

УДК: 544.473

<https://doi.org/10.24412/2310-8266-2022-1-2-15-18>

Дискуссионные проблемы инициированного катализа

Талышинский Р.М., Будняк А.Д., Беденко С.П., Третьяков В.Ф.

Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, 119991, Москва, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3178-6440>, E-mail: talyshinsky@list.ruORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5536-0447>, E-mail: budnyak@ips.ac.ruORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8926-0818>, E-mail: bedenko@ips.ac.ru

Резюме: Рассмотрена история развития классических представлений о катализе и намечены пути развития феноменологических основ инициированного катализа. Отмечено принципиальное различие индуктора и инициатора в катализе. Каталитическую систему в общем случае предложено представить как волновой термодинамический резонатор первого или второго рода.

Ключевые слова: катализ, резонанс, индуктор, инициатор.

Для цитирования: Талышинский Р.М., Будняк А.Д., Беденко С.П., Третьяков В.Ф. Дискуссионные проблемы инициированного катализа // НефтеГазоХимия. 2022. № 1-2. С. 15–18.

DOI: [10.24412/2310-8266-2022-1-2-15-18](https://doi.org/10.24412/2310-8266-2022-1-2-15-18)

Благодарность: Работа выполнена в соответствии с государственным заданием ИНХС РАН.

DISCUSSION PROBLEMS OF INITIATED CATALYSIS

Rashid M. Talyshinskiy, Alexey D. Budnyak, Stanislav P. Bedenko, Valentin F. Tretyakov

A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis of the RAS, 119991, Moscow, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3178-6440>, E-mail: talyshinsky@list.ruORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5536-0447>, E-mail: budnyak@ips.ac.ruORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8926-0818>, E-mail: bedenko@ips.ac.ru

Abstract: The history of the development of the classical understanding of catalysis is considered and the development of initiated catalysis is planned. The principal difference between the inductor and the initiator in catalysis was noted. The catalyst system is generally proposed to be represented as a wave thermocatalytic resonator of the first or second kind.

Keywords: catalysis, resonance, inductor, initiator.

For citation: Talyshinskiy R.M., Budnyak A.D., Bedenko S.P., Tretyakov V.F. DISCUSSION PROBLEMS OF INITIATED CATALYSIS. Oil & Gas Chemistry. 2022, no. 1-2, pp. 15–18.

DOI: [10.24412/2310-8266-2022-1-2-15-18](https://doi.org/10.24412/2310-8266-2022-1-2-15-18)

Acknowledgments: The work was carried out in accordance with the State Task of the IPS RAS.

Исторические аспекты эволюции представлений о катализе

Термин «катализ» впервые введен в XVI веке химиком А. Либавиусом в его учебнике «Алхимия» и имел значение «разложение» или «разрушение» [1]. В 1835 году этот термин был узаконен И. Берцелиусом для реакций, протекающих в присутствии посторонних соединений, которые сами как будто в реакции не участвуют. Точнее, Берцелиус писал о некоторой сакральной каталитической силе, приводящей к разложению тел. Примерно в то же время Э. Митчерлих ввел термин «контактное действие». На самом деле даже «небиологический», то есть ферментативный катализ как явление был известен задолго до Либавиуса и тем более Берцелиуса. Первый известный нам пример небиологического каталитического процесса – это синтез диэтилового эфира из спирта при участии серной кислоты (VIII век, Джабир ибн Хайям) [2].

Научные представления о катализе возникли одновременно с развитием атомной теории строения вещества. В 1806 году, через год после того, как один из создателей современной атомистической теории Д. Дальтон сформулировал в Записках Манчестерского литературного и философского общества закон кратных отношений, Н. Клеман и Ш. Дезорм опубликовали подробные данные об ускорении процесса окисления сернистого газа в присутствии окислов азота при камерном производстве серной кислоты [3]. Шесть лет спустя в Технологическом журнале Г. Кирхгоф изложил результаты своих наблюдений об ускоряющем действии разбавленных минеральных кислот на гидролиз крахмала до глюкозы. Этими двумя наблюдениями была открыта эпоха экспериментального изучения необычных для того времени химических явлений, которым шведский химик Берцелиус дал в 1835 году общее название «катализ» от греческого слова «катало» – разрушать. Такова в двух словах история открытия катализа, который с полным основанием следует отнести к одному из фундаментальных явлений природы. В современном восприятии катализа разрушение ассоциируется с разрыхлением в области переходного состояния в активированном комплексе.

Катализ – универсальное и очень разнообразное явление, широко распространенное в природе и используемое человечеством за тысячи лет до осознания сути каталитических процессов.

Наилучшим примером служит ферментативный катализ. Люди используют биологические катализаторы – ферменты – тысячи лет в процессах брожения (для приготовления, например, молочнокислых продуктов).

Формирование мнения о природе катализа в течение последних четырех веков эволюционировало следующим образом [4].

И. Берцелиус (1837): «Известные вещества оказывают при соприкосновении с другими веществами такое влияние на последние, что возникает химическое действие: одни вещества разрушаются, другие образуются вновь без того, чтобы тело, присутствие которого вызывает эти превращения, принимало в них какое-либо участие. Мы называем причину, вызывающую эти явления, каталитической силой». Однако если есть сила, то есть и работа, совершаемая этой силой. М. Фарадей попытался убрать это противоречие своим определением катализа.

М. Фарадей (1840): «Каталитические явления можно объяснить известными свойствами материи, не снабжая ее при этом никакой новой силой». Это положило начало дискуссии о понимании катализа как явления природы.

П. Рашиг (1906): «Катализ представляет вызываемое внешними причинами изменение строения молекулы, имеющее следствием изменение химических свойств».

Э. Абель (1913): «Я пришел к выводу, что катализ осуществляется в результате реакции, а не простого присутствия вещества».

В. Оствальд: «Катализатор – это такое соединение, которое ускоряет химическую реакцию, не влияя на положение равновесия».

П. Сабатье: «Катализатор – вещество или система, которая изменяет скорость реакции, участвуя в последовательности стадий, но не превращаясь в продукты».

Наиболее строгое определение сформулировано в прошлом веке Г.К. Боресковым [5]: «Феноменологически катализ – это возбуждение химических реакций или изменение их скорости под влиянием веществ – катализаторов, многократно вступающих в промежуточное химическое взаимодействие с участниками реакции и восстанавливающих после каждого цикла промежуточных взаимодействий свой состав».

Самое необычное для своего времени в этом определении была его заключительная часть – вещество, ускоряющее химический процесс, не расходуется. Если нужно ускорить движение тяжелого тела, его подталкивают и, следовательно, затрачивают на это энергию. Чем больше потрачено энергии, тем большую скорость приобретает тело. В идеальном случае количество затраченной энергии будет точно равно приобретенной телом кинетической энергии. В этом проявляется фундаментальный закон природы – сохранение энергии. Обратим внимание на тот факт, который до сих пор исследователями игнорировался по традиции и по умолчанию: в открытой системе катализатору через печь, в которую устанавливается реактор, подводится энергия. Отсюда следует возможность восполнения некоторой потерянной энергии реального катализатора путем подвода ее извне. Следовательно, имеет смысл пересмотреть собственно определение катализа в условиях открытой системы. Возможно, следует говорить о «термокатализаторе», также совершающем работу подобно каталитической системе, которой было дано определение выше. Но в этом случае требуется развитие традиционной феноменологии, поскольку наука подвергается довольно жесткой ревизии, которую прогнозировал Н.Н. Семенов в теории цепных превращений на поверхности гетерогенных катализаторов, когда говорил о приближенности закона Аррениуса. В итоге мы действительно в результате получаем неизменной массу катализатора в ходе процесса, но это не означает, что обмен энергии с ним реакционной среды отсутствует. Таким образом, мы получаем материальный баланс по катализатору $0=0$ и энергетический баланс по реакционной системе, включающей катализатор, предполагающий подвод энергии извне в открытой системе.

Определение Г.К. Борескова включает два существенных момента: катализатор входит в состав промежуточных соединений, но не фигурирует в стехиометрическом уравнении основной реакции и, следовательно, не смещает равновесие основной реакции и не расходуется в ней. Катализатор за счет участия в образовании интермедиатов обеспечивает протекание реакции по другому пути, имеющему более низкую наблюдаемую энергию активации и, значит, более высокую скорость превращения реагентов в продукты.

Химический (небиологический) катализ принято делить на гомогенный и гетерогенный. Гомогенный катализ – это такой процесс, протекающий в одной фазе, в которой находятся реагенты и катализатор. Гетерогенный катализ – это процесс, в котором катализатор – твердое вещество, а реагенты могут быть жидкими или газообразными. С участием гомогенных катализаторов протекают гомогенно-каталитические процессы, а с участием гетерогенных – гетерогенно-каталитические процессы. Эту классификацию нельзя путать с классификацией реакционных систем по фазности (гомофазные – одна фаза, гетерофазные – несколько фаз и есть границы раздела фаз). Системы, в которых протекают гомогенно-каталитические процессы, могут быть как гомофазными, так и гетерофазными.

Г.К. Боресков в 1968 году отмечал [5]: «Когда-то катализ рассматривался как особое, немного таинственное явление со специфическими законами, раскрытие которых должно было сразу в общей форме решить задачу подбора. Сейчас мы знаем, что это не так. Катализ по своей сущности – химическое явление. Изменение скорости реакции при каталитическом воздействии обусловлено промежуточным химическим взаимодействием реагирующих веществ с катализатором».

Если не принимать во внимание неудачную попытку Берцелиуса связать наблюдаемые явления с действием скрытой «каталитической силы», то, как можно заметить из приведенных выступлений, дискуссия шла в основном вокруг физических и химических аспектов катализа. Длительное время особенно популярной была энергетическая теория катализа [6], связывающая процесс возбуждения молекул с резонансной миграцией энергии.

Катализатор вступает во взаимодействие с реагирующими молекулами, образуя неустойчивые промежуточные соединения, которые распадаются с выделением продукта реакции и химически неизменного катализатора. Здесь, однако, возникает вопрос: а не может ли катализатор, поскольку он сам химически участвует в реакции, создать новое равновесное состояние, сместив равновесие в ту или иную сторону? Если бы это было так, то идея о химическом участии катализатора немедленно вступала бы в противоречие с законом сохранения энергии. Чтобы избежать этого, учеными было решено принять, а затем и экспериментально доказать, что катализатор ускоряет реакцию в прямом и обратном направлениях. Те же соединения, которые изменяют и скорость, и равновесие реакции, в строгом смысле этого слова не являются катализаторами. Но это уже каталитическая система, включающая индуктор или инициатор [7].

Развитие современных представлений о катализе

В теории катализа возможны две концепции: классическая и альтернативная. Согласно классической концепции, каталитическая система представляет собой идеальный катализатор, который не совершает работы, а ускорение реакции достигается за счет быстрого достижения химического равновесия по маршруту реакции. В альтернативной концепции можно утверждать, что любой химический маршрут состоит из нескольких стадий, каждая из которых обладает своим энергетическим барьером, причем барьеры с термодинамических позиций обладают аддитивным свойством: сумма барьеров стадий равна барьеру маршрута. При этом можно полагать, что ускорение реакции достигается сдвигом термодинамического равновесия в определяющей стадии механизма (в классике ее называют медленной). Из этой концепции следует, что катали-

тическая система, включающая наряду с катализатором в своем составе инициатор, не снижает в целом барьер маршрута, а все каталитическое действие, отражаемое снижением энергии активации или увеличением фактора «соударений» (точнее, взаимодействий), сводится к иницированию определяющей стадии. Иницирование, как предполагается, осуществляется индукционным механизмом за счет резонанса энергий колебаний молекул актора и инициатора, что укладывается в представления Е.А. Шиловой и Н.Н. Семенова [8, 9]. Эта концепция согласуется с работой [10] и рядом положений, выдвинутых в [11]. О праве на существовании альтернативной концепции катализа свидетельствует, кроме того, ряд работ [12–15] по влиянию СВЧ на медленные стадии, а также работы в области фотохимических реакций [16].

Из рассуждений, приведенных в работе Л.Г. Брука и О.Н. Темкина [17], следует, что кинетическое сопряжение сводится к пустому маршруту, который не описывается реальными стехиометрическими коэффициентами превращения веществ участников реакции, но отражает стехиометрию внутренних маршрутов преобразования интермедиатов каталитической системы. Таким образом, инициатор формирует каталитические центры, ускоряющие целевую химическую реакцию.

Теория Т.М. Нагиева [11] ограничена рассмотрением кинетического сопряжения в рамках воздействия индуктора на основе классической теории Е.А. Шиловой [8]. Это в ряде случаев связано с термодинамическим сопряжением подобно тому, как смещается равновесие в окислительном дегидрировании. Отсюда возникает формальный повод для критики Нагиева Темкиным в рамках концепции иницированного катализа.

Когда же мы переходим к химическому иницированию, а не к термодинамической индукции, то независимо от степени разветвленности цепного процесса первичной реакции достигается влияние пустого маршрута, обеспечивающего резкое синхронное увеличение активных центров, ответственных за протекание целевой реакции, которое мы определяем как динамический компенсационный эффект [18]. По сути, в ходе кинетического сопряжения иницированный каталитический процесс протекает за счет резонанса и проявляется как «автокаталитический» [19–27].

В итоге необходимо четко разделить понятия «индуктор» и «инициатор», что не сделано ни в одной из известных работ, включая известные работы К.И. Замараева [28].

Следует отметить, что уже в работах Н.Н. Семенова по цепным реакциям были намечены пути для ревизии представлений о катализе. Но он и его школа не успели завершить концептуальную работу в этом направлении.

Преимущество альтернативной концепции катализа заключается в том, что она не нуждается в ряде абстрактных допущений об «активных столкновениях», которые, по сути, маловероятны в силу известных причин, а наличие противоречий в области исследования так называемых кинетических компенсационных эффектов в катализе за-

ставляет задумываться исследователей о вырожденности псевдостационарного определения процесса. Переход же от кинетики к динамике подвергает ревизии всю классическую науку о «переходном состоянии».

К сожалению, строгого доказательства альтернативной концепции сегодня мы не имеем из-за известных ограничений в инструментальных методах исследования, но логически рассмотренный взгляд имеет право на существование.

Ранее [7] мы давали следующее определение катализатору: это электронный посредник, организующий наиболее эффективные и селективные каналы превращений реагентов и перемещение энергии в каталитической системе, состоящей из собственно катализатора и реакционной среды, содержащей в общем случае инициатор или индуктор. Инициатор обеспечивает прогрессивный резонанс между колебаниями активных центров и реагентов.

В результате воздействия инициатора в каталитической системе может снижаться энергетический барьер целевого превращения и ускоряться число актов резонанса. В этом определении каталитическая система – это катализатор, представляющий собой идеальный ускоритель достижения химического равновесия, но такой случай скорее всего является вырожденным, и в реальности его не существует ни среди ферментов, ни среди гетерогенно каталитических систем.

В целом катализ можно рассматривать как волновой термокаталитический резонанс. Поэтому в гетерогенном катализе следует говорить о сочетании внешнедиффузионного и внутрикинетического взаимовлияния на фоне резонанса энергий в системе.

Таким образом, катализатор наглядно представляется как волновой термокаталитический резонатор первого рода. А волновой термокаталитический резонатор второго рода есть индуктор. Термодинамическая индукция отличается от химического иницирования стехиометричностью соотношений индуктора по отношению к реагирующим веществам. В случае инициатора его содержание в системе очень низко, в вырожденном случае имеет место идеальный катализатор. Индуктор вводится в стехиометрических количествах и участвует в материальном балансе превращения как реагент. Чаще это наблюдается в гомогенном и ферментативном катализах.

Классическая традиционная феноменология существенно тормозила развитие научно обоснованного подхода к прогнозированию природы каталитического действия, а синтез катализаторов оставался в сфере искусства. Альтернативная теория катализа обобщает все типы катализа, открывая новые горизонты для прогнозирования каталитической активности [29].

Каталитическая система в этом аспекте может быть определена как волновой термокаталитический резонатор первого или второго рода, который совершает работу по перемещению энергии в каталитической системе, ослабляя одни каналы механизма и усиливая другие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Libavius Andreas, *Alchemia*, Frankfurt, 1606, 852 p.
2. Матвиевская Г.П., Розенфельд Б.А. Джабир ибн Хайян. Математики и астрономы мусульманского Средневековья и их труды (VIII–XVII вв.) / Отв. ред. А.П. Юшкевич. Кн. 2. Математики и астрономы, время жизни которых известно. М.: Наука, 1983. С. 30. 650 с.
3. Фигуровский Н.А. Очерк общей истории химии. От древнейших времен до начала XIX в. М.: Наука, 1969. 260 с.
4. Штрубе В. Пути развития химии: в 2 т. Т. 2: пер. с нем. М.: Мир, 1984. 278 с.
5. Боресков Г.К. Катализ. Ч. I и II. Новосибирск: Наука, 1971. 267 с.
6. Швец В.Ф. Введение в химию каталитических реакций // Соросовский образовательный журнал, 1996. 40 с.
7. Максимов А.Л., Третьяков В.Ф., Талышинский Р.М. Развитие фундаментальных основ иницированного гетерогенного катализа // Нефтегазохимия. 2018. № 4. С. 34–38.
8. Шилов Евгений Алексеевич (1893–1970): Сер. «Золотой фонд Химтех».

- Иваново: ИГХТУ, 2010. 116 с.
- Семенов Н.Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности. М.: АН СССР, 1958. 346 с.
 - Козловцев В.А., Климова И.Ю., Навроцкий В.А. и др. Квантово-химический подход к выбору гетерогенного катализатора синтеза N-метиланилина // Бутлеровские сообщения. 2008. Т. 14. № 4. С. 38–45.
 - Нагиев Т.М. Сопряженные реакции в контексте современных идей. Монография. Баку, 2020. 208 с.
 - Muradova, P.A., Zulfugarova, S.M., Tret'yakov, V.F., Talyshinskiy R.M. & Litvishkov Yu.N. // Acid Properties of the Surface of Zn–B–P/g–Al₂O₃/Al Catalysts and Their Activity in Microwave-Stimulated Reaction of Diethylamine Acylation with m-Toluic Acid. // *Petroleum Chemistry*, 2017, 57, pp. 1081–1087. DOI: 10.1134/S096554411712009X.
 - Зульфугарова С.М., Аскеров А.Г., Гасангулиева Н.М. и др. // Новый метод исследования поверхностной кислотности гетерогенных катализаторов термодесорбцией аммиака под воздействием электромагнитного СВЧ-излучения // *Нефтегазохимия*. 2017. № 1. С. 54–58.
 - Мурадова П.А., Зульфугарова С.М. и др. О влиянии микроволновой активации воды на деалкилирование толуола с водяным паром в присутствии катализатора // *Нефтегазохимия*. 2016. № 3. С. 23–26.
 - Литвишков Ю.Н., Третьяков В.Ф., Тальшинский Р.М. и др. Микроволновое стимулирование реакции деалкилирования толуола с водяным паром в присутствии Al/Al₂O₃ катализатора // *Нефтехимия*. 2012. Т. 52. № 3. С. 211–214.
 - Сеттерфилд Ч. Практический курс гетерогенного катализа. М.: Мир, 1984. 520 с.
 - Брук Л.Г., Темкин О.Н. Сопряженные реакции: новые возможности старой идеи // *Кинетика и катализ*. 2016. Т. 57. № 3. С. 275–294.
 - Тальшинский Р.М., Гольмалиев Э.А., Третьяков В.Ф. и др. Наноразмерный динамический компенсационный эффект в гетерогенно-каталитическом процессе // *Нефтегазохимия*. 2016. № 1. С. 45–50.
 - Афанасьев В.А., Заиков Г.Е. В мире катализа М.: Наука, 1977. 107 с.
 - Баландин А.А. Мультиплетная теория катализа. М.: МГУ, 1970. 475 с.
 - Голодец Г.И. Гетерогенно-каталитическое окисление органических веществ. Киев: Наукова думка, 1978. 375 с.
 - Бремер Г., Вендландт К.П. Введение в гетерогенный катализ. М.: Мир, 1981. 160 с.
 - Крылов О.В. Избранные труды: Т. I. М.: МГУ, 1978. 422 с. Т. II. М.: МГУ, 1978. 396 с.
 - Баландин А.А., Рубинштейн А.М. Катализ. Исследование гетерогенных процессов. М.: Мир, 1956. 894 с.
 - Крылов О.В. Гетерогенный катализ. М.: Академкнига, 2004. 679 с.
 - Гейтс Б.К., Кетцир Дж., Шуйт Г. Химия каталитических процессов. М.: Мир, 1981. 552 с.
 - Ганкин В.Ю., Ганкин Ю.В. Новая общая теория катализа. Л., 1991. 88 с.
 - Замараев К.И. Химическая кинетика. Курс лекций: в 3 ч. Новосибирск: ИК СОРАН, 2003. 323 с.
 - Третьяков В.Ф., Тальшинский Р.М. Кинетика и динамика гетерогенных каталитических нефтехимических процессов. М.: МИТХТ, 2012. 190 с.

REFERENCES

- Libavius Andreas. *Alchemia*. Frankfurt, 1606. 852 p.
- Matviyevskaya G.P., Rozenfel'd B.A. Dzhahir ibn Khayyan. *Matematiki i astronomiya musul'manskogo Srednevekov'ya i ikh trudy (VIII–XVII vv.) Kn.2. Matematika i astronomiya, vremya zhizni kotorykh izvestno* [Mathematicians and astronomers of the Muslim Middle Ages and their works (VIII–XVII centuries). Book 2. Mathematicians and astronomers whose lifetime is known]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 650 p.
- Figurovskiy N.A. *Ocherk obshchey istorii khimii. Ot drevneyshikh vremen do nachala XIX v.* [Essay on the general history of chemistry. From ancient times to the beginning of the XIX century]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 260 p.
- Shtube V. *Puti razvitiya khimii* [Ways of development of chemistry]. Moscow, Mir Publ., 1984. 278 p.
- Boreskov G.K. *Kataliz. CH. I i II* [Catalysis. Parts I and II]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1971. 267 p.
- Shvets V.F. Introduction to the chemistry of catalytic reactions. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal*, 1996, 40 p. (In Russian.)
- Maksimov A.L., Tret'yakov V.F., Talyshinskiy R.M. Development of the fundamental foundations of initiated heterogeneous catalysis. *NeftGazoKhimiya*, 2018, no. 4, pp. 34–38 (In Russian).
- Shilov Yevgeniy Alekseyevich (1893–1970): Ser. «Zolotoy fond Khimte-kha» [Evgeniy Alekseyevich Shilov (1893–1970): Ser. “Golden Fund of Khimtekh”]. Ivanovo, IGKHTU Publ., 2010. 116 p.
- Semenov N.N. *O nekotorykh problemakh khimicheskoy kinetiki i reaktivnoy sposobnosti* [On some problems of chemical kinetics and reactivity]. Moscow, AN SSSR Publ., 1958. 346 p.
- Kozlovtssev V.A., Klimova I.YU., Navrotskiy V.A. Quantum-chemical approach to the choice of a heterogeneous catalyst for the synthesis of N-methylaniline. *Butlerovskiyee soobshcheniya*, 2008, vol. 14, no. 4, pp. 38–45 (In Russian).
- Nagiyev T.M. *Sopryazhennyye reaktsii v kontekste sovremennykh idey* [Conjugated reactions in the context of modern ideas]. Baku, 2020. 208 p.
- Muradova, P.A., Zulfugarova, S.M., Tret'yakov, V.F., Talyshinskiy R.M., Litvishkov YU.N. Acid properties of the surface of Zn–B–P/g–Al₂O₃/Al Catalysts and their activity in microwave-stimulated reaction of diethylamine acylation with m-toluic acid. *Petroleum Chemistry*, 2017, vol. 57, pp. 1081–1087. doi: 10.1134/S096554411712009X.
- Zulfugarova S.M., Askerov A.G., Gasanguliyeva N.M. A new method for studying the surface acidity of heterogeneous catalysts by thermal desorption of ammonia under the influence of electromagnetic microwave radiation. *NeftGazoKhimiya*, 2017, no. 1, pp. 54–58 (In Russian).
- Muradova P.A., Zulfugarova S.M. On the effect of microwave activation of water on the dealkylation of toluene with water vapor in the presence of a catalyst. *NeftGazoKhimiya*, 2016, no. 3, pp. 23–26 (In Russian).
- Litvishkov YU.N., Tret'yakov V.F., Talyshinskiy R.M. Microwave stimulation of the dealkylation of toluene with steam in the presence of Al/Al₂O₃ catalyst. *NeftGazoKhimiya*, 2012, vol. 52, no. 3, pp. 211–214 (In Russian).
- Setterfild CH. *Prakticheskiy kurs geterogennogo kataliza* [Practical course of heterogeneous catalysis]. Moscow, Mir Publ., 1984. 520 p.
- Bruk L.G., Temkin O.N. Conjugated reactions: new possibilities of an old idea. *Kinetika i kataliz*, 2016, vol. 57, no. 3, pp. 275–294 (In Russian).
- Talyshinskiy R.M., Gyl'maliyev E.A., Tret'yakov V.F. Nanoscale dynamic compensation effect in a heterogeneous catalytic process. *NeftGazoKhimiya*, 2016, no. 1, pp. 45–50 (In Russian).
- Afanasyev V.A., Zaikov G.YE. *V mire kataliza* [In the world of catalysis]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 107 p.
- Balandin A.A. *Mul'tipletnaya teoriya kataliza* [Multiplet theory of catalysis]. Moscow, MGU Publ., 1970. 475 p.
- Golodets G.I. *Geterogennno-kataliticheskoye okisleniye organicheskikh veshchestv* [Heterogeneous catalytic oxidation of organic substances]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1978. 375 p.
- Bremer G., Vendlandt K.P. *Vvedeniye v geterogennyy kataliz* [Introduction to heterogeneous catalysis]. Moscow, Mir Publ., 1981. 160 p.
- Kobozov N.I. *Izbrannyye trudy* [Selected works]. Vol. I. Moscow, MGU Publ., 1978. 422 p. Vol. II. Moscow, MGU Publ., 1978. 396 p.
- Balandin A.A., Rubinshteyn A.M. *Kataliz. Issledovaniye geterogennykh protsessov* [Catalysis. Study of heterogeneous processes]. Moscow, Mir Publ., 1956. 894 p.
- Krylov O.V. *Geterogennyy kataliz* [Heterogeneous catalysis]. Moscow, Akademkniga Publ., 2004. 679 p.
- Geyts B.K., Ketsir Dzh., Shuyt G. *Khimiya kataliticheskikh protsessov* [Chemistry of catalytic processes]. Moscow, Mir Publ., 1981. 552 p.
- Gankin V.YU., Gankin YU.V. *Novaya obshchaya teoriya kataliza* [New general theory of catalysis]. Leningrad, 1991. 88 p.
- Zamarayev K.I. *Khimicheskaya kinetika. Kurs lektsiy: v 3 ch.* [Chemical kinetics. Course of lectures: in 3 parts]. Novosibirsk, IK SORAN Publ., 2003. 323 p.
- Tret'yakov V.F., Talyshinskiy R.M. *Kinetika i dinamika geterogennykh kataliticheskikh neftekhimicheskikh protsessov* [Kinetics and dynamics of heterogeneous catalytic petrochemical processes]. Moscow, MITKHT Publ., 2012. 190 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Тальшинский Рашид Мусаевич, д.х.н., в.н.с., Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН.
Будняк Алексей Дмитриевич, н.с., Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН.
Беденко Станислав Павлович, н.с., Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН.

Rashid M. Talyshinskiy, Dr. Sci. (Chem.), Leading Researcher, A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis of the RAS.
Alexey D. Budnyak, Researcher, A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis of the RAS.
Stanislav P. Bedenko, Researcher, A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis of the RAS.