

Куренкова Анна Юрьевна

Фотокаталитическое получение водорода из водных растворов
неорганических соединений и органических субстратов
растительного происхождения под действием видимого света

1.4.14 «Кинетика и катализ»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата химических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Федеральный исследовательский центр «Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук»

Научный руководитель: доктор химических наук
Козлова Екатерина Александровна

Официальные оппоненты: **Глебов Евгений Михайлович**
доктор физико-математических наук
ФГБУН Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник

Харламова Тамара Сергеевна
кандидат химических наук
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», доцент кафедры физической и коллоидной химии, старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», обособленное подразделение Институт химии и химической технологии Сибирского отделения Российской академии наук (ИХХТ СО РАН)

Защита состоится 22 декабря 2021 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.222.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Федеральный исследовательский центр «Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук» по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук», адрес сайта: <https://catalysis.ru/>.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
д.х.н., доцент

Алексей Анатольевич Ведягин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время особое внимание уделяется разработке альтернативных источников энергии, способных полностью или частично заменить традиционное ископаемое топливо – нефть, газ, уголь. Одним из наиболее перспективных энергетических носителей будущего считается водород. Это объясняется тем, что продуктом сгорания водорода является вода, и, по сравнению с традиционными видами топлива, он обладает более высокой плотностью энергии. Таким образом, использование водородной энергетики поможет снизить выбросы парниковых газов в атмосферу.

Водород является одним из самых распространенных элементов на Земле. Однако, в подавляющем большинстве случаев, водород находится в соединениях с другими элементами – вода, природный газ, биомасса и др. Существует множество способов получения водорода, большинство из которых приводят к получению оксидов углерода в качестве побочных продуктов. Наиболее распространённым способом получения водорода является паровой риформинг природного газа (около 50% мирового производства водорода), за ним следует риформинг тяжелых нефтяных фракций (30%) и газификация угля (18%). Таким образом, в настоящее время основным источником промышленного получения водорода является ископаемое топливо. Кроме образования нежелательных продуктов, традиционные процессы получения водорода протекают при высоких температурах, что требует дополнительных затрат.

Разложение воды считается одним из наиболее перспективных способов получения водорода при условии, что требуемая энергия получена из возобновляемых источников. Источником энергии может служить солнечное излучение, тогда данный процесс называется фотокаталитическим разложением воды. Важным преимуществом фотокатализа является то, что реакция протекает при комнатной температуре и атмосферном давлении.

Таким образом, преимуществами фотокаталитического получения водорода являются:

- получение чистого водорода;
- возможность использования доступного сырья – биомассы – для получения водорода;
- протекание реакции при комнатной температуре и атмосферном давлении.

Цель и задачи. Исходя из вышеизложенного, целью работы является создание высокоэффективных систем на основе твердого раствора $Cd_{1-x}Zn_xS$ для фотокаталитического выделения водорода из водных растворов неорганических соединений и органических субстратов растительного происхождения под действием видимого света.

Для решения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. синтез фотокатализаторов на основе $Cd_{1-x}Zn_xS$ с использованием различных методов; исследование фотокатализаторов комплексом физико-химических методов;

2. изучение влияния основных физико-химических характеристик фотокатализаторов на активность в реакции выделения водорода из растворов неорганических соединений под действием видимого излучения; исследование стабильности фотокатализаторов путём проведения циклических экспериментов; выбор наиболее эффективных синтетических подходов;

3. изучение активности приготовленных фотокатализаторов в реакции фотокаталитического получения водорода под действием видимого света из водных растворов глюкозы, ксилозы, водной суспензий целлюлозы и водного коллоида крахмала; варьирование параметров проведения процесса (концентрации субстрата, pH, концентрации катализатора); подбор оптимальных условий проведения реакции для достижения высокой эффективности выделения водорода;

4. исследование стабильности фотокатализаторов в оптимальных условиях проведения фотокаталитической реакции путём проведения циклических экспериментов; нахождение кинетических моделей, описывающих процесс фотокаталитического получения водорода; исследование продуктов гидролиза и фотокаталитического риформинга биомассы в зависимости от условий проведения реакции.

Научная новизна. Впервые было проведено систематическое исследование активности фотокатализатора с использованием доноров электронов, существенно различающихся по своей природе – неорганических соединений и органических субстратов растительного происхождения. Совершен переход от растворимых (сахара) к малорастворимым (целлюлоза, крахмал) компонентам биомассы. Исследованы продукты фотокаталитического гидролиза биомассы. Показано влияние условий проведения процесса на скорость выделения водорода и состав продуктов окисления органического субстрата. Впервые предложена математическая модель для описания зависимости скорости реакции от начальной концентрации сахара (глюкозы, ксилозы) и гидроксида натрия, рассчитаны параметры аппроксимации.

Теоретическая и практическая значимость работы. В результате выполненной работы разработаны подходы для создания высокоэффективной автономной системы на основе сульфидных фотокатализаторов для получения водорода под действием видимого излучения из различных доноров электронов. Особый интерес представляет использование первичных продуктов переработки биомассы – крахмала, целлюлозы, что позволит снизить затраты на процесс переработки биомассы в растворимые соединения, что благоприятно скажется на стоимости получаемого водорода и, в конечном итоге, позволит предложить простые и малоэнергос затратные методы обработки биомассы растений для увеличения эффективности выделения водорода.

Методология и методы исследования. В ходе работы был выполнен синтез фотокатализаторов методом осаждения и мягкого химического восстановления. Для исследования полученных образцов применяли следующие физико-химические методы: рентгенофазовый анализ, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, спектроскопия диффузного отражения, просвечивающая электронная микроскопия, низкотемпературная адсорбция азота. Количество выделяющегося водорода при проведении каталитических испытаний измеряли методом газовой хроматографии. Определение органических продуктов гидролиза и окисления крахмала проводили методом высокоэффективной жидкостной хроматографии.

Положения, выносимые на защиту:

- сформулированные подходы к синтезу фотокатализаторов $Cd_{1-x}Zn_xS/Cd_{1-y}Zn_yS$, модифицированных благородными металлами (Au, Pt, Pd) и диоксидом титана, для процесса фотокаталитического выделения водорода из водных растворов Na_2S/Na_2SO_3 , глюкозы, ксилозы, а также водной суспензии целлюлозы и водного коллоида крахмала;
- механизмы трансформации данных фотокатализаторов в процессе выделения водорода из водных растворов органических и неорганических доноров электронов;
- кинетические зависимости фотокаталитического выделения водорода в присутствии сульфидных фотокатализаторов от концентрации реагентов и кислотности среды в водных растворах сахаров;
- механизм фотокаталитического образования водорода из водных суспензий малорастворимых компонентов биомассы.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность полученных результатов обеспечивается применением современного оборудования, имеющего высокий уровень точности измеряемых параметров,

воспроизводимостью и согласованностью данных, полученных различными методами исследования. Результаты работы проходили экспертизу в рецензируемых научных журналах и неоднократно обсуждались на всероссийских и международных научных конференциях. Основные результаты были представлены в качестве устных докладов на следующих конференциях: 6th International School-Conference on Catalysis for Young Scientists «Catalyst Design: From Molecular to Industrial Level» (Новосибирск, 2021); VI International School-Conference for Young Scientists "Catalysis: From Science to Industry" (Томск, 2020); VI Всероссийская научно молодежная школа-конференция "Химия под знаком СИГМА: исследования, инновации, технологии" (Омск, 2020); VII Международная молодежная научная конференция "Физика. Технологии. Инновации" (Екатеринбург, 2020); XI International Conference Mechanisms of Catalytic Reactions (Сочи, 2019); 5th International School-Conference on Catalysis for Young Scientists «Catalyst Design: From Molecular to Industrial Level» (Москва, 2018); Студент и научно-технический прогресс: 55-я Международная научная студенческая конференция (Новосибирск, 2017); Российско-Японская международная конференция «Передовые материалы – 2016: синтез, обработка и свойства наноструктур» (Новосибирск, 2016); Студент и научно-технический прогресс: 54-я Международная научная студенческая конференция (Новосибирск, 2016).

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 17 печатных изданиях, включая 8 статей, изданных в журналах, индексируемых в базе данных Web of Science или Scopus, и 9 тезисов докладов на конференциях.

Личный вклад соискателя. Автором синтезированы фотокатализаторы, проведены эксперименты по исследованию кинетики выделения водорода в различных условиях, рассчитаны квантовые выходы, представлены результаты работы на конференциях. Постановка задач, обсуждение результатов кинетических экспериментов, интерпретация данных

физикохимических методов исследования образцов, подготовка публикаций проводились при непосредственном участии автора работы.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, обзора литературы (гл. 1), экспериментальной части (гл. 2), изложения результатов исследования и их обсуждения (гл. 3,4), заключения, выводов и списка цитируемой литературы (186 наименований). Работа изложена на 124 страницах, содержит 57 рисунков, 99 формул и уравнений и 21 таблицу.

Работа проводилась в рамках государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук» (г. Новосибирск), в рамках проектов РФФИ (19-43-543009, 19-33-90110), Гранта Президента РФ (МД-79.2020.3), а также в рамках реализации постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 220 и исполнения Соглашения о предоставлении из федерального бюджета грантов в форме субсидий в соответствии с пунктом 4 статьи 78.1 Бюджетного кодекса Российской Федерации от 03.12.2019 № 075-15-2019-1876.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность и практическая значимость диссертационной работы, сформулирована цель и поставлены задачи, изложены степень разработанности темы, научная новизна, методология и методы исследования, применявшиеся в данной работе, положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, апробация работы и дано описание структуры диссертации.

Глава **Обзор литературы** посвящена краткому описанию исследований фотокаталитического получения водорода из водных растворов. Рассмотрен механизм действия полупроводниковых фотокатализаторов. Описаны преимущества и недостатки использования фотокатализаторов на основе CdS. Рассмотрены методы приготовления сульфидных фотокатализаторов,

механизм выделения водорода из неорганических и органических доноров электронов. Отдельное внимание уделено обзору исследований, посвященных фотокаталитическому выделению водорода из субстратов биомассы.

В главе **Экспериментальная часть** приводятся описания методики синтеза фотокатализаторов, измерения их активности, методы характеристики полученных образцов и исследования водной фазы реакционной суспензии.

В третьей главе **Выделение водорода из неорганических доноров электронов** проведено сравнение влияния различных методов модификации твердых растворов сульфидов кадмия и цинка $Cd_{1-x}Zn_xS$ на активность полученных фотокатализаторов в реакции выделения водорода под действием видимого света из водных растворов сульфида и сульфита натрия.

Показано, что нанесение твёрдого раствора на образец диоксида титана с регулярной мезо-макропористой структурой, синтезированного темплатным методом, позволяет улучшить активность катализатора в 2,5 раза до значения $1,8 \text{ ммоль } (H_2) \text{ г}^{-1} \text{ ч}^{-1}$ для фотокатализатора 40% $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S/TiO_2$. Повышение активности нанесенного фотокатализатора $Cd_{0.4}Zn_{0.6}S/TiO_2$ можно связать с регулярной пористой структурой носителя и возникновением гетеропереходов между наночастицами твердого раствора сульфидов кадмия и цинка и диоксида титана. При этом было обнаружено, что гидротермальная обработка (ГТ) предварительно синтезированного твердого раствора $Cd_{0.3}Zn_{0.7}S$ приводит к увеличению активности в 8-9 раз и не требует синтеза сложных носителей, обладающих иерархической структурой (рис. 1). Наибольшую активность в фотокаталитическом выделении H_2 среди катализаторов, прошедших гидротермальную обработку, показал образец, выдержанный при $120 \text{ }^\circ\text{C}$. Скорость выделения водорода с использованием данного фотокатализатора составила $6,9 \text{ ммоль } \text{ г}^{-1} \text{ ч}^{-1}$ (кажущаяся квантовая эффективность $\Phi = 17,1 \%$). Показано, что гидротермальная обработка приводит к формированию из однофазного твердого раствора $Cd_{0.3}Zn_{0.7}S$ двухфазного фотокатализатора $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S/ZnS$. В связи с этим, увеличение скорости выделения водорода может достигаться за счет возникновения

межфазных гетеропереходов и повышения эффективности разделения зарядов.

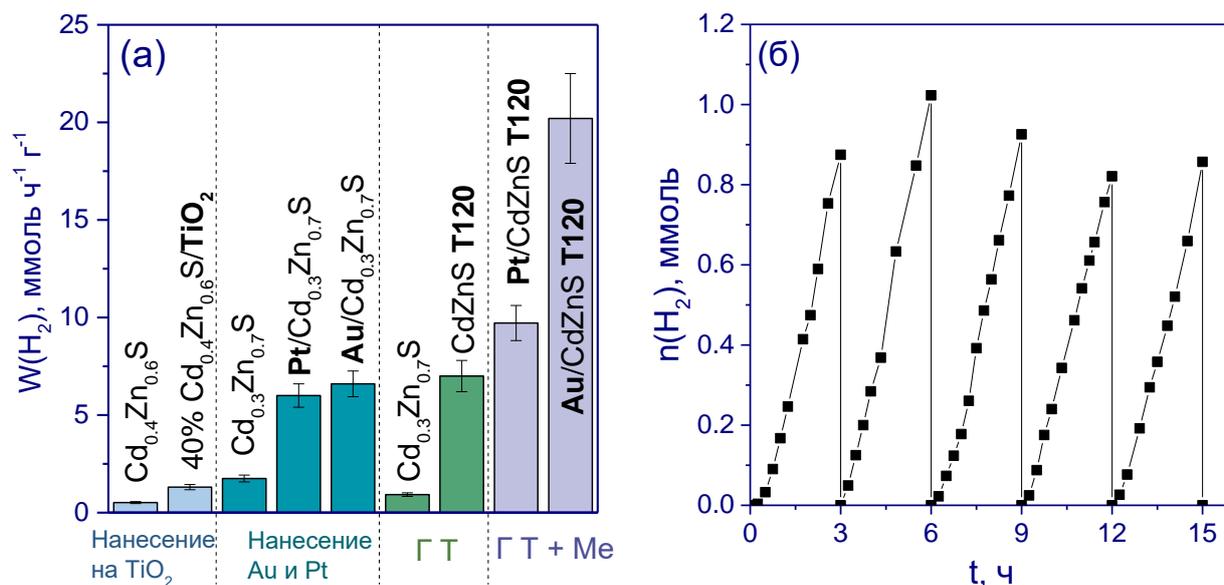


Рис. 1. а) Скорость выделения водорода из водного раствора $\text{Na}_2\text{S}/\text{Na}_2\text{SO}_3$ на различных фотокатализаторах на основе $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ($x = 0,6; 0,7$); б) стабильность образца $1\% \text{ Au}/\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}/\text{ZnS T120}$. Условия: $C_0(\text{Na}_2\text{S}/\text{Na}_2\text{SO}_3) = 0,1/0,1 \text{ M}$, $C(\text{кат.}) = 2,5 \text{ г/л}$, $V = 100 \text{ мл}$, $\lambda = 450 \text{ нм}$.

Кроме того, исследована модификация поверхности сульфидных фотокатализаторов благородными металлами. Были синтезированы фотокатализаторы состава $1\% \text{ Me}/\text{Cd}_{0.3}\text{Zn}_{0.7}\text{S}$ ($\text{Me} = \text{Au}, \text{Pd}, \text{Pt}$). Показано, что изначально наибольшее увеличение скорости достигается за счет нанесения палладия, но в долговременных экспериментах наибольшее повышение активности наблюдается при использовании золота и платины, которые и были выбраны для нанесения на поверхность двухфазного фотокатализатора $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}/\text{ZnS}$ (температура гидротермальной обработки $120 \text{ }^\circ\text{C}$). Нанесение частиц золота на поверхность $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}/\text{ZnS T120}$ позволило повысить скорость выделения водорода до $17,4 \text{ ммоль г}^{-1} \text{ ч}^{-1}$ ($\Phi = 42,6\%$), что является одним из самых высоких зафиксированных значений скорости для подобных систем. Увеличение скорости выделения водорода связано с образованием гетеропереходов и повышением эффективности разделения зарядов.

Таким образом, наиболее эффективным методом увеличения активности фотокатализаторов в реакции выделения водорода является сочетание

гидротермальной обработки твёрдого раствора сульфидов кадмия и цинка с нанесением металлов на поверхность образца.

В четвёртой главе **Выделение водорода из органических доноров электронов** была исследована активность сульфидных фотокатализаторов 0,5-1,5% Pt/Cd_{1-x}Zn_xS в реакции фотокаталитического выделения водорода под действием видимого излучения (450 нм) из водных растворов, суспензий и коллоидов компонентов биомассы (глюкозы, ксилозы, целлюлозы и крахмала). Было показано, что сильнощелочная среда приводит к наиболее высокой скорости выделения водорода для всех исследованных субстратов.

Наиболее высокая скорость выделения водорода из растворов глюкозы достигалась в присутствии фотокатализатора 1% Pt/Cd_{0.6}Zn_{0.4}S/Cd_{0.1}Zn_{0.9}S и составляла 3,4 ммоль·ч⁻¹·г⁻¹ (Φ = 8,4%). Была предложена математическая модель (уравнение 1), описывающая зависимость скорости выделения водорода от начальных концентраций сахара и щелочи, учитывающая мономолекулярные реакции на поверхности фотокатализатора с участием адсорбированных сахаров, линейную зависимость скорости реакции от содержания NaOH и более высокую реакционную способность анионов сахаров по сравнению с их молекулярной формой (рис. 2).

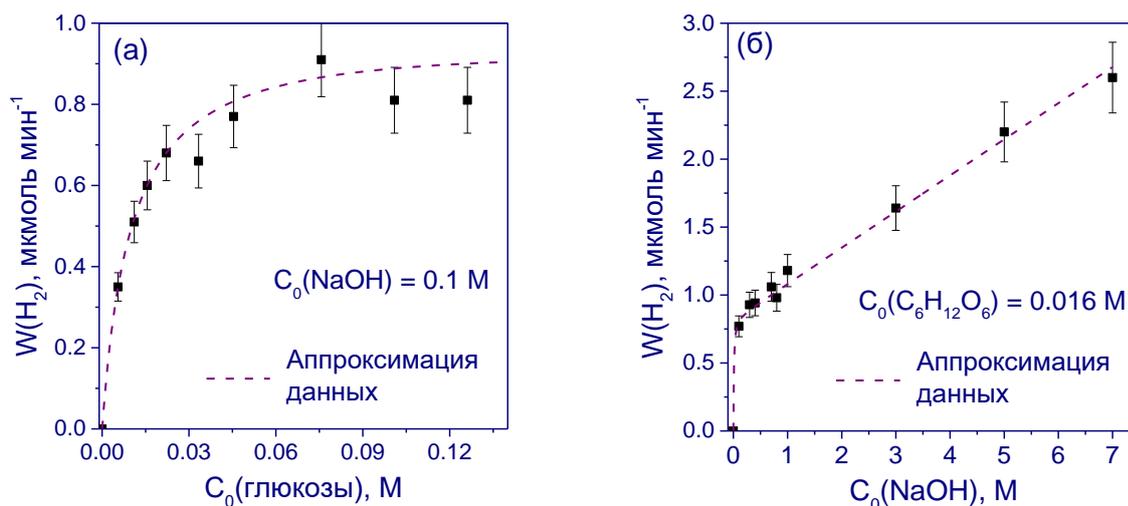


Рис. 2. Скорость выделения H₂ в зависимости от начальных концентраций глюкозы (а) и щелочи (б).

$$W = \frac{A \times C(\text{суб-}) + B \times C(\text{суб-}) \times C(\text{NaOH})}{1 + D \times C(\text{суб-})} \quad (1)$$

Исследованы особенности процесса выделения водорода из малорастворимых компонентов биомассы, таких как целлюлоза и кукурузный крахмал. Наиболее высокую активность в данной серии экспериментов проявил фотокатализатор 0,5% Pt/Cd_{0,7}Zn_{0,3}S/ZnS. Максимальное значение скорости выделения водорода из суспензии целлюлозы составило 0,8 ммоль·ч⁻¹·г⁻¹, Φ = 1,1%. Оказалось, что для получения водорода из водных суспензий крахмала принципиальное значение имеет предобработка субстрата. Щелочной гидролиз крахмала при 70 °С приводит к частичной деполимеризации и образованию глюкозы в качестве основного продукта гидролиза (рис. 3). Глюкоза является донором электронов и способствует эффективному фотокаталитическому выделению водорода.

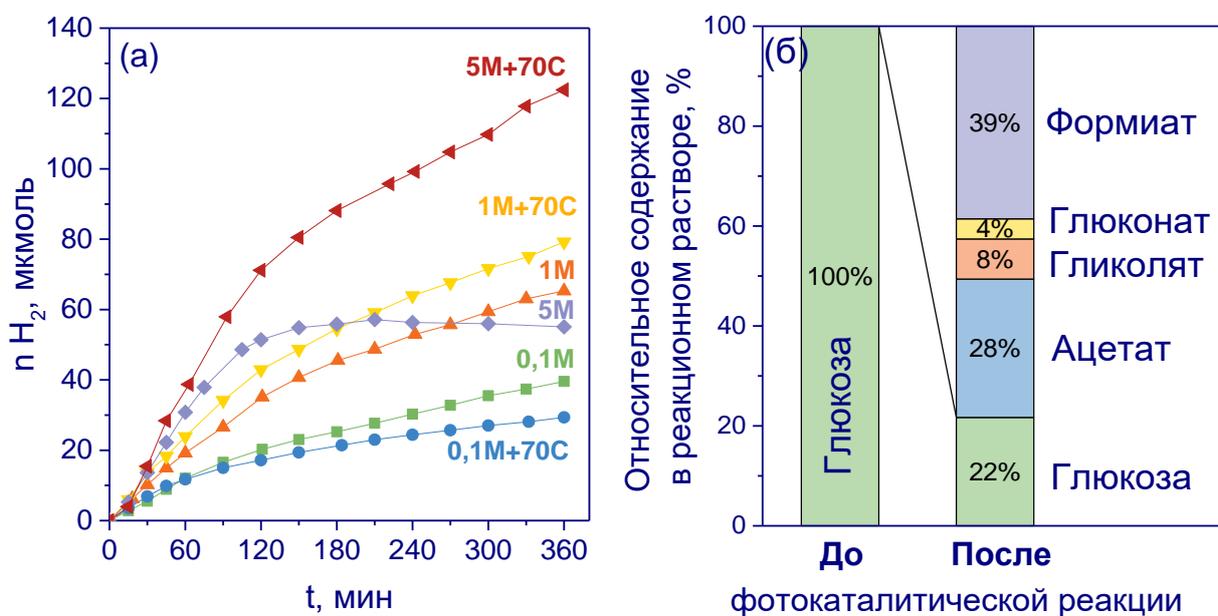


Рис. 3. а) Кинетические кривые выделения H₂ из водных коллоидов крахмала в зависимости от концентрации NaOH и температуры гидролиза. Условия: C₀(крахмала) = 5 г/л, C(кат.) = 2,5 г/л, V = 20 мл, λ = 450 нм, T(реакции) = 20 °С; T(предв. обработки) = 20 °С (не отмечено) или 70 °С (обозначено как “70С”); б) распределение органических соединений в фильтрате до и после фотокаталитической реакции (T(предв. обработки) = 70°С).

С увеличением температуры гидролиза крахмала до 105-140 °С увеличивается концентрация простых органических соединений и уменьшается концентрация глюкозы, что негативно сказывается на процессе фотокатализа. Максимальное значение скорости выделения водорода из водного коллоида крахмала составило 0,7 ммоль·ч⁻¹·г⁻¹, Φ = 0,9 %.

Исследованы продукты гидролиза крахмала и окисления органических веществ. Показано, что фотокаталитическое выделение H_2 из крахмала сопровождается образованием ценных карбоновых кислот: муравьиной, уксусной, молочной и других. Кроме того, происходит прямой гидролиз крахмала до глюкозы в условиях протекания фотокаталитической реакции (рис. 4).

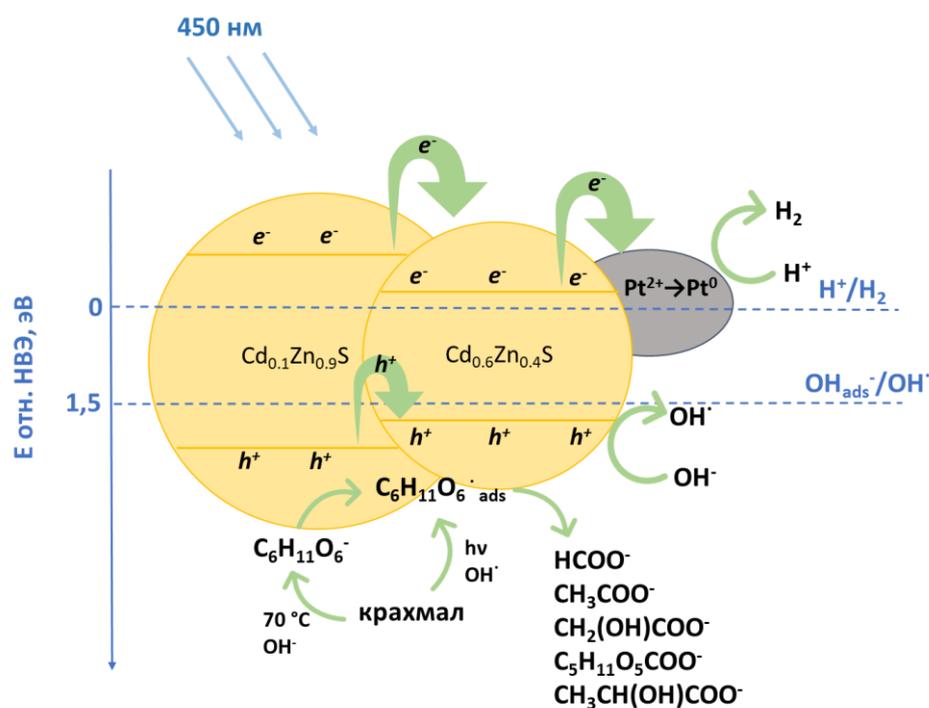


Рис. 4. Схема механизма фотокаталитического риформинга крахмала и выделения водорода.

Данный процесс требует проведения меньшего числа стадий и при меньших температурах, чем традиционные способы обработки, что делает его привлекательным с практической точки зрения. Поэтому фотокаталитический риформинг компонентов растительной биомассы, сопровождающийся выделением водорода, является перспективным направлением для дальнейших исследований.

ВЫВОДЫ

1. Предложен фотокатализатор на основе твёрдого раствора сульфидов $Cd_{1-x}Zn_xS$ и благородных металлов, проявляющий высокую активность в реакции фотокаталитического выделения водорода из неорганических и органических доноров электронов под действием видимого излучения.

Показано, что нанесение металлов (Au, Pt) и гидротермальная обработка $Cd_{1-x}Zn_xS$ приводит к большему увеличению активности, чем нанесение $Cd_{1-x}Zn_xS$ на структурированный TiO_2 . Наибольшая скорость выделения водорода из раствора Na_2S/Na_2SO_3 была достигнута в присутствии фотокатализатора 1% Au/ $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S/ZnS$, прошедшего предварительную гидротермальную обработку при 120 °C ($17,4 \text{ ммоль г}^{-1} \text{ ч}^{-1}$, $\Phi = 42,6\%$ на длине волны 450 нм).

2. При использовании в качестве доноров электронов растворимых органических компонентов биомассы – сахаров – наиболее высокую активность проявил образец 1% Pt/ $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S/Cd_{0.1}Zn_{0.9}S$, прошедший предварительную гидротермальную обработку при 120 °C. Максимальная скорость выделения водорода из растворов глюкозы составляла $3,4 \text{ ммоль} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}$, $\Phi = 8,5\%$ при облучении светом с длиной волны 450 нм. Предложена математическая модель, позволяющая с высокой точностью аппроксимировать зависимость скорости выделения водорода из водных растворов сахаров от начальной концентрации реагентов. Продемонстрирована высокая стабильность предложенного фотокатализатора в реакции выделения H_2 из растворов глюкозы в сильнощелочной среде.
3. В реакции выделения H_2 из малорастворимых компонентов биомассы – целлюлозы и крахмала – наиболее высокие значения скоростей реакции были достигнуты с использованием фотокатализатора 0,5 % Pt/ $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S/Cd_{0.1}Zn_{0.9}S$ и составили 0,8 и 0,7 $\text{ммоль} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}$, соответственно. Было показано, что для эффективного получения водорода из малорастворимых компонентов биомассы принципиальной является предварительная термообработка суспензии.
4. Показано, что, в случае использования крахмала фотокаталитическое выделение водорода сопровождается гидролизом крахмала и образованием ценных органических соединений. Впервые предложен механизм фотокаталитического риформинга крахмала,

сопровождающийся выделением H_2 . Продемонстрирована возможность одностадийного гидролиза крахмала в условиях проведения фотокаталитической реакции при комнатной температуре и атмосферном давлении, что делает данный процесс привлекательным с практической точки зрения.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Kozlova E.A., Kurenkova A.Y., Semeykina V.S., Parkhomchuk E.V., Cherepanova S.V., Gerasimov E.Y., Saraev A.A., Kaichev V.V., Parmon V.N. Effect of Titania Regular Macroporosity on the Photocatalytic Hydrogen Evolution on $Cd_{1-x}Zn_xS/TiO_2$ Catalysts under Visible Light. **ChemCatChem**. 2015. V.7. N24. P.4108-4117.
2. Kurenkova A.Y., Kolinko P.A., Cherepanova S.V., Kozlova E.A. The Effect of Hydrothermal Treatment on Activities of $Cd_{0.3}Zn_{0.7}S$ Photocatalysts under Visible Light. **Materials Today: Proceedings**. 2017. V. 4. N 11. P. 11371-11374.
3. Kozlova E.A., Kurenkova A.Y., Kolinko P.A., Saraev A.A., Gerasimov E.Y., Kozlov D.V. Photocatalytic Hydrogen Production Using $Me/Cd_{0.3}Zn_{0.7}S$ ($Me = Au, Pt, Pd$) Catalysts: Transformation of the Metallic Catalyst under the Action of the Reaction Medium. **Kinetics and Catalysis**. 2017. V.58. N4. P.431-440.
4. Kozlova E.A., Gribov E.N., Kurenkova A.Y., Cherepanova S.V., Gerasimov E.Y., Kozlov D.V. Synthesis of Multiphase $Au/Cd_{0.6}Zn_{0.4}S/ZnS$ Photocatalysts for Improved Photocatalytic Performance. **International Journal of Hydrogen Energy**. 2019. V.44. N42. P.23589-23599.
5. Kurenkova A.Y., Markovskaya D.V., Gerasimov E.Y., Prosvirin I.P., Cherepanova S.V., Kozlova E.A. New Insights into the Mechanism of Photocatalytic Hydrogen Evolution from Aqueous Solutions of Saccharides over CdS -Based Photocatalysts under Visible Light. **International Journal of Hydrogen Energy**. 2020. V.45. N55. P.30165-30177.

6. Kurenkova A.Y., Kozlova E.A. CdS-Based Photocatalyst for Hydrogen Evolution from the Cellulose Aqueous Suspension. **AIP Conference Proceedings**. 2020. V.2313. N1. 060009:1-5.
7. Kurenkova A.Y., Medvedeva T.B., Gromov N.V., Bukhtiyarov A.V., Gerasimov E.Y., Cherepanova S.V., Kozlova E.A. Sustainable Hydrogen Production from Starch Aqueous Suspensions over a Cd_{0.7}Zn_{0.3}S-Based Photocatalyst. **Catalysts**. 2021. V.11. N7. 870:1-15.
8. Kozlova E.A., Kurenkova A.Y., Gerasimov E.Y., Gromov N.V., Medvedeva T.B., Saraev A.A., Kaichev V.V. Comparative Study of Photoreforming of Glycerol on Pt/TiO₂ and CuO_x/TiO₂ Photocatalysts under UV Light. **Materials Letters**. 2021. V.283. 128901:1-13.

КУРЕНКОВА Анна Юрьевна

**ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОЕ ПОЛУЧЕНИЕ ВОДОРОДА ИЗ ВОДНЫХ
РАСТВОРОВ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ И
ОРГАНИЧЕСКИХ СУБСТРАТОВ РАСТИТЕЛЬНОГО
ПРОИСХОЖДЕНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВИДИМОГО СВЕТА.**

Автореф. дисс. на соискание учёной степени кандидата химических наук.

Подписано в печать 18.10.2021. Заказ №28. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1.

Тираж 100 экз.

Отпечатано на полиграфическом участке Института катализа СО РАН

630090, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 5