

# Водород как основа низкоуглеродной ЭКОНОМИКИ



Конференция

## СБОРНИК ТЕЗИСОВ

27.11 – 02.12

Шерегеш

Кемеровская область

Россия



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Федеральный исследовательский центр «Институт катализа им. Г.К. Борескова  
Сибирского отделения Российской академии наук»

Центр НТИ «Водород как основа низкоуглеродной экономики»

**Конференция Центра компетенций НТИ**  
**«Водород как основа низкоуглеродной экономики»**

*27 ноября – 2 декабря 2022 г.  
Шерегеш, Кемеровская область, Россия*

**Сборник тезисов**

Новосибирск -2022

УДК 544.47 + 662.769.2

ББК 24.54 + 35.115 + 24.120.11

B624

**B624 ВОДОРОД КАК ОСНОВА НИЗКОУГЛЕРОДНОЙ ЭКОНОМИКИ**  
конференция Центра компетенций НТИ, Сборник тезисов  
(27 ноября – 2 декабря 2022 г., Шерегеш, Кемеровская область, Россия)  
[Электронный ресурс] / под редакцией акад. РАН В.И. Бухтиярова,  
д.х.н. О.Н. Мартыанова, д.х.н. П.В. Снытникова  
– Новосибирск : Институт катализа СО РАН, 2022.

– ISBN 978-5-906376-46-6

– URL: <http://conf.nsc.ru/h2nti/ru>

В надзаг.:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Федеральный исследовательский центр «Институт катализа им. Г.К. Борескова  
Сибирского отделения Российской академии наук»

Центр НТИ «Водород как основа низкоуглеродной экономики»

Сборник включает тезисы устных докладов.

Основные темы научной программы конференции:

- Водородная заправка
- Биоводород для генерации электроэнергии
- Водород для E-химии и E-топлив
- Крупнотоннажный водород для низкоуглеродной экономики

В рамках конференции пройдет круглый стол «Научная инфраструктура и образование»

УДК 544.47 + 662.769.2

ББК 24.54 + 35.115 + 24.120.11

ISBN 978-5-906376-46-6

© Институт катализа СО РАН, 2022

## ОРГАНИЗАТОРЫ



**BIC Instruments**

Центр компетенций НТИ  
«ВОДОРОД КАК ОСНОВА НИЗКОУГЛЕРОДНОЙ ЭКОНОМИКИ»

ООО «БИК Инструментс»

## Члены консорциума Центра



Партнер конференции



Оператор программы  
государственной поддержки  
Центров НТИ

**ФОНД НТИ**

Конференция проходит  
под эгидой 300-летия  
Российской Академии Наук



## ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

### *Председатель:*

**Академик РАН**

**Валерий Иванович Бухтияров**

ФИЦ Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск

### *Заместители председателя:*

**д.х.н., профессор РАН**

**Олег Николаевич Мартьянов**

ФИЦ Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск

**д.х.н. Павел Валерьевич Снытников** ФИЦ Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск

### *Члены организационного комитета:*

**д.х.н., профессор РАН**

**Денис Владимирович Козлов**

ФИЦ Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск

**д.х.н., профессор РАН**

**Екатерина Александровна Козлова**

ФИЦ Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск

**д.х.н. Вадим Анатольевич Яковлев**

ФИЦ Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск

**к.х.н. Дмитрий Игоревич Потемкин**

ФИЦ Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск

**к.ф.-м.н. Бесов Алексей Сергеевич**

БИК Инструментс, Новосибирск

**Марина Валерьевна Верниковская**

ФИЦ Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск

**Анна Михайловна Ершова**

ФИЦ Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск

**Александра Романовна Иммен**

ФИЦ Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск

**Анастасия Станиславовна Аникина**

ФИЦ Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск

### *Секретариат*

**Марина Сергеевна Суворова**

ФИЦ Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск

**Светлана Сергеевна Логунова**

ФИЦ Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск

## УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ

Секция 1: Водородная заправка

УД-1.1 ÷ УД-1.18

Секция 2: Биоводород для генерации электроэнергии

УД-2.1 ÷ УД-2.11

Секция 3: Водород для E-химии и E-топлива

УД-3.1 ÷ УД-3.14

Секция 4: Крупнотоннажный водород для низкоуглеродной экономики

УД-4.1 ÷ УД-4.12



## УД-1.1

### Водородный потенциал Кузбасса. Технологии из угля и шахтного метана

Исмагилов З.Р.<sup>1,2</sup>, Матус Е.В.<sup>2</sup>, Исмагилов И.З.<sup>2</sup>, Тайлаков О.В.<sup>1</sup>, Адуев Б.П.<sup>1</sup>,  
Нурмухаметов Д.Р.<sup>1</sup>, Белокуров Г.М.<sup>1</sup>, Крафт Я.В.<sup>1</sup>, Федорова Н.И.<sup>1</sup>, Вотолин К.С.<sup>1</sup>

*1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,  
Кемерово, Россия*

*2 – Федеральный исследовательский центр  
«Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН», Новосибирск, Россия  
zinfer1@mail.ru*

Стратегией социально-экономического развития Кемеровской области - Кузбасса на долгосрочную перспективу определено повышение конкурентоспособности региона и рост на этой базе благосостояния его жителей.

При этом она предполагает решение нескольких ключевых задач, в том числе:

1. Развитие ресурсной базы региона.
2. Повышение глубины переработки добываемого сырья, его комплексное и эффективное использование.
3. Нарастивание потребления продукции региона на традиционных рынках, поддержка выхода на новые рынки.
4. Снятие инфраструктурных ограничений для развития базового сектора экономики области.
5. Развитие инновационных центров Кемеровской области.

Для достижения обозначенных целей утверждено **Стратегирование развития водородной энергетики Кузбасса**, включающее развитие уникального водородного потенциала Кузбасса как основного угольного бассейна России, а именно экономичное производство водорода из угля и шахтного метана, который принципиально отличается по составу от традиционных источников природного газа.

Список основных технологий водородной энергетики, разработка которых будет осуществляться в приоритетном порядке и которые будут доведены до промышленного внедрения силами ФИЦ УУХ СО РАН в кооперации с другими институтами СО РАН и РАН, а также с ведущими ВУЗами и индустриальными партнерами, включает получение водорода и энергетических смесей на его основе из ископаемого сырья – газификация угля и углеродсодержащих материалов, паровая конверсия и автотермический риформинг метана, парциальное окисление, пиролиз углеводородов.

Перспективный план НИР и НИОКР

I. Разработка и внедрение технологий производства водорода из ископаемых углей.

1. Разработка технологии газификации углей Кузбасса с получением синтез-газа, содержащего водород
2. Разработка и создание лабораторных стендов
3. Экспериментальные исследования по оптимизации процесса газификации по следующим параметрам: по марке угля и по способу подготовки для газификации, по характеру подачи тепловой энергии, по составу применяемого окислителя, по методу шлакоудаления, по рабочему давлению.
4. Очистка синтез газа и выделение водорода;
5. Разработка сорбентов для концентрирования водорода методом короткоциклового адсорбции (метод PSA)



## УД-1.1

6. Масштабирование стендов, выполнение пилотных испытаний, разработка технико-экономического обоснования (ТЭО), исходных данных и регламента на промышленное производство водорода

II. Разработка и внедрение технологий производства водорода из шахтного метана.

1. Разработка катализаторов и процессов получения водорода из метана:

1.1. паровая конверсия,

1.2. автотермический риформинг,

1.3. парциальное окисление

2. Разработка катализаторов и процесса каталитического разложения шахтного метана с получением водорода и углеродных наноматериалов;

3. Разработка катализаторов и процесса каталитического дегидроароматизации шахтного метана с получением водорода и бензола;

4. Разработка и создание лабораторных стендов, экспериментальные исследования по оптимизации трех процессов конверсии, каталитического разложения и дегидроароматизации шахтного метана.

5. Масштабирование стендов, выполнение пилотных испытаний, разработка технико-экономического обоснования (ТЭО), исходных данных и регламента на промышленное производство водорода

III. Расширение использования водорода. Разработка углеродных и композитных материалов для хранения водорода и для создания производства топливных элементов к использованию водорода в различных отраслях экономики Кузбасса.

### Литература:

- [1] Ismagilov I.Z., Matus E.V., Kuznetsov V.V., Mota N., Navarro R.M., Yashnik S.A., Prosvirin I.P., Kerzhentsev M.A., Ismagilov Z.R., Fierro J.L.G. Hydrogen Production by Autothermal Reforming of Methane: Effect of Promoters (Pt, Pd, Re, Mo, Sn) on the Performance of Ni/La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalysts // Applied Catalysis A: General. 2014. V.481. P.104-115. DOI: 10.1016/j.apcata.2014.04.042
- [2] Matras D., Vamvakeros A., Jacques S.D.M., di Michiel M., Middelkoop V., Ismagilov I.Z., Matus E.V., Kuznetsov V.V., Cernik R.J., Beale A.M. Multi-Length Scale 5D Diffraction Imaging of Ni–Pd/CeO<sub>2</sub>–ZrO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalyst During Partial Oxidation of Methane // Journal of Materials Chemistry A, Materials for Energy and Sustainability. 2021. V.9. N18. P.11331-11346. DOI: 10.1039/d1ta01464a
- [3] Vamvakeros A., Jacques S.D.M., Di Michiel M., Matras D., Middelkoop V., Ismagilov I.Z., Matus E.V., Kuznetsov V.V., Drnec J., Senecal P., Beale A.M. 5D Operando Tomographic Diffraction Imaging of a Catalyst Bed // Nature Communications. 2018. V.9. N1. 4751:1-1. DOI: 10.1038/s41467-018-07046-8
- [4] Исмагилов З.Р., Шалагина А.Е., Подъячева О.Ю., Барнаков Ч.Н., Козлов А.П., Квон Р.И., Исмагилов И.З., Керженцев М.А. Синтез азотсодержащих углеродных материалов для катодов твердополимерных топливных элементов // Кинетика и катализ. 2007. Т.48. №4. С.621-628.
- [5] Ismagilov Z.R., Matus E.V., Tsikoza L.T. Direct Conversion of Methane on Mo/ZSM-5 Catalysts to Produce Benzene and Hydrogen: Achievements and Perspectives // Energy & Environmental Science. 2008. V.1. N5. P.526-541. DOI: 10.1039/b810981h
- [6] Matus E.V., Ismagilov I.Z., Mikhaylova E.S., Ismagilov Z.R. Hydrogen Production from Coal Industry Methane // Eurasian Chemico-Technological Journal. 2022. V.24. N2. P.69-91. DOI: 10.18321/ectj1320

## УД-1.2

### Энергетические установки с водород-воздушными топливными элементами для электротранспорта и перспективной энергетики

Кашин А.М., Голодницкий А.Э.

ООО «Инэнерджи», 115201, Москва, 2-й Котляковский пер., 18, Россия  
[a.golodnitsky@inenergy.ru](mailto:a.golodnitsky@inenergy.ru)

Сформировалась и получает развитие мировая тенденция перехода к безуглеродной экономике, в которой основой новой энергетики становится водород, как первичный энергоноситель. И хотя сейчас высока вероятность снижения темпов реализации «European Green Deal», но переход на новую технологию в энергетике и транспорте будет продолжен. Магистральным и, можно сказать, безальтернативным трендом развития водородной энергетики является использование наиболее эффективного способа применения водорода для производства электроэнергии – технологии топливных элементов, в сочетании с другими электрохимическими технологиями – накопления электроэнергии и производства самого водорода.

ООО «Инэнерджи» обоснованно считается технологическим лидером в области электрохимических решений для новой энергетики в России. Основанная в 2014 году, компания к настоящему времени обладает компетенциями по большинству ключевых технологий водородной энергетики и продолжает их успешно развивать, в частности, технологии топливных элементов по всей цепочке добавленной стоимости.

В сложившейся геополитической ситуации нам уже не приходится уповать на сотрудничество с многими традиционными европейскими и североамериканскими партнерами, но это не в коей мере не означает, что надо инвестировать в технологическую отсталость – необходимо инвестировать в завтрашний день, но при этом в развитии придется рассчитывать на собственное научно-техническое и технологическое сопровождение, развивать сотрудничество с восточными партнерами и создавать в России производство замкнутого цикла – от переработки сырья до изготовления конечной продукции. И отправной базой для движения вперед станет созданный нами задел и приобретенные навыки решения сложных задач. При этом нужно оставаться реалистами и отдавать себе отчет, что разработка новых технологий мирового уровня является серьезным вызовом для отечественной науки и промышленности и потребует значительных ресурсов и организационных мероприятий.

Создано уже не мало. В части водород-воздушных низкотемпературных топливных элементов у нас есть достижения: разработан собственный полимер и изготовлены протонообменные мембраны «Инион», конкурентоспособные с доминирующими на рынке, но ставшими недоступными для нас мембранами «Nafion», разработаны катализаторы, серийно изготавливаются мембранно-электродные блоки, батареи топливных элементов и электрохимические генераторы собственной разработки.

Актуальный портфель проектов ООО «Инэнерджи» включает в себя находящиеся в различных стадиях реализации разработки водородных энергетических установок с топливными элементами (ВЭУ) для различных видов автомобильного, железнодорожного, водного и воздушного транспорта, выполняемые в интересах крупнейших отечественных производителей техники и эксплуатирующих организаций.

В сегменте дорожных транспортных средств выполняется ОКР ВЭУ для городского водоробуса «КАМАЗ» и ВЭУ для автомобиля представительского класса «Аурус» ФГУП «НАМИ». В интересах нашего заказчика ОАО «РЖД», активно продвигающего

## УД-1.2

водородные технологии на железнодорожном транспорте и оказывающего нам системную поддержку, ведутся разработки ВЭУ маневрового и магистрального локомотивов, создан и поставлен Лабораторный комплекс «Водородный кластер», предназначенный для исследования режимов работы ВЭУ с ЭХГ и накопителями электроэнергии, проработаны технические предложения ВЭУ для межрегионального электропоезда с автономным ходом, моторвагонного электроподвижного состава (В-поезд для Сахалина), пассажирских вагонов локомотивной тяги с автономной системой электро- и теплоснабжения, путеукладочного поезда, поезда для детских железных дорог, ВЭУ для стационарных объектов железнодорожной инфраструктуры.

За последнее время по техническим требованиям (ТТ) Правительства Москвы разработаны технические предложения на ВЭУ с накопителями электроэнергии для трамвая, по ТТ ОАО «БЕЛАЗ» – для 90-тонного карьерного самосвала, по ТТ ОСК – для прогулочного судна, по ТТ ООО «ВР-технологии» – для винтокрылого летательного аппарата, по ТТ ОДК – ВЭУ мегаваттного класса стационарного назначения и ВСУ для ЛА.

Однако наша продукция окажется невостребованной в отсутствие необходимой для их эксплуатации водородной инфраструктуры.

По имеющимся прогнозам, рынок водорода будет расти в ближайшее десятилетие в геометрической прогрессии. Как известно, водород – самый распространенный элемент во Вселенной, но на Земле в свободном виде практически отсутствует и для получения из водородсодержащих веществ требует затрат энергии, превышающих свою теплотворную способность. В силу того, что водород самый легкий элемент – на порядок легче традиционных газообразных топлив и на четыре порядка жидких, большие затраты связаны и с хранением, и с транспортированием водорода к местам потребления. Поэтому представляется рациональным производить водород на месте заправки транспортных средств, создавая модульные водородные газозаправочные комплексы (ВГЗК) высокой заводской готовности с возможностью их масштабирования, объединяющие водородные газозаправочные станции (ВГЗС) с установками производства водорода.

Анализ действующих и проектируемых ВГЗС с учётом обозримых перспектив распространённости различных видов транспорта показал, что они в большинстве случаев рассчитаны на суточную потребность от 300 до 1000 кг водорода. Таким образом производительность единичного модуля установки производства водорода может находиться в пределах 15-20 кг/ч, что позволяет изготавливать его в контейнерном исполнении высокой заводской готовности с последующим монтажом модуля(ей) на подготовленной площадке ВГЗК.

Наиболее экологически чистый, но пока и самый дорогой «зеленый» водород, получаемый путём электролиза воды с использованием электричества, выработанного ВИЭ. Однако такой способ получения водорода трудно реализуем в России из-за неразвитости ВИЭ. Напротив, кратно более дешёвый способ получения водорода – паровая или автотермическая конверсия природного газа, благодаря доступности исходного сырья представляется предпочтительным для России (и не только) в обозримом периоде.

ООО «Инэнержи» участвует в работах Центра НТИ «Водород как снова низкоуглеродной экономики», в том числе в составе консорциума отечественных организаций: ИК СО РАН, ИНХС РАН, ФПК «Космос-Нефть-Газ», образованного для создания топливных процессоров конверсии углеводородов в водород небольшой производительности для ВГЗК.

## УД-1.3

### Композитные катализаторы окислительной конверсии природного газа

Потемкин Д.И., Шилов В.А., Горлова А.М., Рубан Н.В., Зажигалов С.В.,  
Загоруйко А.Н., Рогожников В.Н., Печенкин А.А., Собынин В.А., Снытников П.В.

Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия

potema@catalysis.ru

В настоящее время наблюдается мировой тренд на начало активного внедрения водородной энергетики. Одним из главных препятствий на этом пути является проблема хранения водорода. Перспективным подходом к ее решению является применение синтетических топлив, обладающих высокой энергетической плотностью. При избыточной выработке электроэнергии ветрогенераторами, солнечными элементами и атомными электростанциями, она направляется на электролиз воды и производство водорода, который в свою очередь используется для гидрирования диоксида углерода с получением синтетических жидких (бензин, дизель, метанол) или газообразных (природный газ, пропан-бутан) топлив. Такой подход позволяет “обнулить” углеродный след и использовать существующую инфраструктуру хранения и транспортировки традиционных топлив. Кроме того, это позволяет комбинировать ископаемые и синтетические топлива и обеспечить постепенный переход от первых ко вторым.

Процессы получения водорода из различных углеводородных (УВ) топлив являются энергонапряженными многомаршрутными химическими реакциями, для эффективного проведения которых необходимо применение селективных и высокопроизводительных катализаторов, которые бы совмещали высокие активность, теплопроводность, коррозионную и термическую стойкость (Рис. 1А).

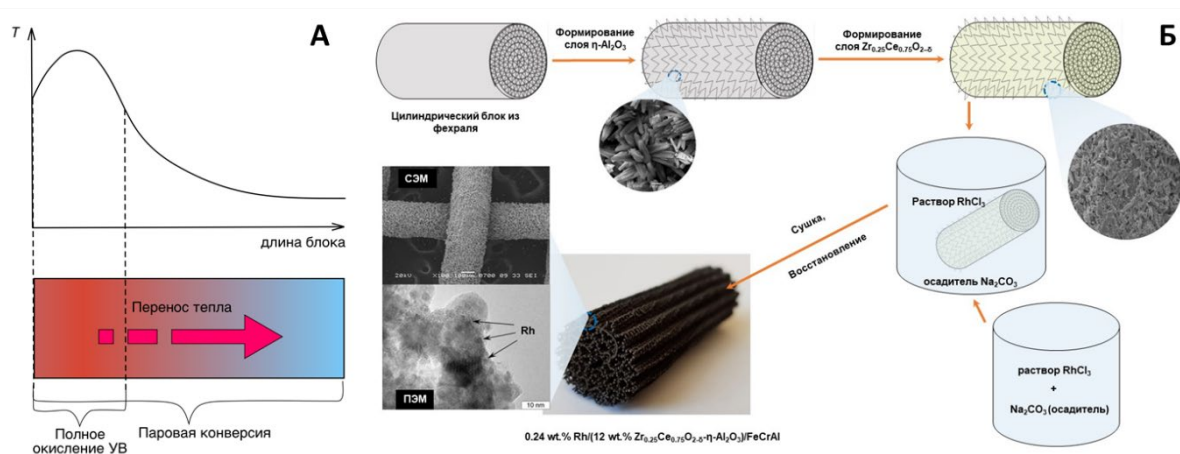


Рис. 1. Типичный температурный профиль в слое катализатора для реакций частичного окисления и автотермической конверсии УВ (А). Схема приготовления композитного Rh/Ce<sub>0.75</sub>Zr<sub>0.25</sub>O<sub>2-δ</sub>-η-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeCrAl катализатора конверсии УВ (Б).

В докладе представлена стратегия дизайна высокоактивных композиционных структурированных катализаторов для процессов получения синтез-газа и водорода. Эти катализаторы представляют собой системы “наночастицы металлов/наночастицы активного оксида/структурный оксидный компонент/структурированная металлическая

### УД-1.3

подложка” (Рис. 1Б). Структурированная металлическая подложка обеспечивает эффективный отвод/подвод тепла для экзо-/эндотермических реакций, обладает хорошими гидродинамическими характеристиками и облегчает масштабный переход. Структурный оксидный компонент (оксид алюминия) обеспечивает термическую и коррозионную устойчивость и высокую удельную поверхность каталитического покрытия, выполняя защитную функцию для металлической подложки. Активный оксидный компонент (преимущественно оксиды церия-циркония) повышает устойчивость к зауглероживанию за счет кислородной подвижности и поддерживает высокую дисперсность активного компонента за счет сильного взаимодействия металл-носитель. Наночастицы металлов размером 1–2 нм участвуют в активации молекул-субстратов.

В качестве теплопроводящей подложки использованы фехралевые (FeCrAl) сетки, сформованные в цилиндрические блоки заданных размеров, на которые отжигом формировали слой  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  и затем по методу Байера наносили покрытие  $\eta\text{-Al}_2\text{O}_3$  с “дышащей” игольчатой морфологией. Далее методами пропитки и/или осаждения наносили смешанный оксид церия-циркония. Наночастицы Pt, Rh и других металлов были нанесены методом сорбционно-гидролитического осаждения [1].

В докладе обсуждаются результаты систематических исследований закономерностей протекания паровой, автотермической и воздушной конверсии природного газа, сжиженного углеводородного газа, бензина и дизельного топлива на полученных Pt- и Rh/Ce<sub>0.75</sub>Zr<sub>0.25</sub>O<sub>2-δ</sub>- $\eta\text{-Al}_2\text{O}_3$ /FeCrAl катализаторах [2, 3]. Показаны высокая активность, стабильность работы и устойчивость к зауглероживанию композитных катализаторов в условиях реакций. Предложены математические модели реакций с учетом процессов тепло- и массопереноса [4]. Рассматриваются возможности и преимущества применения получаемых синтез-газа и метано-водородных смесей для питания энергоустановок на основе топливных элементов различных типов, турбин и двигателей внутреннего сгорания [5].

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ в рамках проекта 21-79-10377.

#### **Литература:**

- [1] Shoynkhorova T.B., Simonov P.A., Potemkin D.I., et al. // Applied Catalysis B: Environmental 2018. V. 237. P. 237-244.
- [2] Shoynkhorova T.B., Rogozhnikov V.N., Potemkin D.I., et al. // International Journal of Hydrogen Energy 2019 V. 44. P. 9941-9948.
- [3] Potemkin D.I., Rogozhnikov V.N., Ruban N.V., et al. // International Journal of Hydrogen Energy 2020 V. 45. P. 26197-26205.
- [4] Zazhigalov S.V., Potemkin D.I., Snytnikov P.V., et al. // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2020. V. 150. P. 107876.
- [5] Снытников П.В., Потемкин Д.И., Усков С.И. и др. // Катализ в промышленности. 2018. Т. 18. № 2. С. 16-32.

## УД-1.4

### Перспективы использования низкотемпературных катализаторов в процессе паровой конверсии монооксида углерода с использованием мембранного реактора

Сидорук К.Н., Седов И.В.

*Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия*

*sidarukk@gmail.com*

В XXI веке получение водорода высокой чистоты (99.999 об.%) – актуальная проблема для новых отраслей энергетики. Он рассматривается в качестве перспективного энергоносителя. Водород высокой чистоты требуется при использовании, например, в низкотемпературных топливных элементах, поскольку наличие даже небольшого количества примесей в сырье негативно сказывается на их работе, вплоть до выхода энергоустановки из строя [1].

Одним из эффективных способов получения водорода является его производство с помощью каталитического парового риформинга метана на никелевых катализаторах. С целью увеличения выхода водорода продукты паровой конверсии метана подвергают дальнейшему превращению по реакции «водяного газа». Чтобы использовать полученный таким образом водород в качестве топлива в электрохимических источниках тока необходима его глубокая очистка [2]. Для повышения эффективности получения водорода высокой чистоты методом парового риформинга углеводородного сырья предлагается использовать мембранные реакторы.

Реакции паровой конверсии углеводородов и монооксида углерода являются обратимыми процессами, поэтому преимущество использования мембранных реакторов для их проведения состоит в возможности смещения равновесия в сторону продуктов реакции [3]. Важным преимуществом является возможность одновременной очистки водорода, который, проходя через селективную водородпроницаемую мембрану, достигает показателей чистоты, удовлетворяющих требования последующих потребителей, в том числе может использоваться для генерации энергии в низкотемпературных топливных элементах.

Целью данной работы является изучение реакции паровой конверсии монооксида углерода в мембранном реакторе с использованием промышленных катализаторов (на примере НИАП-18) для оптимизации условий проведения процесса и достижения максимального выхода водорода.

Весь технологический процесс основан только на реакции водяного газа, которая осуществляется в одну стадию в едином мембранно-каталитическом реакторе в присутствии одного катализатора. По предварительным расчетам базовыми условиями проведения процесса являлись: давление 3 МПа, температурный интервал от 573-823 К, отношение пар/сырье 1-5, объемные скорости сырья 1800 и 3600 Ч-1. Движущей силой

## УД-1.4

смещения равновесия в сторону образования водорода является отвод его через водородселективную мембрану, являющуюся элементом конструкции реактора.



В качестве водородселективной мембраны использовали фольгу толщиной 30 мкм из сплава Pd-Ru, предоставленную сотрудниками лаборатории 12 Института металлургии и материаловедения РАН (ИМЕТ РАН, МОСКВА). Использование высокоселективных по отношению к диффузионному переносу водорода монокристаллических палладиевых мембран обеспечивает чистоту водорода на выходе из реактора не менее 99.99%.

Для проведения процесса разработана установка, представляющая собой экспериментальный лабораторный стенд. Основное технологическое оборудование включает: обогреваемый мембранно-каталитический реактор, где происходит реакция, дозатор воды и ловушка с целью улавливания паров воды. Продукты риформинга анализировались с помощью газовых хроматографов Хромос GX-1000, оснащенного пламенно-ионизационным детектором, детектором по теплопроводности с использованием колонок NaX, Haye Sep Q и HP-PLOT Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> KCl. В докладе будут представлены результаты экспериментальных исследований процесса.

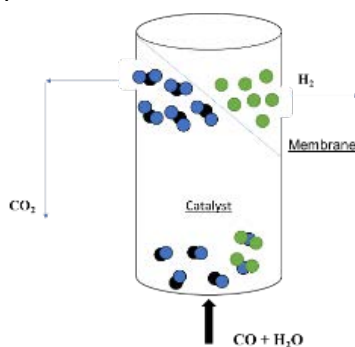


Рис. 1. Мембранный реактор

### Литература:

- [1] Гридасов М.В., Киселева С.В., Нефедова Л.В., Попель О.С., Фрид С.Е. // Теплоэнергетика. Т.58. 2011. С. 38.
- [2] Фортов В.Е., Попель О.С. // Энергетика в современном мире. Долгопрудный: «Интеллект». 2011.
- [3] Макарян И.А, Седов И.В., Никитин А.В., Арутюнов В.С. // Современные подходы к получению водорода из углеводородного сырья // Научный журнал российского газового общества. 2020. Т.1. №24. С. 50-68.

## УД-1.5

### Полициклогексенкарбонат – новый материал для создания водород-селективных газоразделительных мембран

Борисов И.Л., Бахтин Д.С., Баженов С.Д., Волков В.В., Волков А.В.  
Институт нефтехимического синтеза им. А.В.Топчиева РАН, Москва, Россия  
sbazhenov@ips.ac.ru

Поликарбонаты – это одни из наиболее перспективных конструкционных материалов, которые сочетают в себе значительную механическую прочность, гибкость, долговечность, широкий температурный диапазон использования, оптическую прозрачность, стабильность размеров при изменении температур и биологическую инертность. Совокупность этих свойств позволяет применять поликарбонаты в качестве мембранных материалов. Несмотря на широкое распространение ароматических поликарбонатов, большой интерес представляют их алифатические аналоги (например, полициклогексенкарбонат), которые могут быть получены с использованием диоксида углерода в качестве мономера.

Алифатические поликарбонаты могут быть получены полимеризацией циклических карбонатов с раскрытием цикла. В случае 5-членных циклических карбонатов это очень сложно, поэтому был найден более прямой путь за счет прямой сополимеризации оксиранов с диоксидом углерода. Стоит отметить, что полимеризацию можно осуществлять в среде сверхкритического диоксида углерода в качестве растворителя.

Работы по сополимеризации диоксида углерода и четырех- или более членных циклических эфиров немногочисленны из-за пониженной реакционной способности.

В ИНХС РАН впервые были исследованы газотранспортные свойства полициклогексенкарбоната (см. Таблицы 1 и 2).

Таблица 1. Газотранспортные свойства полициклогексенкарбоната.

Газ	Коэффициент проницаемости, баррер	Коэффициент диффузии, см <sup>2</sup> /с	Коэффициент растворимости, см <sup>3</sup> /(см <sup>3</sup> ·смHg)
He	10,5	$4,4 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$
H <sub>2</sub>	7,0	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$7,0 \cdot 10^{-4}$
N <sub>2</sub>	0,029	$1,6 \cdot 10^{-9}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$
O <sub>2</sub>	0,25	$7,5 \cdot 10^{-9}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$
CH <sub>4</sub>	0,014	$3,4 \cdot 10^{-10}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$
CO <sub>2</sub>	0,75	$2,0 \cdot 10^{-9}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$



## УД-1.5

Таблица 2. Идеальная селективность разделения полициклогексенкарбонатом для выбранных пар газов.

	Идеальная селективность
$H_2/CH_4$	500
$He/CH_4$	750
$CO_2/CH_4$	53,5
$CO_2/N_2$	25,9
$O_2/N_2$	8,6
$H_2/CO_2$	10

Показано, что этот полимер перспективен для разделения смесей, содержащих легкие газы. При приемлемых коэффициентах проницаемости по водороду и гелию, полициклогексенкарбонат обладает селективностью водород/метан 500, что в 10 раз превышает селективность полисульфона.

**Благодарности:** Исследования выполнены в рамках работ по Программе развития Центра компетенций Национальной Технологической Инициативы «Водород как основа низкоуглеродной экономики» при участии в Национальном проекте «Наука и университеты» при поддержке Фонда поддержки проектов национальной технологической инициативы и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

## УД-1.6

### Исследование водородной проницаемости мембран с селективным слоем металлического никеля

Тропин Е.С., Шубникова Е.В., Лапушкина Е.Ю., Герасимов К.Б., Немудрый А.П.  
Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия  
evgeny.tropin@mail.ru

В процессах очистки водорода и мембранного катализа, как правило, используют дорогостоящие мембраны на основе сплавов палладия. Преимуществом никелевых мембран перед мембранами на основе палладия является низкая стоимость материала и высокая устойчивость к воздействию отравляющих веществ [1-2].

В данной работе исследована водородная проницаемость двух типов никелевых мембран: 1) выпускаемых промышленно капиллярных трубок из металлического никеля диаметром  $2 \div 2.5$  мм и толщиной стенки  $50 \div 150$  мкм, а также 2) ассиметричных мембран с пористым несущим композитным слоем (NiO-YSZ) и тонким никелевым селективным слоем.

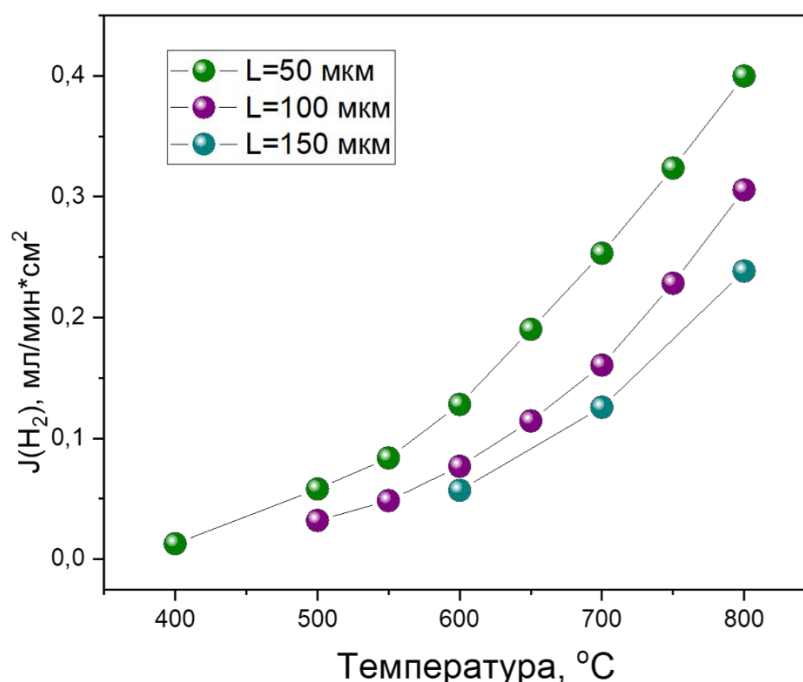


Рис. 1. Зависимость удельного потока водорода через стенку капиллярных трубок различной толщины от температуры (парциальное давление водорода на питающей стороне 0.5 атм)

Для никелевых капиллярных трубок проведена аттестация материала мембран методами растровой электронной микроскопии, атомно-абсорбционной спектроскопии и рентгенофазового анализа, а также получены значения микротвердости материала. Изготовлен реактор для исследования водородной проницаемости трубчатых мембран оригинальной конструкции. Получены зависимости потока водорода от толщины стенки, температуры и разности парциальных давлений водорода.

## УД-1.6

Для ассиметричных мембран разработаны методики формирования методом фазовой инверсии несущих композитных микротрубок с оптимальными значениями диаметра, толщины стенки, пористости, механической прочности, а также формирования методом погружения в суспензии тонкого (5-10 мкм) газоплотного никелевого слоя.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Центра компетенций НТИ «Водород как основа низкоуглеродной экономики»

### **Литература:**

- [1] Leimert J.M., Karl J. // Int. J. Hydrog. Energy. 2016. V. 41. P. 9355.
- [2] Wang M., Zhou Y., Tan X., Gao J., Liu S. // J. Membrane Science. 2019. V. 575. P. 89.

## УД-1.7

### Математическая модель пиролитического процесса генерации водорода из природного газа

Кудинов И.В.<sup>1</sup>, Крюков Ю.А.<sup>1</sup>, Долгих В.Д.<sup>1</sup>, Попов М.В.<sup>2</sup>, Амиров Т.Ф.<sup>1</sup>, Пименов А.А.<sup>1,2</sup>

1 – Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

2 – ООО "Газпромнефть - Промышленные инновации", Санкт-Петербург, Россия

igor-kudinov@bk.ru

Процессы пиролиза углеводородов в газовой фазе, жидких металлах, эвтектических смесях солей, плазмохимических реакторах последнее время активно изучаются в связи с повышенным вниманием к низкоуглеродным технологиям производства водорода [1-3]. Очевидные преимущества прямого термического разложения углеводородов по сравнению с электролизом или паровой конверсией заключаются в отсутствии эмиссии углекислого газа в атмосферу и наименьшем энергокладе в реакцию разложения. В качестве побочного продукта образуется лишь углерод, причем при определенных условиях процесса пиролиза он кристаллизуется на внутренних поверхностях реакторов в наноразмерном виде (вискеры, трубки, проволочные структуры и пр.). Основным способом исследования процессов пиролиза – экспериментальный, недостаточен, в связи с чем, необходима разработка математических моделей тепловых, гидрогазодинамических, массообменных и химических процессов и их детальное исследование. В настоящей работе приведены результаты разработки и исследования процесса пиролиза метана в газовой фазе.

Математическая модель процесса разложения составлена из четырех взаимосвязанных дифференциальных уравнений относительно концентрации метана  $m(x)$ , его производных (этана, этилена, ацетилен) ( $r(x)$ ), водорода  $h(x)$  и углерода  $c(x)$ .

$$v \frac{\partial m(x)}{\partial x} = -k_1 m(x); \quad (1)$$

$$v \frac{\partial h(x)}{\partial x} = k_2 [m(x) + r(x)]; \quad (2)$$

$$v \frac{\partial c(x)}{\partial x} = k_3 [m(x) + r(x)]; \quad (3)$$

$$v \frac{\partial r(x)}{\partial x} = (k_1 - k_2 - k_3) m(x) - [k_2 + k_3] r(x); \quad (4)$$

$$m(0) = m_0; \quad h(0) = 0; \quad c(0) = 0; \quad r(0) = 0, \quad (5)$$

где  $v$  – скорость движения газа в реакторе,  $k_{1,2,3} = A_{1,2,3} e^{\frac{-E_{1,2,3}}{RT}}$ .

Модель (1) – (5) решается методом Рунге-Кутты 4 порядка точности. Исходные данные для модели подбираются по результатам натурального эксперимента.

Для примера решения модели взяты следующие константы:

$T = 800 \text{ K}$ ;  $R = 8.314 \text{ Дж / моль K}$ ;  $m_0 = 1 \text{ кг / м}^3$ ;  $v = 0.1 \text{ м / с}$ ;  $E_1 = 8 \cdot 10^4 \text{ Дж / моль}$ ;  $E_{2,3} = 1.6 \cdot 10^5 \text{ Дж / моль}$ ;  $A_1 = 1.2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ ;  $A_2 = 1.75 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ ;  $A_3 = 5.5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ .

## УД-1.7

Решение предложенной системы дифференциальных уравнений приводит к следующим результатам, представленным на рис. 1. Концентрация метана в процессе разложения уменьшается и при длине канала  $l = 1$  м происходит полная конверсия ( $m(x) = 0$ ). Концентрации водорода и углерода увеличивается и при  $l = 1$  м  $h(x) = 0.23$  кг/м<sup>3</sup>, а  $c(x) = 0.72$  кг/м<sup>3</sup>. Количество промежуточных газов процесса пиролиза по длине канала сначала увеличивается и при  $l = 0.18$  м достигает максимума  $r(x) = 0.32$  кг/м<sup>3</sup>, затем убывает и при  $l = 1$  м составляет 0.05 кг/м<sup>3</sup>.

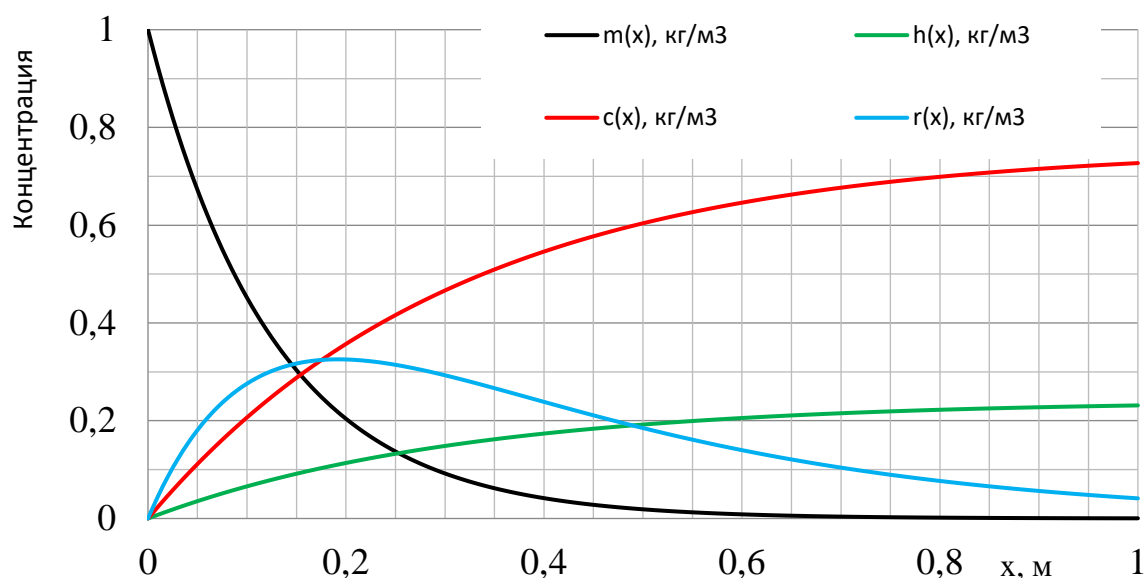


Рис. 1. Распределение концентраций по длине канала

Предложенная математическая модель может быть верифицирована путём идентификации феноменологических коэффициентов  $A_{1,2,3}$  и  $E_{1,2,3}$  в результате сравнения с экспериментальными данными. Это позволит выполнять компьютерное моделирование процесса пиролиза метана, сохраняя ресурс оборудования и сырье для экспериментов. В модели также могут быть учтены изменения всех искомых функций во времени и по радиальной координате, что позволит теоретически оценить и идентифицировать скорость реакции.

### Литература:

- [1] Msheik M., Rodat S., Abanades S. Methane Cracking for Hydrogen Production: A Review of Catalytic and Molten Media Pyrolysis // *Energies*. 2021. V. 14. 3107.
- [2] Kudinov, I.V., Pimenov, A.A., Kryukov, Y.A., Mikheeva, G.V. A theoretical and experimental study on hydrodynamics, heat exchange and diffusion during methane pyrolysis in a layer of molten tin // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. V. 46. P. 10183 – 10190.
- [3] Kudinov, I.V., Pimenov, A.A., Mikheeva G.V. Modeling of the Thermal Decomposition of Methane and the Formation of Solid Carbon Particles // *Petroleum Chemistry*. 2020. V. 60. P. 1239 – 1243.

## УД-1.8

### Плазмохимический пиролиз метана в барботажном реакторе

Пушкарев А.И., Полисадов С.С.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Томск, Россия  
aipush@mail.ru

Представлена концепция плазмохимического конвертера метана с использованием барботажного реактора. Показано, что термическое разложение (пиролиз) метана, который является основным компонентом природного газа, является наиболее подходящей технологией для получения чистого водорода для питания топливных элементов электромобилей. Утилизация выделяющегося углерода становится намного проще при пиролизе метана в расплавленной среде. При этом барботаж метана осуществляется через расплавленный металл или соль, а образующийся углерод накапливается на поверхности расплава. Однако производительность барботажного реактора недостаточно высокая для промышленного использования.

Многочисленные исследования пиролиза углеводородов показали, что процесс реализуется как радикально-цепной (термический крекинг) [1]. В работе предложено использовать неравновесный радикально-цепной механизм пиролиза метана для увеличения производительности, степени конверсии метана и снижения температуры в реакционной зоне барботажного реактора.

Выполнено моделирование пиролиза метана по программе Kintecus [2] с использованием констант скорости реакций из базы данных NIST [3]. Моделирование выполнено для пиролиза метана в проточном газовом реакторе и в барботажном реакторе при давлении 1 атм., начальной температуре 1300 К и концентрации радикалов 0.1%, см. рис. 1.

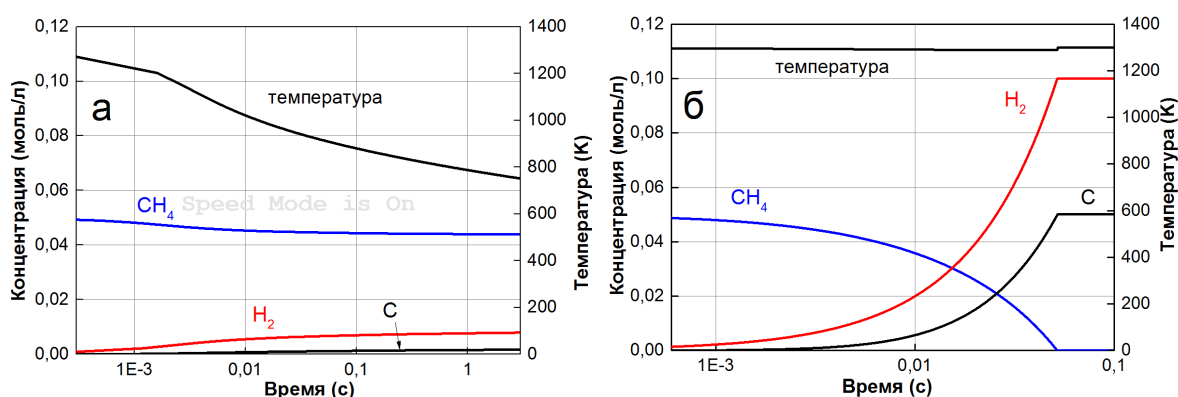


Рис. 1. Изменение температуры и концентрации продуктов пиролиза метана. Пиролиз в проточном реакторе (а) и в барботажном реакторе (б)

Получено, что при протекании эндотермических реакций пиролиза метана в проточном газовом реакторе температура газа значительно снижается, что снижает скорость и степень конверсии. В барботажном реакторе при диаметре пузырька 1-3 мм

## УД-1.8

снижение температуры газа не превышает 10 градусов. Это обеспечивает увеличение скорости реакций пиролиза и повышение степени конверсии метана за счет радикально-цепного механизма пиролиза метана.

Выполнен анализ процесса плазмохимической наработки радикалов  $\text{CH}_3$  и  $\text{H}$  при ионизации метана и последующей диссоциативной рекомбинации. Показано, что продолжительность диссоциативной рекомбинации не превышает 1 мкс, а время жизни радикалов при температуре метана 300 К составляет  $\approx 1$  с. При производительности пиролиза метана  $1 \text{ м}^3/\text{час}$  и концентрации радикалов 0.1% мощность газового разряда составляет  $\approx 20$  Вт.

### Литература:

- [1] Ямпольский Ю.М. Элементарные реакции и механизм пиролиза углеводородов. М.: Химия, 1990.
- [2] Ianni, James C., Kintecus, 2021, [www.kintecus.com](http://www.kintecus.com).
- [3] NIST Chemical Kinetics Database. Standard Reference Database 17, Version 7.1. Data Version 2022. <https://kinetics.nist.gov/kinetics/index.jsp>

## УД-1.9

### Особенности каталитического пиролиза углеводородов в водород и углеродные наноматериалы с добавленной стоимостью

Хабушев Э.М.<sup>1</sup>, Красников Д.В.<sup>1</sup>, Шестакова В.С.<sup>1</sup>, Новиков И.В.<sup>1</sup>, Рагинов Н.И.<sup>1</sup>,  
Яковлев В.Я.<sup>1</sup>, Гольдт А.Е.<sup>1</sup>, Насибулин А.Г.<sup>1,2</sup>

1 – Сколковский Институт науки и технологий, Москва, Россия

2 – Aalto University, Helsinki, Finland  
d.krasnikov@skoltech.ru

Несмотря на высокий уровень готовности технологии и экономическую реализуемость паровой конверсии метана, необходимость селективного улавливания диоксида углерода является существенным вызовом на пути встраивания в низкоуглеродную экономику и энергетику следующего поколения. В то же время метана не только не приводит к образованию парниковых газов, но и в случае применения катализаторов принципиально позволяет получить вторичный продукт с добавленной стоимостью – углеродные наноматериалы.

В свою очередь оптимизация процесса трансформации углеводородов с точки зрения получения углеродных материалов развивается с середины XX века; особенные импульсы область получала при лавинном интересе к нитевидным углеродным материалам и углеродным нанотрубкам/нановолокнам в 70-80-е и конце 90-00-е года. Тем не менее, так как основной акцент при оптимизации был сделан на качество углеродных материалов, а не на конверсию реагентов.

В настоящей работе представлены основные особенности и наработки в области синтеза углеродных наноматериалов из легких углеводородов и метана. В частности, рассматривается роль промоторов процесса, позволяющих повышать конверсию, а также возможность использования гибридных источников для повышения производительности. Более того, обсуждается возможность использования методов машинного обучения для оптимизации многопараметрической задачи (рис. 1).

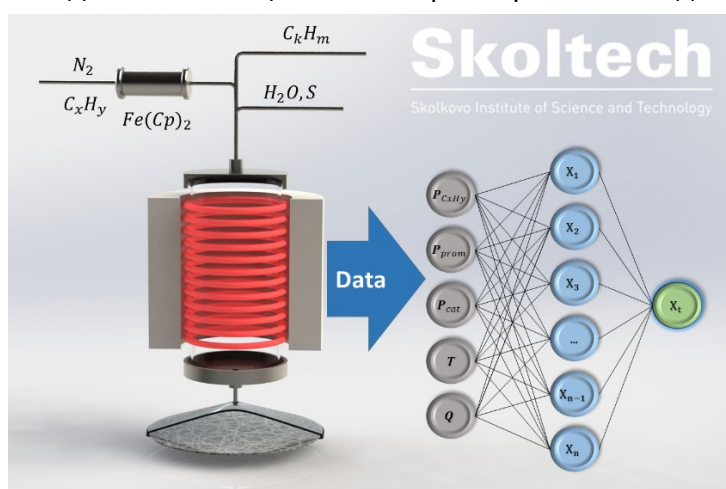


Рис. 1. Иллюстрация использования методов машинного обучения для оптимизации каталитического пиролиза легких углеводородов.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 20-73-10256.



## УД-1.10

### Разработка методологии исследования процесса каталитического пиролиза углеводородов с получением ВСГ и УНМ

Потылицына А.Р.<sup>1,2</sup>, Бауман Ю.И.<sup>1,2</sup>, Шелепова Е.В.<sup>1,2</sup>, Веселов Г.Б.<sup>1,2</sup>, Ильина Е.В.<sup>1,2</sup>  
Пустовалов А.В.<sup>3</sup>, Первиков А.В.<sup>3</sup>, Мишаков И.В.<sup>1,2</sup>

*1 – Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия*

*2 – Центр НТИ ИК СО РАН, Новосибирск, Россия*

*3 – Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия*  
*potylicy@catalysis.ru*

В настоящее время большинство технологий производства водорода, таких как паровая конверсия и парциальное окисление метана, генерируют большое количество  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$  в качестве побочных продуктов. Водород, получаемый этими методами, должен быть очищен для дальнейшего использования, например, в топливных элементах. Разработка альтернативных вариантов получения  $\text{H}_2$ , не содержащего  $\text{CO}_x$ , привлекает значительный интерес. В последнее время больше внимания уделяется каталитическому пиролизу (КП) углеводородов для получения чистого водорода [1]. В результате данного процесса образуется два основных продукта: водородсодержащий газ (ВСГ), свободный от примеси  $\text{CO}_x$ , и углеродный наноструктурированный материал (УНМ). Образующийся углеродный материал, характеризующийся рядом уникальных свойств, может быть использован в различных областях науки и техники [2].

Количество образующегося углеродного продукта позволяет косвенно оценить объем выделяющегося  $\text{H}_2$ . Настоящая работа была сфокусирована на разработке методологии исследования процесса КП углеводородов с акцентом на получение УНМ. В качестве катализаторов был протестирован широкий круг оксидных и сплавных металлических систем. Оксидные и сплавные катализаторы были синтезированы с применением метода механохимической активации (МХА), в то время как бинарные и многокомпонентные сплавы готовились методом электрического взрыва проволок (ЭВП) [3]. Для изучения активности полученных образцов использовали различные смеси углеводородов:  $\text{C}_3\text{-C}_4$ ,  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  и природный газ (модельная смесь). В качестве примера, на рис. 1 приведены снимки растровой электронной микроскопии углеродного продукта, полученного в результате КП метановодородной смеси на  $\text{NiO-CuO/Al}_2\text{O}_3$  катализаторе.

Методология исследования процесса КП включает эксперименты, проводимые в проточных реакторах двух типов. Первый тип представляет собой реактор, оснащенный весами Мак-Бейна, который позволяет измерять скорость накопления УНМ на катализаторе в режиме реального времени. В этом реакторе были изучены кинетические параметры процесса КП  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  смеси на  $\text{NiO-CuO/Al}_2\text{O}_3$  катализаторе. Полученные экспериментальные данные были использованы в численных расчетах с применением кинетических моделей на основании механизмов диссоциативной и

## УД-1.10

молекулярной адсорбции метана на никель-медном катализаторе. В результате определены кинетические константы для двух кинетических моделей, при которых расчётные кривые достаточно адекватно описывают экспериментальные точки. Полученные кинетические константы, после проведения верификации, могут быть применены для математического моделирования процесса КП метана/метано-водородной смеси в реакторе с использованием оксидных катализаторов.

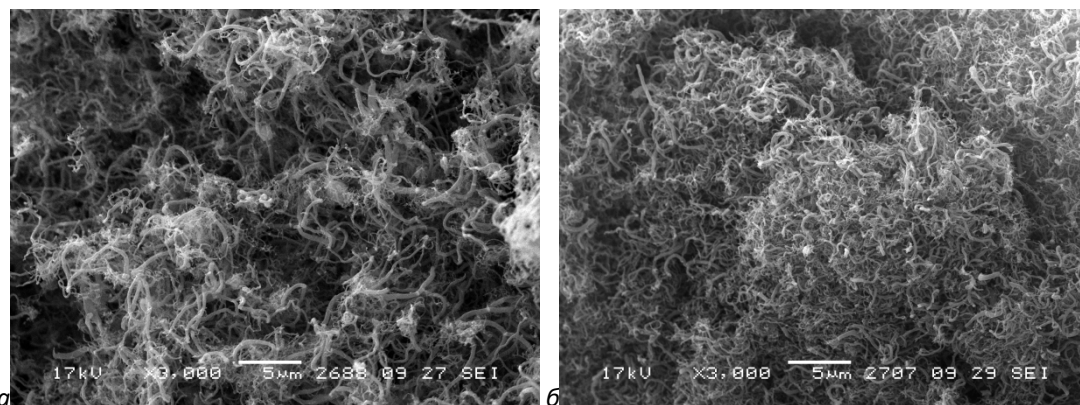


Рис. 1 Углеродные нановолокна, полученные в результате КП смеси  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  при 550 (а) и 600 °С (б) на  $\text{NiO-CuO/Al}_2\text{O}_3$  катализаторе. Данные растровой электронной микроскопии (РЭМ).

Вторая группа экспериментов по изучению КП проводится с использованием трубчатого реактора объёмом 5.8 м<sup>3</sup> с горизонтальной загрузкой катализатора. Конструкция реактора позволяет одновременно размещать 4 - 6 образцов, что даёт возможность совместного скрининга активности. Данный подход позволяет в короткий срок установить зависимость производительности исследуемых образцов в процессе КП углеводородов с получением УНМ и ВСГ от условий и методов синтеза катализаторов, а также от условий испытаний. Такой подход значительно ускоряет движение по пути создания эффективного катализатора для КП углеводородов.

В докладе также будет продемонстрированы морфология и текстурные параметры углеродного материала в зависимости от состава катализатора и условий пиролиза углеводородного сырья (состав смеси, температура пиролиза).

Учитывая объёмы природного газа, который может быть направлен на каталитический пиролиз с получением ВСГ и УНМ, необходимо вести работы по поиску областей применения образующегося твердофазного продукта. В докладе также будут представлены результаты исследования триботехнических характеристик смазочных материалов, модифицированных добавкой УНВ.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-13-00406).

### Литература:

- [1] Musamali R., Isa Y.M. // Energy Technol. 2019. Vol. 7. P. 1800593.
- [2] Shamilov V.M. // SOCAR Proceedings. 2020. No.3. P. 090-107
- [3] Pervikov A., Suliz K., Kazantsev S., Tarasov S., Lerner M., Rodkevich N. // Powder Technology. 2022. Vol. 396. P. 117093.

## УД-1.11

### Исследование микродисперсных сплавов в процессе каталитического пиролиза углеводородов с целью получения УНВ и водородсодержащего газа

Афонникова С.Д.<sup>1,2</sup>, Бауман Ю.И.<sup>1,2</sup>, Мишаков И.В.<sup>1,2</sup>, Максимова Т.А.<sup>1,2</sup>,  
Шелепова Е.В.<sup>1,2</sup>, Шивцов Д.М.<sup>3</sup>, Руденко П.В.<sup>3</sup>, Ведягин А.А.<sup>1</sup>

1 – Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Центр НТИ ИК СО РАН, Новосибирск, Россия

3 – Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

4 – Институт неорганической химии СО РАН, Новосибирск, Россия

*sonya.afonnikova@yandex.ru*

Одной из важнейших задач нефтегазовой промышленности Российской Федерации является разработка способов переработки попутного нефтяного газа (ПНГ) в ценные продукты. ПНГ в основном представлен смесью лёгких углеводородов (C<sub>1</sub>-C<sub>6</sub>). Во многих местах нефтедобычи значительная часть ПНГ подвергаются сжиганию, что приводит к загрязнению атмосферы, выбросам парниковых газов и экономическим потерям [1]. В связи с этим, поиск новых перспективных подходов к переработке попутного нефтяного газа представляется актуальным. Одним из перспективных вариантов переработки лёгких углеводородов может выступать каталитический пиролиз (КП). В результате каталитического пиролиза смеси углеводородов образуется два основных продукта: водородсодержащий газ (ВСГ), свободный от примеси CO<sub>x</sub>, и углеродные нановолокна (УНВ). ВСГ, содержащий 40-70% H<sub>2</sub>, можно направлять на дальнейшее разделение адсорбционным методом с целью получения чистого водорода, либо использовать в качестве экологически чистого топлива. В свою очередь, углеродный наноматериал, в силу особого набора физико-химических свойств, привлекает значительный интерес как модифицирующая добавка в состав различных полимерных композиционных материалов. Ранее было показано, что добавление УНВ в небольших количествах в состав композитов приводит к улучшению их физико-механических свойств [2].

В данной работе был изучен процесс КП лёгких углеводородов C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub> с использованием самоорганизующихся металлических катализаторов на основе Ni. В основе подхода лежит явление углеродной эрозии (УЭ), которое заключается в спонтанном разрушении массивного сплава (металла) при высокой температуре (400-800°C) под действием углеродсодержащей атмосферы [3].

Также известно, что процесс УЭ может быть целенаправленно использован для синтеза углеродных наноматериалов (УНМ), поскольку в ходе разрушения массивного сплава происходит образование активных частиц, катализирующих рост УНМ (рис. 1). Такой катализатор можно назвать самоорганизующимся, поскольку в данном случае система «сама» подбирает оптимальный размер и форму каталитических частиц. В предыдущих исследованиях было показано, что сплавные системы на основе Ni проявляют наибольшую активность в процессе КП углеродсодержащих газов [4].

## УД-1.11

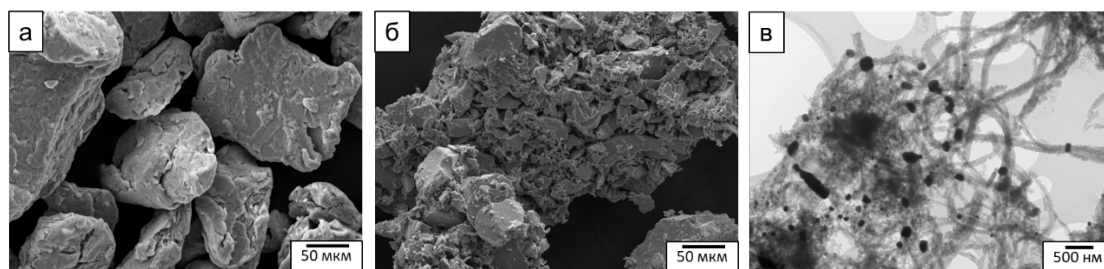


Рис. 1. (а) – массивный сплав Ni-Cu, полученный методом механохимического сплавления (данные СЭМ). (б) – массивный сплав Ni-Cu, полученный методом восстановительного термолиза (данные СЭМ). (в) – образец УНВ, полученный в результате каталитического пиролиза смеси C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub> (данные ПЭМ).  
Условия реакции: T = 550°C, 40 мин, C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/Ar.

В докладе будут представлены результаты исследования способа синтеза массивных сплавов на основе Ni. Синтез массивных сплавов Ni-M (M = Cu, Cr, Mo и т.д.) осуществлялся двумя способами: соосаждением с последующим восстановительным термолизом и методом механохимического сплавления металлов. Оба подхода позволяют получать твёрдые растворы на основе Ni с заданной концентрацией стабилизирующих металлических добавок. Скрининг активности образцов проводили на испытательном лабораторном стенде с горизонтальной загрузкой катализатора. Изучение кинетики процесса КП осуществляли в гравиметрической установке с весами Мак-Бейна. Изучено влияние таких параметров синтеза как диаметр мелющих шаров, время активации и т.д. на гранулометрический состав и каталитическую активность Ni-сплавов в переработке C<sub>2+</sub> углеводородов методом КП [5]. Также будут продемонстрированы результаты по масштабированию предлагаемого процесса КП углеводородов и определению оптимальных условий для его осуществления (длительность реакции, нагрузка на катализатор, температура процесса). Будет продемонстрировано влияние данных параметров на морфологию и текстурные параметры углеродных нановолокон, получаемых в качестве второго продукта КП.

В докладе также будут обсуждены возможные варианты практического использования УНВ в качестве модифицирующей добавки в составе полимерных композиционных материалов.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Центра НТИ «Водород как основа низкоуглеродной экономики». Авторы благодарят Шубина Ю.В., Попова А.А., Серкову А.Н. и Тренихина М.В.

### Литература:

- [1] Газпром, П. А. О. Справочник «Газпром в цифрах 2016 – 2020».
- [2] Nanni F., Travaglia P., Valentini M. // Compos. Sci. Technol. 2009. Vol. 69, № 3–4. P. 485.
- [3] Guo X., Vanhaecke E., Vullum P. E., et al. // Catal. Today. 2021. Vol. 369. P. 48-61.
- [4] Буянов Р. А. //Химия в интересах устойчивого развития. – 2000. – Т. 8. – №. 3. – С. 347-352.
- [5] И.В. Мишаков, С.Д. Афонникова, Ю.И. Бауман и др. // Кинетика и катализ. 2022.Т.63. № 1.С.110-121.

## УД-1.12

### Катализаторы на основе модифицированного оксида церия-циркония для процесса углекислотной конверсии метана

Арапова М.В., Беспалко Ю.Н., Смаль Е.А., Федорова В.Е., Валеев К.Р., Симонов М.Н.  
Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия  
*smike@catalysis.ru*

Углекислотная конверсия метана (УКМ) является одним из доступных методов утилизации парниковых газов ( $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$ ) с получением синтез-газа ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ), применяемого в нефтехимической промышленности а качестве химического сырья для синтеза метанола, диметилового эфира, в процессе Фишера-Тропша и получения водорода для синтеза аммиака и для производства энергии с использованием топливных элементов. Катализаторы УКМ представляют собой различные оксиды с нанесёнными на их поверхность ультрадисперсными частицами металлов. УКМ - это эндотермический каталитический процесс, сопровождающийся образованием различных форм углерода на поверхности катализатора, что приводит к дезактивации. Указанные недостатки Ni можно минимизировать, используя в качестве носителя оксиды с высокой кислородной подвижностью, которые улучшают активность и стабильность катализатора в окислительно-восстановительных условиях.

Целью работы является разработка высокоэффективного и стабильного Ni-содержащего катализатора на основе модифицированного оксида церия-циркония для процесса углекислотной конверсии метана. Носитель получали оригинальным методом синтеза - с использованием проточной установки [1] в сверхкритических условиях, что позволяет получать однофазные носители со структурой флюорита на основе оксида церия, модифицированного введением таких катионов как Zr, Ti, Nb, Pr в различных комбинациях. Нанесение металла в количестве 5 вес.% осуществляли двумя способами - пропиткой по влагоемкости и «one-pot» методом. Реакцию УКМ проводили в проточной установке в диапазоне температур 600 – 750 °С при времени контакта 10 мс. Катализаторы были охарактеризованы с использованием ряда физико-химических методов исследования (РФА, ПЭМ, РФЭС, ТПВ, ТПО, ИКС СО). С помощью каталитических экспериментов были изучены влияние как метода введения Ni, так и влияние химического состава сложнооксидного носителя на кинетические параметры реакции УКМ. Наиболее активные образцы с сходных условиях превысили по активности лучшие мировые аналоги.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект 18-73-10167).

#### Литература:

[1] M. Arapova, E. Smal, Yu. Besspalko, V. Fedorova, K. Valeev, S. Cherepanova, A. Ischenko, V. Sadykov, M. Simonov. Ethanol dry reforming over Ni supported on modified ceria-zirconia catalysts– the effect of Ti and Nb dopants, Int. J. Hydrogen Energy, V. 46, 2021, P. 39236-39250.

## УД-1.13

### **Ni – содержащие биметаллические катализаторы углекислотной конверсии метана и этанола**

Беспалко Ю.Н., Арапова М.В., Смаль Е.А., Федорова В.Е., Валеев К.Р., Симонов М.Н.  
*Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия*  
*bspalko@catalysis.ru*

Получение водорода и синтез-газа путем риформинга углеродсодержащего сырья является одним из важнейших процессов для промышленности и энергетики. Углекислотная конверсия метана (УКМ) представляют собой привлекательный способ утилизации двух парниковых газов (метана и диоксида углерода) в синтез-газ с последующим преобразованием в химические продукты, либо выделением чистого водорода. Помимо утилизации CO<sub>2</sub> в реакции углекислотной конверсии этанола (УКЭ) другим привлекательным аспектом является то, что углекислый газ и этанол являются возобновляемыми источниками. Многочисленные комплексные исследования катализаторов УКМ и УКЭ позволяют обобщить, что типичные катализаторы риформинга представляют собой активный металл (Pt, Rh, Ru и Ni, Co, Fe), нанесенный на оксидный носитель (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, CeO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>), чаще всего с различными модифицирующими добавками. Основной проблемой, препятствующей внедрению, является дезактивация из-за зауглероживания и спекания активных частиц. Перспективные подходы к решению данных проблем заключаются в создании катализаторов с сильным взаимодействием металла с носителем, как правило, это оксид с высокой подвижностью кислорода, способствующего газификации кокса. Также можно модифицировать строение и свойства нанесенных металлических частиц путем введения в состав катализатора второго металла. В работе были синтезированы смешанные оксиды церия и циркония с использованием сверхкритических флюидов и методом пропитки по влагоемкости были получены катализаторы 5 вес. % Ni или 5 вес. % Ni+Co (1:1). Комплексом физико-химических методов была исследована структура, текстура и поверхностные свойства как носителей, так и катализаторов. По данным РФА было обнаружено, что после восстановительной обработки, происходит образование NiCo сплава, который по данным [1] приводит к разбавлению ансамблей никеля, размер которых связывают с интенсивностью роста углерода, что позволит снизить количество углеродистых отложений. Было показано, что модификация активного компонента приводит к увеличению стабильности каталитической активности в обеих реакциях.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект 18-73-10167).

#### **Литература:**

[1] Damaskinos C.M., Zavašnik J., Djinović P., Efstathiou A.M. // Appl. Cat. B: Env. I 2021. Vol. 296. P. 120321.

## УД-1.14

### Низкотемпературная паровая конверсия $C_{2+}$ -алканов на Rh содержащих катализаторах

Урлуков А.С.<sup>1,2</sup>, Усков С.И.<sup>1</sup>, Потемкин Д.И.<sup>1,2</sup>, Снытников П.В.<sup>1</sup>

1 – Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

*aurlukov@mail.ru*

Эффективная утилизация попутного нефтяного газа (ПНГ) является актуальной проблемой современной нефтегазовой отрасли России. В состав ПНГ, помимо метана, входят тяжелые  $C_{2+}$ -алканы, которые не позволяют напрямую использовать ПНГ в качестве топлива или транспортировать его на нефтеперерабатывающие заводы. В настоящее время одним из наиболее перспективных способов эффективной утилизации ПНГ является его использование непосредственно на месторождении для выработки электроэнергии и тепла на электростанциях малой мощности для обеспечения собственных нужд месторождения и/или снабжения ближайших населенных пунктов [1]. Использование исходного ПНГ в качестве топлива проблематично, так как он имеет высокое содержание  $C_{2+}$ -углеводородов, переменный состав и низкое метановое число. Для решения этой проблемы предлагается использовать низкотемпературную паровую конверсию (НТПК)  $C_{2+}$ -углеводородов, входящих в состав ПНГ, с преимущественным образованием метано-водородных смесей [2]. В данной работе были исследованы свойства высокодисперсных Rh-катализаторов, нанесенных на различные носители, в НТПК модельных смесей ПНГ, содержащих  $C_2H_6$ - $C_4H_{10}$  в избытке метана.

Ряд Rh-катализаторов был приготовлен методом сорбционно-гидролитического осаждения [3]. Основная идея этого метода заключается в получении раствора «соль благородного металла + щелочной агент», метастабильного при заданных условиях (температура, концентрация) по отношению к осаждению гомогенного гидроксида металла. Это связано с кинетической инертностью металлокомплексов к гидролизу при комнатной температуре. Поскольку поверхность носителя ускоряет гетерогенное зародышеобразование и рост частиц гидроксида металла, добавление носителя в смесь реагентов инициирует гидролиз, что приводит к равномерному осаждению металлов на поверхности носителя. В качестве носителей использовали  $Se_{0,75}Zr_{0,25}O_2$ ,  $Se_{0,4}Zr_{0,5}Y_{0,05}La_{0,05}O_2$ ,  $\gamma-Al_2O_3$ ,  $TiO_2$  (рутил).

Свойства полученных катализаторов исследовали в НТПК модельных смесей ПНГ при температурах 200-400 °С и скорости потока реагентов 2500-5000 мл/(г<sub>кат</sub>·ч). Катализаторы были стабильны и обеспечивали полную конверсию  $C_{2+}$ -углеводородов в  $CH_4$ ,  $CO_2$  и  $H_2$  при  $T = 320-350$  °С. Кроме того, при конверсии пропана и более тяжелых алканов на Rh-катализаторах в области низких температур (200-300 °С) увеличивается концентрация этана (рис. 1) в реакционной смеси, чего не наблюдается в присутствии

## УД-1.14

никелевых катализаторов паровой конверсии углеводородов. Этан образуется в результате параллельной реакции гидрогенолиза пропана. Этан имеет более высокую теплотворную способность, чем метан, и может компенсировать негативное влияние разбавления углекислым газом и водородом на характеристики топливной смеси. Это уникальное свойство Rh-катализаторов позволяет получать газообразные смеси, содержащие определенное количество этана, в реакциях паровой конверсии, что в свою очередь полезно для варьирования свойств (низшей теплотворной способности, числа Воббе, метанового числа) получаемых топливных смесей.

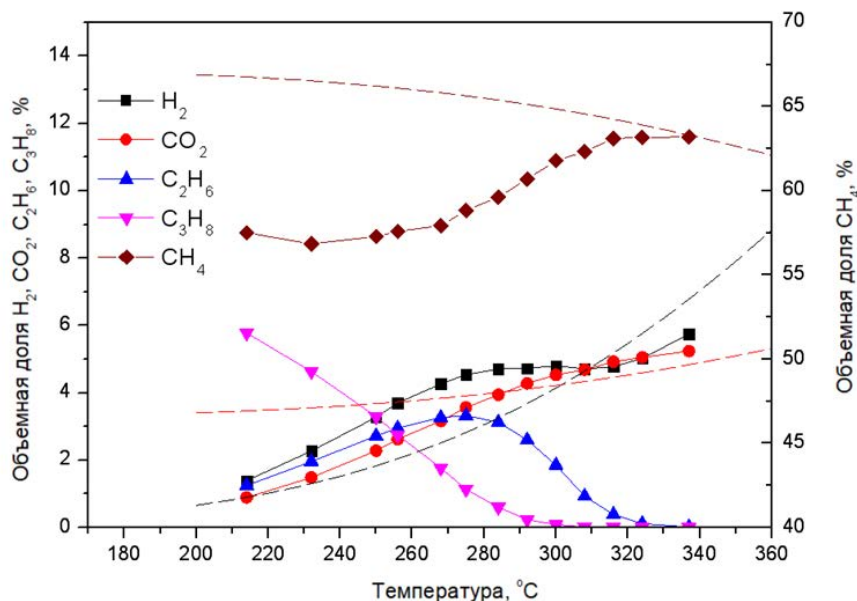


Рис. 1. Зависимость объемных долей (об. %) продуктов реакции паровой конверсии пропан-метановой смеси (54,6 об. % CH<sub>4</sub>, 7 об. % C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> и 38,5 об. % H<sub>2</sub>O) на выходе из реактора от температуры на 1 масс. % Rh/Ce<sub>0.75</sub>Zr<sub>0.25</sub>O<sub>2</sub>. Условия: 1 атм, GHSV = 2500 мл/(г<sub>кат</sub> \* ч)

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 21-73-00122.

### Литература:

- [1] Uskov S.I., Potemkin D.I., Shigarov A.B., Snytnikov P.V., Kirillov V.A., Sobyenin V.A. // Chemical Engineering Journal. 2019. V.368. P.533-540.
- [2] Zyryanova M.M., Snytnikov P.V., Shigarov A.B., Belyaev V.D., Kirillov V.A., Sobyenin V.A. // Fuel. 2014. V.135, P.76-82.
- [3] Shoynkhorova T.B., Simonov P.A., Potemkin D.I., Snytnikov P.V., Belyaev V.D., Ishchenko A.V., Svintsitskiy D.A., Sobyenin V.A. // Applied Catalysis B: Environmental. 2018. V.237. P.237-244.



## УД-1.15

### Исследование методов модификации свойств MgO для эффективного процесса очистки водорода

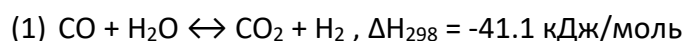
Никулина И.Е.<sup>1</sup>, Потемкин Д.И.<sup>1,2</sup>, Деревщиков В.С.<sup>1,2</sup>

1 – Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

*ikar@catalysis.ru*

Реакция паровой конверсии СО, или Water-Gas Shift (WGS) (1), является одной из стадий парового риформинга, с помощью которого получают более 75% всего производимого объема водорода [1], увеличивающей выход водорода и снижающей концентрацию СО в выходящем потоке газа до уровня менее 0.1-0.3 % [2].



Для увеличения глубины протекания процесса в соответствии с принципом Ле-Шателье необходимо отводить один из продуктов реакции. Наиболее эффективным способом является улавливание СО<sub>2</sub> подходящими сорбционными материалами, что одновременно позволяет получать высокочистый водород. Эффективный сорбент должен обладать высокой сорбционной емкостью, механической прочностью, устойчивостью к спеканию. А также улавливать СО<sub>2</sub> при температуре реакции для проведения Sorption-Enhanced WGS реакции [3].

Целью данной работы было исследовать сорбционные свойства MgO, промотированного MNO<sub>3</sub>, где M=Li, Na, K, Zn, в количестве 10 мол.%, далее обозначенными как 10MMg, полученные методом пропитки, описанным в статье [4]. Все смеси нитратов содержали соли в соотношении 1:1 за исключением образца 10LiNaKMg-2, где количество солей соотносилось как 0.8:0.6:1.5 соответственно.

Не промотированный MgO, полученный путем разложения 3MgCO<sub>3</sub>•Mg(OH)<sub>2</sub> в качестве соли-предшественника непосредственно в камере термовесов, а также аэрогели MgO, не проявляли сорбционных свойств ни при 200 °С и 50 об.% СО<sub>2</sub>, ни при 380 °С и 80 об.% СО<sub>2</sub>. Как видно из результатов на рисунке 1, присутствие NaNO<sub>3</sub> в образце 10NaMg позволило достичь сорбционной емкости по СО<sub>2</sub> 9,64 ммоль/г при 320 °С (рис.1а), а наличие всех трех солей в случае 10LiNaKMg-2 при 220 °С позволило поглотить до 4,93 ммоль СО<sub>2</sub>/г (рис.1б). Хотя промотирующий эффект достигается за счет растворения СО<sub>2</sub> в расплаве нитратной соли, попытка улучшить свойства MgO путем введения в состав Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> в количестве 5 и 10 мол.% не увенчалась успехом: сорбенты не проявляли сорбционных свойств при 200-300 °С, хотя T<sub>пл</sub> соли составляет 110 °С.

## УД-1.15

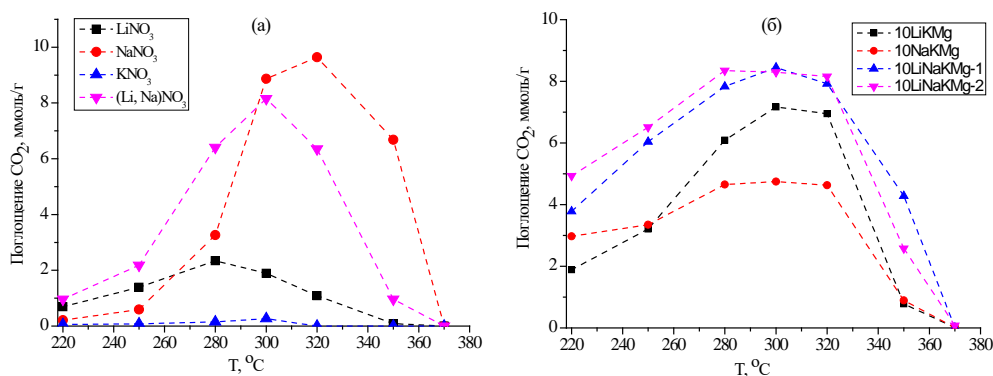


Рисунок 1 Результаты сорбции на промотированных сорбентах 10 мол.%  $MnO_3/MgO$  при различной температуре, 50 об.%  $CO_2$ , 2 часа.

Испытание промотированных сорбентов в эксперименте по циклической сорбции показало стабильность их работы (рис.2), при этом каждый металл вносит свой вклад в характер сорбционных кривых. Так,  $LiNO_3$  отвечает за стабильность поглощения от цикла к циклу, а  $NaNO_3$  и  $KNO_3$  за высокую сорбционную емкость. Стоит отметить, что повышение содержания  $KNO_3$  приводит к падению исходной сорбционной емкости.

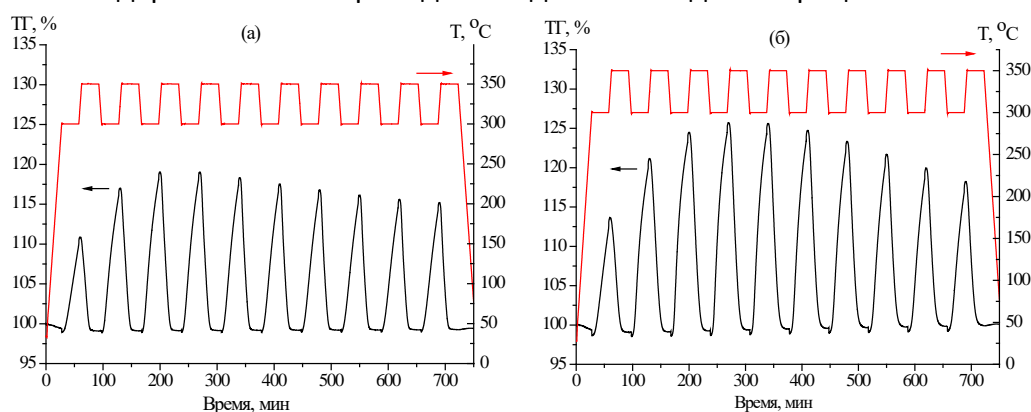


Рисунок 2 Данные ТГ-анализа в течение 10 циклов сорбции/десорбции по 30 минут каждый, 50 об.%  $CO_2$  на образце: а – 10LiNaMg; б – 10LiNaKMg-1.

Таким образом, в результате работы показана эффективность промотирования  $MgO$  нитратами щелочных металлов для эффективного улавливания  $CO_2$ . При этом более выгодно использовать смесь солей.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 21-79-10377.

### Литература:

- [1] Arutyunov V. // Academia letters. 2021. doi.org/10.20935/AL3692.
- [2] Urrejola S., Sanchez A., Cancela A., Maceiras R., Del Val V. // Chem. Technol. Fuels Oils. 2011. V. 47. P. 374-380.
- [3] Dunstan M. T., Donat F., Bork A. H., Gray C. P., Muller C. R. // Chem. Rev. 2021. DOI: 10.1021/acs.chemrev.1c00100.
- [4] Harada T., Simeon F., Hamad E., Hatton A. // Chem.Mater. 2014. DOI: 10.1021/cm503295g.

## УД-1.16

### Паровая конверсия СО для получения водорода высокой чистоты из синтез-газа: катализаторы и условия

Горлова А.М., Пахарукова В.П., Снытников П.В., Потемкин Д.И.  
*Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия*  
*gorlova@catalysis.ru*

Переход к водородной энергетике в транспортном секторе предполагает, среди прочего, переход от двигателей внутреннего сгорания к топливным элементам. Среди многообразия последних выбор падает на топливные элементы с протонообменной мембраной (ПОМТЭ), которые характеризуются относительно низкой рабочей температурой (-40...120 °С) и малым временем выхода на режим (секунды) [1]. Однако для питания ПОМТЭ необходим водород высокой чистоты; в частности, содержание примеси СО не должно превышать 10 ppm [2]. Поэтому цикл производства водорода из метана путем его паровой конверсии должен включать в себя стадию удаления СО из образующегося синтез-газа. В свою очередь, паровая конверсия СО (ПК СО) является первым этапом этой стадии.

Для проведения ПК СО в рамках портативной или небольшой стационарной установки для производства водорода могут оказаться важными такие характеристики катализаторов как толерантность к следам кислорода и время активации. С этой точки зрения промышленные катализаторы ПК СО имеют недостатки – для перехода в активное состояние им требуется несколько часов предварительного восстановления, после чего они становятся пирофорными. Этих недостатков лишены, в частности, катализаторы на основе оксида церия с нанесенной на них платиной. Показано, что одной из основных причин высокой активности таких катализаторов в ПК СО является большое количество кислородных вакансий и высокая подвижность кислорода в оксиде. Улучшить эти характеристики позволяет введение в оксид допирующих металлов (Zr, La, Y).

В работе представлены данные по исследованию взаимосвязи между составом, структурой и активностью в реакции ПК СО платиновых катализаторов на основе допированных оксидов церия. Нанесение платины на поверхность оксида производилось методом сорбционно-гидролитического осаждения [3]. Полученные таким способом катализаторы характеризуются узким распределением по размерам частиц нанесенного металла, а также их высокой дисперсностью ( $\leq 2$  нм) и устойчивостью к спеканию в условиях ПК СО [4]. Испытания катализаторов проводились в диапазоне температур 250-350 °С при атмосферном давлении в смесях, близких по составу к продукту паровой конверсии метана. Показано, что в таких условиях в случае монометаллических платиновых катализаторов в газовой смеси после ПК СО наблюдается небольшое количество метана, который является продуктом побочной

## УД-1.16

реакции метанирования оксидов углерода. В то же время, нанесение железа в качестве второго металла позволяет практически полностью подавить образование метана и обеспечить 100 % селективность относительно ПК CO (Рис. 1).

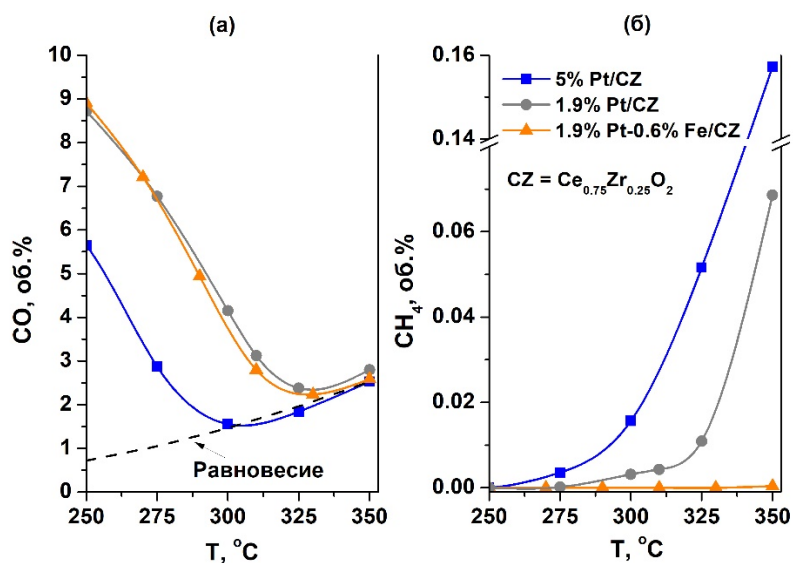


Рис. 1. Зависимости концентраций CO (а) и CH<sub>4</sub> (б) после ПК CO от температуры. Исходная смесь (об.%): 10 CO, 15 CO<sub>2</sub>, 45 H<sub>2</sub>, 30 H<sub>2</sub>O. Скорость подачи смеси 30000 мл·2<sub>кат</sub><sup>-1</sup>·ч<sup>-1</sup>.

Также представлены данные по анализу динамики состояния платиновых катализаторов в ходе ПК CO, полученные комплексом физико-химических методов [4]. Кроме того, проведено сравнение приготовленных в ходе работы катализаторов с коммерческими образцами.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 21-79-10377.

### Литература:

- [1] Mitrofanov S.V., Kiryanova N.G., Gorlova A.M. // Energies. 2021. V. 14. P. 5946.
- [2] Park E.D., Lee D., Lee H.C. // Cat. Today. 2009. V. 139. P. 280-290.
- [3] Shoynkhorova T.B., Simonov P.A. et al. // Appl. Catal. B Environ. 2018. V. 237. P. 237-244.
- [4] Gorlova A.M., Panafidin M.A. et al. // Int. J. Hydrogen Energy. 2022.

## УД-1.17

### Оборудование Altamira Instruments и RuboLab для исследования процессов получения водорода и материалов для его хранения

Абуткина Е.Н.

ООО «НКЦ «ЛАБТЕСТ», Москва, Россия

lena@lab-test.ru

Компания ООО «НКЦ «ЛАБТЕСТ» является официальным эксклюзивным представителем производителей Altamira Instruments (США/Китай) и RuboLab (Германия/Китай) в России. Компании Altamira Instruments и RuboLab специализируются на разработке высококачественных измерительных приборов в области исследования адсорбции и катализа. Данное оборудование широко применяется для исследования материалов для хранения водорода (углеродные пористые материалы, гидриды металлов, МОКС и др.), топливных элементов, а также процессов получения водорода в результате различных газожидкостных реакций.

Высокоточный анализатор физисорбции TOP-200 производства Altamira Instruments позволяет производить анализ микро- и мезопористых носителей для хранения водорода, а также измерять их удельную поверхность. Анализ удельной поверхности и пористости позволяет осуществлять контроль разрабатываемых материалов.



Рис. 1. Анализатор TOP-200 [1]

Волюмометрические анализаторы RuboSORP MPA производства RuboLab предназначены для проведения адсорбции водорода под давлением до 200 бар. Прибор позволяет одновременно анализировать до 5 образцов. Температурный диапазон – от -20 С до 500 С, опционально возможен анализ при температуре жидкого азота. Точность дозирования обеспечивается набором нескольких калиброванных резервуаров объемами от 10 до 1200 мл. Представление данных возможно в виде изотерм адсорбции, кривых состав-давление-температура (СРТ) и графиков кинетики адсорбции. Управление анализатором – полностью в автоматическом режиме, в т.ч. проведение циклов адсорбции-десорбции.

## УД-1.17



Рис. 2. Анализатор RuboLab MPA [2]

Также представлена серия анализаторов RuboSORP, обеспечивающая давление до 700 бар. Определение количества адсорбированного газа происходит с помощью гравиметрического метода.

Динамический анализатор многокомпонентной адсорбции RuboSORP BTC предназначен для измерения сорбционной емкости, теплоты и кинетики адсорбции при исследованиях процессов пористых материалов для разделения и хранения газов.

Анализаторы серии AMI-300 производства Altamira Instruments применяются при исследованиях катализаторов для получения водорода. Аналитические возможности AMI-300 включают определение дисперсности, активной поверхности и размера зерна катализатора методом импульсного титрования, а также проведение термопрограммируемых реакций ТПО/ТПВ/ТПД.

Компания Altamira Instruments имеет огромный опыт в разработке газожидкостных лабораторных и полупромышленных реакторных систем BenchCAT, в т.ч. для процессов получения и превращения водорода под задачу заказчика.

### **Литература:**

[1] Официальный сайт Altamira Instruments [Электронный ресурс] //

URL: <https://www.altamirainstruments.com/> (дата обращения: 15.09.2022).

[2] Официальный сайт RuboLab [Электронный ресурс] // URL: <https://www.rubolab.de/en> (дата обращения: 15.09.2022).

## УД-1.18

### Электрохимические методы исследования катализаторов окисления водорода при их разработке для топливных элементов с протон-проводящей мембраной

Кузнецов А.Н., Потанина Ю.Ю., Ощепков А.Г., Козлов Д.В.  
*Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия*  
*kan@catalysis.ru*

Топливные элементы с протон-проводящей мембраной (ТЭППМ), напрямую использующие водород в качестве топлива, преобразуют химическую энергию в электрическую и являются одним из эффективных экологических источников энергии, КПД достигает 60 – 80 %. Основным компонентом электрокатализаторов, которые нанесены на анод и катод в ТЭППМ, является платина. Водород, полученный путем паровой конверсии природного газа, так называемый «голубой» водород, считается наиболее рентабельным. Такое топливо даже после очистки содержит небольшое количество различных примесей: CO, H<sub>2</sub>S и другие. Основной «вредной» примесью в водороде является монооксид углерода, который прочно адсорбируется на платине, что существенно ограничивает ресурс работы электрокатализатора путем его дезактивации. Одним из путей решения данной проблемы является создание новых би- (или более) металлических катализаторов. Ярким примером является PtRu, где рутений существенно облегчает процесс окисления адсорбированного CO.

В ходе разработки новых катализаторов необходимо проводить экспресс тесты, в которых определяется их активность в окислении водорода и устойчивость к отравлению CO. Новые катализаторы могут быть протестированы в реальных условиях работы ТЭ. Однако тесты в ТЭ достаточно трудоемкие, требуют затраты относительно большого количества Pt катализаторов и не позволяют адекватно оценить удельную каталитическую активность катализатора. В модельных условиях, применяя, например, метод вращающегося дискового электрода (ВДЭ), все недостатки, перечисленные для тестов в ТЭ, отсутствуют. Однако, в научном сообществе нет единого протокола измерений, поэтому необходимо развивать методики коротких тестов. Промежуточным звеном в цепочке измерений является метод, основанный на использовании газодиффузионного электрода (ГДЭ), позволяющий легко перейти от модельных систем к реальным. Таким образом, выстраивается следующая схема исследования катализаторов: первичные тесты по методу ВДЭ, затем метод ГДЭ и тест наилучших образцов в ТЭ (Рис. 1).

Все эти методы, связанные с тестированием электрокатализаторов, будут рассмотрены и обсуждены в докладе. Будут представлены данные апробации такого подхода в тестировании моно- и биметаллических платиновых катализаторов в сравнении с существующими коммерческими образцами. Рассмотрено влияние

## УД-1.18

различных факторов на активность в окислении водорода и устойчивости к отравлению СО, а именно влияние микроструктуры катализатора и состава активного компонента.

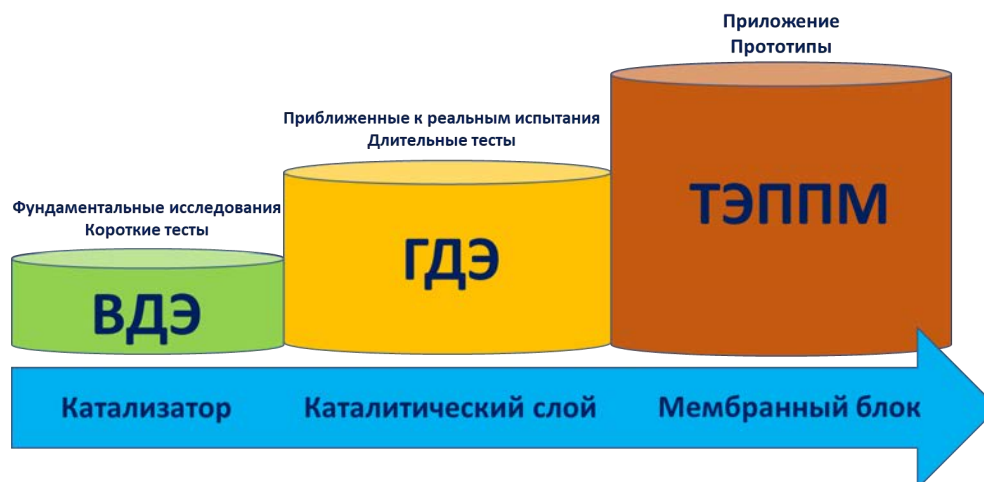


Рис. 1. Схема электрохимического исследования катализаторов

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Центра НТИ «Водород как основа низкоуглеродной экономики», проект «Водородная заправка».



## УД-2.1

### Опыт разработок ЮРГПУ(НПИ) в области водородной энергетики

Смирнова Н.В.

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)*

*имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия*

*smirnova\_nv@mail.ru*

Разработки в области водородных технологий и технологий замкнутого углеродного цикла в ЮРГПУ(НПИ) ведутся по нескольким направлениям и многократно поддержаны РФФИ, Минобрнауки и ФЦП.

Во-первых, это материалы, технологии и устройства для электрохимических систем генерации и накопления энергии – топливных элементов, литий-ионных аккумуляторов, суперконденсаторов. Уже разработаны электрохимическая технология получения платиноуглеродных катализаторов с повышенной стабильностью для водородных ТПТЭ [1,2], способы получения активных электродных материалов для ЛИА, в том числе углеродных, оксидных [3]; композитных материалов для гибридных СК [4]. Разработан и создан комплекс технологического оборудования для производства твердополимерных топливных элементов, включающий технологические линии производства металлических биполярных пластин и герметизации единичного ТЭ; создана система и алгоритмы управления для энергоустановок на ТЭ. Ведется разработка технологии композитных БП для энергоустановок на ТПТЭ для робототехники и стационарных применений.

Разрабатываются технологии замкнутого углеродного цикла, в том числе технологии комплексной переработки биомассы растительного происхождения для производства продукции с высокой добавленной стоимостью – полифункциональных органических веществ, мономеров и полимеров. Создан комплекс оборудования синтеза фурановых полиэфиров непосредственно из возобновляемого растительного сырья, включая технологии утилизации отходов и очистки сточных вод. На базе фурановых мономеров создана серия новых адгезивов, связующих, композиционных материалов [5,6]. Разрабатываются новые углеродные материалы из отходов переработки растительного сырья для водородной энергетики [7].

Проводятся фундаментальные и прикладные исследования, инжиниринг в области получения синтез-газа, синтетических углеводородов и продуктов на их основе, в том числе в области переработки природных и попутных нефтяных газов в синтетические топлива, церезин, масла и метанол; переработки биомассы в синтетические углеводороды; обратимого превращения лабильных химических соединений и систем для генерации, аккумулирования и транспортировки водорода.

## УД-2.1

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках стратегического проекта «Системы водородной энергетики» Программы развития ЮРГПУ(НПИ) при реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

### **Литература:**

- [1] Kuriganova A. et al. // Applied Catalysis A: General. 2012. V.431-432. P. 120-125.
- [2] Kuriganova A.B. et al. // Mendeleev Communications. 2018. V.28 P. 444-446.
- [3] Kuriganova, A.B. et al. // J. Applied Electrochemistry. 2016. V.46. P. 527
- [4] Chernysheva D.V. et al. // Mendeleev Commun. 2021. V. 31. P. 160–162
- [5] Kashparova, V.P et. Al. // Russian Chemical Reviews. 2021. V. 90(6). P 750–784.
- [6] Klushin V. // Chemistry: A European Journal. 2020. V. 27 (10) P. 3382-3396.
- [7] Chernysheva D.V. et al. // ChemSusChem. 2018. V. 11. P. 3599.

## УД-2.2

### Конверсия лигнина в водородсодержащий газ в присутствии углеродных поглотителей микроволнового излучения

Чистяков А.В., Константинов Г.И., Цодиков М.В.

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

*chistyakov@ips.ac.ru*

Углеродные материалы обладают рядом уникальных свойств, что позволяет создавать на их основе новые химические процессы весьма сложной конфигурации, область использования которых в народном хозяйстве простирается от медицины и военной техники до решения экологических проблем, связанных с антропогенным загрязнением окружающей среды.

В работе были протестированы восемь промышленных образцов активированного угля, предоставленные ООО «Сорбис Групп». Найдено, что для достижения температуры 800 °С под воздействием микроволнового излучения наименьшее время требуется при использовании березового угля БАУ-А и кокосового угля АК (Рисунок 1).

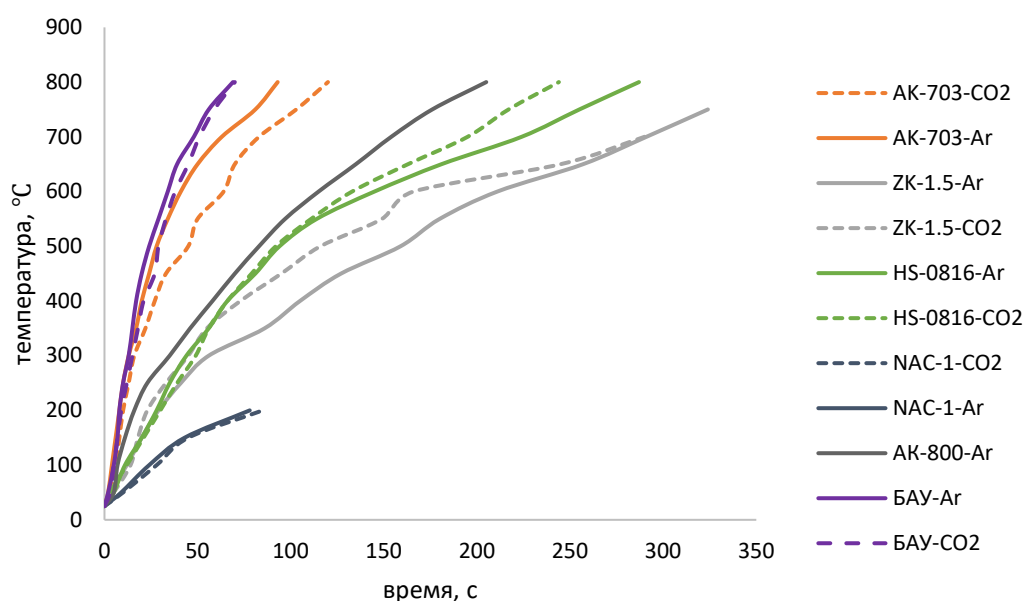


Рис. 1. Динамика нагрева УА при Микроволновом воздействии

Проведено исследование влияния газа-элюента на динамику нагрева углеродных материалов под действием микроволнового излучения. Показано, что наибольшая скорость нагрева достигается в среде аргона, что, вероятно, связано с его более низким потенциалом ионизации и высокой стабильностью ионов. Найдено, что максимальные производительности по водород содержащему газу достигаются при использовании углей АК-703 и БАУ-А (Рисунок 2). Степень извлечения водорода из лигнина составила 80%.

## УД-2.2

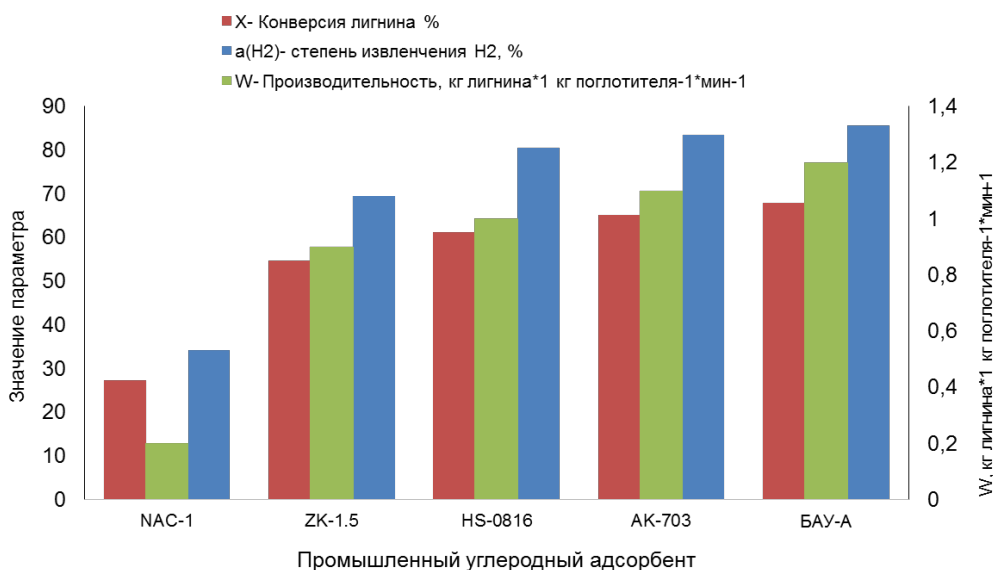


Рис. 2. Конверсия лигнина, степень извлечения водорода и производительность изученных углеродных материалов

В работе были протестированы восемь промышленных образцов активированного угля, предоставленные ООО «Сорбис Групп». Найдено, что для достижения температуры 800 °С под воздействием микроволнового излучения наименьшее время требуется при использовании березового угля БАУ-А и кокосового угля АК (Рисунок 1).

Разработаны научно-технические основы переработки лигнина в водород содержащий газ под действием микроволнового излучения (МВИ). Отличительными особенностями разрабатываемого подхода являются: высокая скорость переработки лигнина, устойчивость метода к изменениям состава и влажности субстрата, толерантность к неорганическим примесям и каталитическим ядам, таким, например, как соединения серы и азота, безградиентный нагрев реакционной зоны, высокая селективность в разрыве С-Н связей. Полученные результаты позволяют предложить качественно новый подход к переработки высоко стабильных соединений, как лигнин, в водород со значительно меньшими энергозатратами, по сравнению с существующими технологиями.

**Благодарность:** Исследования выполнены в рамках работ по Программе развития Центра компетенций Национальной Технологической Инициативы «Водород как основа низкоуглеродной экономики» при участии в Национальном проекте «Наука и университеты» при поддержке Фонда поддержки проектов национальной технологической инициативы и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашения о формировании консорциума «Водород как основа низкоуглеродной экономики» от «06» июля 2021 г.)

## УД-2.3

### Получение водорода паровой конверсией биоспиртов на никель-кобальтовых катализаторах, диспергированных в углеродной матрице

Осипов А.К.<sup>1,2</sup>, Крысанова К.О.<sup>1</sup>, Дедов А.Г.<sup>1,2</sup>

1 – ИХС РАН имени А.В. Топчиева, Москва, Россия

2 – РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия

osipov.aleksander.k@gmail.com

Разработка процессов получения водорода, а также продуктов и полупродуктов нефтехимии из возобновляемого сырья является важным шагом на пути к низкоуглеродной энергетике. Паровая конверсия спиртов биологического происхождения является перспективным способом получения «зеленого» синтез-газа – важнейшего полупродукта для получения целого ряда ценных веществ. Наиболее изученным в этом процессе биоспиртом является этанол, при этом также большой интерес представляет изобутанол, процесс производства которого из кукурузного сырья коммерчески реализован компаниями Gevo и Butamax.

Наряду с использованием биоспиртов в качестве сырья, в рамках концепции «зеленой» химии также представляет интерес получение катализаторов с использованием продуктов переработки биомассы, таких как биоугли. Углеродные материалы часто используются, как носители для самых разных катализаторов, кроме того, некоторые из них также проявляют активность в реакциях паровой конверсии и разложения спиртов.

В данной работе получены катализаторы паровой конверсии спиртов на основе углеродных материалов, полученных карбонизацией (высокотемпературной анаэробной и гидротермальной) различного сырья растительного происхождения, содержащих нанесенные методом пропитки Ni и/или Co с массовым содержанием от 1% до 5%. Катализаторы испытаны в процессе паровой конверсии спиртовой смеси (EtOH : *i*BuOH : H<sub>2</sub>O = 1:1:4) при различных температурах.

**Таблица 1.** Выходы продуктов паровой конверсии спиртов на исследуемых катализаторах при 700°C

Катализатор	Выходы газообразных продуктов, %			
	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
1%Co/C <sub>АН</sub>	42	41	32	25
1%Co/C <sub>ГТ</sub>	45	41	26	33
5%Co/C <sub>АН</sub>	52	53	24	18
5%Co/C <sub>ГТ</sub>	48	49	20	29
5%Ni/C <sub>АН</sub>	53	59	21	18
5%Ni/C <sub>ГТ</sub>	51	57	23	19
2,5%Ni2,5%Co/C <sub>АН</sub>	65	67	17	16
2,5%Ni2,5%Co/C <sub>ГТ</sub>	66	50	28	17

### УД-2.3

В проведенных испытаниях конверсия спиртов для всех образцов составила 100%, конверсия воды от 55% для образцов, содержащих 1% Со, до 87% для биметаллических катализаторов, содержащих по 2,5% нанесенных металлов. Содержание углеводородов C<sub>2+</sub> в газопродуктовой смеси не превышало 1% для всех проведенных испытаний. Наибольшие выходы H<sub>2</sub> (66%) и СО (67%) показали биметаллические катализаторы на основе карбонизата, полученного прокаливанием без доступа воздуха. Содержание СО<sub>2</sub> и СН<sub>4</sub> в газопродуктовой смеси для этих катализаторов составило по 16%.

Таким образом, полученные в данной работе катализаторы показали высокую активность в процессе паровой конверсии спиртов в синтез-газ, что делает их пригодными для комплексного решения проблемы производства экологичного топлива и полупродуктов нефтехимии.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансировании РНФ, проект № 22-23-0090

## УД-2.4

### Паровая конверсия метанола в водородсодержащий газ

Кузнецова А.Д.<sup>1,2</sup>, Бадмаев С.Д.<sup>1</sup>, Снытников П.В.<sup>1</sup>, Собынин В.А.<sup>1</sup>

*1 – Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия*

*2 – Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

*a.kuznetsova1@g.nsu.ru*

В настоящее время энергоустановки на базе топливных элементов рассматриваются как альтернативные и экологически чистые источники электрической энергии. Топливные элементы с полимерным протон-проводящим электролитом (ТЭПЭ) являются наиболее коммерциализованными среди известных электрохимических генераторов. Топливом для ТЭПЭ является водород, который может быть получен посредством каталитической конверсии углеводородов или кислородсодержащих органических соединений.

Метанол, который является биржевым сырьем с развитой инфраструктурой, рассматривается в качестве перспективного сырья для получения водорода. Существенно, что метанол отличается от традиционных углеводородов низкой температурой превращения, а также отсутствием примесей соединений серы, которые являются ядом для большинства катализаторов.

Среди способов получения водородсодержащего газа из метанола, паровая конверсия приводит к наибольшему содержанию водорода в продуктах. Для осуществления паровой конверсии метанола нами были предложены эффективные катализаторы  $\text{CuO-CeO}_2/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{CuO-ZnO}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  [1,2], которые обеспечивают полную конверсию метанола и высокую производительность по водороду ( $\sim 15 \text{ л H}_2 \cdot \text{г}_{\text{кат}}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$ ) при относительно мягких условиях. При этом, концентрация СО в получаемом водородсодержащем газе не превышает 1 об.%, что позволяет использовать такую смесь для питания высокотемпературных ТЭПЭ без какой-либо очистки от СО.

В докладе рассматриваются каталитические свойства  $\text{CuO-CeO}_2/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{CuO-ZnO}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  систем в отношении паровой конверсии метанола, а также их физико-химические характеристики, полученные методами ТПВ, РФА, ПЭМВР, EDX и ИКС.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект №17-79-30071.

#### **Литература:**

[1] Badmaev S.D. , Sobyenin V.A. // *Catalysis Today*. 2020. V.348. P.9-14.

[2] Pechenkin A. , Badmaev S. , Belyaev V. , Sobyenin V. // *Energies*. 2019. V.12. N18. 3577:1-10.

## УД-2.5

### Разработка никельсодержащих катализаторов для твердофазных источников водорода на основе боргидрида натрия

Нецкина О.В., Булаков В.Э., Комова О.В., Тайбан Е.С., Просвирин И.П., Ищенко А.В.,  
Булавченко О.А., Рогов В.А., Симагина В.И.

Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия

*netskina@catalysis.ru*

Аккумуляция электроэнергии в водородном цикле выступает как основной сценарий перехода мировой энергетики к безуглеродным энергоносителям, но остро стоит вопрос компактного хранения водорода. Для долговременного хранения предпочтительно переводить водород в химически связанное состояние, например, в виде гидридов, не имеющих конкурентов по его содержанию.

При их взаимодействии с водой выход водорода увеличивается в 2 раза. Следует отметить, что гидриды энергично взаимодействуют с водой с выделением тепла, что позволяет создать водородгенерирующие системы для Арктической зоны. Тем не менее, для их безопасной эксплуатации следует выбрать гидрид с приемлемым тепловым эффектом. Таким соединением является боргидрид натрия ( $\text{NaBH}_4$ ), но для его полной конверсии требуются присутствие катализаторов. Наиболее изучены в гидролизе  $\text{NaBH}_4$  кобальтовые катализаторы. Однако из-за востребованности в производстве литий-ионных аккумуляторов стоимость кобальта растет. Альтернативным катализатором гидролиза  $\text{NaBH}_4$  выступает никель, цена которого в 3 раза меньше кобальта.

В данной работе проведено сравнение кинетических закономерностей гидролиза  $\text{NaBH}_4$  в присутствии кобальтовых и никелевых катализаторов, добавленных в состав твердых водородгенерирующих композиций. Установлено, что активность никелевых катализаторов ниже, чем кобальтовых, несмотря на более дисперсное состояние активного компонента (Рис.1). Главной причиной является низкая эффективность адсорбции боргидрид-аниона из-за присутствия водорода на поверхности никелевых частиц.

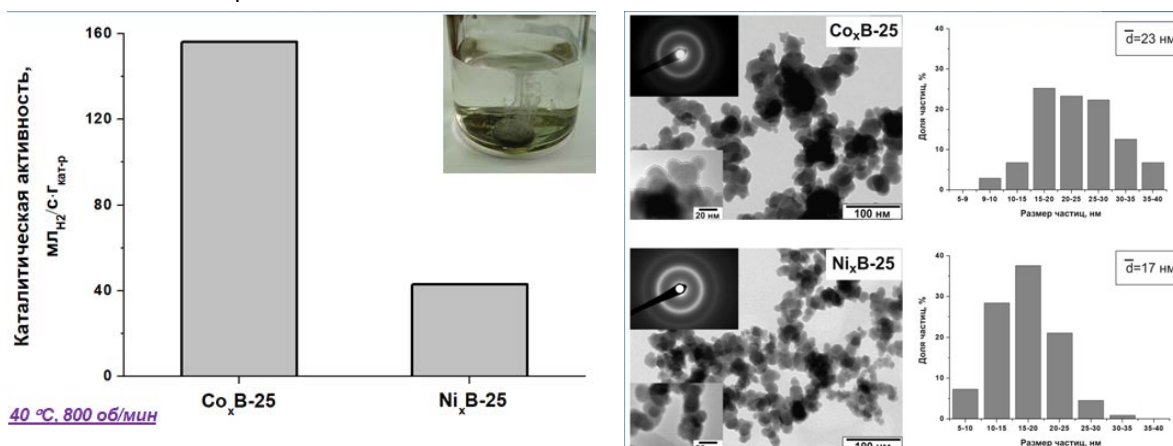


Рис. 1. Сравнение кобальтового и никелевого катализаторов гидролиза боргидрида натрия



## УД-2.5

Было определено, что прокаливание никелевых катализаторов до 350 °С практически не влияет на скорость газогенерации. При дальнейшем увеличении температуры частицы укрупняются и объединяются в протяженные структуры, окруженные аморфным слоем из оксида бора, что приводит к снижению каталитической активности. Тем не менее, наблюдается усиление магнитных свойств никелевых катализаторов за счет накопления ферромагнитной фазы металла. Это положительно влияет на степень их извлечения из реакционной среды с помощью магнита.

Для увеличения активности прокаленного никелевого катализатора было предложено закрепить кобальт на его поверхности разными методами: пропиткой растворами хлорида кобальта, восстановительным осаждением кобальта в воде и этаноле. Среди рассмотренных методов наиболее эффективный биметаллический катализатор в гидролизе боргидрида натрия был получен пропиткой никелевого катализатора этанольным раствором хлорида кобальта, который позволил закрепить более 16,3 мас% кобальта в виде поверхностного слоя на ферромагнитных никелевых частицах (Рис. 2).

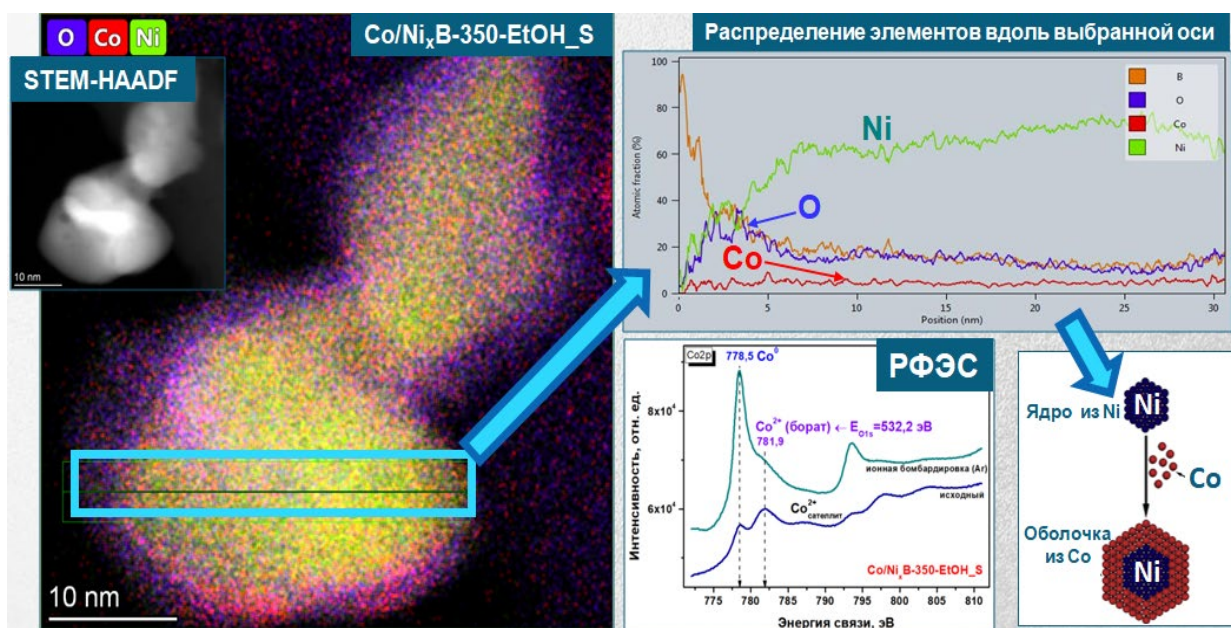


Рис. 2. Биметаллические частицы кобальт-никелевого катализатора, полученного пропиткой прокаленного никелевого катализатора этанольным раствором хлорида кобальта

Таким образом, для твердофазных водородгенирирующих материалов на основе боргидрида натрия предложен эффективный ферромагнитный кобальт-никелевый катализатор, легко извлекаемый из отработанной реакционной среды магнитом.

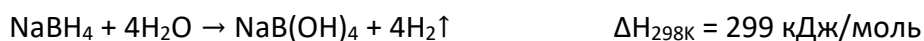
**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания № 0239-2021-0007 (AAAA-A21-121011390006-0).

## УД-2.6

### Твердофазные источники водорода на основе боргидрида натрия: синтез магнитоотделяемых Co и Co@Pt катализаторов методом гальванического замещения

Озерова А.М., Комова О.В., Симагина В.И., Муха С.А., Нецкина О.В.  
*Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия*  
*ozerova@catalysis.ru*

Создание и широкое распространение малоразмерных источников энергии на основе топливных элементов, которые набирают все большую популярность для обеспечения работы портативной техники, невозможно без разработки компактных систем хранения и генерации водорода. Боргидрид натрия ( $\text{NaBH}_4$ ) является одним из наиболее перспективных водородгенерирующих материалов благодаря высокому содержанию водорода (10,8 мас.% или  $112 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ), коммерческой доступности, стабильности при хранении, высокой растворимости в воде (14,5 моль/л при  $25^\circ\text{C}$ ) [1]. Его каталитический гидролиз обеспечивает контролируемое и безопасное выделение  $\text{H}_2$  при температурах окружающей среды ( $-40\dots+60^\circ\text{C}$ ).



В настоящее время идёт интенсивный поиск активных и стабильных катализаторов данного процесса. Наибольшее внимание исследователей сконцентрировано на кобальте, который характеризуется высокой каталитической активностью и приемлемой ценой [2].

Данная работа посвящена синтезу магнитоотделяемых катализаторов гидролиза боргидрида натрия на основе кобальта методом гальванического замещения с использованием микропорошка алюминия в качестве темплата. Данный метод в последнее время стал активно исследоваться для получения катализаторов [3], однако его потенциал для синтеза катализаторов гидролиза  $\text{NaBH}_4$  практически не изучен. В результате проведенного исследования были оптимизированы условия получения наиболее активных каталитических композиций. Установлено, что  $\text{Co}(\text{acac})_3$  в качестве исходного соединения кобальта является более перспективным по сравнению  $\text{CoCl}_2$  и  $\text{CoSO}_4$ , при этом в среде этанола формируются более активные катализаторы, чем в водном растворе. Ультразвуковая обработка обеспечивает значительное сокращение времени синтеза. С помощью методов химического анализа, РФА и СЭМ было показано, что формирующиеся частицы имеют средний размер  $\sim 45 \text{ мкм}$  и состоят из алюминиевого ядра, покрытого оболочкой металлического кобальта (г.п.у.) с толщиной  $\sim 3 \text{ мкм}$  (Рис. 1). Показано, что обработка катализаторов раствором  $\text{NaOH}$  позволяет удалить из их состава оставшийся алюминий и сформировать полые оболочки из металлического кобальта (Рис. 1). При этом наблюдается увеличение каталитической активности в 1,8 раз.

## УД-2.6



Рис. 1. Микрофотографии СЭМ исходного порошка алюминия, а также синтезированного на его основе кобальтовых и платино-кобальтового катализаторов.

Для усиления каталитических свойств полученные полые микрооболочки металлического кобальта были модифицировали слоем платины путем их гальванического замещения в водном растворе  $\text{H}_2\text{PtCl}_6$ . В результате, согласно данным РФА и СЭМ, имело место равномерное закрепление платины на поверхности кобальта (Рис. 1), магнитные свойства которого обеспечивают легкое отделение катализатора из реакционной среды с помощью магнита и его повторное использование. Также было показано, что платина улучшает стабильность кобальтовых катализаторов при хранении. Добавление всего 0,2 ат.% Pt повышает каталитическую активность в 1,6 раза. При дальнейшем добавлении до 19 ат.% Pt наблюдается линейный рост активности до 5,2 раза. Введение большего количества Pt не оказывает такого существенного эффекта.

Проведение ресурсных испытаний показало, что синтезированные катализаторы характеризуются высокой стабильностью. При этом по данным РФЭС, в ходе гидролиза  $\text{NaNH}_4$  с ними протекают несколько процессов – 1) адсорбция на их поверхности продуктов гидролиза – боратов натрия; 2) частичное восстановление кобальтовой поверхности *in situ* под действием  $\text{NaNH}_4$  с образованием высокоактивных фаз  $\text{Co}_x\text{H}$  и, вероятно,  $\text{Co}(\text{BO}_2)_2$ ; 3) унос с поверхности части платины в случае образцов с её высоким содержанием. Так, скорость выделения водорода после 10 циклов непрерывных испытаний полых сфер кобальта и низкоплатинового  $\text{Pt}_{0,2}\text{Co}_{99,8}$  и удаления с их поверхности боратного слоя не уступает исходной величине.

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания № 02392021-0007 (AAAA-A21-121011390006-0).

### Литература:

- [1] В.И. Симагина, О.В. Нецкина О.В. Комова О.В. // Альтернативная энергетика и экология. 2007. Т. 10. С. 54–64.
- [2] Simagina V.I., Ozerova A.M., Komova O.V., Netskina O.V. // Catalysts. 2021. V. 11. P. 1-31.
- [3] Da Silva A.G.M., Rodrigues T.S., Haigh S.J., Camargo P.H.C. // Chem. Commun. The Royal Society of Chemistry. 2017. V. 53. P. 7135–7148

## УД-2.7

### Влияние природы борсодержащего гидрида на низкотемпературную генерацию $H_2$ в присутствии Cu-Co-O каталитических систем

Бутенко В.Р., Комова О.В., Симагина В.И., Одегова Г.В., Булавченко О.А.,  
Липатникова И.Л., Муха С.А., Нецкина О.В.

*Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия*

*vladislav.but@mail.ru*

Одним из сценариев перехода на низкоуглеродную экономику является развитие водородной энергетики, для которой необходимы эффективные и безопасные системы хранения и генерации  $H_2$ . Среди различных водородгенирующих материалов отмечается высокий потенциал применения твердых борсодержащих гидридов (БСГ) для мобильных энергоустановок на основе низкотемпературных топливных элементов с протонообменной мембраной (ТЭ ПОМ). Лидером по изученности и практическому применению является боргидрид натрия ( $NaBH_4$ , БГН, 10,8 мас.% Н). Особое внимание уделяют амминборану ( $NH_3BH_3$ , АБ, 19,6 мас.% Н) и продукту его превращения этилендиаминбисборану ( $(CH_2NH_2BH_3)_2$ , ЭДББ, 16,3 мас.% Н) из-за высокой устойчивости к влаге воздуха. На данный момент ЭДББ является менее изученным гидридом. Однако уже показано, что в отличие от АБ его использование позволяет повысить чистоту выделяемого  $H_2$ , избегая выделения примесей  $NH_3$  (яд для ТЭ ПОМ).

Процесс каталитического гидролиза АБ и ЭДББ позволяет получить  $H_2$  с высокой скоростью при температурах окружающей среды, но это снижает показатель гравиметрической емкости системы по водороду  $W_m < 1$  мас.%, учитывающий массу всех компонентов водородгенирующей системы. Низкотемпературный термолиз АБ и ЭДББ позволяет достичь более высоких значений  $W_m \sim 4-6$  мас.%, но требует нагрев 100-120 °С. Гидротермолиз как комбинация данных процессов пока изучен только в случае АБ. Он является наиболее эффективным по соотношению скорости генерации  $H_2$  и показателя  $W_m > 7$  мас.% при температурах нагрева  $\leq 90$  °С.

Данная работа посвящена разработке активных каталитических систем на основе оксида кобальта, допированного оксидом меди, для улучшения характеристик процесса гидролиза и гидротермолиза АБ и ЭДББ. Предшественники катализаторов готовили методом термического разложения  $CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$  в присутствии  $Co_3O_4$ , а также горением. Отметим, что БСГ могут выступать не только как источники водорода, но и как восстановители, способные реагировать с соединениями переходных металлов непосредственно в реакционной среде с формированием активных нанодисперсных металлов или их боридов. Такой *in situ* формирующийся активный компонент является более активным, чем *ex situ* восстановленный катализатор. Использование оксидов позволяет получать стабильные твердые композиции с гидридом. С другой стороны, недостатком использования  $Co_3O_4$  является присутствие длинного индукционного периода

## УД-2.7

(ИП) (Рис. 1.), обусловленного его восстановлением до активного  $\text{Co}_x\text{V}$ , особенно в среде АБ и ЭДББ (более слабые восстановители, чем БГН). Основной задачей этого исследования был поиск подходов по увеличению скорости восстановления оксида кобальта в реакционной среде исследуемых БСГ, а значит и увеличению скорости генерации  $\text{H}_2$ .

Проведенная работа позволила показать, что активность  $\text{Co}_3\text{O}_4$  в реакции гидролиза БСГ зависит от их природы. Уменьшение длительности ИП и увеличение скорости генерации  $\text{H}_2$  наблюдается в ряду: ЭДББ  $\ll$  АБ  $<$  БГН. Установлено, что увеличение скорости восстановления кобальта в составе оксида возможно при использовании  $\text{CuO}$  вместо  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , а также при введении  $\text{CuO}$  в состав катализатора. Так, введение всего 10 мас.%  $\text{CuO}$  к  $\text{Co}_3\text{O}_4$  позволило избавиться от ИП на кривых генерации  $\text{H}_2$  как при гидролизе АБ (Рис. 1.), так и ЭДББ. При этом удельная активность катализаторов, отнесенная на суммарное количество молей  $\text{Cu}$  и  $\text{Co}$  в реакционной среде, существенно превышает активность индивидуальных оксидных фаз.

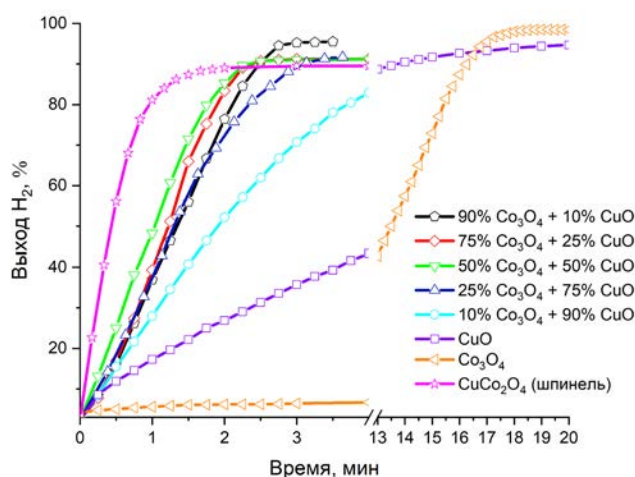


Рис. 1. Влияние состава оксидной композиции на каталитическую активность в процессе гидролиза АБ при 60 °С.

Полагаем, что полученные результаты согласуются с предположением, что наблюдаемый эффект связан с более легким процессом восстановления меди, по сравнению с кобальтом. По-видимому, формирующиеся в реакционной среде гидридные  $\text{Cu-H}$  центры на поверхности катализатора ускоряют восстановление кобальта, входящего в состав катализатора, и защищают активный компонент от окисления в ходе реакции. Без меди катализатор на основе  $\text{CoO}$  теряет активность при хранении. Установлено, что формирование фазы смешанного оксида  $\text{Cu}_{1-x}\text{Co}_{2+x}\text{O}_4$  является более перспективным способом получения высокоактивной оксидной композиции. Полученные в гидролизе БСГ закономерности подтвердились и в процессе их гидротермолиза.

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания № 0239-2021-0007 (AAAA-A21-121011390006-0).

## УД-2.8

### Структурированный катализатор конверсии дизельного топлива в синтез-газ

Шилов В.А.<sup>1,2,3</sup>, Рогожников В.Н.<sup>1</sup>, Потемкин Д.И.<sup>1,2</sup>, Снытников П.В.<sup>1</sup>

1 – Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

3 – Институт химии твердого тела и механохимии, Новосибирск, Россия  
sva@catalysis.ru

Перспективными устройствами для получения электроэнергии являются электрохимические генераторы на основе топливных элементов, которые по своим техническим и эксплуатационным характеристикам превосходят коммерчески доступные энергоустановки на основе двигателей внутреннего сгорания. Одной из основных проблем, сдерживающих внедрение энергоустановок на основе топливных элементов в повседневную жизнь, пока остается их стоимость и доступность водорода из-за слаборазвитой инфраструктуры. Для решения этой проблемы предлагается на начальном, «переходном» этапе задействовать привычное для потребителей углеводородное топливо, например, дизельное, инфраструктура которого широко развита и отлажена логистика, в том числе и в труднодоступных районах Российской Федерации. В этом случае энергоустановку необходимо оснастить дополнительным устройством – топливным процессором, позволяющим конвертировать дизельное топливо в пригодный для питания топливных элементов водородсодержащий газ (рис.1).

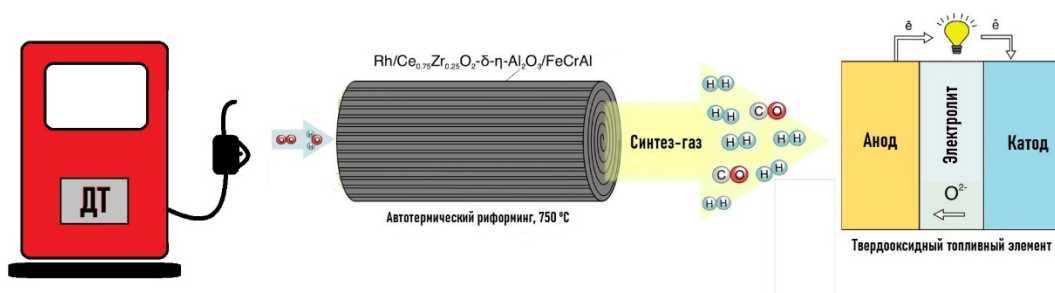


Рис. 1. Концепт получения электроэнергии из дизельного топлива

До сих пор не разработан коммерческий катализатор конверсии дизельного топлива и, соответственно, топливный процессор, который бы позволял получать водородсодержащий газ для питания топливных элементов. Трудности в разработке связаны с многокомпонентностью моторного топлива, а также наличием в нем каталитического яда – серы. Коммерческий дизель содержит в своем составе ди- и полиароматические соединения, конверсия которых вызывает наибольшие затруднения. Неполная конверсия топлива сопровождается зауглероживанием катализатора, что приводит к его дезактивации. Деградационные процессы также возникают из-за спекания активного компонента в условиях довольно высоких температур (700-1000 °С).

## УД-2.8

Все эти факторы приводят к затруднениям в создании эффективного катализатора и, соответственно, топливного процессора.

В данной работе был разработан и исследован структурированный  $\text{Rh/Ce}_{0.75}\text{Zr}_{0.25}\text{O}_{2.6}/\theta\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{FeCrAl}$  катализатор конверсии дизельного топлива в синтез-газ. В начальных исследованиях с использованием модельных блендов дизельного топлива была выявлена зависимость образования побочных продуктов от условий реакции и размера катализатора. Была изучена активность основных групп органических соединений, входящих в состав дизельного топлива, в реакциях паровой и паровоздушной конверсии. Катализатор показал высокую активность и устойчивость к зауглероживанию в ходе ресурсных испытаний на коммерческом дизельном топливе, проведено исследование его регенерации водяным паром и кислородом. На основании полученных результатов была построена двумерная осесимметричная математическая модель процесса автотермического риформинга дизельного топлива с целью дальнейшего масштабирования риформера.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 19-19-00257, <https://rscf.ru/project/19-19-00257>

## УД-2.9

### Математическое моделирование автотермического риформинга и паровой конверсии дизельного топлива на структурированном $\text{Rh}/\text{Ce}_{0.75}\text{Zr}_{0.25}\text{O}_{2-\delta}-\eta\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{FeCrAl}$ катализаторе с последующей оптимизацией геометрии блока

Зажигалов С.В.<sup>1,2</sup>, Рогожников В.Н.<sup>1,2</sup>, Шилов В.А.<sup>1,2</sup>, Потемкин Д.И.<sup>1,2</sup>, Загоруйко А.Н.<sup>1,2</sup>,  
Собянин В.А.<sup>1,2</sup>, Снытников П.В.<sup>1,2</sup>

1 – Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Институт химии твердого тела и механохимии, Новосибирск, Россия  
zazhigal@catalysis.ru

Автотермический риформинг (АТР) топлив, представляющий собой комбинацию парциального окисления и паровой конверсии (ПК), является энергоэффективным и перспективным способом получения водорода. В данной работе представлена математическая модель процессов АТР и ПК дизельного топлива (гексадекана) на структурированном каталитическом  $\text{Rh}/\text{Ce}_{0.75}\text{Zr}_{0.25}\text{O}_{2-\delta}-\eta\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{FeCrAl}$  сеточном картридже (рис. 1). Валидация модели проведена на основе пилотных испытаний в картриджах длиной 10-60 мм при вариации температур подаваемой смеси от 650 до 800 °С.

Математическая модель построена в двумерной осесимметричной геометрии (рис. 1) и учитывает изменение скорости потока и давления в системе, массоперенос компонентов смеси, теплопередачу, химические реакции и их влияние на изменение параметров смеси (плотность, состав, температура). Моделирование выполнено с помощью коммерческого ПО COMSOL Multiphysics.

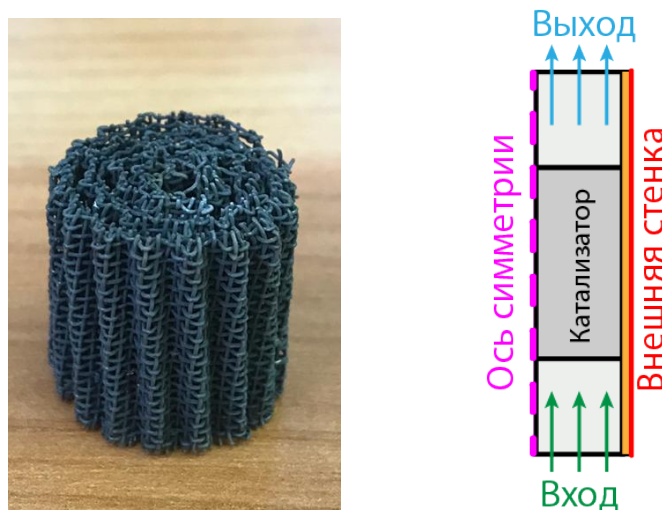


Рис. 1. Каталитический модуль и 2D осесимметричная расчётная область

Процесс описывался следующим набором химических реакций: окисление, паровая конверсия и гидрогенолиз (до этана и этилена) гексадекана, реакция водяного газа,



## УД-2.9

реакция метанирования, окисление угарного газа и водорода, окисление и паровая конверсия  $C_2$  компонентов.

Пример сравнения экспериментальных и расчётных данных представлен в Табл. 1. Несмотря на некоторые количественные несоответствия, модель качественно хорошо описывает АТР гексадекана, отражая общие закономерности процесса [1]. Поэтому может быть использована для оптимизации и масштабирования процесса.

Таблица. 1. Сравнение результатов моделирования и экспериментов в АТР

	Конверсия $C_{16}H_{34}$ , %	Концентрация на выходе (об.%)						
		CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	C <sub>2+</sub>
Модель	99.9	6.7	7.4	0.23	23	25.5	35.9	1.1
Эксперимент	99.2	5.3	8.5	0.25	23	25.8	36.1	1.2

В работе рассчитан процесс АТР на картриджах различной геометрии и структуры, при этом наибольший выход водорода (на 10 % выше по сравнению со стандартным картриджем) показала модификация, заключающаяся в расположении двух внутренних продольных окружных стальных стенок в модуле таким образом, что они образуют три вертикальных канала в картридже (рис. 2) [2].

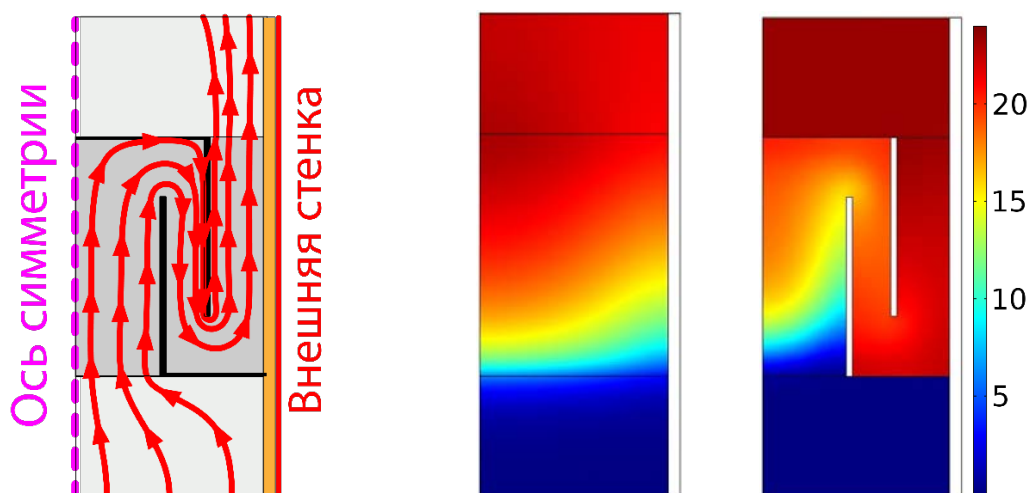


Рис. 2. Каталитический модуль с внутренними стенками и линиями тока (слева), концентрация водорода для стандартного картриджа и картриджа с внутренними стенками (об. %)

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 19-19-00257.

### Литература:

- [1] Zazhigalov S.V., Shilov V.A., Rogozhnikov V.N., Potemkin D.I., Sobyenin V.A., Zagoruiko A.N., Snytnikov P.V. Mathematical Modeling of Diesel Autothermal Reformer Geometry Modifications // Chemical Engineering Journal. 2022. V.442. N1. 136160:1-10.
- [2] Zazhigalov S.V., Shilov V.A., Rogozhnikov V.N., Potemkin D.I., Sobyenin V.A., Zagoruiko A.N., Snytnikov P.V. Modeling of Hydrogen Production by Diesel Reforming over Rh/Ce<sub>0.75</sub>Zr<sub>0.25</sub>O<sub>2</sub>- $\delta$ - $\eta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeCrAl Wire Mesh Honeycomb Catalytic Module // Catalysis Today. 2021. V. 378. P. 240-248.

## УД-2.10

### Разработка материалов для герметизации и токовой коммутации твердооксидных топливных элементов в батарее

Кузьмин А.В.<sup>1,2</sup>, Саева Н.С.<sup>1,2</sup>, Елькин О.В.<sup>1</sup>, Козулин Д.А.<sup>1</sup>

*1 – Вятский государственный университет, Киров, Россия*

*2 – Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия*

*a.v.kuzmin@yandex.ru*

В настоящее время актуальной задачей на пути снижения выбросов диоксида углерода (декарбонизации) является переход к «зеленой» энергетике, включающей концепции водородной и распределенной энергетике. В Энергетической стратегии РФ на период до 2035 г. водородная энергетика обозначена в качестве одного из важнейших и перспективных направлений развития. Основные направления Концепции развития водородной энергетике России (2021 г.) предусматривают расширение производства и потребления водорода, а также вхождение страны в число мировых лидеров по его производству и экспорту. Крупнейшие российские компании планируют или уже реализуют инвестиционные проекты в области водородной энергетике. Тем не менее, далеко не все технологии этой области приводят к эффективной декарбонизации, а некоторые (например, технология получения водорода паровым риформингом метана) наоборот отличаются высоким углеродным следом.

Твердооксидные электрохимические устройства имеют серьезные перспективы при решении проблем создания новых экономичных и экологически чистых технологий производства энергии, получения чистого водорода и т. д. Использование таких устройств делает возможным переход от традиционной системы энергоснабжения к концепции распределенной энергетике, когда электрогенераторы располагаются непосредственно на местах потребления.

Возможность организации конкурентоспособного отечественного производства эффективных и надежных электрохимических устройств напрямую зависит от наличия функциональных материалов с требуемыми свойствами и технологий их изготовления. В настоящем докладе представлены примеры готовых научно-технических решений, представленных на мировом рынке, и разработки специалистов Института химии и экологии ВятГУ в области создания новых материалов и технологий для твердооксидных электрохимических устройств: стеклогерметиков и интерконнекторов для герметизации и электрической коммутации единичных топливных элементов в батарее.

**Благодарности:** Исследования проводятся при финансовой поддержке программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030», гранта Российского научного фонда (проект №21-79-30051) и центра Национальной технологической инициативы «Водород как основа низкоуглеродной экономики».

## УД-2.11

### Изготовление анода для ТОТЭ на основе NiO/SDC методом прямой печати с лазерной постобработкой и исследование его микроструктуры

Багишев А.С., Мальбахова И.А., Воробьев А.М., Борисенко Т.А.,  
Титков А.И., Немудрый А.П.  
ФГБУН Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН  
630128 Новосибирск, Россия  
*bagishev.ar@yandex.ru*

Альтернативные методы производства электроэнергии привлекают все больше внимания в последние годы. Этот интерес вызван, с одной стороны, сокращением потребления минерального топлива, с другой - экономической эффективностью инновационных подходов в производстве электроэнергии и жесткими экологическими требованиями к новым технологиям.

Одним из направлений развития альтернативной энергетики являются высокотемпературные электрохимические устройства (ВЭУ). Такие устройства позволяют а) эффективно (КПД 60-70%) преобразовывать органическое топливо и водород в электроэнергию с использованием твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) и б) перерабатывать диоксид углерода и водяной пар в синтез-газ ( $\text{CO} + 2\text{H}_2$ ), утилизируя выбросы парниковых газов, эффективно запасая энергию дешевых источников энергии, с использованием высокотемпературных твердооксидных электролизеров (SOE). Как известно, водород является не только основой экологически чистой водородной энергетики, но и сырьем для различных технологий гидрообработки, многотоннажного производства аммиака и метанола и последующих химических продуктов.

Одним из главных факторов ограничивающих текущее развитие ТОТЭ, является технологическая сложность производства. Производство ТОТЭ является многостадийным процессом, что требует больших временных и денежных затрат и не обеспечивает должной воспроизводимости. Кроме того, точные геометрические размеры и сложная микроструктура, которая требуется для обеспечения высоких электрохимических характеристик, а также большая удельная поверхность, необходимая для увеличения массопереноса и минимизации различных поляризационных потерь, не могут быть получены методами изготовления ТОТЭ, такими как литье и экструзия. С ростом спроса на рынке и технологического развития промышленности аддитивные технологии (АТ) в последнее десятилетие активно применяются для производства элементов ТОТЭ. Уникальные возможности 3D-печати, такие как высокая автоматизация процесса, низкие потери материала в процессе изготовления, возможность программируемого изготовления деталей со сложной иерархичной структурой, позволяют значительно облегчить как технологический

## УД-2.11

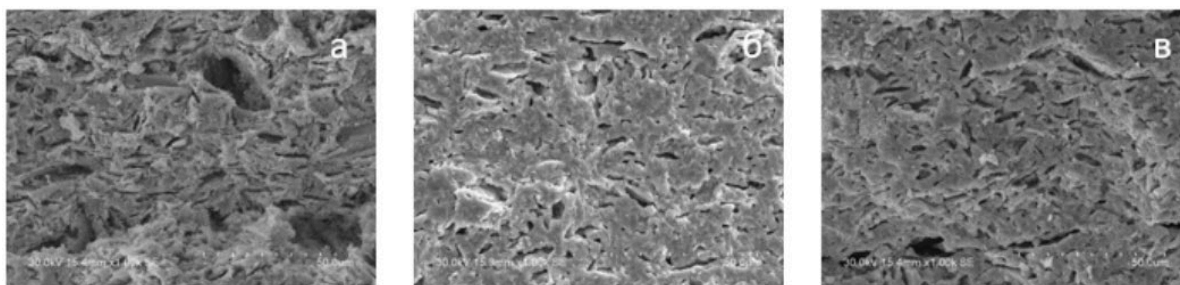
процесс изготовления ТОТЭ, так и улучшить эксплуатационные и мощностные характеристики топливных элементов [1].

Твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ) представляют собой многослойные электрические элементы на керамической основе. Современное состояние материалов для ТОТЭ это оксид церия допированный самарием (SDC) для электролита, в сочетании с композитами на основе YSZ в качестве электродов, а именно манганит лантана-стронция (LSM-SDC) для катода и Ni – SDC для анода[2].

В рамках данной работе нами были разработаны и исследованы составы паст для 3D-печати на основе оксида никеля и оксида циркония, стабилизированного иттрием. Исследованы реологические характеристики подобранных анодных композиций. Подобраны оптимальные параметры анодных паст различных вязкостей и составов для печати на 3D-принтере. Проведены эксперименты печати двумерных и трехмерных объектов на 3D-принтере с использованием керамических паст(рис.1), исследованы режимы печати, для получения объектов заданной формы и размеров. Проведены работы по лазерной постобработке полученных керамических образцов. После печати проведена термическая обработка образцов, исследовано влияние различной температуры спекания на микроструктуру полученных образцов. (рис.2)



**Рисунок 1.** Образец полученный метод прямой струйной печати



**Рисунок 2.** Микрофотографии микроструктуры при различной температуре спекания  
а) 1250°C; б) 1400°C; в) 1450°C.

**Благодарности:** работа выполнена по договору № 719/22/н от 27 мая 2022 года в рамках программы центра «Водород как основа низкоуглеродной экономики»

### Литература:

- [1] A. Shahzad, I. Lazoglu, "Direct ink writing (DIW) of structural and functional ceramics: Recent achievements and future challenges", *Composites Part B*, vol.225, pp.109249, (2021).
- [2] F. Tietz, *Mater. Sci. Forum*, 2003, 426–432, 4465–4470

## УД-3.1

### Синтез материалов на основе $g\text{-C}_3\text{N}_4$ для эффективного получения водорода под действием видимого света

Васильченко Д.Б.<sup>1,2</sup>, Журенко А.В.<sup>1,2</sup>, Козлова Е.А.<sup>1</sup>

1 – Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Институт неорганической химии СО РАН, Новосибирск, Россия

*kozlova@catalysis.ru*

Тенденция к сокращению легкодоступных запасов высококачественного ископаемого углеродсодержащего сырья определяет острую необходимость освоения доступных альтернативных и, прежде всего, возобновляемых источников энергии. При этом одним из наиболее перспективных направлений развития энергетики будущего может стать развитие солнечной энергетики. Особо привлекательным в этой области считается процесс фотокаталитического получения водорода под действием видимого света, поскольку в данном случае осуществляется трансформация солнечной энергии в энергию химических связей. Уникальные свойства водорода позволяют считать его универсальным и наиболее экологически чистым химическим энергоносителем, пригодным для использования практически в любых типах тепловых двигателей и многих иных видах электрогенерирующих устройств. С этой точки зрения разработка новых эффективных технологий получения водорода является актуальным для решения, по крайней мере, локальных задач водородной энергетики [1].

Основным фактором, сдерживающим практическое использование фотокаталитических процессов является отсутствие эффективных и одновременно стабильных гетерогенных фотокатализаторов, функционирующих под действием видимого света, составляющего около 43% солнечного спектра. В последнее время больше внимание исследователей привлекает графитоподобный нитрид углерода  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ . Данный материал обладает свойствами полупроводника с шириной запрещенной зоны 2.7 эВ, и положениями валентной зоны и зоны проводимости, подходящими для фотокаталитического разложения воды [2]. Разрабатывают различные подходы к увеличению активности фотокатализаторов на основе  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ . Основной стратегией здесь является создание систем с межфазными гетеропереходами. Широкое применение нашел синтез  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  с использованием различных темплатов для получения материалов с развитой пористой структурой [1].

Одним из распространенных методов повышения активности  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ , является нанесение металлических сокатализаторов на поверхность полупроводников, что приводит к пространственному разделению электрон-дырочных пар. Традиционно в качестве сокатализаторов используются благородные металлы и их соединения, особенно металлы платиновой группы. Соответственно, возникает задача создания активных фотокатализаторов с низким содержанием благородных металлов, что может

### УД-3.1

быть достигнуто за счет высокой дисперсности частиц фотокатализатора и их взаимодействием с полупроводниковым носителем.

Сотрудники Центра НТИ «Водород как основа низкоуглеродной экономики» получили высокоактивные фотокатализаторы на основе графитоподобного нитрида углерода со сверхмалым содержанием платины. С помощью предварительной обработки исходных реагентов был получен носитель фотокатализатора — графитоподобный нитрид углерода с высокой удельной поверхностью, при этом платину осаждали из нитратокомплексов. Это прецизионный метод осаждения, который позволяет получить высокоактивные материалы с очень малой массовой долей платины. В ходе работы была создана модель установки, объединяющая реактор, генерирующий водород (общий объем 1000 мл) водородным топливным элементом с протонообменной мембраной. Скорость генерации водорода составила до 2 мл H<sub>2</sub> в мин, образующийся газ подавался в топливный элемент, который вырабатывал около 0.3 Вт электроэнергии [3].

Такую простую конструкцию можно рассматривать как модель масштабирования процесса производства водорода путем фотолиза органических субстратов в водных растворах. Для максимизации квантовой эффективности в случае крупномасштабных установок можно предположить планарные реакторы, выполненные в виде окна с двойным остеклением. Для минимизации использования сложных перемешивающих устройств можно организовать протекание суспензии через такой реактор с двойными стенками. Предполагается дальнейшая оптимизация для поиска оптимального состава суспензии (соотношение катализатора и раствора) и концентрации донора, но даже в представленных условиях видна перспективность процесса фотокаталитического выделения водорода.

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 21-13-00314

#### **Литература:**

- [1] Kozlova E.A., Parmon V.N. // *Russ. Chem. Rev.*, **2017**, 86, 870-906.
- [2] Ye S., Wang R., Wu M.-Z., Yuan Y.-P. // *Appl. Surf. Sci.*, **2015**, 358, 15-27.
- [3] Vasilchenko D., Zhurenok A., Saraev A., Gerasimov E., Cherepanova S., Tkachev S., Plusnin P. // *Chemical Engineering Journal*. 2022. V.445. 136721:1-14.

## УД-3.2

### Разработка методики синтеза нанопористого диоксида титана

Сипатов И.С., Сушникова А.А., Ремпель А.А.  
Институт металлургии УрО РАН, Екатеринбург, Россия  
ivan.sipatov@gmail.com

Разработка методов синтеза нанопористого диоксида титана (далее - НП TiO<sub>2</sub>) является актуальной, поскольку он может использоваться для расщепления молекул воды на водород и кислород. На основании обзора современной научно-технической литературы [1-4], посвященной методам синтеза наноразмерных порошков диоксида титана, был сделан выбор пользу золь-гель технологии, как базового подхода к получению образцов НП TiO<sub>2</sub>. В работе исследовано влияние изменения следующих параметров синтеза pH-среды (pH = 3, 7, 9), в которой формируется золь, и температуры отжига (диапазон 150-750 °С) геля на фазовый состав, размер частиц и удельную площадь поверхности.

Для исследований проводили синтез образцов НП TiO<sub>2</sub> в несколько этапов: 1) смешивание исходных реагентов, 2) ультразвуковая дефрагментация, 3) сушка геля, 4) измельчение геля, 5) отжиг.

Установлено, что синтезированные образцы TiO<sub>2</sub> до отжига состоят из двух фаз анатаз и брукит, при повышении температуры отжига соотношение фаз изменяется, а при отжиге выше 550 °С эти фазы переходят в более стабильную фазу рутил. В зависимости от условий синтеза получали образцы со средним размером частиц от 3 до 110 нм и широким диапазоном значений удельной площади поверхности от 2 до 300 м<sup>2</sup>/г. В ходе экспериментов показано, что уровень pH по сравнению с температурой отжига слабо влияет на контролируемые нами параметры.

С учетом полученных результатов была разработана методика синтеза, которая позволяет получать образцы с размером частиц и удельной площадью поверхности в заданных диапазонах соответственно 10-100 нм и 10-100 м<sup>2</sup>/г.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке консорциума «Водород как основа низкоуглеродной экономики» и ИК СО РАН, договор № 01/04/2022 – 524/22/4.

#### Литература:

- [1] Rempel A.A., Valeeva A.A., Vokhmintsev A.S., Weinstein I.A. // Russ. Chem. Rev. 2021. V. 90. № 11. P. 1397–1414.
- [2] Дорошева И.Б., Ремпель А.А., Тресцова М.А., Утепова И.А., Чупахин О.Н.// Неорганические Материалы. 2019. Т. 55. С. 175–181.
- [3] Berdyugin S., Kolesov B., Yushina I., Vasilchenko D., Korenev S., Kozlova E., Kurenkova A., Gerasimov E., Bukhtiyarov A. // Materials Letters. 2022. V. 307. P. 130997- 131012.
- [4] Qarni F. Al, Alomair N.A., Mohamed H.H. // Catalysts. 2019. V. 9. № 10. P. 1-13.

### УД-3.3

## Однослойные углеродные нанотрубки для реакции выделения водорода

Федоров Ф.С.<sup>1</sup>, Хабушев Э.М.<sup>1,2</sup>, Новиков И.В.<sup>1</sup>, Илатовский Д.А.<sup>1</sup>,  
Гольдт А.Е.<sup>1</sup>, Красников Д.В.<sup>1</sup>, Каллио Т.<sup>2</sup>, Насибулин А.Г.<sup>1,2</sup>

1 – Сколковский институт науки и технологии, Москва, Россия

2 – Aalto University, Эспоо, Финляндия

*a.nasibulin@skoltech.ru*

Углеродные нанотрубки представляют собой уникальное семейство материалов, обладающих замечательными химическими и физическими свойствами. Получение углеродных нанотрубок относят к одному из важнейших достижений в области материаловедения за последние 50 лет [1]. Уникальные свойства пленок из однослойных углеродных нанотрубок, такие как высокая пористость и удельная поверхность, низкая плотность, высокое отношение оптического пропускания к поверхностному сопротивлению, высокая теплопроводность и химическая устойчивость, а также настраиваемые электронные свойства материала, открывают перспективы для широкого спектра применений.

Данная работа посвящена краткому обзору наших исследований по использованию однослойных углеродных нанотрубок (ОУНТ), полученных аэрозольным методом химического осаждения из газовой фазы [3-4], для электрохимического получения водорода.

Мы изучили характеристики катода на основе ОУНТ, в отношении реакции выделения водорода, таргетируя оптимальное сочетание таких свойств, как смачиваемость материала, проводимость, получаемую при плазменной обработке, и загрузку катализатора RuO<sub>x</sub>, полученного атомно-слоевым осаждением. В то время как атомно-слоевое осаждение, позволило регулировать размер частиц RuO<sub>x</sub> на уровне нескольких нанометров, обработка плазмой дала способствовать их нуклеации. Так, катодный материал на основе ОУНТ обработанных плазмой и декорированных 4-5 нм RuO<sub>x</sub> наночастицами с использованием атомно-слоевого осаждения показал наилучшие характеристики [5]. Потенциал начала выделения водорода составляет -5 мВ (электрод сравнения - обратимый водородный электрод, RHE) в 0,5 М H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, измеренный при плотности тока -1 мА см<sup>-2</sup>; наклон Тафеля 47,5 мВ/дек. Материал обладает стабильными характеристиками при -10 мА/см<sup>2</sup> с потенциалом около -160 мВ.

В докладе также представлен новый материал, состоящий из наночастиц железа, покрытых углеродом, и нанесенных на ОУНТ, в качестве нового высокоактивного и долговечного катализатора для реакции выделения водорода, без использования благородных металлов [6]. Полученный материал обладает каталитическими свойствами, превосходящими ранее изученные недорогие материалы и сравнимыми со свойствами платины. Материал (см. рис. 1) синтезируется методом



### УД-3.3

аэрозольного химического метода осаждения из газовой фазы в один этап. Графеновый слой не препятствует желаемому доступу реагентов к наночастицам железа, но защищает активную металлическую сердцевину от окисления. Это открывает новые возможности для использования активных переходных металлов, таких как железо, в широком спектре применений.

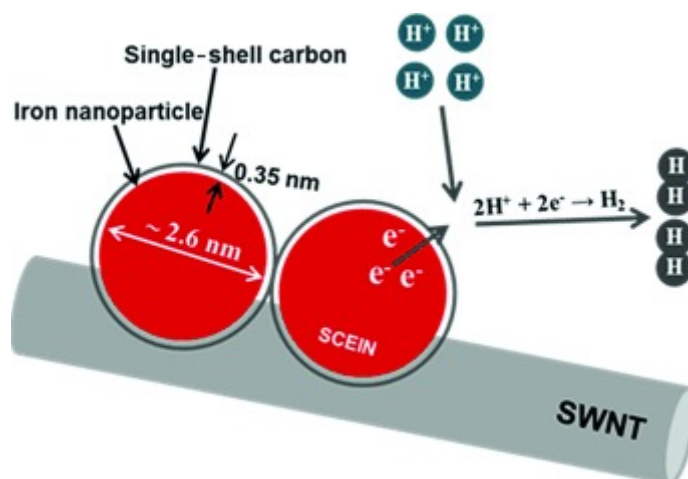


Рис. 1. Наночастиц железа, инкапсулированные в углеродную оболочку (SCEINs), нанесенные на однослойные углеродные нанотрубки (SWNTs). Такой катализатор обладает каталитическими свойствами, сравнимыми с свойствами платины.

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 22-13-00436.

#### Литература:

- [1] De Volder M.F.L., Tawfick, S.H., Baughman, R.H., Hart, A.J. // *Science*. 2013. **339**. 535-539.
- [2] Nasibulin, A. G., Moisala, A., Brown, D. P., Jiang, H. and Kauppinen, E.I. // *Chemical Physics Letters*. 2005. **402**, [227-232](#).
- [3] Moisala, A., Nasibulin, A. G., Brown, D. P., Jiang, H., Khriachtchev, L., and Kauppinen, E. I., // *Chemical Engineering Science*. 2006. **61**, [4393-4402](#).
- [4] Iakovlev, V. Ya., Krasnikov, D. V., Khabushev, E. M., Alekseeva, A. A., Grebenko, A. K., Tsapenko, A. P., Zabelich, B.Yu., Kolodiaznaia, J. V., Nasibulin, A. G. // *Chemical Engineering Journal*. 2020. 383, [123073](#).
- [5] Fedorov, F., Settiani, D., Buan, M.E.M., Sainio, J., Ali, F. S.M., Ilatovskii, D., Kallio, T., Nasibulin A. G. // *ChemElectroChem* 2020, 7, [2651](#).
- [6] Tavakkoli, M., Kallio, T., Reynaud, O., Nasibulin, A. G., Johans, C., Sainio, J., Jiang, H., Kauppinen, E. I. and Laasonen, K. *Angewandte Chemie International Edition* 2015, **54**, [4535](#).

## УД-3.4

### Получение *in situ* водорода по реакции водяного газа для гидропревращения кислородсодержащих соединений бионефти с применением дисперсных катализаторов на основе переходных металлов

Вутолкина А.В., Байгильдин И.Г.

*МГУ имени М.В. Ломоносова, Химический факультет, Москва, Россия*  
*annavutolkina@mail.ru*

В нефтеперерабатывающей промышленности наблюдается тенденция к вовлечению в переработку возобновляемого органического сырья (продуктов переработки биомассы) с целью расширения сырьевой базы, диверсификации производства компонентов товарных топлив и сырья для нефтехимических производств. Переработка биомассы предполагает ее термическую обработку, гидролиз или каталитическое окисление, а образующаяся при этом жидкая фракция, называемая бионефтью, характеризуется высоким содержанием воды (до 15-30% масс.) и кислорода (30-55% масс.), что делает невозможным ее использование в качестве компонентов товарных топлив и обуславливает необходимость стадии каталитического облагораживания, которой предшествует подготовка сырья с целью его обезвоживания и снижения содержания гетероатомных соединений.

Перспективными представляются методы, позволяющие вовлекать воду в процесс и использовать ее в качестве источника водорода [1-3]. Примером такого процесса является реакция водяного газа, в ходе которой вода взаимодействует с монооксидом углерода с образованием углекислого газа и водорода с последующим его вовлечением в гидропревращение гетероатомных соединений. Катализаторами совмещенного процесса удаления воды-гидрооблагораживания могут выступать системы на основе переходных металлов, активных как в реакции водяного газа, так и в гидропревращении гетероатомных соединений кислорода [1-3]. Протекание реакции на одних и тех же активных центрах обеспечит контакт реагентов, а, значит, и эффективное превращение молекул сырья в нафтеновые и нафеноароматические углеводороды. Однако в случае водосодержащего сырья классические катализаторы на основе оксида алюминия или цеолитов, широко применяемые для гидрогенизационных процессов, быстро дезактивируются вследствие перестройки структуры носителя под воздействием водяного пара [4, 5]. Решением этой проблемы может стать использование катализаторов без носителя, распределенных в углеводородной среде. Ненанесенные катализаторы характеризуются высоким содержанием активной фазы, а размер их частиц обеспечивает доступ молекул субстрата к активному компоненту [1-3, 5]. Использование катализаторов без носителя, распределенных в углеводородной среде, позволяет практически полностью исключить влияние диффузионных ограничений и

### УД-3.4

процессов массопереноса. При этом углеводороды выступают в качестве защитного слоя, предотвращающего агломерацию наночастиц катализатора, что обуславливает их высокую активность в превращении стерически-затруднённых молекул.

В рамках данной работы проведено исследование особенностей гидродеоксигенации модельного сырья, содержащего химические структурные элементы компонентов бионефти лигноцеллюлозного происхождения, в условиях реакции водяного газа с применением сульфидных катализаторов без носителя, полученных разложением маслорастворимых предшественников активного компонента *in situ* в присутствии субстрата и элементной серы (прекурсор сульфидирующего агента). Изучены закономерности преобразования кислородсодержащих соединений, в частности гваякола, в зависимости от состава катализатора, источника водорода, содержания серы, воды, давления монооксида углерода, определяющих соотношение CO/вода, и температуры. Установлено, что наибольшей активностью обладают Ni-Mo катализаторы (Ni:Mo= 1:3, содержание серы 1,2–1,5 %масс.), а количественная конверсия гваякола достигается при 320–380 °С и давлении CO 5 МПа (содержание воды 30-40 %масс.). На основании данных о распределении продуктов и влияния параметров процесса на превращение гваякола в условиях реакции водяного газа предложен маршрут протекания реакции и выдвинуто предположение о влиянии воды на образование циклогексена, циклогексана и продуктов алкилирования фенола циклогексеном. Показана возможность многократного использования катализаторов (380 °С, 6 ч, 5 МПа CO, 20мас.% воды) без существенной потери активности при добавлении предшественника сульфидирующего агента в каждом последующем цикле, что обеспечивает *in situ* регенерацию активного компонента. Изучена «эволюция» состава, структурных и геометрических характеристик частиц активного компонента методами рентгенофазового анализа, просвечивающей электронной микроскопии, энергодисперсионного анализа и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10140, <https://rscf.ru/project/21-79-10140/>.

#### **Литература:**

- [1] Vutolkina A.V., Baygildin I.G., Glotov A.P., Cherednichenko K.A., Maksimov A.L., Karakhanov E.A. // Applied Catalysis B: Environmental. 2021. V. 282. № 119616.
- [2] Vutolkina A.V., Glotov A.P., Baygildin I.G., Akopyan A.V., Talanova M. Yu., Terenina M.V., Maximov A.L., Karakhanov E.A. // Pure and Applied Chemistry. 2020. V. 92. № 6. P. 949-966.
- [3] Vutolkina A.V., Baigildin I.G., Glotov A.P., Pimerzin A.I., Akopyan A.V., Maximov A.L., Karakhanov E.A. // Applied Catalysis B: Environmental. 2022. V. 312. № 121403.
- [4] Vutolkina, A.V., Glotov A.P., Zanina A.V., Makhmutov D.F., Maximov A.L., Egazar'yants S.V., Karakhanov E.A. // Catalysis Today. 2019. V.329. P. 156-166
- [5] Vutolkina A.V., Glotov A.P., Maximov A.L., Karakhanov E.A. // Russian Chemical Bulletin. 2020. V. 69. № 2. P. 280-288.

## УД-3.5

### Каталитическое превращение CO<sub>2</sub> в углеводороды

Куликова М.В., Дементьева О.С., Грабчак А.А.

ИНХС РАН, Москва, Россия

*dementyeva@ips.ac.ru*

В настоящее время все большее внимание привлекает к себе проблема нейтрализации техногенного диоксида углерода, поскольку его вклад в общий парниковый эффект составляет около 60% [1]. Помимо разработки энергетических стратегий, направленных на сокращение выбросов CO<sub>2</sub> путем нормирования и повышения налогов, существуют подходы, направленные на улавливание образующегося в результате сжигания углеводородов диоксида углерода и его консервацию или переработку. В основе конверсии CO<sub>2</sub> лежит процесс каталитического гидрирования, промышленная реализация которого сопряжена с проблемами отсутствия дешевых источников водорода и невысокими селективностями по целевым продуктам синтеза. Важнейшей задачей развития направления переработки диоксида углерода является разработка эффективных каталитических систем, позволяющих повысить степень превращения углекислого газа за проход и, соответственно, рентабельность процесса. Наиболее перспективным подходом представляется создание бифункциональных контактов, которые позволят снять термодинамические ограничения за счет протекания реакции через стадию образования промежуточных соединений. Образцы бифункциональных катализаторов состава 10%Fe-0,1K-10%M-/носитель (где М – Co, Cu, Mn) готовили методом пропитки носителя водно-спиртовыми растворами нитратов соответствующих солей. Предварительно получали носитель – углеродсодержащий материал – путем гидротермальной карбонизации органического полимера (целлюлозы) и последующей его стабилизации (Ar, 400°C, 1 ч). Процесс превращения CO<sub>2</sub> в углеводороды проводили в проточной по газу установке предварительно активированных образцах (H<sub>2</sub>, 400°C, 1000 ч<sup>-1</sup>, 20 атм, 3 ч). Каталитические испытания осуществляли при 20 атм в диапазоне температур 240-320°C с объемной скоростью подачи сырьевого газа 500 ч<sup>-1</sup>.

В ходе каталитических испытаний было показано, что все бифункциональные системы проявили активность: конверсия диоксида углерода в их присутствии достигала 47-61%, селективность по жидким углеводородам – 60%. Изученные для сравнения монометаллические системы, не смотря на высокую активность, проявили высокую селективность по газообразным углеводородам: в присутствии Co-системы диоксид углерода превращался преимущественно в метан ( $S_{CH_4} = 60-80\%$ ), а на железном катализаторе – в углеводороды C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub>, фракция которых не содержала олефинов. Стоит отметить интересный эффект добавки кобальта к Fe-системе: в присутствии указанного металла наблюдали наибольший выход ценных мономеров для нефтехимического

### УД-3.5

синтеза – этилена и пропилена, например, при температуре 320°C отношение олефин/парафин для углеводородов C<sub>3</sub> достигало 6,3 (таблица 1).

Таблица 1. Влияние состава 10%Fe-0,1K-10%M-катализатора на селективность по непредельным углеводородам C<sub>2</sub>-C<sub>3</sub>

M	T, °C	Этилен/этан	Пропилен/пропан
Co	260	2,57	2,98
	320	2,49	6,26
Mn	260	3,42	2,85
	320	2,75	2,65
Cu	260	0,00	0,07
	320	0,01	0,54

Наибольший выход жидких углеводородов среди бифункциональных систем был получен для катализаторов, содержащих в составе кобальт и медь (31-34 г/м<sup>3</sup> сырьевой смеси), при этом для кобальт-содержащих систем отмечен интересный эффект смещения углеводородного распределения в сторону продуктов с более длинной цепью: максимум распределения зарегистрирован для додекана и тридекана. Fe-Mn-катализаторы, не смотря на меньшую селективность по высокомолекулярным углеводородам, позволяли получать смесь жидких углеводородов, обогащенную олефинами – их доля в составе продуктов C<sub>5+</sub> достигала 30%, причем большая часть приходилась на бензиновую фракцию углеводородов (C<sub>5</sub>-C<sub>10</sub>).

Таким образом, в ходе работы была установлена возможность контроля активности каталитической системы и состава продуктов реакции путем варьирования состава бифункционального катализатора. Показано, что наибольшую селективность по непредельным газообразным углеводородам – мономерам для производства полимеров – проявляют Fe-Co-системы, тогда как в присутствии Fe-Mn-катализатора было получено наибольшее количество жидких олефинов C<sub>5+</sub> (30,1%).

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №17-73-30046П).

Литература:

[1] Kweku D.W., Odum B., Addae M., Koomson A.D., Kwakye B.D., Ewurabena A.O.-M., Asenso T.Q., Buanya B.A. Greenhouse effect: greenhouse gases and their impact on global warming // J. of Scientific Research and Reports. 2017. V. 17. № 6. P. 1–9. .

## УД-3.6

### Влияние способов получения моно- и биметаллических наночастиц на их каталитические свойства в процессе Фишера-Тропша

Мазурова К.М., Мияссарова А.Ф., Ставицкая А.В.  
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия  
*stavitsko@mail.ru*

Будущим отечественного и мирового транспорта и энергетики на долгие годы могут стать продукты, полученные с использованием технологий, в основе которых лежит синтез Фишера-Тропша. Основным преимуществом топлив, получаемых по данному способу, является отсутствие серо- и азотсодержащих соединений, а также снижение выбросов CO и ароматических углеводородов [1]. В настоящее время в мире реализуются процессы с использованием катализаторов Фишера-Тропша третьего поколения, лидеры мирового производства – компании Shell и Sasol. В начале XXI века стали разрабатываться первые многофункциональные катализаторы (4-го поколения), направленные на получение синтетических топлив в одну стадию.

Сегодня ведутся разработки технологий получения высокоселективных и при этом активных наноструктурированных катализаторов для процесса Фишера-Тропша на основе нанокластеров и наночастиц активных металлов на основе структурированных носителей. При этом до сих пор основным способом получения катализаторов является пропитка носителя солями металлов [2]. Таким способом получить монодисперсные и стабильные наночастицы нужного размера практически невозможно. Быстрая дезактивация нанокатализаторов затрудняет их применение в промышленности. Использование структурированных мезопористых носителей и разработка новых методов синтеза наночастиц, в том числе селективно на внутренней поверхности пор носителя может решить проблемы, связанные с быстрой потерей стабильности, а также увеличить селективность по целевым продуктам – высокомолекулярным алканам.

В работе представлены новые катализаторы процесса Фишера-Тропша на основе алюмосиликатных нанотрубок галлуазита. Галлуазит - минерал представляет собой многослойные нанотрубки с размером пор от 10 до 20 нм, длиной от 100 нм до 1.5 мкм. Положительно заряженная поверхность просвета галлуазита образована глиноземом, а отрицательно заряженная внешняя поверхность трубки содержит оксид кремния. Такое различие в химическом составе и электрохимическом заряде открывает возможность для селективной модификации алюмосиликатных нанотрубок и придания им необходимых свойств. Месторождения галлуазита разрабатываются по всему миру, в том числе в России. Его использование в качестве носителя для активных частиц металлов (рутения, платины, палладия, железа, кобальта, меди, никеля), а также катализатора крекинга уже показали свою эффективность, как в лабораторных исследованиях, так и на производстве.

## УД-3.6

Также представлены новые данные о влиянии способа нанесения наночастиц на показатели каталитической активности материалов. Представлены новые методы синтеза металлических частиц под действием микроволнового воздействия и с использованием комплексообразователей [3-4].

Оценка каталитической активности проводили на лабораторной установке синтеза Фишера-Тропша с интегральным реактором проточного типа при расходе сырья = 10 нл/ч\*Г<sub>кат</sub>, соотношении CO/H<sub>2</sub> = 1/2, температуре = 210-260 °С, давлении = 1-2 МПа.

В результате получены катализаторы с более однородным и узким распределением частиц по размеру, в отличие от традиционного метода пропитки, с высокой активностью и селективностью по отношению к ценным углеводородам C<sub>5+</sub>, содержащим малое количество олефинов, с показателем роста цепи α=0.87.

**Благодарности:** Исследование выполнено в рамках Государственного задания РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина FSZE-2022-0002 «Катализаторы на основе наноструктурированных материалов для процессов переработки углеродсодержащего сырья в компоненты моторных топлив и нефтехимические полупродукты».

### Литература:

1. Zhang S., Yang X., Zhang H., Chu C., Zheng K., Ju M., Liu L. Liquefaction of Biomass and Upgrading of Bio-Oil: A Review // *Molecules*. 2019. V. 24. № 12. P. 2250.
2. Abdulrasheed A., Abdul Jalil A., Gambo Y., Ibrahim M., Umar Hambali H., Yusuf Shahul Hamid M. A review on catalyst development for dry reforming of methane to syngas: recent advances // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2019. V. 108. P. 175–193.
3. Stavitskaya A., Mazurova K., Kotelev M., Eliseev O., Gushchin P., Glotov A., Kazantsev R., Vinokurov V., Lvov Y. Ruthenium-Loaded Halloysite Nanotubes as Mesocatalysts for Fischer–Tropsch Synthesis // *Molecules*. 2020. Vol. 25, No. 8. P.1764.
4. Kristina Mazurova, Aleksandr Glotov, Mikhail Kotelev, Oleg Eliseev, Pavel Gushchin, Maria Rubtsova, Ruslan Kazantsev, Vladimir Vinokurov, Anna Stavitskaya. Natural aluminosilicate nanotubes loaded with RuCo as nanoreactors for Fischer-Tropsch synthesis // *Science and Technology of Advanced Materials*. 2022. 23 (1). P. 17-30.

## УД-3.7

### Процессы получения CO<sub>2</sub>-нейтральных E-топлив, основанные на переработке биомассы

Куликова М.В., Максимов А.Л.

*Институт нефтехимического синтеза РАН, Москва, Россия*

*m\_kulikova@ips.ac.ru*

В ИНХС РАН создан ряд процессов, позволяющих осуществлять глубокую переработку углеродсодержащего сырья и нивелировать «углеродный след».

Сформулированы и экспериментально подтверждены общие подходы к созданию ультрадисперсных каталитических систем на основе полимеров синтетического и природного происхождения. В частности, систематически изучены оригинальные каталитические системы на основе карбонизованной целлюлозы, которые позволяют эффективно конвертировать оксиды углерода в E-топлива. Такой подход, как по используемому сырью, так и по методу формирования каталитической системы, полностью соответствует принципам «зеленой химии». (Данная часть работы выполнена в рамках проекта Российского научного фонда проект № 17-73-30046П)

В ИНХС РАН ведутся систематические исследования по переработке растительной биомассы методом гидротермальной карбонизации в биоуголь – полупродукт для CO<sub>2</sub>-нейтрального производства синтетических углеводородов. Термическая обработка биомассы, в частности, ее наиболее мягкий вариант гидротермальная карбонизация, позволяет получить биоуголь и приблизить свойства сырья к свойствам ископаемых аналогов. Таким образом, применение биоугля может быть существенно расширено в направлении процессов, которые традиционно применяются для переработки ископаемого угля: для получения жидких углеводородных продуктов, искусственных горючих газов и ценных химических соединений. Кроме того, как известно, биоуголь рассматривается в Евросоюзе как энергетически богатое экологически чистое твердое топливо.

Изучено влияния состава и свойств биоугля на его термическое растворение в водород-донорных растворителях. Было установлено, что на протекание процесса оказывают влияние температура и массовое отношение биоуголь/растворитель. Показана возможность получения экологически чистых CO<sub>2</sub>-нейтральных топливных компонентов методом гидрогенизационного каталитического оживления биоугля.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 17-73-30046П.



## УД-3.8

### Влияние изменения давления проведения процесса на селективность и состав продуктов синтеза Кёльбеля-Энгельгардта

Грабчак А.А., Иванцов М.И., Свидерский С.А., Куликова М.В.

*Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН1, Москва, Россия  
ale.grabchak@ips.ac.ru*

Актуальной мировой тенденцией является переход от углеродной энергетики к водородной. Основными промышленными способами получения водорода в настоящее время являются паровая конверсия метана и его гомологов и газификация угля. Данные методы характеризуются общим недостатком – высоким уровнем выбросов оксидов углерода в атмосферу. В связи с этим является актуальным вопрос о превращении оксидов углерода в ценные продукты следуя принципам «зеленой» химии.

Одним из вариантов решения этой задачи является получение углеводородов из оксида углерода в синтезе Кёльбеля-Энгельгардта. Данный процесс отличается от более глубоко исследованного синтеза Фишера-Тропша использованием в качестве гидрирующего агента монооксида углерода воды, а не водорода [1]. Продуктами синтеза Кёльбеля-Энгельгардта являются углеводороды и  $\text{CO}_2$ . Получаемый в ходе синтеза диоксид может быть восстановлен до  $\text{CO}$  и также вовлечен в процесс получения углеводородов – экологически чистых компонентов топлив, или использоваться в качестве окислителя.

Первыми катализаторами синтеза Кёльбеля-Энгельгардта являлись кобальтовые и железные, в ходе дальнейших исследований данного процесса были изучены также катализаторы на основе никеля, рутения и родия. Интерес представляет использование гибридных катализаторов, представляющих собой механическую смесь катализаторов синтеза Кёльбеля-Энгельгардта и реакции водяного газа [2]. На основании имеющихся данных, представляет интерес разработка гибридных катализаторов, совмещающих активность в синтезе Кёльбеля-Энгельгардта и реакции водяного газа. В качестве такого катализатора нами предложен железно-кобальтовый, нанесенный на силикагель.

Катализатор готовили методом совместной пропитки носителя растворами предшественников активных компонентов с последующим просушиванием и прокаливанием. Исследование каталитической активности проводили в установке со стационарным слоем в непрерывном режиме при давлении 2,0-4,0 МПа при температуре 300°C. Перед проведением каталитических испытаний образец активировали в токе водорода при атмосферном давлении, температуре 400°C и объемной скорости  $\text{H}_2 = 130 \text{ ч}^{-1}$ . Полученные результаты представлены на рисунках 1-2.

### УД-3.8

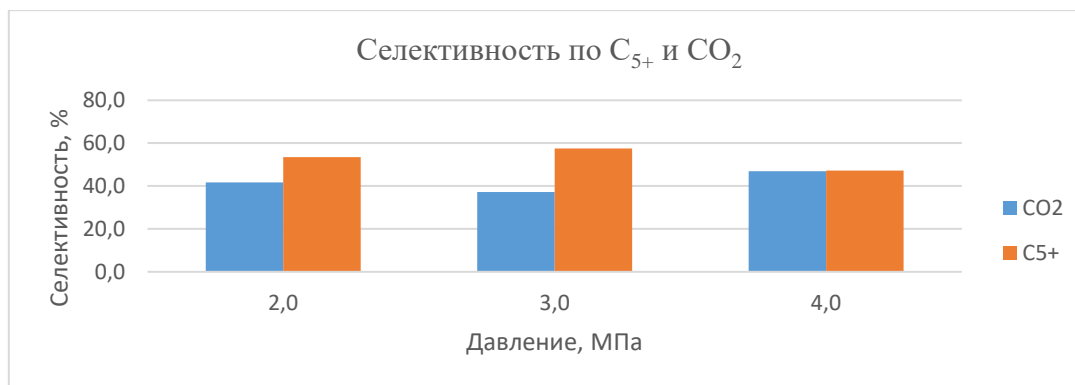


Рис. 1. Влияние давления на селективности образования углеводородов C<sub>5+</sub> и CO<sub>2</sub>

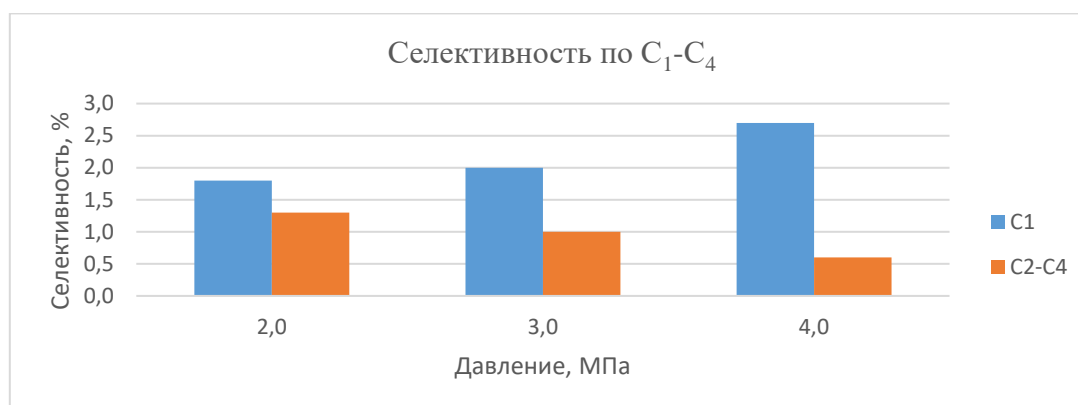


Рис. 2. Влияние давления на селективности образования углеводородов C<sub>1</sub> и C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub>

Из представленных данных видно, что наилучшее сочетание селективностей по целевому продукту – углеводородам C<sub>5+</sub> и важнейшему побочному продукту CO<sub>2</sub> было получено при давлении 2,0 МПа (рис. 1.). Селективность образования метана при повышении давления возрастала, для углеводородов C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub> данный показатель при этом, напротив, снижался (рис. 2). Селективность в отношении образования метана и легких углеводородов была невысока во всем изученном диапазоне давлений процесса – менее 3% масс. против 45-55% масс. для углеводородов C<sub>5+</sub>.

Таким образом было установлено, что повышение давления в процессе синтеза Кельбеля-Энгельгардта со стационарным слоем катализатора существенно влияет на показатели селективности образования продуктов. Наилучшее сочетание селективностей по целевому продукту – углеводородам C<sub>5+</sub> и побочным продуктам достигается при давлении 3,0 Мпа.

#### Литература:

- [1] F.P. LARKINS, A.Z. KHAN. Investigation of Kölbel-Engelhardt Synthesis over Iron-Based Catalysts // Applied Catalysis. 2009. V 47. P. 209-227.
- [2] H. Tommaga, M. Miyauchi and K Fujimoto. Synthesis of liquid hydrocarbons from carbon monoxide and water with a hybrid catalyst. // Bull Chem. Soc. Jpn., 1987. V.60/ P. 3210.

## УД-3.9

### Получение водорода из воды с использованием вторичного алюминия, активированного Ga-In эвтектикой

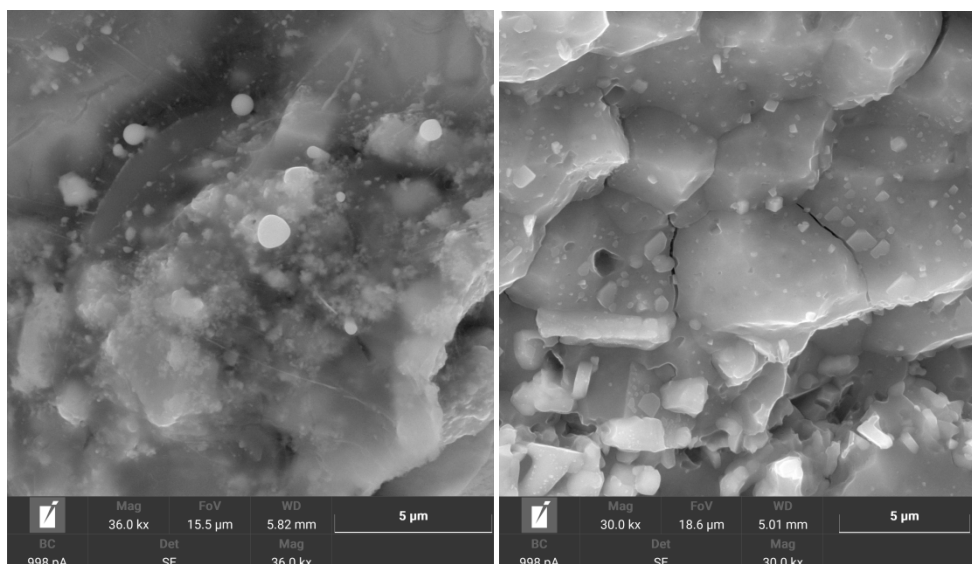
Низовский А.И., Шмаков А.Н., Куликов А.В., Супрун Е.А., Бухтияров В.И.  
*Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия*  
*alex niz@inbox.ru*

Актуальность развития безуглеродной энергетики в последнее время связана с динамикой планетарного климата. Одним из вариантов развития технологий, снижающих количество выбросов диоксида углерода, является водородная энергетика, в которой в идеальном варианте в качестве основной компоненты выбросов становится вода. В настоящее время основным источником водорода рассматривается, как это ни парадоксально, природное органическое сырье и отходы нефтехимических производств. Малая доля водорода, необходимая для масштабного перехода на экологически чистый энергоноситель, получается путем электролиза, практически исключая использование углеродсодержащих компонент.

В большом комплексе проблем водородной энергетики, требующих конкретных инженерных решений, является вовлечение в новую экологически чистую энергетическую цепочку небольших энергопотребителей, таких как отдельные группы геологов, туристов, системы видеонаблюдения и охраны удаленных объектов и др. Очевидным решением в этом случае является получение водорода на месте использования в количестве, требуемом для удовлетворения локальных энергетических затрат. Водородные топливные ячейки небольшой мощности идеально подходят в этом случае в качестве источника электрической энергии. Естественным образом возникает необходимость создания пары: водородный картридж - топливный элемент. В течение довольно продолжительного времени происходит обсуждение использования в качестве источника водорода для картриджа реакции металлов с водой. Одним из перспективных материалов для использования в реакции выделения водорода с точки зрения стоимости и эффективности является алюминий, однако, интенсивно порошкообразный алюминий с водой взаимодействует в сильнощелочной среде или при высокой температуре и давлении.

В данной работе метод активирования заключался в обработке поверхности массивных образцов из конструктивных алюминиевых сплавов Ga-In эвтектикой (76 % - 24 %,  $T_{\text{melt.}}=15.9$  °C). При такой обработке высокая реакционная способность полученных продуктов достигается за счет эффекта Ребиндера, связанного с диффузией компонентов эвтектики по межзеренным границам исходного сплава. В качестве исходного материала для последующего активирования использовалась стружка из конструктивных алюминиевых сплавов, полученная в процессе изготовления деталей механических устройств.

### УД-3.9



1

2

Рис. 1. Микрофотографии поверхности скола образцов активированного продукта:

1 - обработанный Ga-In эвтектикой; 2 - обработанный чистым Ga.

Особенностью использования для активирования Ga-In эвтектики в качестве активатора по сравнению с чистым Ga является формирование на базе исходного алюминиевого сплава наноматериала, в котором компоненты Ga-In эвтектики равномерно распределены по границам зерен всего объема активированного продукта. Именно это и определяет его высокую реакционную способность. Обработка конструкционных алюминиевых сплавов чистым Ga приводит к формированию твердого раствора Al-Ga, активность которого в реакции с водой значительно меньше. На рис. 1. приведены микрофотографии скола активированного продукта, хранившегося в атмосферных условиях 3 месяца. В реакции с водой происходит его полное взаимодействие, при этом выделение водорода идет очень интенсивно. На фотографии видно, что поверхность скола покрыта пленкой Ga-In эвтектики (рис. 1.1). На микрофотографии скола материала, обработанного чистым Ga (рис. 1.2) отчетливо выражены границы зерен, на которых проявляются частицы интерметаллидов легирующих элементов (Cu, Fe, Si и др.). Ga равномерно распределен по всему объему зерен исходного материала, как показано методом SEM с использованием EDX.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института катализа СО РАН (проекты АААА-А21-12101139 0009-1, АААА-А21-12101149 0008-3).

## УД-3.10

### Получение водорода при окислении наночастиц алюминия в воде под действием лазерных импульсов

Адуев Б.П.<sup>1</sup>, Нурмухаметов Д.Р.<sup>1</sup>, Белокуров Г.М.<sup>1</sup>, Крафт Я.В.<sup>1</sup>, Исмагилов З.Р.<sup>1,2</sup>

*1 – Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,  
Кемерово, Россия*

*2 – Федеральный исследовательский центр  
«Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН», Новосибирск, Россия  
kraft.kem@gmail.com*

Одним из наиболее перспективных источников энергии будущего является водород – экологически чистое топливо с высокой теплотворной способностью. Один из перспективных методов получения водорода основан на химическом взаимодействии воды с металлами. Недостатком этого метода является то, что при нормальных условиях металлические пластины и микронные частицы алюминия обладают низкой активностью из-за плотной оксидной пленки [1]. Наши предыдущие работы были направлены на исследование процессов превращения ископаемых углей и органических материалов при воздействии лучистой энергии от высокоинтенсивного источника излучения [2-7]. Нас заинтересовала возможность применения лазерного излучения для инициирования реакции воды с металлами.

Размер частиц алюминия в максимуме распределения составлял 120 нм. Содержание металлического алюминия составляло 65 масс. %.

В качестве источника лазерного излучения использовали YAG:Nd<sup>3+</sup> лазер (1064 нм, 14 нс, 10 Гц, максимальная энергия в импульсе 1.2 Дж). Луч лазера через линзу направлялся перпендикулярно боковой поверхности экспериментальной кюветы, заполненной суспензией 0.03 % наночастиц алюминия в воде. На кювете сделаны два герметизированных вывода, которые с помощью линии отбора газа подсоединялись к кранам, позволяющие направлять газ в заполненный водой мерный цилиндр, помещенный в сосуд с водой, либо к газоанализатору. Объем образовавшегося газа определяли путем измерения вытесненной из мерного цилиндра воды с точностью до 0.1 мл. Состав газа определялся с помощью газоанализатора SRS QMS 300.

Эксперименты выполнялись при комнатной температуре  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Измерялась зависимость увеличения объема газа в мерном цилиндре от времени облучения суспензии лазерными импульсами с частотой 10 Гц. В каждом опыте использовали одинаковую навеску наночастиц алюминия в воде. Результат представлен на рис. 1.

Максимальный объем полученного газа оказался одинаковым для всех использованных плотностей энергии лазерного излучения. Видно, что время полного превращения металлического алюминия уменьшается с увеличением плотности энергии лазерного излучения.

### УД-3.10

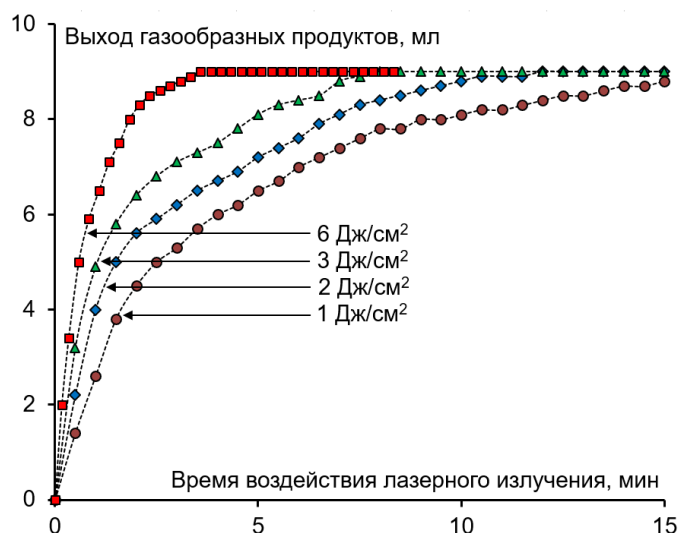


Рис. 1. Зависимость выхода газообразных продуктов от времени при облучении суспензии 0.03 % наночастиц Al в воде импульсами лазера (1064 нм, 14 нс, 10 Гц). Плотность энергии от 1 до 6 Дж/см<sup>2</sup>.

Компонентный состав газообразных продуктов реакции взаимодействия воды с наночастицами алюминия после импульсно-периодического лазерного воздействия следующий: водород – 94.0 об. %; водяной пар – 3.0 об. %; азот – 2.5 об. %; кислород – 0.5 об. %.

Твердые продукты реакции являются агломератами с размерами частиц 200–250 нм, обнаружены структуры гидроксида и оксигидроксида алюминия, а именно, гиббсит, бёмит и байерит. Алюминий в металлической форме не обнаружен.

Предложен механизм взаимодействия лазерного излучения с наночастицами алюминия. Лазерное излучение поглощается наночастицами алюминия, что приводит к их нагреву, увеличению объема металлического ядра наночастицы, разрушению оксидной оболочки и взаимодействию воды с металлическим алюминием с образованием зеленого водорода. В результате происходит полное превращение металлического алюминия в продукты.

#### Литература:

- [1] Pityulin A.N., Shcherbakov V.A., Borovinskaya I.P., Merzhanov A.G. // Combust. Explos. Shock. Waves. 1979. V. 15. P. 432-437.
- [2] Aduев B.P., Kraft Y.V., Nurmukhametov D.R., Ismagilov Z.R. // Combust. Sci. Technol. 2022. P. 1-15.
- [3] Aduев B.P., Nurmukhametov D.R., Nelyubina N.V., Kraft Y.V., Ismagilov Z.R. // J. Appl. Spectrosc. V. 88. P. 761-764. 2021.
- [4] Kraft Y.V., Nurmukhametov D.R., Aduев B.P., Sozinov S.A., Ismagilov Z.R. // Chemistry for Sustainable Development. 2021. V. 29. P. 206-212.
- [5] Kraft Y.V., Nurmukhametov D.R., Aduев B.P., Ismagilov Z.R. // Eurasian Chem.-Technol. J. 2020. V. 22. P. 3-10.
- [6] Aduев B.P., Nurmukhametov D.R., Kraft Y.V., Ismagilov Z.R. // Opt. Spectrosc. 2020. V. 128. P. 2008-2014.
- [7] Aduев B.P., Kraft Y.V., Nurmukhametov D.R., Ismagilov Z.R. // Chemistry for Sustainable Development. 2019. V. 27. P. 549-555.

## УД-3.11

### Наноструктурированные катализаторы для окислительного дегидрирования пропана в присутствии CO<sub>2</sub>

Решетина М.В., Смирнова Е.М., Мельников Д.П., Глотов А.П., Винокуров В.А.  
РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва, Россия  
*reshetina.mv@yandex.ru*

Пропилен является сырьем для синтеза различных марок полипропилена, изопропилбензола (для получения ацетона и фенола, а также  $\alpha$ -метилстирола), окиси пропилена, бутиловых спиртов, акрилонитрила и акриловой кислоты. Одним из основных промышленных способов получения пропилена является термokatалитическое дегидрирование пропана, однако оно имеет ряд термодинамических ограничений. Применение окислителя позволяет снизить температуру процесса, уменьшить нагрузку на катализатор, ингибировать побочные реакции. Использование CO<sub>2</sub> в качестве окислителя является наиболее перспективным, так как в его присутствии исходные парафины не подвергаются глубокому окислению, соответственно уменьшается выход побочных продуктов [1]. Кроме того, утилизация CO<sub>2</sub> путем его конверсии в ценные продукты является одной из актуальных задач катализа в связи с общемировой тенденцией к декарбонизации экономики.

Мезопористый материал МСМ-41, характеризующийся упорядоченной структурой и высокой площадью поверхности, является одним из самых распространенных кремнеземов, применяемых в качестве носителя для катализаторов. Однако термомеханические характеристики МСМ-41 относительно невысоки. Галлуазит (ГНТ) – это природный неорганический минерал, который имеет структуру скрученных пластин каолина. При этом его внутренняя поверхность состоит из оксида алюминия и заряжена положительно, а внешняя – из оксида кремния и заряжена отрицательно. Нанокompозит, полученный при совместном синтезе МСМ-41 и галлуазитных нанотрубок, обладает высокой механической прочностью и термической стабильностью, что позволяет использовать его в качестве носителя для катализаторов окислительного дегидрирования пропана [2].

В ходе работы были синтезированы композиты МСМ-41/ГНТ и МСМ-41@ГНТ, в которых кремнезем расположен снаружи и внутри нанотрубок галлуазита соответственно. Приготовлены катализаторы окислительного дегидрирования пропана, где в качестве основного активного компонента был выбран CrO<sub>x</sub>.

Физико-химические характеристики всех катализаторов были изучены с помощью методов термопрограммируемого восстановления водородом, низкотемпературной адсорбции азота и просвечивающей электронной микроскопии. Удельная площадь поверхности 5%Cr/МСМ-41/ГНТ+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> составила 558 м<sup>2</sup>/г, тогда как у промышленного катализатора Oleflex – 98 м<sup>2</sup>/г.

### УД-3.11

Каталитические испытания проводились в диапазоне температур 550-700°C, мольном соотношении CO<sub>2</sub>: пропан = (1-5):1 и газовой скорости подачи сырья (GHSV) 1800-3600 ч<sup>-1</sup>. Результаты каталитических испытаний для катализатора 5%Cr/MCM-41/ГНТ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты каталитических испытаний для 5%Cr/MCM-41/ГНТ

Т, °С	TOS, мин	Конверсия C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , %	Конверсия CO <sub>2</sub> , %	Селективность по пропилену, %
550	30	19,4	8,7	82,6
	60	13,8	6,2	86,5
	90	12,7	6,4	86,8
600	30	31,2	16,2	73,7
	60	24,5	10,3	72,0
	90	21,7	9,2	71,4
650	30	49,2	22,2	52,2
	60	36,6	15,3	49,3
	90	32,5	12,4	48,4
700	30	87,6	23,9	30,3
	60	66,3	20,0	28,6
	90	65,4	17,3	30,7

Кроме пропилена, наблюдается образование этана, этилена и метана. Исходя из результатов (таблица 1) конверсия пропана постепенно снижается, что связано с образованием кокса на поверхности катализатора. Регенерация проводилась при 650 °С в токе воздуха в течение часа после каждой серии испытаний. Были выявлены оптимальные условия для проведения исследования ОДП – температура 650°C и GHSV 1800 и 2700 ч<sup>-1</sup>. Дальнейшее увеличение объемной скорости приводит к снижению активности катализаторов ввиду уменьшения времени их контакта с сырьем, а также к росту образования углеродистых отложений.

**Благодарности:** Исследование выполнено при поддержке Российской Федерации в лице Минобрнауки России (Название «Метастабильные катализаторы, полученные лазерной обработкой в жидкости, для эффективного дегидрирования алканов», № Соглашения 075-15-2021-1386, Шифр 13.2251.21.0100).

#### Литература:

- [1] Gambo Y., Adamu S., Abdulrasheed A.A., Lucky R.A., Ba-Shammakh M.S., Hossain M.M. Catalyst design and tuning for oxidative dehydrogenation of propane – A review // Applied Catalysis A: General. 2021. Т. 609. С. 117914. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apcata.2020.117914>
- [2] Karakhanov E., Maximov A., Zolotukhina A., Vinokurov V., Ivanov E., Glotov A. Manganese and cobalt doped hierarchical mesoporous halloysite-based catalysts for selective oxidation of p-xylene to terephthalic acid // Catalysts. 2020. Т. 10. № 1. С. 1–15.



## УД-3.12

### Гидрирование продуктов переработки лигноцеллюлозной биомассы на катализаторах, содержащих мезопористые носители

Ролдугина Е.А.<sup>1</sup>, Максимов А.Л.<sup>1,2</sup>, Караханов Э.А.<sup>1</sup>

1 – МГУ им. М.В. Ломоносова, химический факультет, Москва, Россия

2 – ИХХС им. А.В. Топчиева РАН, Москва, Россия

rolduginakate@mail.ru

Одним из направлений по обеспечению устойчивого энергетического развития является разработка технологий переработки возобновляемых источников энергии, в частности сырья на основе отходов растительного происхождения. В ходе термохимической переработки полимеров растительной биомассы образуется ряд платформенных соединений (метоксифенолы, фурфуролы и др.), из которых можно получать широкий спектр мономеров, ценных для топливной и нефтехимической отраслей промышленности [1]. Сырье, получаемое из биомассы, характеризуется высоким содержанием кислорода и воды, что придает ему специфические физико-химические свойства, такие как склонность к полимеризации, несмешиваемость с углеводородным топливом, высокая коррозионная активность и др. Для повышения качества такого сырья с целью его эффективного вовлечения в переработку необходима стадия гидрогенизации с применением деоксигенирующих катализаторов, активных в условиях гидропревращения кислородсодержащих молекул биомассы. В работе исследуется активность катализатора на основе мезопористого алюмосиликатного носителя Al-HMS, содержащего наночастицы рутения [2], в гидропревращении структурных фрагментов сырья, получаемого из биомассы – 2-метоксифенола (гваякола) и фурфурола – при изменении параметров процесса (давления, состава реакционной среды и др.).

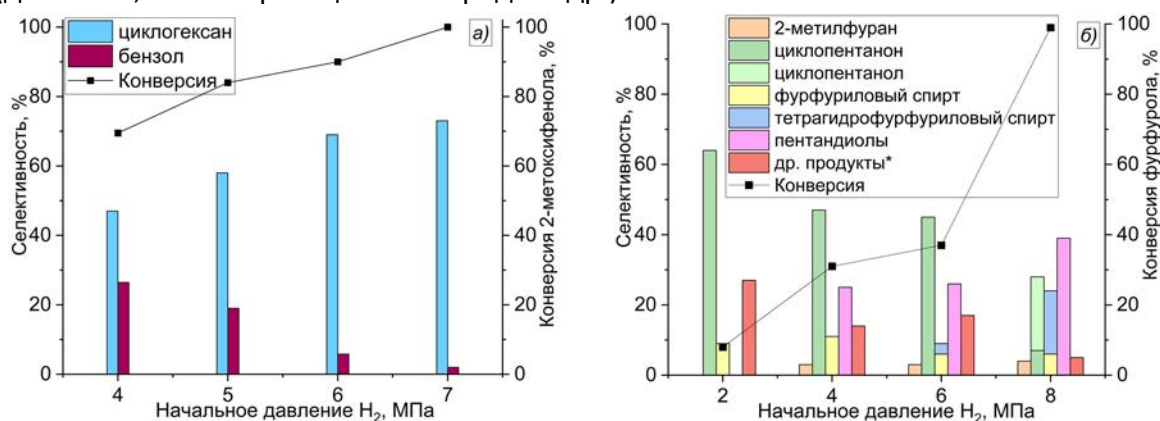


Рис. 1. Влияние начального давления водорода на гидропревращение гваякола (а) и фурфурола (б).

Условия: (а) 25 мг 1%Ru/Al-HMS(10)/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2 мкмоль гваякола, 250 мл воды, 250°C, 3ч;

(б) 16 мг 1%Ru/Al-HMS(10), 0.5 мкмоль фурфурола, 400 мл воды, 160°C, 6ч.

\*бутанол, пентанол, 2-метилтетрагидрофуран, тетрагидрофуран, продукты димеризации

С увеличением начального давления водорода резко возрастает конверсия субстратов, что связано с ростом количества адсорбированного на поверхности активных центров катализатора водорода. Повышение давления водорода в реакции гидропревращения 2-метоксифенола способствовало селективному образованию

### УД-3.12

продукта полного гидрирования-деоксигенации – циклогексана (рис.1а). Гидрирование фурфурола при повышенных давлениях водорода (> 4 МПа) привело к снижению селективности процесса из-за образования высокорекреационных интермедиатов – спиртов различного строения (рис.1б).

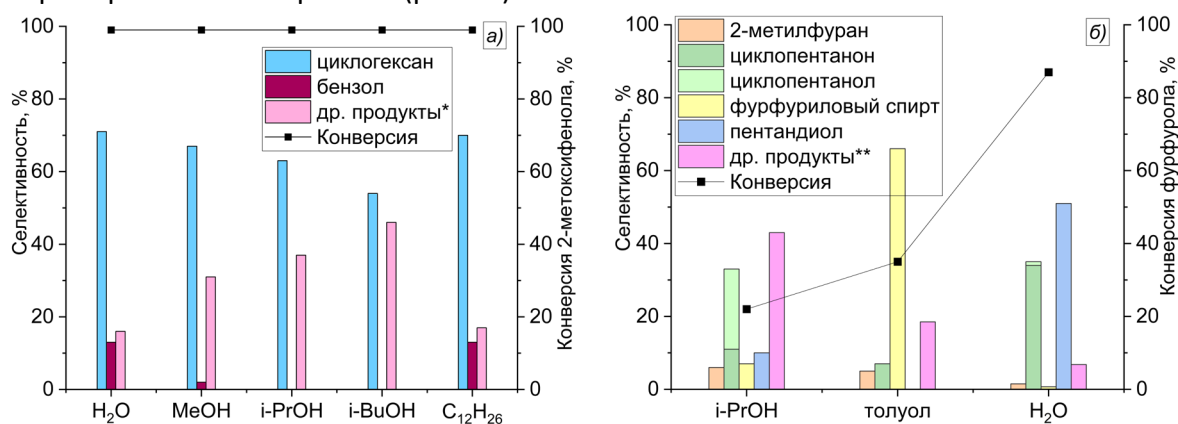


Рис. 2. Влияние состава реакционной среды на гидропревращение гваякола (а) и фурфурола (б). Усл.: (а) 50 мг 1%Ru/Al-HMS(10)/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2 мкмоль гваякола, 250 мг второго компонента, 250°С, 6 МПа H<sub>2</sub>, 3ч; (б) 16 мг 1%Ru/Al-HMS(10), 0.5 мкмоль фурфурола, 400 мл растворителя, 160°С, 2 МПа H<sub>2</sub>, 6ч.

\* фенол, анизол, метанол, метилциклопентан, циклогексаны с одной и двумя кислородсодержащими функциональными группами (в случае использования спиртов C<sub>3+</sub> - соответствующие эфиры и продукты алкилирования); \*\* бутанол, пентанол, 2-метилтетрагидрофуран, тетрагидрофуран, продукты димеризации, в случае использования iPrOH - эфиры и продукты алкилирования.

В качестве второго компонента модельной системы для гидропревращения 2-метоксифенола исследованы вода, метанол, изопропанол, изобутанол и додекан (рис.2а). При полной конверсии субстрата наибольшие значения селективности по циклогексану были достигнуты при проведении реакции в присутствии воды и додекана. Оценка активности исследуемого катализатора в гидрировании фурфурола осуществлена с использованием в качестве растворителя толуола, изопропанола и воды (рис.2б). В мягких условиях (160°С, 2 МПа H<sub>2</sub>) наиболее подходящим растворителем оказалась вода – была достигнута высокая конверсия субстрата, при этом основным продуктом реакции был циклопентанол.

Для переработки фенольных фрагментов растительного сырья на Ru-содержащем катализаторе на основе кислотного носителя Al-HMS предпочтительны водные/неполярные среды, высокие температуры и давление H<sub>2</sub>. Гидрирование фурфурола на этом катализаторе предпочтительно проводить в водных средах в мягких условиях (в среднем диапазоне температур и давлений до 4-5 МПа H<sub>2</sub>).

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00118, <https://rscf.ru/project/22-79-00118/>.

#### Литература:

- [1] Velvizhi G., Balakumar K. // *Bioresource Technology*. 2022. V.343. P.126151.
- [2] Roldugina E.A., Naranov E.R. // *Applied Catalysis A: General*. 2018. V.553. P.24-35.

## Оценка эффективности поглощения CO<sub>2</sub> восстановительной гетерофазной системой NaBH<sub>4</sub>(тв.)–Bu<sub>4</sub>NBr(тв.) при атмосферных условиях

Кожевников И.В., Чибиряев А.М., Мартьянов О.Н.  
Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия  
kiv@catalysis.ru

Боргидрид натрия NaBH<sub>4</sub> является одним из перспективных водород-аккумулирующих веществ [1]: гравиметрическое содержание легкоизвлекаемого водорода в нём превышает 10.6 масс.%, что позволяет создавать на его основе эффективные топливные элементы прямого действия (DBFC) [2]. Вместе с тем, боргидрид натрия в растворах некоторых органических растворителей может химически связывать газообразный CO<sub>2</sub>, восстанавливая его до производных муравьиной кислоты – формилборгидридов натрия общего строения NaBH<sub>4-n</sub>(OCHO)<sub>n</sub> [3,4]. Этот химический процесс представляет значительный практический интерес в рамках мировых подходов к снижению антропогенного углеродного следа.

Теоретически одна молекула NaBH<sub>4</sub> способна восстановить четыре молекулы CO<sub>2</sub> (т.е. n = 4), но на практике достигается в восстановление не более трёх молекул CO<sub>2</sub> [4]. Согласно последним литературным данным [5,6], аналогичный результат можно достичь проведением процесса в ионных жидкостях, что породило повышенный исследовательский энтузиазм в отношении разных реакционных систем «NaBH<sub>4</sub>–ионная жидкость». Одновременно появилась информация о том, что такие системы демонстрируют эффективность даже при комнатной температуре в отсутствие каких-либо катализаторов или других активирующих факторов [5,6]. Однако перспективность масштабного применения систем «NaBH<sub>4</sub>–ионная жидкость» не является очевидной, поскольку остаются невыясненными множество вопросов экспериментального характера: о газопроницаемости таких гетерофазных систем и возникающих диффузионных ограничениях, о химической стабильности систем «NaBH<sub>4</sub>–ионная жидкость» в атмосферных условиях при естественной влажности воздуха, о возможности извлечения (удаления) формилборгидридов натрия NaBH<sub>4-n</sub>(OCHO)<sub>n</sub> и регенерации ионной жидкости, о повышении ёмкости применяемой реакционной системы по отношению к поглощаемому CO<sub>2</sub> и пр. Поэтому **целью данной работы** являлось изучение особенностей восстановления газообразного CO<sub>2</sub> гетерофазной системой NaBH<sub>4</sub>–Bu<sub>4</sub>NBr, оценка эффективности химического связывания CO<sub>2</sub> при стандартной атмосферной влажности (т.е. без дополнительного осушения) и поиска реакционных условий, приемлемых для масштабирования процесса.

Поскольку одной из наиболее доступных и дешёвых органических аммонийных солей на отечественном и мировом рынках является тетрабутиламмонийбромид Bu<sub>4</sub>NBr, именно он был использован в качестве модельной ионной жидкости. Исследование превращений в системе CO<sub>2</sub>–NaBH<sub>4</sub>–Bu<sub>4</sub>NBr, в которой мольное

### УД-3.13

соотношение  $\text{NaBH}_4\text{--Bu}_4\text{NBr}$  было близко к 1, было проведено в естественных атмосферных условиях при относительной влажности воздуха 45–50%, эти результаты были сопоставлены с экспериментальными данными по реакции газообразного  $\text{CO}_2$  в инертной атмосфере сухого бокса при остаточной влажности аргона 200–250 ppm. Для сокращения времени реакции превращение проводилось при повышенной температуре в интервале 80–125°C. Количественная оценка степени насыщения реакционной системы  $\text{NaBH}_4\text{--Bu}_4\text{NBr}$  газообразным  $\text{CO}_2$  осуществлялась гравиметрически. Все полученные образцы реакционных смесей были дополнительно проанализированы методами ИК- и ЯМР-спектроскопии.

Полученные экспериментальные данные подтверждают наш скепсис относительно перспектив масштабного использования подобных реакционных систем на основе ионных жидкостей для химического связывания  $\text{CO}_2$ . Так, при контакте системы  $\text{NaBH}_4\text{--Bu}_4\text{NBr}$  с воздушной средой умеренной влажности наблюдался заметный гидролиз части  $\text{NaBH}_4$ , приводивший к снижению количества реакционного водорода в нём и, как следствие, к снижению количества восстановленного (поглощённого)  $\text{CO}_2$ . Протекание указанного гидролиза  $\text{NaBH}_4$  было зафиксировано и в среде сухого аргона при остаточном содержании воды 200 ppm. Кроме того, в ходе превращения явственно проявились ожидаемые диффузионные проблемы, связанные с ограниченной способностью проникновения газообразного  $\text{CO}_2$  даже в расплав  $\text{NaBH}_4\text{--Bu}_4\text{NBr}$  при температуре ~125°C. Как результат, требовалось большее реакционное время для поглощения ожидаемых количеств  $\text{CO}_2$ . В целом, указанные побочные процессы приводят к серьёзному снижению общего количества поглощённого (восстановленного)  $\text{CO}_2$ , которое в зависимости от условий составляло всего 1.6–1.8 молей  $\text{CO}_2$  на один моль  $\text{NaBH}_4$  вместо теоретических 4 молей или экспериментальных 3 молей  $\text{CO}_2$ , описанных в литературе [5,6].

Полученные результаты указывают на острую необходимость проведения более детальных экспериментальных исследований реакционных систем « $\text{CO}_2\text{--NaBH}_4\text{--ионная жидкость}$ », предшествующих их масштабному практическому применению.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института катализа СО РАН (проект АААА-А21-121011390053-4), а также – при реализации государственной программы НТИ «Водород как основа низкоуглеродной экономики» (договор №70-2021-00270 от 17 декабря 2021 года).

#### Литература:

- [1] Comanescu C. // *Materials*. 2022. V. 15. 2286.
- [2] Yin X., Zhu K. *et al.* // *J. Power Sources*. 2022. V.541. 231704.
- [3] Wartik T., Pearson R.K. // *J. Inorg. Nucl. Chem.* 1958. V.7. P.404-411.
- [4] Knopf I., Cummins C.C. // *Organometallics*. 2015. V.34. P.1601-1603.
- [5] Lombardo L., Yang H. *et al.* // *ChemSusChem*. 2020. V.13. P.2025-2031.
- [6] Lombardo L., Ko Y. *et al.* // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2021. V.60. P.9580-9589.

## УД-3.14

### Катализаторы на основе природных и синтетических алюмосиликатов для гидропроцессов

Рубцова М.И.<sup>1</sup>, Засыпалов Г.О.<sup>1</sup>, Вутолкина А.В.<sup>1,2</sup>, Пимерзин А.А.<sup>1,3</sup>, Глотов А.П.<sup>1</sup>

1 – РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия

2 – Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

3 – ООО «Газпромнефть – Промышленные инновации», Санкт-Петербург, Россия  
glotov.a@gubkin.ru

В настоящее время в нефтеперерабатывающей промышленности наблюдается тенденция к вовлечению в переработку тяжелых нефтей и возобновляемого органического сырья с целью расширения сырьевой базы и диверсификации производства компонентов товарных топлив и сырья для нефтехимических производств и, в то же время, решения вопросов рационального природопользования, энергетической и экологической безопасности. Перспективным вариантом является диверсификация структуры производства энергоносителей и декарбонизация мировой экономики путем вовлечения в переработку альтернативных источников углеводородов, в частности, возобновляемого растительного сырья – лигноцеллюлозной биомассы, а также углекислого газа, техногенная эмиссия которого стремительно возрастает на протяжении последних 20 лет [1].

В данной работе представлены стратегии синтеза наноструктурированных катализаторов на основе природных и синтетических алюмосиликатов для гидропроцессов (гидрирование ароматических соединений, гидродеоксигенация компонентов термической или термокаталитической деструкции лигноцеллюлозной биомассы, гидродесульфуризация компонентов средне-дистиллятных фракций). В исследовании рассмотрены подходы к синтезу нанокомпозитов на основе алюмосиликатных нанотрубок галлуазита и упорядоченного мезопористого оксида кремния типа MCM-41, микро-мезопористых алюмосиликатов ZSM-5/галлуазит, а также способы модификации внешней и внутренней поверхностей нанотрубок для создания каталитических нанореакторов [2].

Мезопористые материалы MCM-41/галлуазит (оксид кремния интеркалирован во внутреннюю полость нанотрубок, либо расположен на их внешней поверхности) исследованы в качестве компонентов носителей катализаторов гидрирования ароматических соединений и гидроочистки средне-дистиллятных фракций. Изучены закономерности формирования CoMoS активной фазы в порах оксида кремния типа MCM-41 и внутренней полости нанотрубок. Сульфидный компонент катализатора CoMo/MCM-41/HNT+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> характеризуется высоким средним значением числа слоев MoS<sub>2</sub> в кристаллитах активной фазы и относительно небольшой длиной частиц, что обеспечивает относительно высокую дисперсность и повышает доступность активных центров, что в конечном итоге приводит к увеличению активности данного катализатора

### УД-3.14

по сравнению с традиционными системами на основе оксида алюминия (значение TOF на 15% выше при гидродесульфуризации дибензотиофена и на 25% выше при гидрировании нафталина,  $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , давление  $P_{\text{H}_2}=3,0\text{ МПа}$ ,  $\text{ОСПС}=3\text{ ч}^{-1}$ ).

Синтезированы мезопористые нанореакторы на основе гидрофобизированных триэтоксисиланами различного строения (длина алкильного заместителя 3, 8, 18 атомов углерода) нанотрубок, во внутренней полости которых расположены наночастицы рутения. Показано, что такие системы активны (количественная конверсия субстрата со 100% селективностью по нафтеновому продукту) в гидрировании ароматических соединений (бензол, толуол, этилбензол) в «мягких условиях» ( $T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{\text{H}_2}=3,0\text{ МПа}$ , мольное соотношение субстрат/металл=2000) в двухфазной системе с водой.

Представлены результаты по деалюминированию алюмосиликатных нанотрубок с целью увеличения их кислотности с последующим синтезом рутений-содержащих катализаторов. Данные системы изучены в гидродеоксигенации модельного соединения термодеструкции лигноцеллюлозной биомассы (гваякол) в диапазоне температур  $120\text{--}180\text{ }^{\circ}\text{C}$  в реакторах периодического действия при давлении  $\text{H}_2 = 3,0\text{ МПа}$  и мольном соотношении субстрат/металл = 200. Установлено, что кислотность галлуазита возможно увеличить в 3-4 раза путем кислотного деалюминирования (16 часов обработки). В случае немодифицированного образца процесс протекал по маршруту прямого гидрирования (ГИД) ароматического кольца с преимущественным сохранением полярной группы. Основными продуктами реакции были циклогексанол и циклогександиол-1,2. Ru-катализатор на основе деалюминированного галлуазита был более эффективен в образовании углеводородов (ГДО маршрут) с 14 % селективностью по циклогексану при 100% конверсии гваякола. Результаты катализа на гидрофобизированном образце катализатора демонстрируют высокую селективность по циклогексанолу (61 %), кроме того, данный образец характеризовался наибольшей стабильностью при повторных экспериментах.

Синтезированы микро-мезопористые материалы путем темплатного и бестемплатного синтеза из галлуазита (использован в качестве прекурсора кремния/алюминия, а также в качестве мезопористой матрицы). Показано, что образец ZSM-5, полученный перекристаллизацией алюмосиликатных нанотрубок в присутствии темплата (TPABr) характеризуется 100 % кристалличностью, в то время как использование бестемплатного синтеза приводит к формированию микро-мезопористого композита.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-79-10016.

#### Литература:

- [1] A. Pechenkin, D. Potemkin, A. Glotov, et. al. // Green Process. Synth., Т. 10 (1), С. 594 – 605.
- [2] A. Glotov, A. Vutolkina, A. Pimerzin, V. Vinokurov, Y. Lvov // Chem. Soc. Rev. 2021, Т. 50, С. 9240–9277.

## УД-4.1

### Крупнотоннажный водород для низкоуглеродной экономики: некоторые направления в рамках проекта НТИ

Яковлев В.А., Кузьмин А.О., Исупова Л.А.  
Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия  
[yakovlev@catalysis.ru](mailto:yakovlev@catalysis.ru)

В рамках проекта НТИ будут разработаны и апробированы инновационные технологические решения получения, кондиционирования, хранения и использования водорода на предприятиях нефте- и газохимического комплекса РФ, которые отвечают современным требованиям по энергоэффективности и вызовам по переходу к низкоуглеродной экономике. Предлагаемые технические решения будут мягко интегрированы в существующую инфраструктуру предприятий нефте- и газохимического комплекса, где уже используются технологии получения и использования водорода. При этом существующая сырьевая база получения метана меняться не будет. Новые технические решения касаются получения водорода паровым риформингом метана с повышенной устойчивостью катализатора к примесям в сырье и сниженными эксплуатационными затратами за счет экономии энергии, и выделения водорода из водородсодержащего газа после парового риформинга и улавливанию  $\text{CO}_2$  из отходящих газов с использованием аминной очистки в вихревых абсорбере/десорбере с получением высокодисперсного закрученного газожидкостного слоя, аминной очистки в компактных модульных мембранно-абсорбционных разделительных аппаратах, а также связывания  $\text{CO}_2$  путем его захоронения в пласте с решением проблемы коллоидной дестабилизации нефти при закачке  $\text{CO}_2$ . Хранение водорода предлагается при помощи технологии жидких органических носителей водорода (ЖОНВ, ЛОНС), основанной на промышленно доступных в РФ материалах и позволяющей запасать, хранить и транспортировать энергию в виде водорода, химически связанного с органической жидкостью и высвобождаемого при необходимости вблизи или непосредственно на месте потребления. Кроме того, будет развиваться технология хранения крупнотоннажного водорода в жидком криогенном состоянии. При этом будут решаться задачи по снижению энергетических затрат на сжижение водорода, каталитическая очистка следовых количеств кислорода, каталитической конверсии водорода из орто- в пара-состояние для его длительного хранения.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке проекта НТИ «Водородная энергетика как основа низкоуглеродной экономики».

## УД-4.2

### Компетенции научного блока Госкорпорации «Росатом» в области топливных элементов

Солнцева Е.С.<sup>1</sup>, Боргулев М.В.<sup>1</sup>, Константинов В.Л.<sup>1</sup>, Данилов Е.А.<sup>2</sup>, Ананьев М.В.<sup>3</sup>

*1 – Частное учреждение «Наука и инновации» ГК «Росатом», Москва, Россия*

*2 – АО «НИИГрафит», Москва, Россия*

*3 – АО «Гуредмет», Москва, Россия*

*EkSeSolntseva@rosatom.ru*

Госкорпорация «Росатом» выступает одним из лидеров по развитию водородной энергетики в РФ, работая над становлением Госкорпорации в качестве драйвера развития сектора водородной энергетики в России, а также в качестве технологического лидера и девелопера водородных проектов.

Госкорпорация «Росатом» принимает участие в реализации «Плана мероприятий по развитию водородной энергетики в Российской Федерации на период до 2024 года» [1], «Концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации» [2], а также в формировании «Комплексной программы развития отрасли низкоуглеродной водородной экономики» Министерства энергетики Российской Федерации [1].

С 2019 года в Госкорпорации «Росатом» под управлением частного учреждения «Наука и инновации» реализуется комплексная программа НИОКР по водородной энергетике и декарбонизации. В феврале этого года утверждена стратегическая программа Госкорпорации «Росатом» по развитию водородной энергетики, которая ставит ключевыми приоритетами развитие науки, создание собственных технологий низкоуглеродной энергетики, охватывая всю цепочку жизненного цикла водорода, включая снижение углеродного следа [3].

Одной из целей Госкорпорации «Росатом» является применение ключевых компетенций и научных заделов в водородной энергетике, таких как химия оксидов и солей редких металлов, обращение с углеродом и композиционными материалами, изучение течения и горения смесей газов и взаимодействия водорода с конструкционными материалами.

На предприятиях блока науки и стратегии Госкорпорации «Росатом» также накоплены компетенции в области топливных элементов, которые позволяют реализовывать НИОКР и разрабатывать технологические решения, включая, но не ограничиваясь разработкой:

- материалов и технологий твердооксидных и твердополимерных электролизеров и топливных элементов;
- протонпроводящих мембран для твердополимерных электролизеров и топливных элементов;
- среднетемпературных твердооксидных топливных элементов;



## УД-4.2

– твердооксидных мембранных реакторов со смешанной проводимостью (или электрохимических конвертеров) для получения водорода;

– углеродных материалов для биполярных пластин, катализаторов и газодиффузионных слоёв твердополимерных электролизеров и топливных элементов.

В новой геополитической ситуации компетенции Госкорпорации «Росатом» оказались ключевыми для импортозамещения основных компонентов электролизеров и топливных элементов. В частности, работы АО «НИИГрафит» по углеродным носителям для катализаторов, углеродным биполярным пластинам и материалам для газодиффузионного слоя твердополимерных электролизеров и топливных элементов. Ведутся работы и по импортозамещению протонпроводящей мембраны «Нафион» и разработке мембран нового поколения. Эти работы сегодня включены в Программу развития электрохимических технологий водородной энергетики до 2030 г Госкорпорации «Росатом».

### **Литература:**

[1] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 12 октября 2020 г. № 2634-р.

[2] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 5 августа 2021 г. № 262-р.

[3] Протокол заседания Стратегического совета Госкорпорации «Росатом» от 8 февраля 2022 г. № 1-СС/3-Пр.

### УД-4.3

## Получение водорода требуемой степени чистоты в мембранных реакторах на основе пористых керамических каталитических конвертеров

Федотов А.С., Цодиков М.В.

*Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН, Москва, Россия  
tsodikov@ips.ac.ru*

В настоящее время, одним из перспективных направлений развития мировой энергетики является разработка малогабаритных электрогенераторов на основе топливных элементов для питания как стационарных объектов, так и для применения в силовых установках различного транспорта и в портативных электроприборах.

В качестве важнейших видов топлива для питания топливных элементов на данный момент рассматриваются синтез-газ (смесь  $H_2/CO$ ) и водород. Эти топлива могут быть ископаемого (метан), биологического (этанол, продукты ферментации) синтетического (диметиловый эфир) и техногенного (побочные продукты синтеза Фишера-Тропша, продукты парциального окисления авиационного керосина) происхождения.

В современных нефтехимических процессах выделение водорода является сложным производственным этапом, составляющим половину его конечной стоимости. Альтернативой существующим многотоннажным решениям может стать использование малогабаритных каталитических мембранных реакторов на основе пористых керамических конвертеров для получения водородсодержащего газа требуемого состава. Добиться этого можно как путём направленного осуществления ряда химических процессов, таких как гидрирование и паровой риформинг оксидов углерода уже готового синтез-газа, так и в ходе его непосредственного получения из широкого спектра углеводородов с использованием гибридного каталитического мембранного реактора в котором стадия химического превращения объединена со стадией селективного извлечения ультрачистого водорода из зоны реакции на палладийсодержащей мембране.

В результате проведённых исследований на разработанных мембранных реакторах, содержащих в качестве активного элемента пористые керамические каталитические конвертеры, приготовленные путём комбинации самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и золь-гель метода, показано, что гидрирование газов риформинга углеводородов в метан на никель-алюминий-кобальтовых системах эффективно очищает их от примесей оксидов углерода, что делает их пригодными для питания не только высоко, но и среднетемпературных топливных элементов, весьма чувствительных к содержанию CO в концентрациях, превышающих 3 – 5 об. %.

Кроме того, установлено, что скорость протекающих реакций для цельного конвертера в 3 раза выше, чем для гранулированного, что является следствием

### УД-4.3

принудительной диффузии молекул субстратов в пространственно ограниченном объёме пор. Это фундаментальное заключение опирается на форму структурной организации конвертера, в котором на 1 см<sup>2</sup> поверхности приходится до 10<sup>7</sup> каналов с эффективным сечением 3 мкм, в то время как гораздо менее плотная упаковка активных частиц в насыпном слое катализатора приводит к заметно более низкой производительности традиционного проточного реактора.

Показано, что паровая конверсия монооксида углерода на пористых каталитических никель-кобальтовых конвертерах является альтернативным и весьма производительным способом получения водородсодержащих смесей со сверхмалыми концентрациями монооксида углерода (до 800 ppm).

Разработан оригинальный гибридный каталитический мембранный реактор, в котором стадия химического превращения реагентов на пористом каталитическом конвертере объединена со стадией селективного извлечения одного из продуктов, ультрачистого водорода (доля H<sub>2</sub> не менее 99.9999 об. %), из зоны реакции на палладий-рутениевой мембране. Как известно, ультрачистый водород необходим для питания низкотемпературных топливных элементов, особо чувствительных к отравлению монооксидом углерода в концентрациях выше 10 ppm.

Показано, что в гибридном каталитическом мембранном реакторе за счёт смещения химического равновесия заметно возрастают основные параметры процесса по сравнению с традиционным проточным режимом. Например, в углекислотном риформинге метана конверсия увеличивается на 30 %, при этом степень извлечения ультрачистого водорода достигает 83 %. Таким образом, высокая производительность наряду с малым весом и габаритами вполне позволяют эффективно задействовать гибридный каталитический мембранный реактор в переносных электрогенераторных схемах.

На примере процесса переработки побочных продуктов синтеза Фишера-Тропша продемонстрировано, что пористые каталитические конвертеры могут быть весьма успешно использованы в том числе и для глубокой очистки жидких и газообразных техногенных отходов от различного рода органических загрязнителей, переводя их в важный полупродукт и энергоноситель – синтез-газ, который после отделения диоксида углерода может быть использован в качестве реагента на нефтехимических производствах для получения различных ценных веществ, либо же для питания твёрдооксидных топливных элементов и выработки электроэнергии.

Утилизация выхлопов газотурбинных двигателей в мембранных реакторах на основе пористых каталитических конвертеров, совмещённых с твёрдооксидным топливным элементом, может стать дополнительным источником мощности во вспомогательных силовых установках для электроснабжения бортовых авиационных систем.

### УД-4.3

Опираясь на результаты исследований, полученных на разработанном прототипе электрогенераторного устройства, показана возможность создания новейших силовых установок на основе каталитических мембранных реакторов, совмещённых с твёрдооксидным топливным элементом, имеющих большой потенциал практического применения для безопасного энергообеспечения стационарных объектов и различных видов транспорта.

**Благодарности:** Исследования выполнены в рамках работ по Программе развития Центра компетенций Национальной Технологической Инициативы «Водород как основа низкоуглеродной экономики» при участии в Национальном проекте «Наука и университеты» при поддержке Фонда поддержки проектов национальной технологической инициативы и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

## УД-4.4

### Анализ технологических решений по предварительному охлаждению сжижаемого водорода с использованием замкнутых циклов на многокомпонентных смесевых хладагентах

Кротов А.С., Крикунова М.П., Самохвалов Я.В., Масликова С.В.  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, Москва, Россия  
*krikunova@bmstu.ru*

Процесс перехода на водородную энергетику связан с проблемой транспортировки водорода, одним из способов решения которой является перевозка водорода в сжиженном состоянии. В связи с этим, актуальным становится разработка технологических решений, позволяющих создавать эффективные и безопасные установки ожижения водорода.

В большинстве случаев, эффективные установки ожижения водорода содержат контур предварительного охлаждения и низкотемпературный контур. Предварительное охлаждение может осуществляться с помощью замкнутых циклов и открытых циклов с внешним охлаждением жидким азотом. Поставки жидкого азота экономически невыгодны для удалённых районов со слабо развитой инфраструктурой. Замкнутые схемы могут быть реализованы по разнообразным схемам в зависимости от температуры предварительного охлаждения. Наиболее эффективными являются циклы охлаждения на смесевых хладагентах, так как охлаждение происходит за счет кипения хладагента на разных температурных уровнях при постоянном давлении. [1]

В данной работе проанализированы схемные решения циклов на смесевом хладагенте и представлены общие особенности данного типа циклов. По выявленным особенностям были подобраны схемные решения для контура предварительного охлаждения УОВ.

Авторами было проведено моделирование [2, 3, 4] схемных решений и подобраны оптимальные по энергозатратам параметры для температур предварительного охлаждения в диапазоне 70 – 120 К.

По полученным данным были сформированы рекомендации по разработке технологических решений контуров предварительного охлаждения для установок ожижения водорода. Были выявлены пути уменьшения энергозатрат и повышения эффективности в зависимости от производительности установки.

Представлено технико-экономическое обоснование целесообразности использования системы предварительного охлаждения на смесевом хладагенте в сравнении с предварительным охлаждением жидким азотом.

#### Литература:

[1] Cryogenic Mixed Refrigerant Processes, Venkatarathnam Gadhiraaju, Springer New York, NY, Springer-Verlag New York 2008, XIII, 262

#### УД-4.4

- [2] Krotov, A., Kolesnikov, A., Samokhvalov, Y., Kuznetsov, R., Pronin, D., Zherdev, A. Study of mixed refrigerant natural gas liquefaction process using a mixture of non-flammable refrigerants// Refrigeration Science and Technology. – 2019 – Part F147717 – С. 233–237.
- [3] Ø. Wilhelmsen, D. Berstad, A. Aasen, P. Neksa, G. Skaugen, Reducing the exergy destruction in the cryogenic heat exchangers of hydrogen liquefaction processes, Int. J. Hydrogen Energy 43 (2018) 5033–5047, doi: 10.1016/j.ijhydene. 2018.01.094.
- [4] Архаров А.М., Марфенина И.В., Микулин Е.Н. Криогенные системы: в 2 т. Т. 1. М.: Машиностроение, 1996. С. 470-507. Т. 2 // под ред. А.М. Архаров и А.И. Смородина. М.: Машиностроение, 1999. 720 с.

## УД-4.5

### Разработка методов измерения характеристик летательных аппаратов при сверхзвуковых скоростях при использовании водорода в качестве энергоносителя

Гимон Т.А., Лукашевич С.В., Морозов С.О., Ядренкин М.А.

*Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, Новосибирск, Россия  
yadrenkin@itam.nsc.ru*

Экологические характеристики авиационной техники в настоящее время становятся одним из главных показателей, определяющих ее конкурентоспособность на мировом рынке и беспрепятственную эксплуатацию на международных авиалиниях [1-2]. Применение водорода в качестве топлива может не только значительно уменьшить углеродный след, но и благотворно сказаться на создаваемом сверхзвуковым самолетом уровне звукового удара, громкость которого главным образом определяется высотой полета и весом самолета [3].

В данной работе представлена методика измерения характеристик летательных аппаратов, а именно звукового удара, создаваемого ЛА при сверхзвуковых скоростях полета. Методика необходима для дальнейшего изучения характеристик элементов летательных аппаратов при использовании водорода в качестве энергоносителя.

Используемая методика заключается в получении данных в ближнем поле течения численными методами (с дублированием некоторых результатов посредством измерения полей возмущенного давления в аэродинамической установке), и дальнейшем пересчете его на большие расстояния [3].

Численное моделирование течения в ближнем поле моделей проводится с помощью постпроцессора COSMOS Flow Simulation. Задача обтекания тела и формирования течения в ближнем поле решается в трехмерной постановке с использованием стационарных уравнений Навье-Стокса [4]. На рис. 1 показан результат расчета для тестовой модели статического давления в плоскости симметрии модели, направленной вертикально вниз.

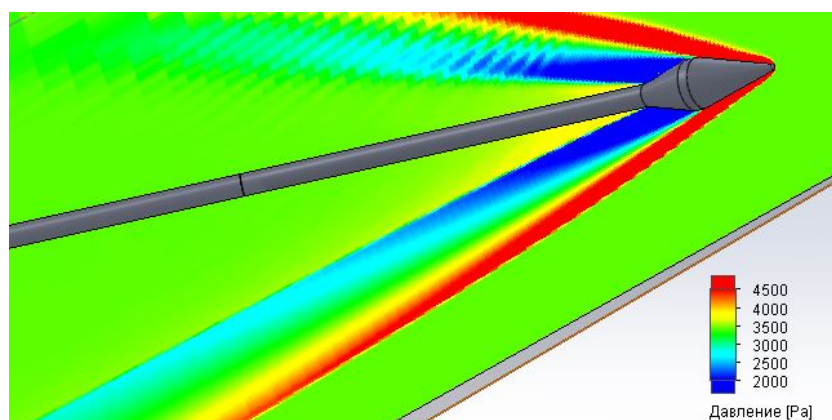


Рис. 1. Распределение статического давления вблизи тестовой модели

## УД-4.5

Экспериментальная часть метода основана на моделировании ближней зоны звукового удара в аэродинамической трубе «Транзит-М» (диаметр сопла 0,3 м) с использованием крупных моделей. На основании обзора и анализа существующих методов измерений возмущенных давлений в ближней зоне модели показано преимущество использования зонда полного давления за прямым скачком уплотнения в качестве приемника давления. Измерения возмущенного давления проводятся в динамическом режиме, то есть при непрерывном перемещении измерительного зонда относительно модели.

Сравнение экспериментально полученных данных с результатами численного моделирования в ближнем поле модели, представленное на рис.2, показывает их хорошее совпадение.

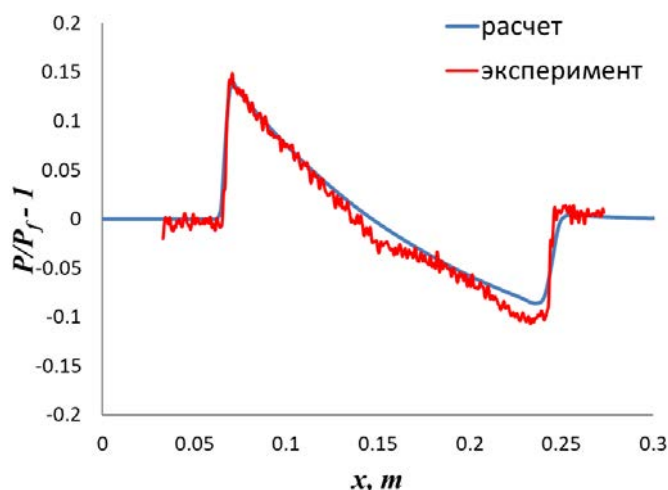


Рис. 2. Сопоставление экспериментально и численно полученных распределений нормированного статического давления в ближнем поле модели

В рамках методики пересчет полученных результатов на большие расстояния производится с помощью квазилинейной теории [5]. Далее проводится определение громкости звукового удара [6].

### Литература:

- [1] Палкин В.А. Обзор работ за рубежом по применению альтернативных видов топлива в авиации // Авиационные двигатели. 2021. Т. 4, № 13. С. 63-84.
- [2] NLR – Royal Netherlands Aerospace Centre, SEO Amsterdam Economics. Destination 2050: A route to net zero European aviation. Report NLR-CR-2020-510. 2021. 186 p.
- [3] Fomin V. M., Kiseleva T. A., Volkov V. F., Chernyshev S. L. Sonic boom problem: past, present and future // HiSST: International Conference on High-Speed Vehicle Science Technology (Moscow, Russia, 26–29 November 2018): Proceedings. -S.l. 2018. P. 1–4.
- [4] Kiseleva T., Lukeshevich S. Numerical simulation of sonic boom near-field flow over 69-degree delta wing body // Journal of Physics. Conference Series. 2019. Vol. 1404. P. 012111.
- [5] Рыжов О.С. Затухание ударных волн в стационарных течениях // ПМТФ. 1961. № 6. С. 36–40.
- [6] Stevens S. S. Perceived Level of Noise by Mark VII and Decibels // The Journal of the Acoustical Society of America. 1972. Vol. 51. P. 575–601.



## УД-4.6

### Высокоселективные каталитические системы на основе никеля для процесса дегидрирования жидких органических носителей водорода

Степаненко С.А., Коскин А.П., Алексеева М.В., Каичев В.В., Яковлев В.А.  
Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия  
*koskin@catalysis.ru*

В настоящее время существенно возрос интерес к альтернативным источникам энергии и, прежде всего, к водороду, как к топливу с нулевым углеродным следом. Развитие водородной энергетики помимо создания методов выделения  $H_2$ , подразумевает разработку методов его эффективного хранения и транспортировки. Особый интерес представляет хранение и транспортировка  $H_2$  в составе жидких органических носителей водорода (ЛОНС) [1]. Эти носители характеризуются высоким удельным содержанием  $H_2$  и могут использоваться многократно. Ключевым этапом в разработке ЛОНС-технологий является оптимизация условий дегидрирования циклоалканов ( $H_2$ -насыщенных форм ЛОНС-субстратов), таких как – метилциклогексан (МСН), декалин или пергидродибензилтолуол. Этот высокотемпературный (свыше  $300\text{ }^\circ\text{C}$ ) процесс, традиционно проводят на платиновых катализаторах [1], однако известны примеры использования каталитических систем без содержания благородных металлов [2] (в частности,  $Ni/SiO_2$ ), что является перспективным направлением развития технологии. В случае дегидрирования МСН, основной недостаток  $Ni/SiO_2$  это низкая селективность процесса в виду разложения толуола (продукт дегидрирования) до бензола и метана. Это снижает допустимое количество циклов использования ЛОНС-субстрата и приводит к загрязнению водорода. Таким образом, при разработке каталитических композиций с содержанием никеля основной задачей является повышение селективности процесса дегидрирования.

В ряде предшествующих работ нами исследовались каталитические свойства высокопроцентных никелевых систем ( $Ni-SiO_2$ , около 60 вес.% Ni). В восстановленной форме эти системы состоят из ультрадисперсных частиц Ni (удельная поверхность металла свыше  $20\text{ м}^2/\text{г}$ , по данным хемосорбции CO), стабилизированных матрицей аморфного диоксида кремния [3]. Последовательно изучалось влияние Cu- и Zn-модификации  $Ni-SiO_2$  на селективность процесса дегидрирования МСН [4,5]. В представленной работе основное внимание уделялось исследованию каталитических свойств NiSn-систем. Было показано, что применение олова в качестве модификатора позволяет достичь наиболее высокой селективности по толуолу (близкой к 100%) при сохранении высокой конверсии МСН. Исходные  $Ni-SiO_2$  системы ( $Ni_{100}$ , Рис.1) синтезировались согласно [3] и модифицировались оловом по адаптированной из работ [4,5] методике. Каталитические свойства восстановленных систем  $Sn/Ni-SiO_2$  ( $Sn_x/Ni_{1-x}$ , Рис.1) исследовались с использованием проточной реакционной установки, описанной

## УД-4.6

в работах [4,5]. Конверсия метилциклогексана ( $X_{\text{MCH}}$ , %) и селективность по толуолу ( $S_{\text{Тол}}$ , %) оценивались методом газовой хроматографии. В результате экспериментов был оптимизирован состав катализатора (Ni:Sn 80:20 вес.%) и температура предварительного восстановления (500 °С) олово-модифицированных систем.

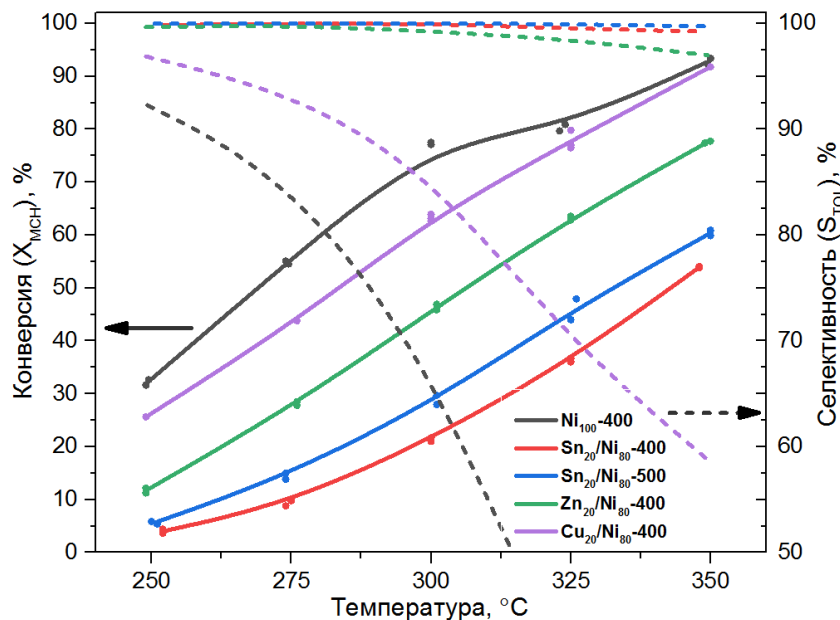


Рис. 1. Сравнение каталитических свойств исходного никелевого катализатора ( $Ni_{100}$ ) и модифицированных аналогов  $M_x/Ni_y-T$  (где,  $X, Y$  – весовые доли металлов;  $M = Cu, Zn$  или  $Sn$ ;  $T$  – температура восстановления ( $H_2$ , 1 час, 500 мл/мин)). Реакционные условия – проточная реакционная установка,  $T$  250-350 °C, 1 атм, 400 мл/мин  $Ar/H_2$  (1:1) 0.5 г катализатора,  $WHSV$  18.5 ч<sup>-1</sup>.

Строение исходных и восстановленных  $M/Ni-SiO_2$  ( $Me=Cu, Zn$  и  $Sn$ ) каталитических систем было исследовано комплексом физико-химических методов (РФА, РФА in situ, РФЭС, хемосорбция  $CO, H_2$ -ТПВ, ПЭМ, ТПД толуола и др.). В результате проведенных исследований было показано, что высокая селективность процесса дегидрирования МСН достигается при образовании твердых растворов Ni-Zn или Ni-Sn, для которых характерно снижение адсорбционных свойств катализатора по отношению к продукту реакции – толуолу. В свою очередь, быстрое удаление толуола из реакционного слоя способствует снижению скорости побочного процесса гидрогенолиза LOHC-субстрата.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 19-73-20020.

### Литература:

- [1] Preuster P., Papp C., Wasserscheid P. // *Accounts of Chemical Research*. 2017. Vol. 50. P. 74-85.
- [2] Al-ShaikhAli A.H., Jedidi A., Cavallo L., Takanabe K. // *Chemical Communications*. 2015. Vol. 51. P. 12931-12934.
- [3] Ermakova M., Ermakov D. // *Applied Catalysis A*. 2003. Vol. 245, 277-288.
- [4] Gulyaeva Y., Alekseeva (Bykova) M., Bulavchenko O., Kremneva A., Saraev A., Gerasimov E., Selishcheva S., Kaichev V., Yakovlev V. // *Nanomaterials*. 2021. Vol. 11. P. 1-20.
- [5] Alekseeva (Bykova) M., Gulyaeva Y., Bulavchenko O., Saraev A., Kremneva A., Stepanenko S., Koskin A., Kaichev V., Yakovlev V. // *Dalton Transactions*. 2022. Vol. 51. 6068-6085.

## УД-4.7

### Разработка безрастворного метода синтеза никелевых катализаторов для метанирования CO<sub>2</sub>

Дмитрук К.А., Нецкина О.В., Муха С.А., Булавченко О.А., Ищенко А.В., Комова О.В.  
Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия  
k.dmitruk@g.nsu.ru

Глобальное потепление на Земле ускоряется ростом концентрации парниковых газов в атмосфере, в том числе углекислого газа (CO<sub>2</sub>). Решить её можно путем улавливания CO<sub>2</sub> из дымовых газов и воздуха с его последующей утилизацией. Одним из перспективных способов переработки CO<sub>2</sub> является его гидрирование до метана (метанирование CO<sub>2</sub>). Кроме того, этот подход одновременно решает задачу аккумулирования водорода в химически связанной форме, а также позволяет обогащать биогаз метаном и удалять примеси CO и CO<sub>2</sub> из водородсодержащих газовых смесей. Согласно термодинамическим расчётам, высокая селективность метанирования CO<sub>2</sub> возможно только при температурах ниже 400 °С. Однако в данном температурном диапазоне нельзя осуществить этот процесс без катализаторов из-за высокого энергетического барьера восстановления углерода. Наибольшую активность в метанировании CO<sub>2</sub> проявляют металлы платиновой группы Ru, Rh, Pd благодаря их способности диссоциативно адсорбировать водород. В меньшей степени никель катализирует этот процесс, но из-за низкой стоимости никелевые катализаторы нашли широкое применение в промышленности. Традиционно приготовление никелевых катализаторов включает энергозатратное прокаливание никелевого предшественника. В результате формируется оксид никеля, который восстанавливают до металла в токе чистого водорода непосредственно перед реакцией. Объединить стадии формирования оксида никеля и его восстановления до металла удалось в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) при использовании комплексных соединений никеля как предшественников активного компонента. В литературе эта разновидность СВС получила название solid-state combustion (SSC), т.к. высокотемпературной газификации подвергаются твердые вещества.

Следует отметить, что обычно никельсодержащие комплексы получают с использованием растворителей, которые необходимо в дальнейшем утилизировать. Снизить экологическую нагрузку на окружающую среду можно за счет использования безрастворных методов приготовления комплексов, что соответствует современной концепции развития химической промышленности.

В настоящей работе предложен новый подход к синтезу органометаллических комплексов никеля методом сплавления нитрата или перхлората никеля с имидазолом, который термостабилен при плавлении и легко образует комплексные соединения с

## УД-4.7

переходными металлами. Их состав и структура были подтверждены методами элементного анализа, ИК НПВО спектроскопии и РФА.

Детально изучены процессы термодеструкции синтезированных никельсодержащих комплексов в условиях медленного ( $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ ) и быстрого нагрева ( $<100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ) в комбинации с масс-спектрометрией. Было установлено, что их разложение протекает в три стадии: (1) частичное удаление молекул лиганда из ближайшего координационного окружения металла; (2) окислительно-восстановительное взаимодействие структурных компонентов комплекса «лиганд-анион»; (3) окисление продуктов неполного разложения органического лиганда. Был выполнен анализ кинетики термодеструкции синтезированных никельсодержащих комплексов в рамках моделей Горовица-Мецгера и Коутса-Редферна и определены значения наблюдаемой энергии активации отдельных стадий, которые были использованы для расчета критической температуры теплового взрыва. Было отмечено, что имидазол-перхлоратный комплекс никеля более термостабилен, т.к. для него характерны более высокие значения энергии активации стадии удаления молекул лиганда и критической температуры теплового взрыва.

Изучение конденсированных продуктов газификации имидазол-нитратного и имидазол-перхлоратного комплексов никеля в режиме SSC показало, что они представляют собой смесь оксида никеля и восстановленного металла. Было продемонстрировано, что они проявляют каталитическую активность в реакции метанирования  $\text{CO}_2$ . При этом образец, полученный из имидазол-нитратного комплекса, активируется уже при  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  в реакционной среде, содержащей  $\text{CO}_2$ , и эффективно катализирует процесс взаимодействия  $\text{CO}_2$  с водородом.

С использованием комплекса имидазол-нитратного комплекса был приготовлен нанесенный никель-алюминиевый катализатор в режиме SSC, который проявил каталитическую активность в метанировании  $\text{CO}_2$  уже при температуре  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а при  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  обеспечил превращение  $69\%$   $\text{CO}_2$  в метан, что почти в 3 раза выше по сравнению с коммерческим катализатором НИАП-07-01, содержащим в 1,5 раза больше никеля.

В результате выполненных исследований был предложен новый безрастворный метод синтеза никелевых катализаторов для метанирования  $\text{CO}_2$  с использованием энергоёмких комплексов никеля с имидазолом в качестве предшественников каталитически активной фазы.

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания № 0239-2021- 0007 (AAAA-A21-121011390006-0).

## УД-4.8

### Исследования коллоидной стабильности нефти для разработки технологий закачки CO<sub>2</sub> в пласт при реализации водородных технологий

Гуськова И.А., Хаярова Д.Р.

*Альметьевский государственный нефтяной институт, Альметьевск,*

*Республика Татарстан, Россия*

*guskovaagni1@rambler.ru*

Для дальнейшего развития технологий производства водорода одним из приоритетных направлений исследований является изучение различных вариантов утилизации и использования углекислого газа (CO<sub>2</sub>). Исследования, направленные на проектирование технологий по использованию углекислого газа для увеличения нефтеизвлечения, являются важной государственной задачей, так как данные технологии могут обеспечить не только решение экологических проблем, но и получение дополнительной добычи нефти за счет применения ранее не использованных ресурсов [1,2]. Важно, что применение CO<sub>2</sub> позволяет вовлечь в разработку трудноизвлекаемые запасы нефти в широком спектре геолого-физических условий.

Одним из существенных отрицательных эффектов применения CO<sub>2</sub> для увеличения нефтеизвлечения является снижение фильтрационных характеристик пласта из-за агрегации и выпадения асфальтенов. Риски выпадения асфальтенов определяются конкретными характеристиками объекта разработки, и результаты, полученные ранее проведенными исследованиями, нельзя экстраполировать на другие нефтяные залежи. Даже при одинаковом химическом составе закономерности поведения и физико-химические свойства нефтяной дисперсной системы в пределах одного месторождения могут различаться, что является причиной отсутствия эффекта при применении технологий увеличения нефтеизвлечения [3].

В условиях высокой неоднородности пластовых систем месторождений и сложности процессов взаимодействия их с CO<sub>2</sub> для определения технологических параметров закачки и исключения рисков необходимо проведение большого количества сложных дорогостоящих экспериментальных исследований. Кроме того, текущая нормативно-техническая документация не учитывает возможностей и особенностей использования CO<sub>2</sub> для увеличения нефтеизвлечения, а методики, определяющие единые требования и подходы к проведению исследований нефти для определения возможности закачки CO<sub>2</sub>, отсутствуют. Поэтому необходимо ее развитие на основе анализа, систематизации и доработки методик проведения исследований, в том числе, разработка критериев, обеспечивающих скрининг нефтяного месторождения для предварительной оценки возможности закачки CO<sub>2</sub> и выбора приоритетного объекта.

## УД-4.8

Для решения этой задачи обоснована необходимость определения комплекса параметров состава и свойств нефти для дифференциации ее по коллоидной устойчивости на потенциальных объектах применения CO<sub>2</sub>. Показана необходимость проведения не только комплекса физико-химических методов, но и оценки неоднородности коллоидной устойчивости нефти по залежи или объекту, так как неоднородность коллоидной устойчивости нефти связана с изменениями ее состава по ряду причин, в том числе как техногенных, так и природных. Для определения коллоидной устойчивости нефти разработана комплексная методика анализа, включающая, наиболее, на наш взгляд, информативные реологические, спектрофотометрические, спектроскопические исследования. На основе экспериментальных исследований, анализа и обобщения результатов выполнена оценка коллоидной устойчивости нефти для трех месторождений нефти и определены объекты с наиболее стабильными характеристиками.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке ПАО «Татнефть» и Центра НТИ "Водород как основа низкоуглеродной экономики", Институт катализа СО РАН.

### **Литература:**

- [1] Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации. Утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 5 августа 2021 г. № 2162-р
- [2] «Декарбонизация нефтегазовой отрасли: международный опыт и приоритеты России». Энергетический центр СКОЛКОВО и Нефтяной совещательный форум, март 2021, energy@skolkovo.ru
- [3] Е. Е. Барская, Ю. М. Ганеева, Т. Н. Юсупова и др. Прогнозирование проблем при добыче нефтей на основе анализа их химического состава и физико-химических свойств. Проблемы нефтедобычи, нефтехимии, нефтепереработки и применения нефтепродуктов. с. 166-168.

## УД-4.9

### Разработка ингибитора осаждения асфальтенов для процессов закачки CO<sub>2</sub> в пласты для повышения нефтеотдачи

Якубов М.Р., Косачев И.П., Якубова С.Г., Тазеева Э.Г., Ахметова Г.Р., Тазеев Д.И.,  
Милордов Д.В., Борисов Д.Н.  
*Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова – ОСП ФИЦ КазНЦ РАН,  
Казань, Россия  
yakubovmr@mail.ru*

На сегодняшний день в результате многочисленных экспериментальных исследований и промысловых испытаний известно, что при закачке диоксида углерода происходит коллоидная дестабилизация нефти и осаждение асфальтенов в пласте. В большинстве случаев такой негативный фактор существенно ограничивает применимость методов закачки CO<sub>2</sub>-содержащих газов в пласты для повышения нефтеотдачи, поскольку осаждение асфальтенов наблюдается уже в маловязких нефтях с их содержанием 1-2 мас.%. Образование агрегатов асфальтенов зависит от стабильности нефти, дисбаланс которой могут вызвать изменения температуры, давления и химического состава, количество и скорость закачиваемого диоксида углерода [1]. С использованием высокотемпературной и высоконапорной системы микроанализа твердых осадков установлено [2], что изменение состояния асфальтенов в системе диоксид углерода – моделируемая нефть связано с массовой долей CO<sub>2</sub> и давлением и не зависит от температуры в диапазоне от 50°C до 100°C. Повышение давления от 8 МПа до 40 МПа приводит к росту размера частиц асфальтенов.

Применение ингибиторов осаждения асфальтенов является одним из способов предотвращения их осаждения в пласте при закачке диоксида углерода. В этом качестве органические соединения с высокой полярностью и ароматической структурой могут действовать аналогично естественному состоянию смол и стабилизировать частицы асфальтенов, удерживая их в растворе [3]. Молекулы ингибиторов присоединяются к асфальтеновым агрегатам через активные центры и образуют новый сегмент полиароматического ядра, в результате чего кинетически замедляется процесс образования твердой фазы асфальтенов и обеспечивается стабильность нефти в процессе добычи. В случае асфальтеновых частиц размером менее микрометра ингибиторы осаждения выступают в качестве дисперсантов. Гидроксильная функциональная группа -ОН, связанная с ароматическим кольцом в структуре ингибитора, при контакте с полярной группой асфальтенов способна усилить их стабильность.

В настоящее время технологии повышения нефтеотдачи, основанные на применении диоксида углерода в качестве агента воздействия на нефтяной коллектор, успешно применяются по всему миру, но в России подобные технологии только начинают тестироваться в опытном режиме. Эффективность проектов по закачке

## УД-4.9

диоксида углерода в пласт оценивается различными технологическими параметрами (давление, температура, объем и скорость закаченного газа и т.п.), однако весьма значимой характеристикой является и состояние асфальтеновых фаз флюида, способных ощутимо изменить проницаемость пласта. Для предотвращения таких процессов используют ингибиторы осаждения асфальтенов. Целенаправленный подход к их выбору и условиям применения позволит минимизировать негативные последствия коллоидной дестабилизации нефти в пласте при закачке диоксида углерода.

### **Литература:**

- [1] Tatiana Simões Loureiro, Luiz Carlos Magalhães Palermo, Luciana S. Spinelli. Influence of precipitation conditions (n-heptane or carbon dioxide gas) on the performance of asphaltene stabilizers // *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015. -127 - P.109-114.
- [2] Zhengku Wang, Jianian Xu, Hongli Liu, Jiadan Hou, Yu Zhang To. Effect of pressure, temperature, and massfraction of CO<sub>2</sub> on the stability of the asphaltene constituents in crude oil // *Petroleum Science and Technology* 2017, V. 35, 22, 2109-2114.
- [3] Yakubov M.R. Abilova G.R. Yakubova S.G. Mironov N.A. Composition and Properties of Heavy Oil Resins // *Petroleum Chemistry*, 2020, V. 60, 6, 637–647.



## УД-4.10

### Композитные материалы на основе ионных жидкостей для улавливания углекислого газа

Шешковас А.Ж.<sup>1,2</sup>, Веселовская Ж.В.<sup>1</sup>, Козлов Д.В.<sup>1,2</sup>

1 – Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия

2 – Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

*kdv@catalysis.ru*

В последние годы всё больше внимания уделяется технологиям, направленным на улавливание углекислого газа и уменьшение углеродного следа в целом. Такой интерес связан, в первую очередь, с увеличением потребления углеродсодержащего сырья, и, как следствие, повышением концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере. Перспективными абсорбентами углекислого газа являются ионные жидкости (ИЖ), вступающие в химическое взаимодействие с CO<sub>2</sub>. Для них характерны такие свойства, как нелетучесть, высокая сорбционная емкость и низкая температура регенерации. Главным недостатком этих ИЖ является высокая вязкость, которая приводит к снижению скорости поглощения CO<sub>2</sub>. Один из способов улучшения динамики сорбции – диспергирование ИЖ в порах носителей с развитой внутренней поверхностью.

В работе исследованы композитные материалы на основе различных ионных жидкостей ([Emim][Gly], [Emim][Ala] и [Emim][Ac]) и носителей с различной химией поверхности и пористой структурой (силикагель, активированный уголь и др.). Целью работы было изучение зависимости сорбционных свойств полученных композитных материалов от выбора носителя, массового содержания ИЖ и условий эксперимента.

Композитные сорбенты готовили методом пропитки пористой матрицы по избытку спиртовым раствором ИЖ с заданной концентрацией. Сушку материала проводили сначала на воздухе при 50°C, а затем в токе гелия при 100°C. Измерение сорбционных и термических характеристик для композитных материалов, а также исходных носителей и ИЖ проводили методами термогравиметрического анализа (ТГА) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Сорбционную емкость материалов определяли при температуре 30°C с использованием газовых смесей CO<sub>2</sub> и He, содержащих 2,4 или 15 об. % углекислого газа.

При проведении исследования было выявлено, что самую высокую сорбционную ёмкость показали композиты на основе [Emim][Gly], диспергированные на матрице мезопористого SiO<sub>2</sub> [1]. Отметим, что при диспергировании [Emim][Gly] в микропорах активированного угля значения сорбционной емкости были значительно ниже, возможно, из-за эффекта блокировки пор носителя.

На рисунке 1 можно видеть, что диспергирование [Emim][Gly] в порах силикагеля приводит к значительному ускорению сорбции CO<sub>2</sub> по сравнению с чистой ИЖ. Увеличение содержания ИЖ от 20% до 50% приводит к повышению динамической

## УД-4.10

сорбционной ёмкости по  $\text{CO}_2$ , однако при этом происходит замедление самого процесса сорбции. При увеличении содержания ИЖ до 60% динамическая сорбционная емкость резко снижается, и видно, что система не достигает стационарного значения величины сорбции за время эксперимента. По всей видимости, происходит блокировка пор избыточным количеством активного компонента, и реакция замедляется из-за образующегося на поверхности слоя вязкой жидкости, что подтверждается микрофотографиями SEM и DFSTEM.

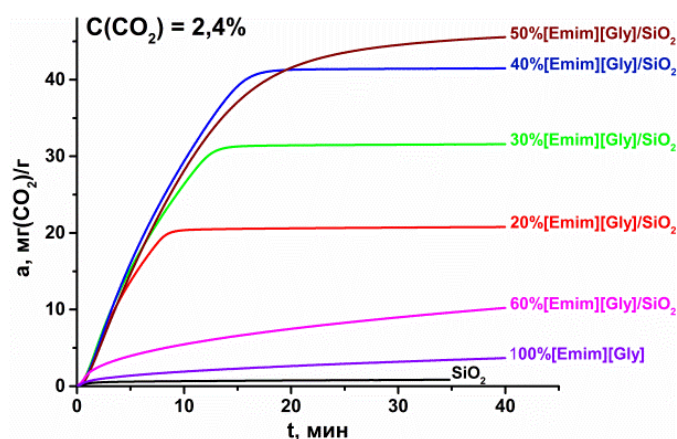


Рис. 1. Кинетические кривые сорбции  $\text{CO}_2$  для композитных сорбентов на основе  $\text{SiO}_2$  с разным содержанием  $[\text{Emim}][\text{Gly}]$

При увеличении концентрации  $\text{CO}_2$  в потоке подаваемых газов с 2,4 до 15 об.% появляется заметный прирост как в скорости сорбции, так и в величинах сорбционной ёмкости. Помимо этого в результате исследования стало известно, что концентрация углекислого газа в потоке влияет и на значения теплоты сорбции, измеренную методом ДСК. Этот эффект можно связать с тем, что при увеличении парциального давления газа  $\text{CO}_2$  увеличивается вклад в общую сорбционную емкость от процессов физической адсорбции/абсорбции.

Было проведено исследование стабильности сорбционной емкости композита 40%  $[\text{Emim}][\text{Gly}]/\text{SiO}_2$  в последовательных сорбционных циклах с регенерацией при 100 или 80°C. При 100°C наблюдается медленная деградация материала, что привело к незначительному снижению сорбционной ёмкости (потеря 5% от начальной сорбционной емкости за 10 циклов). Если регенерацию сорбента проводить при 80°C, динамическая сорбционная емкость материала несколько снижается, но материал стабильно работает в циклах, что важно для его практического использования.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института катализа СО РАН, проект АААА-А21-121011390006-0.

### Литература:

[1] Sheshkovas A.Z., Veselovskaya J.V., Rogov V.A., Kozlov D.V. // Microporous Mesoporous Mater. 2022. V.341. A.112113. P. 1-9.

## УД-4.11

### Совместное сжигание угля и биомассы как способ снижения выбросов CO<sub>2</sub>

Дубинин Ю.В.<sup>1</sup>, Языков Н.А.<sup>1</sup>, Елецкий П.М.<sup>1</sup>, Табакаев Р.Б.<sup>2</sup>, Беляновская А.И.<sup>2</sup>, Яковлев В.А.<sup>1</sup>

*1 – Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия*

*2 – Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия  
dubinin@catalysis.ru*

В настоящее время в связи с исчерпанием ископаемых органических ресурсов, экологическими проблемами, постоянным ростом стоимости топлива и его доставки и, соответственно, стоимости производимой из него энергии, наблюдается постоянный рост внимания к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) [1].

Одним из направлений использования возобновляемой биомассы (отходы древесины, энергетическая древесина, отходов сельского хозяйства, продуктов переработки биомассы, например, лигнина) является ее применение в качестве топлива при совместном сжигании с ископаемым твердым топливом [2]. Такой подход приводит к снижению антропогенной нагрузки на окружающую среду за счет того, что в атмосферу выделяется столько же диоксида углерода, сколько поглощается при росте биомассы [3].

В работе проведено исследование сжигания бурого угля, опилок и их смесей в кипящем слое катализатора при температурах 650-750 °С. Показано, что увеличение содержания опилок в смеси с бурым углем приводит к увеличению степени выгорания твердого топлива с 94.4 % до 99.9 %, при этом учитываемый выброс парникового газа в виде CO<sub>2</sub> снижается. Также снижается выброс CO, NO<sub>x</sub>. Высокое содержание оксидов щелочноземельных металлов в минеральной части этих твердых топлив (CaO и MgO) позволяет исключить выброс оксидов серы и шлакование теплообменных поверхностей при каталитическом сжигании бурого угля, опилок и их смесей в режиме кипящего слоя.

Также в работе представлены оценка экономического эффекта сжигания и расчет показателя воздействия на окружающую среду.

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания Института катализа СО РАН (проект АААА-А17-117041710075-0). Оценка экономического эффекта от сжигания и расчет показателя воздействия на окружающую среду выполнены в рамках государственного задания Тюменского государственного университета (проект FEWZ-2021-0014).

#### **Литература:**

- [1] Елистратов В.В. Возобновляемая энергетика. Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). 2017;(1-3):142-143.
- [2] E.A. Sondreal, S.A. Benson, J.P. Hurley, M.D. Mann, J.H. Pavlish, M.L. Swanson, G.F. Weber, C.J. Zygarlicke, Review of advances in combustion technology and biomass cofiring, 2001.
- [3] Алхасов, А. Б. Возобновляемые источники энергии: учебное пособие / А. Б. Алхасов. — Москва: МЭИ, 2016. — 271 с.

## УД-4.12

### Хемосорбционно-каталитический процесс получения водорода из сероводорода

Загоруйко А.Н., Микенин П.Е.  
Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия  
zagor@catalysis.ru

Активное развитие технологий гидропереработки и водородной энергетики требует разработки новых эффективных способов получения водорода, предпочтительно из неуглеводородного сырья. Сероводород является очень привлекательным сырьем для этой цели. Во-первых, это обычные отходы предприятий по переработке нефти и природного газа. Во-вторых, энергия связи водорода в H<sub>2</sub>S самая низкая среди всех встречающихся в природе водородсодержащих соединений.

К сожалению, реакция разложения сероводорода



характеризуется жесткими равновесными ограничениями. Полное разложение сероводорода требует сверхвысоких температур (выше 1500°C), что приводит к высоким энергозатратам, необходимости применения дорогостоящих термостабильных материалов и риску обратной рекомбинации элементов на стадии охлаждения. В (очень типичном) случае, когда в исходном газе присутствуют углеродсодержащие соединения (CO<sub>2</sub>, углеводороды), такие температуры также могут вызывать побочные реакции с образованием нежелательных продуктов (кокса, CO, COS и CS<sub>2</sub>). По этим причинам до сих пор не существует реальной технологии разложения H<sub>2</sub>S для широкого практического применения.

Новый технологический подход [1] включает циклическое чередование двух технологически разделенных во времени и пространстве реакций хемосорбции сероводорода на сульфидном хемосорбенте (2) и регенерации хемосорбента (3)



Как показали термодинамические расчеты [1], реакция (2) является экзотермической и соответствующая равновесная конверсия H<sub>2</sub>S может достигать 100 % при температуре окружающей среды. Реакция регенерации (2) требует более высоких температур, но обратное образование H<sub>2</sub>S полностью исключается отсутствием водорода в реакционных средах на стадии регенерации.

Проведенные эксперименты показали, что при циклическом чередовании стадий хемосорбции и регенерации образование водорода при комнатной температуре у всех исследованных сульфидов (FeS, NiS, CoS) незначительно, что связано с кинетическими ограничениями. Конверсия H<sub>2</sub>S с выделением водорода на стадии хемосорбции

## УД-4.12

становится заметной, начиная с 200°C, и увеличивается с повышением температуры, достигая максимума при 350°C (см. рис.1), этот рост также обусловлен кинетическими факторами. При дальнейшем повышении температуры становится существенным влияние обратной реакции образования H<sub>2</sub>S и наблюдаемая конверсия снижается. В то же время видно, что конверсия H<sub>2</sub>S во всем представленном интервале температур значительно превышает равновесное значение, что обусловлено хемосорбционным усилением реакции разложения H<sub>2</sub>S.

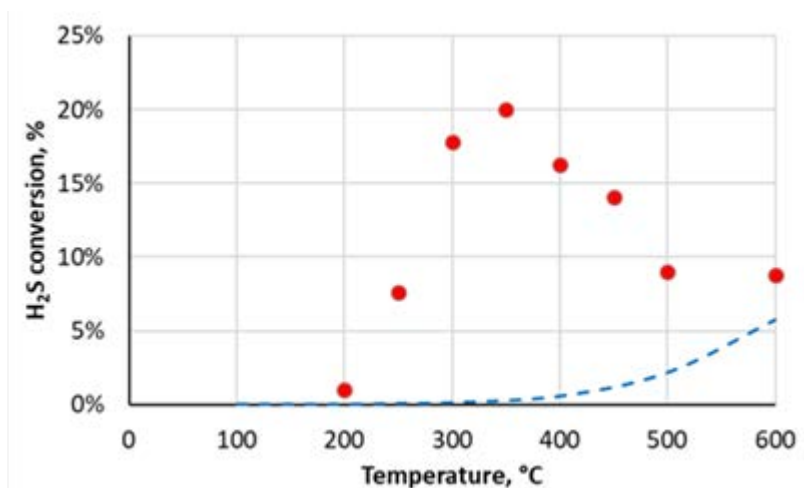


Рис. 1. Конверсия H<sub>2</sub>S на стадии хемосорбции в цикле хемосорбция-регенерация. Точки – экспериментальные данные, штриховая линия – равновесие реакции (1). Хемосорбент – FeS, реакционная среда – 5% H<sub>2</sub>S в азоте.

Высокотемпературная (600°C) регенерация полностью восстанавливает свойства хемосорбента, не проявляя деградации этого материала в течение 20 циклов.

Хотя полученные результаты оказались менее оптимистичными, чем ожидалось, в отношении температур реакции, предлагаемый технологический подход по-прежнему перспективен для практического применения в целях производства водорода. В презентации обсуждаются возможные технологические схемы и технико-экономические характеристики процесса, а также задачи, которые необходимо решить для создания эффективной технологии.

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания для Института катализа им. Г.К.Борескова СО РАН (проект АААА-А21-121011390010-7)

### Литература:

- [1] A.Zagoruiko, Catalysis Today, 329 (2019), 171-176.
- [2] Zagoruiko A., Mikenin P. Catalysis Today, 378 (2021) 176-188.

**КРУГЛЫЙ СТОЛ**  
**«Научная инфраструктура и образование»**



**Исследовательские, лабораторно-производственные и испытательные возможности ИФТТ РАН в области электрохимической водородной энергетики: твердооксидных топливных и электролизных элементов**

Агарков Д.А., Бурмистров И.Н., Матвеев Д.В., Патракеев М.В., Самойлов А.В., Федотов Ю.С., Хартон В.В., Ципис Е.В., Бредихин С.И.

*Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, Россия  
buril@issp.ac.ru*

В ИФТТ РАН с 2003 года ведутся систематические исследования и разработки в области твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ), батарей и энергетических установок на их основе, а также твердооксидных электролизных элементов (ТОЭЛЭ), батарей и электролизных элементов на их основе: от поиска, синтеза и исследований исходных материалов до разработки и создания высокоэффективных генераторов электроэнергии и высокопотенциального тепла на базе ТОТЭ, а также электролизных установок на базе ТОЭЛЭ для эффективной генерации водорода.

В рамках указанных работ коллективом был сформирован и активно применяется в исследованиях и прикладных проектах комплекс исследовательского, лабораторно-производственного и испытательного оборудования по всем указанным выше направлениям исследований:

1. Комплекс оборудования для синтеза новых электродных материалов: вытяжные шкафы, высокотемпературные печи, планетарные мельницы, механические ступки и т.д.

2. Комплекс оборудования для характеристики полученных соединений на предмет применимости в электродах ТОТЭ и ТОЭЛЭ: рентгеновские порошковые и монокристалльный дифрактометры, сканирующий электронный микроскоп, времяпролетный вторично-ионный масс-спектрометр, рентгеновский фотоэлектронный спектрометр, двулучевой электронно-ионный микроскоп, вертикальный дилатометр, термогравиметрический анализатор с дифференциальным термическим анализом, стенды для изучения электропроводности в зависимости от парциального давления кислорода, стенды для изучения содержания кислорода методом кулонометрического титрования и другое оборудование.

3. Комплекс оборудования для изготовления топливных и электролизных элементов: локальные «чистые зоны», машина для литья на движущуюся ленту, планетарные миксеры, принтеры для трафаретной печати с автоматизированным позиционированием, сушильные шкафы для чистых зон, комплекс высокотемпературных печей, установка для формирования тонкопленочного электролита методом "холодного" аэрозольного осаждения в вакууме, система прецизионной лазерной маркировки и резки, система лазерной сварки, автоматизированная система подготовки шлифов и другое оборудование.



## КС-1

4. Комплекс исследовательского оборудования для изучения электрохимических характеристик единичных ТОТЭ и ТОЭЛЭ: высокотемпературные печи, газовые системы, потенциостаты-гальваностаты, измерители импедансных спектров, «хаузинги» и высокотемпературные вставки, прочее оборудование и оснастка газо-температурных стендов.

5. Комбинированная экспериментальная установка, объединившая методику исследования методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) с высоким пространственным разрешением и методику изучения электрохимических характеристик твердооксидных электролизных элементов (ТОЭЛЭ) и твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) в реальных условиях работы: спектральная установка, автоматизированный испытательный газо-температурный стенд, система проточного газового анализа.

6. Комплекс оборудования для изготовления маломасштабных сборок и батарей ТОТЭ и ТОЭЛЭ: станок электроэрозионный копировально-прошивной, прецизионный трехкоординатный фрезерный станок с ЧПУ, робот-дозатор с ЧПУ для прецизионного нанесения керамо-органических паст, комплекс оборудования для подготовки металлических деталей и нанесения проводящих защитных покрытий гальваническим методом, электропечи вакуумные, сборочный участок, оборудованный всеми системами для организации сборки батарей ТОТЭ и ТОЭЛЭ.

7. Комплекс оборудования для испытания маломасштабных сборок и батарей ТОТЭ и ТОЭЛЭ: газовая рампа со сменными моноблоками из баллонов с водородом и метаном для обеспечения больших потоков топливных газов при электрохимических испытаниях, газовый хроматограф, система проточного газового анализа, лабораторный настольный двухканальный увлажнитель топливной смеси, высокотемпературные печи, газовые системы, потенциостаты-гальваностаты и электронные нагрузки, измерители импедансных спектров, автоматизированный стенд для электрохимических испытаний батарей ТОЭЛЭ и ТОТЭ мощностью до 1 кВт, газо-температурный стенд для проведения электрохимических испытаний маломасштабных сборок ТОЭЛЭ и ТОТЭ мощностью до 200 Вт.

8. Комплекс аналитического оборудования и испытательных стендов для изучения и отладки силовых схем и систем управления электролизных установок на ТОЭЛЭ и энергетических установок на ТОТЭ.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке договора 1320-22-427/22/9Д между ИК СО РАН и ИФТТ РАН, заключенного в рамках договора о предоставлении субсидии от «17» декабря 2021 г. № 70-2021-00270 для поддержки Центра Национальной технологической инициативы «Водород как основа низкоуглеродной экономики».

## КС-2

### Возможности «Научно-аналитического центра исследования структуры и состава углеродистых веществ» (КемЦКП)

Созинов С.А., Исмагилов З.Р.

*Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты СО РАН, Кемерово, Россия  
sozinov71@mail.ru*

«Научно-аналитический центр исследования структуры и состава углеродистых веществ» (КемЦКП) ФИЦ УУХ СО РАН располагает комплексом самого современного, мощного научно-исследовательского и аналитического оборудования, а по отдельным позициям в уникальной комплектации, которое позволяет на самом высоком мировом уровне проводить исследования состава, структуры и физико-химических свойств широкого круга объектов. Коллектив ЦКП имеет огромный опыт по проведению исследований углей и твердого топлива, продуктов углекислоты, углеродных наноструктурированных материалов и композитов на их основе, каталитических систем на основе углеродных нанотрубок и нановолокон. Мы выполняем исследования по ряду междисциплинарных проектов медицины, сельского хозяйства, экологии. Результаты исследований на базе КемЦКП публикуются в научных журналах, входящих в Q1 и Q2 WoS и Scopus.

Отдельного внимания достойны уникальные комплексы, которыми располагает КемЦКП - это достаточно редкая в РФ комплектация рентгеновского порошкового дифрактометра Bruker D8 Advance с возможностью исследования структурных изменений и фазовых превращений in-situ при нагреве образцов до 1000С и охлаждении до температуры жидкого азота, в различных атмосферах, а также – исследовательская установка, включающая оптико-эмиссионный спектрометр с индуктивно связанной плазмой iCAP 6500 DUO с применением метода лазерной абляции (гравер UP 266 MACRO) для отбора проб из твердого агрегатного состояния вещества.

В распоряжении центра находится более 20 единиц оборудования, охватывающий электронную микроскопию, радиоспектрометрические методы ЭПР и ЯМР, спектроскопию ИК и КР, термогравиметрию и дифференциальный термический анализ с масс-спектрометрией, методы исследования размеров частиц, удельной поверхности и пористости, хроматомасс-спектрометрию.

## КС-3

### ЦКП "СКИФ": проектируемые станции и будущие возможности

Бухтияров А.В., Сараев А.А., Зубавичус Я.В.

*ЦКП «СКИФ» Институт катализа СО РАН, р.п. Кольцово, Новосибирская область,  
Россия  
avb@catalysis.ru*

ЦКП "СКИФ" – источник СИ поколения 4+, создаваемый в наукограде Кольцово под Новосибирском. Ускорительный комплекс ЦКП "СКИФ" состоит из линейного ускорителя электронов с энергией 200 МэВ, синхротрона-бустера на полную энергию и накопительного кольца. Накопитель релятивистских электронов с энергией 3 ГэВ, периметром 476 м и сверхмалым расчетным горизонтальным эмиттансом 73.2 пкм·рад (без учета токовых эффектов, связи бетатронных колебаний и вставных устройств) будет поставлять пучки СИ с предельной яркостью в диапазоне от 10 эВ до 100 кэВ на 30 экспериментальных станций. Для энергии фотонов ~1.5 кэВ эмиттанс источника приближается к волновому (дифракционному) пределу, обеспечивая высокую степень когерентности СИ и расширяя потенциал исследовательского комплекса.

Экспериментальными станциями "СКИФ" первой очереди являются станции 1-1 "Микрофокус", 1-2 "Структурная диагностика", 1-3 "Быстропротекающие процессы", 1-4 "XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм", 1-5 "Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне" и 1-6 "Электронная структура".

Основной задачей функционирования ЦКП "СКИФ" станет инфраструктурное обеспечение фундаментальных и прикладных исследований научных и образовательных организаций, а также организаций реального сектора экономики, выступающих в роли пользователей, с целью обеспечения лидерства в приоритетных областях научно-технологического развития Российской Федерации. Инфраструктура ЦКП "СКИФ" будет использована для выполнения исследований мирового уровня в различных областях физики, химии, материаловедения, молекулярной биологии, медицины и других дисциплин с акцентом на наиболее прорывные, экономически и социально-значимые мультидисциплинарные задачи.

В области фундаментальных наук приоритетными направлениями деятельности ЦКП "СКИФ" являются: развитие научных основ создания новых материалов с заданными свойствами (включая композитные и гибридные) на основе знания их структуры; исследование механизмов функционирования живых систем, в том числе развитие бионических подходов к дизайну технических систем; развитие методологии синхротронной диагностики для эффективной реализации инновационных технологических цепочек "от идеи к коммерческому продукту"; развитие экспериментальной аппаратуры и методик обработки больших данных, в том числе для исследования ударно-волновых воздействий на вещества и материалы; структурный

### КС-3

дизайн новых лекарственных средств для борьбы с социально значимыми заболеваниями, развитие методов медицинской диагностики и терапии; моделирование геологических и геофизических процессов в недрах Земли и планет; поиск решений глобальных экологических проблем, включая исследования материалов для альтернативной энергетики (водородной, солнечной, термоядерной).

## КС-4

### Возможности ЦКП «Национальный центр исследования катализаторов»

Каичев В.В.

*Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия*

*vvk@catalysis.ru*

Центр коллективного пользования «Национальный центр исследования катализаторов» (ЦКП «НЦИК») представляет собой специализированный исследовательский центр, обеспечивающий инфраструктурную поддержку программ и проектов в сфере приоритетных фундаментальных и прикладных научных исследований, в том числе в области развития водородной энергетики. Основными направлениями деятельности ЦКП является проведение исследований строения и свойств катализаторов, адсорбентов и сопутствующих функциональных материалов с использованием современных кинетических, адсорбционных, оптических, рентгеновских и магнитных методов; оказание соответствующих услуг исследователям и научным коллективам, как базовой организации, так и иным заинтересованным пользователям. Отличительной особенностью ЦКП «НЦИК» является проведение исследований методами просвечивающей электронной микроскопии с субангстремным пространственным разрешением, проведение *in situ* исследований методами колебательной спектроскопии, рентгеновской дифракции и РФЭС, а также проведение широкого спектра исследований адсорбционными методами. Список услуг можно найти на сайте ЦКП [https://www.catalysis.ru/block/index.php?ID=2&SECTION\\_ID=2434](https://www.catalysis.ru/block/index.php?ID=2&SECTION_ID=2434).

Основными направлениями исследований, проводимых на оборудовании ЦКП, являются: определение каталитических свойств материалов в реакциях окисления СО и легких углеводородов; измерение кислотно-основных свойств поверхности гетерогенных катализаторов, в том числе количественное измерение силы и концентрации льюисовских и бренстедовских кислотных, а также основных центров; изучение текстуры катализаторов и сорбентов; определение удельной поверхности и распределения пор по размерам; изучение морфологии катализаторов и функциональных материалов методами электронной микроскопии; проведение *in situ* и *ex situ* исследований структуры и химического состава катализаторов методами электронного парамагнитного резонанса, рентгеновской дифракции, РФЭС, оптической и колебательной спектроскопии, в том числе изучение процессов активации и дезактивации катализаторов, происходящих под воздействием газовых сред, высокой температуры и/или давления на атомно-молекулярном уровне.

ЦКП оказывает научно-технические услуги как государственным научным организациям, так и коммерческим предприятиям различной направленности. Научно-технические услуги оказываются оперативно на высоком методическом уровне.

**Исследование катализаторов и функциональных материалов методами  
электронной микроскопии**

Герасимов Е.Ю.<sup>1,2</sup>

*1 – Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия*

*2 – Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

*gerasimov@catalysis.ru*

Современные исследования морфологии и микроструктуры катализаторов и других функциональных материалов сложно представить без использования методов электронной микроскопии. Прямая визуализация структуры на нанометровых масштабах позволяет исследователям детально понимать процессы формирования катализаторов или отслеживать влияние реакционных условий на изменения, происходящие как с поверхностью, так и со структурой. Еще одной особенностью электронной микроскопии является возможность проводить анализ химических компонентов входящих в состав функциональных материалов с локальностью порядка 1 нм.

**Концепция образовательных программ НГУ-СКИФ**

Цыбуля С.В.<sup>1,2</sup>, Булавченко О.А.<sup>1,2</sup>, Винокуров З.С.<sup>1,2,3</sup>, Гольденберг Б.Г.<sup>1,3</sup>,  
Мищенко Д.Д.<sup>2,3</sup>, Селютин А.Г.<sup>2,3</sup>, Шефер К.И.<sup>1,2,3</sup>, Зубавичус Я.В.<sup>1,2,3</sup>

1 – Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

2 – Институт катализа СО РАН, Новосибирск, Россия

3 – ЦКП «СКИФ» ФИЦ ИК СО РАН, Кольцово, Россия

*obulavchenko@catalysis.ru*

Создание источника синхротронного излучения поколения 4+ в Новосибирской области (ЦКП «СКИФ») предполагает, что в ближайшие годы после его запуска должно сформироваться научное сообщество российских и зарубежных исследователей, активно использующих новые, во многом уникальные, экспериментальные возможности для решения актуальных задач в различных сферах науки и технологий. Сам источник синхротронного излучения призван стать экспериментальной базой для подготовки и переподготовки кадров в содружестве с заинтересованными учебными учреждениями. Совместно с ЦКП СКИФ планируется создание станции 1-7 СКИФ-НГУ «Базовые методы синхротронной диагностики для образовательной, исследовательской и инновационной деятельности студентов» в 2025 г. и образовательно-исследовательского центра, на основе которого будет проходить учебная деятельность студентов, переподготовка кадров и научно-исследовательские проекты. На станции 1-7 будут реализованы ключевые методы, которые позволяют решать широкий круг задач из различных областей, включающих материаловедение, медицину, геофизику, археологию и др. Планируется реализация методов порошковой и монокристаллической рентгеновской дифракции, спектроскопии рентгеновского поглощения и рентгенофлуоресцентный анализ. В планы университета входит создание следующих научно-образовательных программ, которые можно условно разделить на три категории. (1) Мероприятия, интегрированные в учебный процесс НГУ, которые включают в себя проведение практикумов и лабораторных работ, выполнение квалификационных работ студентов и аспирантов: в настоящее время находится в стадии формирования магистерская программа "Синхротронные методы исследования", создается практикум с включением лабораторных приборов и учебной станции ИЯФ (СЦСТИ). (2) Дополнительное образование, организация школ, курсов повышения квалификации, тематических школ-конференций. (3) Стажировки для выполнения научных или образовательных задач с использованием экспериментальных возможностей станции 1-7. Таким образом, в НГУ будет сформирован образовательный трек полного цикла подготовки кадров для синхротронных исследований, ключевым элементом которого должна стать станция 1.7 после её запуска.

## Список участников

### **АБУТКИНА Елена Наилевна**

ООО "НКЦ "ЛАБТЕСТ"  
Москва  
lena@lab-test.ru

### **АФОННИКОВА Софья Дмитриевна**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
afonnikova@catalysis.ru

### **БАГИШЕВ Артем Сергеевич**

Институт химии твердого тела и  
механохимии СО РАН  
Новосибирск  
bagishev.ar@yandex.ru

### **БАЖЕНОВ Степан Дмитриевич**

Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Ордена Трудового  
Красного Знамени Институт  
нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева  
Российской академии наук  
Москва  
sbazhenov@ips.ac.ru

### **БЕСПАЛКО Юлия Николаевна**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
bespalko@catalysis.ru

### **БОРГУЛЕВ Мирон Валерьевич**

Частное учреждение "Наука и инновации"  
Москва  
MiVBorgulev@rosatom.ru

### **БРИНК Иван Юрьевич**

Южно-Российский государственный  
политехнический университет  
Новочеркасск  
brink.ivan@mail.ru

### **БУЛАВЧЕНКО Ольга Александровна**

Новосибирский государственный  
университет  
Новосибирск  
obulavchenko@catalysis.ru

### **БУРМИСТРОВ Илья Николаевич**

Институт физики твердого тела РАН  
Черноголовка  
buril@issp.ac.ru

### **БУТЕНКО Владислав Романович**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
vladislav.but@mail.ru

### **БУХТИЯРОВ Андрей Валерьевич**

Центр коллективного пользования  
"Сибирский кольцевой источник фотонов"  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
"Федеральный исследовательский центр  
"Институт катализа им. Г.К. Борескова  
Сибирского отделения Российской  
академии наук"  
Новосибирск  
avb@catalysis.ru

### **ВУТОЛКИНА Анна Викторовна**

МГУ им. М.В. Ломоносова,  
Химический факультет  
Москва  
annavutolkina@mail.ru

### **ГЕРАСИМОВ Евгений Юрьевич**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
gerasimov@catalysis.ru

### **ГЛОТОВ Александр Павлович**

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина  
Москва  
glotov.a@gubkin.ru

### **ГОЛОДНИЦКИЙ Андрей Эмильевич**

ООО "Инэнерджи"  
Москва  
a.golodnitsky@inenergy.ru

### **ГОРЛОВА Анна Михайловна**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
gorlova@catalysis.ru



**ГРАБЧАК Алена Андреевна**

Институт нефтехимического синтеза им. А.В.  
Топчиева РАН  
Москва  
ale.grabchak@ips.ac.ru

**ГУСЬКОВА Ирина Алексеевна**

Альметьевский государственный нефтяной  
институт  
Альметьевск  
guskovaagni1@rambler.ru

**ДЕМЕНТЬЕВА Оксана Сергеевна**

Учреждение Российской академии наук  
Ордена Трудового Красного Знамени  
Институт нефтехимического синтеза  
им. А. В. Топчиева РАН  
Москва  
dementyeva@ips.ac.ru

**ДМИТРУК Кирилл Алексеевич**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
k.dmitruk@g.nsu.ru

**ДУБИНИН Юрий Владимирович**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
dubin@cat.ysu.ru

**ЗАГОРУЙКО Андрей Николаевич**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
zagar47@gmail.com

**ЗАЖИГАЛОВ Сергей Валерьевич**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
zazhigalov@gmail.com

**ИММЕН Александра Романовна**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
immen@cat.ysu.ru

**ИСМАГИЛОВ Зинфер Ришатovich**

ФИЦ угля и углехимии СО РАН  
Кемерово  
zinfer1@mail.ru

**КАИЧЕВ Василий Васильевич**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
vvk@cat.ysu.ru

**КОЖЕВНИКОВ Иван Вячеславovich**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
kiv@cat.ysu.ru

**КОЗЛОВ Денис Владимирович**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
kdv@cat.ysu.ru

**КОЗЛОВА Екатерина Александровна**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
kozlova@cat.ysu.nsk.su

**КОСКИН Антон Павлович**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
koskin@cat.ysu.ru

**КРАСНИКОВ Дмитрий Викторович**

Сколковский Институт Науки и технологий  
Москва  
krasnikovdmitry@gmail.com

**КРАФТ Ярослав Валерьевич**

Федеральный исследовательский центр угля  
и углехимии Сибирского отделения  
Российской академии наук  
Кемерово  
kraft.kem@gmail.com

**КРИКУНОВА Маргарита Петровна**

МГТУ им. Н.Э. Баумана  
Москва  
Krikunova@bmstu.ru

**КРОТОВ Александр Сергеевич**

МГТУ им. Н.Э. Баумана  
Москва  
krotov@bmstu.ru

**КУДИНОВ Игорь Васильевич**

Самарский государственный технический  
университет  
Самара  
igor-kudinov@bk.ru

**КУЗНЕЦОВ Алексей Николаевич**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
kan@catalysis.ru

**КУЗНЕЦОВА Александра Денисовна**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
a.kuznetsova1@g.nsu.ru

**КУЗЬМИН Антон Валериевич**

Вятский государственный университет  
Киров  
a.v.kuzmin@yandex.ru

**КУЛИКОВА Майя Валерьевна**

Учреждение Российской академии наук  
Ордена Трудового Красного Знамени  
Институт нефтехимического синтеза  
им. А. В. Топчиева РАН  
Москва  
m\_kulikova@ips.ac.ru

**ЛОГУНОВА Светлана Сергеевна**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
logunova@catalysis.ru

**МАЗИНА Ольга Ивановна**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
o.mazina@g.nsu.ru

**МЕДВЕДЕВ Дмитрий Александрович**

ООО "Салаватский катализаторный завод"  
Салават  
a.e.rubanov@gmail.com

**НАСИБУЛИН Альберт Галийевич**

Сколковский институт науки и технологий  
Москва  
a.nasibulin@skol.tech

**НЕЦКИНА Ольга Владимировна**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
netskina@catalysis.ru

**НИЗОВСКИЙ Александр Иванович**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
alexniz@inbox.ru

**НИКУЛИНА Ирина Евгеньевна**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
ikar@catalysis.ru

**ОЗЕРОВА Анна Михайловна**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
ozerova@catalysis.ru

**ОСИПОВ Александр Константинович**

Институт нефтехимического синтеза  
им. А.В. Топчиева РАН  
Москва  
osipov.aleksander.k@gmail.com

**ПОТЕМКИН Дмитрий Игоревич**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
potema@catalysis.ru

**ПОТЫЛИЦЫНА Арина Романовна**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
arina231299@mail.ru

**ПУШКАРЕВ Александр Иванович**

Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет  
Томск  
aipush@mail.ru

**РЕШЕТИНА Марина Викторовна**

РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина  
Москва  
reshetina.mv@yandex.ru

**РОЛДУГИНА Екатерина Алексеевна**

Химический факультет МГУ  
им. М.В. Ломоносова  
Москва  
rolduginakate@mail.ru

**РУБАНОВ Антон Евгеньевич**

ООО "Салаватский катализаторный завод"  
Салават  
a.e.rubanov@gmail.com

**САМОХВАЛОВ Ярослав Владимирович**

МГТУ им. Н.Э. Баумана  
Москва  
samokhvalov@bmstu.ru

**СЕДОВ Игорь Владимирович**

ФИЦ ПХФ и МХ РАН  
Черноголовка  
isedov@icp.ac.ru

**СИДОРУК Кристина Николаевна**

Институт проблем химической физики РАН  
Черноголовка  
sidarukk@gmail.com

**СИМОНОВ Михаил Николаевич**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
smike@catalysis.ru

**СИПАТОВ Иван Сергеевич**

Институт металлургии УрО РАН  
Екатеринбург  
ivan.sipatov@gmail.com

**СМИРНОВА Нина Владимировна**

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова  
Новочеркасск  
smirnova\_nv@mail.ru

**СНЫТНИКОВ Павел Валерьевич**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
pvsnyt@catalysis.ru

**СОЗИНОВ Сергей Анатольевич**

ФИЦ УУХ СО РАН  
Кемерово  
sozinov71@mail.ru

**СОЛДАТОВА Евгения Викторовна**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
sev@catalysis.ru

**СОЛНЦЕВА Екатерина Сергеевна**

Наука и инновации,  
Госкорпорация "Росатом"  
Подольск  
EkSESolntseva@rosatom.ru

**СТАВИЦКАЯ Анна Вячеславовна**

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина  
Москва  
stavitsko@mail.ru

**СУВОРОВА Марина Сергеевна**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
ms-suvorova@yandex.ru

**ТРОПИН Евгений Сергеевич**

ФГБУН Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН  
Новосибирск  
evgeny.tropin@mail.ru

**УРЛУКОВ Артём Сергеевич**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
aurlukov@mail.ru

**ФЕДОТОВ Алексей Станиславович**

Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН  
Москва  
alexey.fedotov@ips.ac.ru

**ХАМИДУЛЛИН Руслан Маратович**

АО "Электрокерамика"  
Раменское  
a.e.rubanov@gmail.com

**ЧИБИРЯЕВ Андрей Михайлович**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
chibirv@catalysis.ru

**ЧИСТЯКОВ Андрей Валерьевич**

Учреждение Российской академии наук  
Ордена Трудового Красного Знамени  
Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН  
Москва  
chistyakov@ips.ac.ru

**ШАБАНОВА Марина Сергеевна**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
sbvmari@catalysis.ru

**ШИЛОВ Владислав Александрович**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
dubbm97@gmail.com

**ЯДРЕНКИН Михаил Андреевич**

ИТПМ СО РАН  
Новосибирск  
yadrenkin@itam.nsc.ru

**ЯКОВЛЕВ Вадим Анатольевич**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
yakovlev@catalysis.ru

**ЯКУБОВ Махмут Ренатович**

Институт органической и физической химии  
им. А.Е. Арбузова - ОСП ФИЦ КазНЦ РАН  
Казань  
yakubovmr@mail.ru

**КУЗЬМИН Андрей Олегович**

Институт катализа СО РАН  
Новосибирск  
kuzmin@catalysis.ru

**МАСЛИКОВА Софья Владимировна**

Московский государственный технический  
университет им. Н.Э. Баумана  
Москва  
maslikova15@gmail.com

## Содержание

<b>Секция 1: Водородная заправка</b> .....	5
<b>УД-1.1</b> <u>Исмагилов Э.Р., Матус Е.В., Исмагилов И.З., Тайлаков О.В., Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Белокуров Г.М., Крафт Я.В., Федорова Н.И., Вотолин К.С.</u> <b>Водородный потенциал Кузбасса. Технологии из угля и шахтного метана</b> .....	7
<b>УД-1.2</b> <u>Кашин А.М., Голодницкий А.Э.</u> <b>Энергетические установки с водород-воздушными топливными элементами для электротранспорта и перспективной энергетики</b> .....	9
<b>УД-1.3</b> <u>Потемкин Д.И., Шилов В.А., Горлова А.М., Рубан Н.В., Зажигалов С.В., Загоруйко А.Н., Рогожников В.Н., Печенкин А.А., Собянин В.А., Снытников П.В.</u> <b>Композитные катализаторы окислительной конверсии природного газа</b> .....	11
<b>УД-1.4</b> <u>Сидорук К.Н., Седов И.В.</u> <b>Перспективы использования низкотемпературных катализаторов в процессе паровой конверсии монооксида углерода с использованием мембранного реактора</b> .....	13
<b>УД-1.5</b> <u>Борисов И.Л., Бахтин Д.С., Баженов С.Д., Волков В.В., Волков А.В.</u> <b>Полициклогексенкарбонат – новый материал для создания водород-селективных газоразделительных мембран</b> .....	15
<b>УД-1.6</b> <u>Тропин Е.С., Шубникова Е.В., Лапушкина Е.Ю., Герасимов К.Б., Немудрый А.П.</u> <b>Исследование водородной проницаемости мембран с селективным слоем металлического никеля</b> .....	17
<b>УД-1.7</b> <u>Кудинов И.В., Крюков Ю.А., Долгих В.Д., Попов М.В., Амиров Т.Ф., Пименов А.А.</u> <b>Математическая модель пиролитического процесса генерации водорода из природного газа</b> .....	19
<b>УД-1.8</b> <u>Пушкарев А.И., Полисадов С.С.</u> <b>Плазмохимический пиролиз метана в барботажном реакторе</b> .....	21
<b>УД-1.9</b> <u>Хабушев Э.М., Красников Д.В., Шестакова В.С., Новиков И.В., Рагинов Н.И., Яковлев В.Я., Гольдт А.Е., Насибулин А.Г.</u> <b>Особенности каталитического пиролиза углеводородов в водород и углеродные наноматериалы с добавленной стоимостью</b> .....	23
<b>УД-1.10</b> <u>Потылицына А.Р., Бауман Ю.И., Шелепова Е.В., Веселов Г.Б., Ильина Е.В. Пустовалов А.В., Первиков А.В., Мишаков И.В.</u> <b>Разработка методологии исследования процесса каталитического пиролиза углеводородов с получением ВСГ и УНМ</b> .....	24

<b>УД-1.11</b>	
<u>Афонникова С.Д.</u> , Бауман Ю.И., Мишаков И.В., Максимова Т.А., Шелепова Е.В., Шивцов Д.М., Руденко П.В., Ведягин А.А.	
<b>Исследование микродисперсных сплавов в процессе каталитического пиролиза углеводов с целью получения УНВ и водородсодержащего газа</b> .....	26
<b>УД-1.12</b>	
Арапова М.В., Беспалко Ю.Н., Смаль Е.А., Федорова В.Е., Валеев К.Р., <u>Симонов М.Н.</u>	
<b>Катализаторы на основе модифицированного оксида церия-циркония для процесса углекислотной конверсии метана</b> .....	28
<b>УД-1.13</b>	
<u>Беспалко Ю.Н.</u> , Арапова М.В., Смаль Е.А., Федорова В.Е., Валеев К.Р., Симонов М.Н.	
<b>Ni – содержащие биметаллические катализаторы углекислотной конверсии метана и этанола</b> .....	29
<b>УД-1.14</b>	
<u>Урлуков А.С.</u> , Усков С.И., Потемкин Д.И., Снытников П.В.	
<b>Низкотемпературная паровая конверсия C<sub>2+</sub>-алканов на Rh содержащих катализаторах</b> .....	30
<b>УД-1.15</b>	
<u>Никулина И.Е.</u> , Потемкин Д.И., Деревщиков В.С.	
<b>Исследование методов модификации свойств MgO для эффективного процесса очистки водорода</b> .....	32
<b>УД-1.16</b>	
<u>Горлова А.М.</u> , Пахарукова В.П., Снытников П.В., Потемкин Д.И.	
<b>Паровая конверсия CO для получения водорода высокой чистоты из синтез-газа: катализаторы и условия.</b> .....	34
<b>УД-1.17</b>	
Абуткина Е.Н.	
<b>Оборудование Altamira Instruments и RuboLab для исследования процессов получения водорода и материалов для его хранения</b> .....	36
<b>УД-1.18</b>	
<u>Кузнецов А.Н.</u> , Потанина Ю.Ю., Ощепков А.Г., Козлов Д.В.	
<b>Электрохимические методы исследования катализаторов окисления водорода при их разработке для топливных элементов с протон-проводящей мембраной.</b> .....	38
<b>Секция 2: Биоводород для генерации электроэнергии</b> .....	40
<b>УД-2.1</b>	
Смирнова Н.В.	
<b>Опыт разработок ЮРГПУ(НПИ) в области водородной энергетики</b> .....	40
<b>УД-2.2</b>	
<u>Чистяков А.В.</u> , Константинов Г.И., Цодиков М.В.	
<b>Конверсия лигнина в водородсодержащий газ в присутствии углеродных поглотителей микроволнового излучения.</b> .....	42

### УД-2.3

Осипов А.К., Крысанова К.О., Дедов А.Г.

**Получение водорода паровой конверсией биоспиртов на никель-кобальтовых катализаторах, диспергированных в углеродной матрице** ..... 44

### УД-2.4

Кузнецова А.Д., Бадмаев С.Д., Снытников П.В., Собянин В.А.

**Паровая конверсия метанола в водородсодержащий газ** ..... 46

### УД-2.5

Нецкина О.В., Булаков В.Э., Комова О.В., Тайбан Е.С., Просвирин И.П., Ищенко А.В., Булавченко О.А., Рогов В.А., Симагина В.И.

**Разработка никельсодержащих катализаторов для твердофазных источников водорода на основе боргидрида натрия** ..... 47

### УД-2.6

Озерова А.М., Комова О.В., Симагина В.И., Муха С.А., Нецкина О.В.

**Твердофазные источники водорода на основе боргидрида натрия: синтез магнитоотделяемых Co и Co@Pt катализаторов методом гальванического замещения** ..... 49

### УД-2.7

Бутенко В.Р., Комова О.В., Симагина В.И., Одегова Г.В., Булавченко О.А., Липатникова И.Л., Муха С.А., Нецкина О.В.

**Влияние природы борсодержащего гидрида на низкотемпературную генерацию H<sub>2</sub> в присутствии Cu-Co-O каталитических систем** ..... 51

### УД-2.8

Шилов В.А., Рогожников В.Н., Потемкин Д.И., Снытников П.В.

**Структурированный катализатор конверсии дизельного топлива в синтез-газ** ..... 53

### УД-2.9

Зажигалов С.В., Рогожников В.Н., Шилов В.А., Потемкин Д.И., Загоруйко А.Н., Собянин В.А., Снытников П.В.

**Математическое моделирование автотермического риформинга и паровой конверсии дизельного топлива на структурированном Rh/Ce<sub>0.75</sub>Zr<sub>0.25</sub>O<sub>2-δ</sub>-η-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeCrAl катализаторе с последующей оптимизацией геометрии блока** ..... 55

### УД-2.10

Кузьмин А.В., Саетова Н.С., Елькин О.В., Козулин Д.А.

**Разработка материалов для герметизации и токовой коммутации твердооксидных топливных элементов в батареях** ..... 57

### УД-2.11

Багишев А.С., Мальбахова И.А., Воробьев А.М., Борисенко Т.А., Титков А.И., Немудрый А.П.

**Изготовление анода для ТОТЭ на основе NiO/SDC методом прямой печати с лазерной постобработкой и исследование его микроструктуры** ..... 58

<b>Секция 3: Водород для E-химии и E-топлива</b> .....	60
<b>УД-3.1</b>	
<u>Васильченко Д.Б., Журенко А.В., Козлова Е.А.</u>	
<b>Синтез материалов на основе g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> для эффективного получения водорода под действием видимого света</b> .....	60
<b>УД-3.2</b>	
<u>Сипатов И.С., Сушникова А.А., Ремпель А.А.</u>	
<b>Разработка методики синтеза нанопористого диоксида титана</b> .....	62
<b>УД-3.3</b>	
<u>Федоров Ф.С., Хабушев Э.М., Новиков И.В., Илатовский Д.А., Гольдт А.Е., Красников Д.В., Каллио Т., Насибулин А.Г.</u>	
<b>Однослойные углеродные нанотрубки для реакции выделения водорода</b> .....	63
<b>УД-3.4</b>	
<u>Вутолкина А.В., Байгильдин И.Г.</u>	
<b>Получение <i>in situ</i> водорода по реакции водяного газа для гидропревращения кислородсодержащих соединений бионефти с применением дисперсных катализаторов на основе переходных металлов</b> .....	65
<b>УД-3.5</b>	
<u>Куликова М.В., Дементьева О.С., Грабчак А.А.</u>	
<b>Каталитическое превращение CO<sub>2</sub> в углеводороды</b> .....	67
<b>УД-3.6</b>	
<u>Мазурова К.М., Мияссарова А.Ф., Ставицкая А.В.</u>	
<b>Влияние способов получения моно- и биметаллических наночастиц на их каталитические свойства в процессе Фишера-Тропша</b> .....	69
<b>УД-3.7</b>	
<u>Куликова М.В., Максимов А.Л.</u>	
<b>Процессы получения CO<sub>2</sub>-нейтральных E-топлив, основанные на переработке биомассы</b> .....	71
<b>УД-3.8</b>	
<u>Грабчак А.А., Иванцов М.И., Свицерский С.А., Куликова М.В.</u>	
<b>Влияние изменения давления проведения процесса на селективность и состав продуктов синтеза Кёльбеля-Энгельгардта</b> .....	72
<b>УД-3.9</b>	
<u>Низовский А.И., Шмаков А.Н., Куликов А.В., Супрун Е.А., Бухтияров В.И.</u>	
<b>Получение водорода из воды с использованием вторичного алюминия, активированного Ga-In эвтектикой</b> .....	74
<b>УД-3.10</b>	
<u>Адуев Б.П., Нурмухаметов Д.Р., Белокуров Г.М., Крафт Я.В., Исмагилов З.Р.</u>	
<b>Получение водорода при окислении наночастиц алюминия в воде под действием лазерных импульсов</b> .....	76
<b>УД-3.11</b>	
<u>Решетина М.В., Смирнова Е.М., Мельников Д.П., Глотов А.П., Винокуров В.А.</u>	
<b>Наноструктурированные катализаторы для окислительного дегидрирования пропана в присутствии CO<sub>2</sub></b> .....	78



### УД-3.12

Ролдугина Е.А., Максимов А.Л., Караханов Э.А.

**Гидрирование продуктов переработки лигноцеллюлозной биомассы на катализаторах, содержащих мезопористые носители . . . . . 80**

### УД-3.13

Кожевников И.В., Чибиряев А.М., Мартыанов О.Н.

**Оценка эффективности поглощения CO<sub>2</sub> восстановительной гетерофазной системой NaBH<sub>4</sub>(тв.)–Вu<sub>4</sub>NBr(тв.) при атмосферных условиях . . . . . 82**

### УД-3.14

Рубцова М.И., Засыпалов Г.О., Вутолкина А.В., Пимерзин А.А., Глотов А.П.

**Катализаторы на основе природных и синтетических алюмосиликатов для гидропроцессов . . . . . 84**

**Секция 4: Крупнотоннажный водород для низкоуглеродной экономики . . . . . 86**

### УД-4.1

Яковлев В.А., Кузьмин А.О., Исупова Л.А.

**Крупнотоннажный водород для низкоуглеродной экономики: некоторые направления в рамках проекта НТИ. . . . . 86**

### УД-4.2

Солнцева Е.С., Боргулев М.В., Константинов В.Л., Данилов Е.А., Ананьев М.В.

**Компетенции научного блока Госкорпорации «Росатом» в области топливных элементов . . . . . 87**

### УД-4.3

Федотов А.С., Цодиков М.В.

**Получение водорода требуемой степени чистоты в мембранных реакторах на основе пористых керамических каталитических конвертеров . . . . . 89**

### УД-4.4

Кротов А.С., Крикунова М.П., Самохвалов Я.В., Масликова С.В.

**Анализ технологических решений по предварительному охлаждению сжижаемого водорода с использованием замкнутых циклов на многокомпонентных смесевых хладагентах . . . . . 92**

### УД-4.5

Гимон Т.А., Лукашевич С.В., Морозов С.О., Ядренкин М.А.

**Разработка методов измерения характеристик летательных аппаратов при сверхзвуковых скоростях при использовании водорода в качестве энергоносителя. . . . . 94**

### УД-4.6

Степаненко С.А., Коскин А.П., Алексеева М.В., Каичев В.В., Яковлев В.А.

**Высокоселективные каталитические системы на основе никеля для процесса дегидрирования жидких органических носителей водорода . . . . . 96**

#### УД-4.7

Дмитрук К.А., Нецкина О.В., Муха С.А., Булавченко О.А., Ищенко А.В., Комова О.В.

**Разработка безрастворного метода синтеза никелевых катализаторов для метанирования CO<sub>2</sub>** .....98

#### УД-4.8

Гуськова И.А., Хаярова Д.Р.

**Исследования коллоидной стабильности нефти для разработки технологий закачки CO<sub>2</sub> в пласт при реализации водородных технологий** ..... 100

#### УД-4.9

Якубов М.Р., Косачев И.П., Якубова С.Г., Тазеева Э.Г., Ахметова Г.Р., Тазеев Д.И., Милордов Д.В., Борисов Д.Н.

**Разработка ингибитора осаждения асфальтенов для процессов закачки CO<sub>2</sub> в пласты для повышения нефтеотдачи**..... 102

#### УД-4.10

Шешковас А.Ж., Веселовская Ж.В., Козлов Д.В.

**Композитные материалы на основе ионных жидкостей для улавливания углекислого газа** ..... 104

#### УД-4.11

Дубинин Ю.В., Языков Н.А., Елецкий П.М., Табакаев Р.Б., Беляновская А.И., Яковлев В.А.

**Совместное сжигание угля и биомассы как способ снижения выбросов CO<sub>2</sub>**. ..... 106

#### УД-4.12

Загоруйко А.Н., Микенин П.Е.

**Хемосорбционно-каталитический процесс получения водорода из сероводорода** ..... 107

**Круглый стол «Научная инфраструктура и образование»**..... 109

#### КС-1

Агарков Д.А., Бурмистров И.Н., Матвеев Д.В., Патракеев М.В., Самойлов А.В., Федотов Ю.С., Хартон В.В., Ципис Е.В., Бредихин С.И.

**Исследовательские, лабораторно-производственные и испытательные возможности ИФТТ РАН в области электрохимической водородной энергетики: твердооксидных топливных и электролизных элементов**..... 111

#### КС-2

Созинов С.А., Исмагилов.З.Р.

**Возможности «Научно-аналитического центра исследования структуры и состава углеродистых веществ» (КемЦКП)**..... 113

#### КС-3

Бухтияров А.В., Сараев А.А., Зубавичус Я.В.

**ЦКП "СКИФ": проектируемые станции и будущие возможности** ..... 114

#### КС-4

Каичев В.В.

**Возможности ЦКП «Национальный центр исследования катализаторов»** ..... 116

## КС-5

Герасимов Е.Ю.

**Исследование катализаторов и функциональных материалов методами  
электронной микроскопии ..... 117**

## КС-6

Цыбуля С.В., Булавченко О.А., Винокуров З.С., Гольденберг Б.Г.,  
Мищенко Д.Д., Селютин А.Г., Шефер К.И., Зубавичус Я.В.

**Концепция образовательных программ НГУ-СКИФ ..... 118**

Список участников ..... 119

Содержание ..... 124

Научное издание  
«Водород как основа низкоуглеродной экономики»  
конференция Центра компетенций НТИ  
27 ноября - 2 декабря 2022 года, Шерегеш, Кемеровская обл., Россия  
Сборник тезисов

Под общей редакцией: академика РАН В.И. Бухтиярова,  
д.х.н. О.Н. Мартыанова, д.х.н. П.В. Снытникова

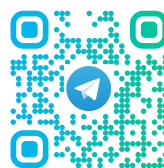
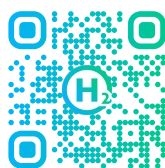
Составители: М.С. Суворова, С.С. Логунова  
Компьютерная обработка: Ю.В. Климова, Т.О. Барсуков  
Обложка: А.М. Ершова

Издатель:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Федеральный исследовательский центр «Институт катализа  
им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук»  
630090, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 5,  
ИК СО РАН <http://catalysis.ru>  
E-mail: [bic@catalysis.ru](mailto:bic@catalysis.ru) Тел.: +7 383 330 67 71  
Электронная версия:  
Издательский отдел Института катализа СО РАН  
E-mail: [pub@catalysis.ru](mailto:pub@catalysis.ru) Тел.: +7 383 326 97 15  
Объём: 8,5 МБ. Подписано к размещению: 21.11.2022  
Адрес размещения: <http://conf.nsc.ru/h2nti/ru>  
Системные требования: i486; Adobe® Reader® (чтение формата PDF)  
ISBN 978-5-906376-46-6



**Центр компетенций НТИ  
«Водород как основа низкоуглеродной экономики»**



**Веб-сайт конференции**

