J. C. Application of olefin metathesis on oleo chemistry: an example of green chemistry // Green Chemistry. 2002. Vol. 4. P. 5–13.
15. Брейтер Ю. Л., Жовнер Т. П., Пелина С. В. Исследование эффективности катализаторов при производстве пропилена методом метатезиса // Нефтепереработка и нефтехимия. 2008. № 7. С. 31–33.
16. Лоренгель В. С., Брейтер Ю. Л. Анализ состояния разработок катализаторов по получению мономеров методом метатезиса // Международ. журн. эксперимент. образования. 2010. № 8. С. 150–153.
17. Быков В. И., Беляев Б. А., Бутенко Т. А., Финкельштейн Е. Ш. Катализитические системы метатезиса олефинов на основе галогенидов молибдена и кремнийорганических соединений // Нефтехимия. 2016. Т. 56, № 2. С. 140–143.

References

1. Harlampii H. Je., Cherkunov Je. V., Plaskunov T. K. Efanova Je. A. Laptev T. Ju. Sintez i primenenie produktov na osnove vysshih olefinov [Synthesis and application of products based on higher olefins]. Rossijskij himicheskij zhurnal, 2009, vol. 53, no. 2, pp. 142–150.
2. Kashkovskij V. M., Grigor'ev A. A. Metatezis olefinov proshloe, nastojashhee, budushhee [Olefin metathesis past, present, and future]. Kataliz i neftehimija, 2006, no. 14, pp. 1–10.
3. Engelhard J., Golvaseer J., Hall W. L. A trace study of the metathesis of simple olefins over molybdenum – aluminoscatalysts. Journal of Catalysis, 1981, vol. 70, no. 2, pp. 364–374.
4. Finkel'shtejn E. Sh., Gringol'c M. L. Olefinovyj metatezis i rodstvennye reakcii v sinteze novyh polimernyh materialov [Olefin metathesis and related reactions in the synthesis of new polymer materials]. Vysokomolekuljarnye soedinenija. Serija S, 2019, vol. 61, no. 1, p. 3.
5. Rouhi A. M. Olefin metathesis: the early days. Chemical and Engineering News, 2002, vol. 80, no. 51, pp. 34–38.
6. Rouhi A. M. Olefin metathesis: big-deal reaction. Chemical and Engineering News, 2002, vol. 80, no. 51, pp. 29–33.
7. Moll J. C. Industrial application of olefin metathesis. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 2004, vol. 213, pp. 39–45.
8. Kumadin P. A., Poljanskij K. B., Antonov A. S., Alekseev K. A., Zubkov F. I. Sintez stabil'nyh, vysokojeffektivnyh rutenievyh katalizatorov reakcii metatezisa olefinov s koordinacionnymi svyazami N-Ru v shestichlennom cikle [Synthesis of stable, highly efficient ruthenium catalysts for the olefin metathesis reaction with N-Ru coordination bonds in a six-membered cycle]. Aktual'nye voprosy organicheskoy himii i biotekhnologii: materialy ochnyh dokladov mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii (Ekaterinburg, 18–21 nojabrja 2020 g.). Ekaterinburg, AMB Publ., 2020. Pp. 226–228.
9. Klemmer L., Thommes A., Zimmer M., Scheschewitz D. Metathesis of Ge=Ge double bonds. Nature Chemistry, 2021, vol. 13 (4), pp. 373–377.
10. Takebajashi S., Ajron M., Mil'shtejn D. Kataliziruemaja zhelezom metatezisnaja polimerizacija olefinov s raskrytiem kol'co i mehanicheskie issledovaniya [Iron-catalyzed metathesis polymerization of olefins with ring opening and mechanical studies]. Prirodnyj kataliz, 2022, no. 5, pp. 194–502.
11. Babaev R. K. Issledovanie kinetiki i mehanizma reakcii metatezisa izobutylene v parovoj faze v prisutstvii promyshlennogo kremnevolyframovogo katalizatora [Investigation of the kinetics and mechanism of the isobutylene metathesis reaction in the vapor phase in the presence of an industrial silica-tungsten catalyst]. Universum: tehnicheskie nauki, 2017,

no. 11 (44). Available at: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/5268> (accessed: 23.04.2023).

12. Derun Hua, Zheng Zhou, Qianqian Hua, Jian Li, Xinning Lu, Yongrong Xie, Hong Xiao, Mei Li, Jin Yang. Transformation of 2-Butene into Propene on WO₃/MCM-48: Metathesis and Isomerization of n-Butene. *Catalysts*, 2018, vol. 5 (12), p. 585. <https://doi.Org/10.3390/cata 18120585>.

13. Otroshchenko T., Zhang Q., Kondratenko E. V. Room-Temperature Metathesis of Ethylene with 2-Butene to Propene Over MoO_x-Based Catalysts: Mixed Oxides as Perspective Support Materials. *Catalysis Letters*, 2022, vol. 152, pp. 2366-2374.

14. Mol J. C. Application of olefin metathesis on oleo chemistry: an example of green chemistry. *Green Chemistry*, 2002, vol. 4, pp. 5-13.

15. Brejter Ju. L., Zhovner T. P., Pelina S. V. Issledovanie jeffektivnosti katalizatorov pri proizvodstve propilena

metodom metatezisa [Investigation of the effectiveness of catalysts in the production of propylene by metathesis]. *Neftepererabotka i neftehimija*, 2008, no. 7, pp. 31-33.

16. Lorengel' V. S., Brejter Ju. L. Analiz sostojanija razrabotok katalizatorov po polucheniju monomerov metodom metatezisa [Analysis of the state of development of catalysts for the production of monomers by metathesis]. *Mezhdunarodnyj zhurnal jeksperimental'nogo obrazovanija*, 2010, no. 8, pp. 150-153.

17. Bykov V. I., Beljaev B. A., Butenko T. A., Finkel'shtejn E. Sh. Kataliticheskie sistemy metatezisa olefinov na osnove galogenidov molibdena i kremnijor-ganicheskikh soedinenij [Catalytic systems of olefin metathesis based on molybdenum halides and organosilicon compounds]. *Neftehimija*, 2016, vol. 56, no. 2, pp. 140-143.

Статья поступила в редакцию 23.09.2025; одобрена после рецензирования 24.03.2025; принятa к публикации 03.06.2025

The article was submitted 23.09.2024; approved after reviewing 24.03.2024; accepted for publication 03.06.2025

Информация об авторах / Information about the authors

Рауф Камил оглы Бабаев – кандидат технических наук; доцент кафедры нефтехимических технологий и промышленной экологии; Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности; babayevrauf59@mail.ru

Rauf K. Babayev – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Petrochemical Technologies and Industrial Ecology; Azerbaijan State Oil and Industry University; babayevrauf59@mail.ru

Солтан Аскерали оглы Алиев – кандидат химических наук; доцент кафедры нефтехимических технологий и промышленной экологии; Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности; soltlena@gmail.com

Soltan A. Aliyev – Candidate of Chemical Sciences; Assistant Professor of the Department of Petrochemical Technologies and Industrial Ecology; Azerbaijan State Oil and Industry University; soltlena@gmail.com

Севиндж Низами кызы Гулиева – кандидат технических наук; доцент кафедры нефтехимических технологий и промышленной экологии; Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности; raoztun@mail.ru

Sevindzh N. Guliyeva – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Petrochemical Technologies and Industrial Ecology; Azerbaijan State Oil and Industry University; raoztun@mail.ru

