

ПРОМЫШЛЕННЫЕ КАТАЛИЗАТОРЫ

для производства водорода

Афанасьев Сергей Васильевич

доцент по специальности «Экология»,
академик РАЕН,
руководитель управления по разработке инноваций
и их патентованию,
АО «ТОАЗ»,
к.х.н., д.т.н.

Макрушин Николай Анатольевич

директор научной части,
ООО «НИАП-КАТАЛИЗАТОР»,
доцент, к.х.н.

Садовников Андрей Александрович

генеральный директор,
ООО «НИАП-КАТАЛИЗАТОР»

Кашинская Анна Вячеславовна

заведующий лабораторией
физико-химических исследований научной части,
ООО «НИАП-КАТАЛИЗАТОР»

Трошина Вера Александровна

заведующий технологическим отделом
научной части ООО «НИАП-КАТАЛИЗАТОР»,
к.т.н.

Дульнев Алексей Викторович

технический директор,
ООО «НИАП-КАТАЛИЗАТОР»,
к.т.н.

В СТАТЬЕ ПРЕДСТАВЛЕН ОБЗОР ПО КАТАЛИЗАТОРАМ, ИСПОЛЬЗУЕМЫМ В ПРОЦЕССАХ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА, КОТОРЫЕ ВЫПУСКАЮТСЯ ООО «НИАП-КАТАЛИЗАТОР» В ПРОМЫШЛЕННОМ МАСШТАБЕ. ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЗВОЛЯЕТ ПРОВОДИТЬ ОЧИСТКУ ПРИРОДНОГО ГАЗА ДЛЯ ЕГО ПОСЛЕДУЮЩЕЙ КОНВЕРСИИ С ВОДЯНЫМ ПАРОМ С ЦЕЛЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА И ЕГО ДАЛЬНЕЙШЕЙ ОЧИСТКИ, А ТАКЖЕ ОСУЩЕСТВЛЯТЬ ОЧИСТКУ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ ГАЗОВ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ПРИМЕСЕЙ. МНОГОЛЕТНИЙ ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ МНОГИХ ИЗ ПРИВЕДЕННЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ ПОДТВЕРДИЛ ИХ ВЫСОКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ

THE WORK PROVIDES A REVIEW OF CATALYSTS USED IN HYDROGEN PRODUCTION PROCESSES, WHICH ARE PRODUCED BY NIAP-KATALIZATOR LLC ON AN INDUSTRIAL SCALE. THEIR USE MAKES IT POSSIBLE TO PURIFY NATURAL GAS FOR ITS CONVERSION WITH WATER VAPOR IN ORDER TO OBTAIN HYDROGEN AND ITS FURTHER PURIFICATION, AS WELL AS TO PURIFY HYDROGEN-CONTAINING GASES FROM VARIOUS IMPURITIES. MANY YEARS OF EXPERIENCE IN OPERATING THESE CATALYSTS HAS CONFIRMED THEIR HIGH EFFICIENCY AND RELIABILITY

Ключевые слова: катализаторы, производство водорода, конверсия метана, очистка газов.

События последних лет повысили интерес к производству и использованию водорода, что обусловлено увеличением объемов выпуска химических веществ: аммиака и метанола, полимерных материалов и других продуктов органического синтеза [1]. Вместе с тем большими темпами растет интерес к нему со стороны энергетики, где он рассматривается как перспективный энергоноситель, способный обеспечить получение доступной, стабильной и более экологичной энергии, одновременно выполняя функции как энергоносителя, так и средства накопления избыточной электроэнергии.

Основные усилия исследователей в настоящее время связаны с разработкой и реализацией разнообразных технологий производства водорода. В то же время наиболее затратной считается проблема транспортировки и хранения данного газа по причине его высокой взрывоопасности, летучести и ряда иных свойств.

Как и в других странах, в России принята концепция, определяющая цели, задачи, стратегические инициативы и ключевые меры по развитию водородной энергетики на среднесрочный период до 2024 года, долгосрочный период до 2035 года, а также основные ориентиры на перспективу до 2050 года [2]. В ней водородная энергетика рассматривается как часть энергетической отрасли с высоким экспортным потенциалом. Последнее утверждение весьма актуально, поскольку Российская Федерация обладает уникальным сочетанием факторов, включающих в себя: выгодное географическое положение, огромные запасы природного газа, серьезные научно-технологические разработки в данном направлении.

Известно большое количество методов промышленного производства водорода, среди которых основными являются:

- паровая конверсия природного и других углеводородных газов;
- газификация угля;
- электролиз воды и водяного пара;
- пиролиз углеводородов;
- биотехнологии.

Одной из главных целей внедрения водородной энергетики является снижение выброса парниковых газов. В долгосрочной перспективе,

ФАКТЫ

Концепция

до 1913

года

рассматривает водородную энергетику как часть энергетической отрасли с высоким экспортным потенциалом

для этого требуется переход на возобновляемые источники энергии. Снизить уровень углеродных выбросов можно за счет водорода, полученного с использованием низкоуглеродных технологий с применением способов улавливания и хранения диоксида углерода, а также электролиза воды, проводимого за счет энергии, получаемой с помощью атомной, гидро-, ветряной или солнечной энергетики. Однако себестоимость «чистого» водорода существенно выше, чем получаемого из природного газа по традиционной технологии.

Несмотря на существенные достижения в области производства водорода за счет возобновляемых ресурсов, основным сырьем при его производстве в настоящее время является природный газ. Данный способ является основным в мире и применяется на нефтеперерабатывающих заводах, в производстве аммиака и метанола, а также в металлургии. С его помощью сегодня производится более 75% водорода. Практически вся остальная часть вырабатывается из каменного угля, а на долю электролиза приходится примерно 0,1% от всего выпуска.

Водород считается «чистым» газом, поскольку при его использовании не образуется «углеродный след», однако в процессе его получения выделяется достаточно большое количество оксидов углерода и других газов, ухудшающих экологическую обстановку региона, в котором находится конкретное производство. Для интенсификации основных технологических процессов, а также снижения воздействия неблагоприятных факторов на окружающую среду



наиболее перспективно использовать каталитические процессы, которые позволяют уменьшить концентрации вредных веществ, образующихся при производстве химической продукции.

К основным технологическим процессам получения водорода путем паровой конверсии метана можно отнести:

- очистку природного газа от соединений серы (сероочистка) [1, 3];
- паровую и паровоздушную конверсии углеводородов [4];
- среднетемпературную и низкотемпературную конверсии монооксида углерода;
- метанирование;
- очистку отходящих технологических газов.

В настоящее время разработаны и выпускаются в промышленном масштабе многочисленные марки катализаторов, в той или иной степени позволяющие решать указанные задачи [4, 5].

Сероочистка

Снижение концентрации соединений серы в природном газе до требуемого уровня обеспечивается в узле тонкой очистки, который находится в головной части агрегатов. Для этого используются различные методы, которые условно можно разделить на абсорбционные, адсорбционные, хемосорбционные и каталитические.

ООО «НИАП-КАТАЛИЗАТОР» ныне является основным в РФ разработчиком и производителем катализаторов сероочистки (поглотителей) природного газа. Поступающий на паровую конверсию природный газ предварительно проходит двухступенчатую каталитическую очистку от соединений серы: сначала – на катализаторе гидрирования сераорганических соединений НИАП-01-01К(Н), а затем при помощи поглотителя сероводорода в виде экструдатов (НИАП-02-03, НИАП-02-05) или таблеток (НИАП-02-02, НИАП-02-04).

Известно, что в целом при одинаковом строении молекул устойчивость относительно гидрирования возрастает в следующем ряду соединений [6]:

сероорганические < кислородорганические < азоторганические

Серосодержащие соединения гидрируются следующим образом: легче всего – меркаптаны, за ними – сульфиды. Степень активности соединений серы в реакциях гидрогенолиза различна и убывает в следующем ряду [7, 8]:

меркаптаны > сульфиды > дисульфиды > тиофены > бензотиофены > дибензо-тиофены

Труднее всего протекает гидрирование тиофенов. В одинаковых условиях степень превращения меркаптанов достигает 100%, а для тиофенов – примерно 40–50%. В случае использования каталитических систем предприятия, для тиофенов она достигает 70–90%, что существенно выше средних значений для катализаторов других марок.

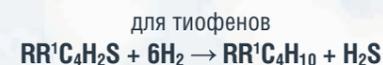
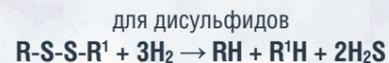
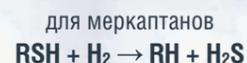
На катализаторе НИАП-01-01К(Н) при гидрировании некоторых сераорганических соединений,

ФАКТЫ

75 %

водорода производят из природного газа

содержащихся в природном газе и легких нефтяных фракциях, происходят следующие основные процессы:



Разнообразие марок поглотителей, указанных выше, связано с различным температурным диапазоном их применения. Так, цинковые поглотители НИАП-02-02 (таблетки) и НИАП-02-05 (экструдаты) рассчитаны на температурный диапазон 300–390 °С. В процессе их эксплуатации установлено, что данные поглотители могут устойчиво работать и при температурах 450 °С и выше.

Цинкмедные поглотители НИАП-02-03 (экструдаты) и НИАП-02-04 (таблетки) рекомендованы на более низкий рабочий диапазон температур 150–350 °С.

При этом во всех марках поглотителей тонкая очистка газа от соединений серы происходит в слое гранул оксида цинка, который реагирует с сероводородом практически нацело



В аппарате сероочистки при этом наблюдается синхронное движение фронтов серы как в слое, так и в грануле поглотителя [5]. К центру гранулы движется крутой фронт сульфида цинка и пологий фронт газофазной серы в ее порах. Движение паров воды при этом происходит в обратном направлении, как в слое, так и в грануле поглотителя. По мере приближения к центру частицы оксида цинка (а также при увеличении ее размеров) диффузия серы становится медленнее. Часть газофазной серы проскакивает к центру гранулы мимо частицы, внутри которой остается непрореагировавший оксид цинка. По этой причине в процессе приготовления поглотителей серы большое внимание уделяется

размеру кристаллитов. Оптимальным размером частиц можно считать их величину до 17 нм, а допустимым – до 30 нм.

Следует отметить, что цинковые и в большей степени цинкмедные поглотители в процессе их эксплуатации могут проявлять гидрирующие и гидродеструктурирующие свойства по отношению к сераорганическим соединениям. Это происходит в осернившемся (за счет поглощенной серы) лобовом слое поглотителя. Используя данное свойство, был разработан бифункциональный катализатор гидрирования сераорганических соединений и поглощения сероводорода с помощью НИАП-02-11.

При нынешнем качестве природного газа и его полной загрузке в реактор сероочистки длительность эксплуатации составляет не один десяток лет.

Для тонкой очистки бензола и его производных от соединений серы применяется катализатор К-СО, представляющий собой изоморфную смесь карбонатов меди и цинка с добавками соединений марганца, алюминатов кальция и активированного угля.

Цинковые и цинкмедные поглотители могут проявлять гидрирующие и гидродеструктурирующие свойства по отношению к сераорганическим соединениям. Используя данное свойство, был разработан бифункциональный катализатор гидрирования сераорганических соединений и поглощения сероводорода с помощью НИАП-02-11

Конверсия углеводородов

Предриформинг. С целью сокращения расходов на производство водорода при паровой конверсии углеводородов, ряд производителей осуществляет расширение сырьевой базы путем использования наряду с метаном пропан-бутановой фракции, топливных газов, природного газа, содержащего гомологи метана вплоть до гексановой фракции, а также отдувочных газов различных технологических стадий [9].

Для увеличения глубины переработки такого сырья путем конвертирования тяжелых углеводородов в метан и повышения эффективности процесса, а также предотвращения падения активности и механического разрушения катализатора вследствие сажеобразования, в технологический процесс вводится стадия предриформинга, суть которой связана с метанированием и гидрокрекингом алифатических углеводородов [10].

Предриформинг осуществляется при помощи водяного пара в широком температурном диапазоне, чаще всего это 450...500 °С, и минимальном соотношении пар:углерод = 1,8:1 на никелевых катализаторах. Фактически температурный диапазон процесса и соотношение пар:газ зависят от состава используемого газа. Реализация данной стадии позволяет предотвратить сажеобразование, возможное при пароуглеродной конверсии метана [11], а также смягчить условия работы катализатора парового риформинга.

ФАКТЫ

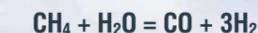
300-390 °С

температурный диапазон, на который рассчитаны цинковые поглотители НИАП-02-02 и НИАП-02-05

Высокую эффективность показал никелевый катализатор НИАП-03-05 с повышенным содержанием никеля, который успешно эксплуатируется на ряде промышленных предприятий [12–14].

Конверсия метана

Процесс получения водорода конверсией метана является основным промышленным методом синтеза [15]. Он осуществляется в две стадии. Сначала в печи первичного риформинга протекает эндотермический процесс паровой конверсии метана в температурном интервале 750–850 °С и давлении 2,5–4,5 МПа при соотношении пар:газ 2,5:3,7



В агрегатах производства аммиака частично конвертированный газ поступает далее в реактор вторичного риформинга, в котором происходит окончательная конверсия метана с водяным паром и кислородом воздуха.



Физико-химические основы данных процессов изучены достаточно хорошо [5, 15]. Одним из немногочисленных ресурсов повышения активности катализаторов, используемых в этих процессах, является оптимизация их формы и размеров, непосредственно влияющие на каталитическую активность за счет улучшения доступности поверхности, газодинамического сопротивления, характеристик теплопередачи и др.

Предриформинг осуществляется при помощи водяного пара в широком температурном диапазоне и минимальном соотношении пар – углерод на никелевых катализаторах. Это позволяет предотвратить сажеобразование и смягчить условия работы катализатора парового риформинга

Повышение эффективности работы диффузионной области достигается увеличением удельной поверхности гранул катализатора, то есть путем

создания и внедрения более развитых геометрических форм. При этом происходит увеличение удельной поверхности без роста гидравлического сопротивления зернистого слоя.

Процесс паровой конверсии метана осуществляется на катализаторе НИАП-03-01, имеющем сложную форму в виде цилиндрических гранул с выпуклыми торцами и несколькими отверстиями, которая позволяет увеличить геометрическую поверхность слоя катализатора с одновременной компенсацией роста его сопротивления.

Частично конвертированный газ из трубчатой печи первичного риформинга и технологический воздух с дополнительным количеством водяного пара поступают в реактор вторичного риформинга. В нем на катализаторе НИАП-03-01 происходит окончательная конверсия метана с паром и кислородом воздуха.

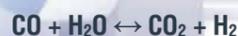
Различные модификации данного катализатора позволяют значительно расширить диапазон его эффективного применения. К ним можно отнести:

- катализатор К-905D1, промотированный лантаном для подавления сажеобразования;
- сферический катализатор НИАП-03-01Ш, сочетающий высокую производительность с низким перепадом давления;
- катализатор НИАП-03-01Б, выпускаемый в виде более крупных гранул (примерно на 15%) по сравнению с НИАП-03-01;
- катализатор НИАП-04-02, используемый как защитный слой катализатора вторичного риформинга;
- низкоактивный катализатор НИАП-НК, предназначенный для паро-углекислотного риформинга природного газа в процессе МИДРЕКС; обеспечивает нагрев газового потока выше критической температуры образования углерода и представляет собой оксид никеля, нанесенный на гранулы термостойкого корунда, выполненные в форме цилиндра;
- высокоактивный катализатор НИАП-ВК, предназначенный для стехиометрического паро-углекислотного риформинга природного газа в процессе МИДРЕКС; представляет собой оксид никеля, нанесенный на термостойкий пористый корундовый носитель, имеющий форму цилиндра с шестью отверстиями.

Конверсия монооксида углерода

После вторичного риформинга конвертированный газ, содержащий большое количество монооксида углерода (до 12,5%), поступает сначала на стадию среднетемпературной конверсии оксида углерода (СТК или конверсия CO I ступени), а затем – на низкотемпературную конверсию оксида углерода (НТК или конверсия CO II ступени).

В реакторе СТК на поверхности железохромового катализатора при температуре 350–430 °С и соотношении пар: газ (0,65–0,75): 1 протекает окисление монооксида углерода в соответствии со следующей реакцией:



ФАКТЫ

Не менее

15 %

должна быть объемная концентрация водяного пара в реакционной смеси, чтобы избежать снижения активности катализатора

Для указанного процесса разработан и выпускается железохромовый катализатор НИАП-05-01. Активной фазой является оксид Fe₃O₄, который в присутствии оксида хрома (III) формирует твердый раствор Fe₃O₄ · Cr₂O₃ с замещением части ионов железа ионами Cr³⁺ в кристаллической решетке Fe₃O₄. При этом, по мнению авторов [16], роль Cr₂O₃ заключается в стабилизации активного компонента.

При низком содержании водяного пара на поверхности катализатора возможно протекание нежелательного процесса Будуара:



Образующийся при этом углерод снижает активность катализатора за счет пассивации его поверхности. Чтобы избежать этого, объемная концентрация водяного пара в реакционной смеси должна быть не менее 15%.

На входе в аппарат температура газовой смеси составляет 320–330 °С. Ее снижение на входе в реактор достигается за счет применения в составе катализаторов промоторов, в частности KMnO₄. Благодаря экзотермичности процесса температура в реакторе повышается на 8–10 °С на каждый процент конвертированного оксида углерода. После реактора для газовой смеси она не превышает 430 °С, хотя катализатор выдерживает перегревы до 550 °С без потери его активности.

Дальнейшая конверсия монооксида углерода осуществляется при температуре до 240 °С. Для этой стадии хорошо зарекомендовали себя медьцинкалюминиевые катализаторы марок НИАП-06-06 (НТК-АКН), НИАП-06-07 (К-СО) и НИАП-06-08 (НТК-4).

Содержание оксида меди (II) в указанных катализаторах варьирует от 25 до 50% масс. В процессе восстановления оксида меди конвертированным газом после I ступени образуется металлическая медь в достаточно большом количестве, которая является активным компонентом данных катализаторов. Для стабилизации ее высокодисперсного состояния

и предотвращения возможности рекристаллизации в процессе эксплуатации в состав катализатора вводят ряд стабилизирующих добавок, которыми являются оксиды алюминия, магния, цинка и др. Хорошими стабилизирующими свойствами также обладают соединения шпинельного типа [5].

Кроме этого, указанные добавки при правильном их подбore могут оказывать дополнительное положительное влияние на катализатор. Прежде всего, они могут связывать вредные примеси, находящиеся в конвертированном газе, защищая активный компонент катализатора. Такую роль в катализаторах НТК играет оксид цинка, который поглощает соединения серы и хлора. Небольшие добавки оксида хрома, помимо стабилизирующего действия, повышают прочность катализатора.

Метанирование

После конверсии CO II ступени и ее последующей очистки от диоксида углерода, полученная азотоводородная смесь, содержащая в своем составе небольшие количества CO и CO₂, поступает на стадию метанирования, где протекают следующие основные процессы:



Данный процесс позволяет проводить тонкую очистку водорода и водородсодержащих газов от оксидов углерода, которые являются каталитическими ядами во многих процессах органического и неорганического синтеза и обеспечивает защиту окружающей среды от большого количества оксидов углерода, выбрасываемых в атмосферу.

По природе активного компонента катализаторы метанирования разделяют на никелевые, железные, и на основе металлов платиновой группы. Наибольшее практическое применение получили первые

Метанирование – наиболее эффективный способ очистки водорода от оксидов углерода, который позволяет снижать их остаточное содержание до 5–10 ppm. Процесс проводится на никелевых катализаторах при входном суммарном содержании оксидов углерода до 3,5% об.

В целом по природе активного компонента катализаторы метанирования можно разделить на три основные группы: никелевые, железные и на основе металлов платиновой группы.

Существенным недостатком железных катализаторов является их подверженность сильному зауглероживанию, что приводит к блокированию пористой структуры. По этой причине такие катализаторы не нашли широкого промышленного применения.

Катализаторы на основе металлов платиновой группы (родий, платина) обладают хорошими каталитическими свойствами, не нуждаются в восстановлении,

ФАКТЫ

Железные катализаторы

подвержены сильному зауглероживанию, что приводит к блокированию пористой структуры

не пиррофорны. Однако их практическое применение сильно ограничено из-за высокой стоимости.

Наибольшее практическое применение получили катализаторы метанирования на основе никеля. Лидирующие позиции среди этих катализаторов по активности и стабильности занимает НИАП-07-01 (НКМ-1) с содержанием оксида никеля (II) 35–40% масс. Известны случаи его эффективной работы на протяжении 30 лет без перегрузки. Данный катализатор получают путем смешения основного карбоната никеля с активным оксидом алюминия, обработки продукта смешения аммиачной водой, сушки, прокатки и таблетирования полученной массы. Удельная поверхность металлического никеля в полученном катализаторе имеет максимальное значение при содержании NiO в катализаторе 35–40% масс. [1, 5].

Совершенствование структуры катализатора в направлении максимального диспергирования активного компонента позволяет повысить эффективность его работы, снизить содержание в нем никеля и, следовательно, уменьшить его стоимость. С этой целью был разработан и запущен в производство катализатор НИАП-07-04, в котором содержится лишь 25% масс. NiO.

Другим направлением совершенствования катализаторов этой серии является доработка выпускаемых ранее катализаторов тонкой очистки водородсодержащих газов от оксидов углерода (ТО-2) с целью снижения температуры восстановления процесса. Таким образом был разработан катализатор НИАП-07-05. Особенностью технологии его приготовления является наличие стадии формирования аммонийных хроматов никеля.

Благодаря этому удалось существенно снизить температуры восстановления и работы катализатора с 490 до 135 °С.

Дальнейшие исследования в этом направлении позволили получить катализатор НИАП-07-07, в котором дополнительно используется высокоглиноземистый цемент для увеличения механической прочности.

Очистка газов

В ряде технологических процессов, в частности при получении азото-водородной смеси, происходит выделение инертных газов, требующих дополнительной очистки от кислорода и углеводородов [17]. Такая очистка осуществляется на катализаторе-хемосорбенте НИАП-15-08, а также на никель-медных катализаторах марок НИАП-15-02, НИАП-15-03, НИАП-15-09.

Для освобождения технологических газов от диоксида углерода и от горючих газов, включая водород, достаточно широко используются алюмо-палладиевый катализатор ПК-ЗШН и его аналоги, катализаторы АПКБ-0,5, АПК-НШГС, АПН-Ш. Их активные компоненты наносятся на носители сферической формы разного диаметра из активного оксида алюминия с высокой удельной поверхностью. Это позволяет обеспечивать оптимальный баланс между производительностью катализатора и перепадом давления в его слое.

Для освобождения технологических газов от диоксида углерода и горючих газов широко используются алюмо-палладиевый катализатор ПК-ЗШН и его аналоги – катализаторы АПКБ-0,5, АПК-НШГС, АПН-Ш

Тонкая очистка водородсодержащих газов от O₂, CO и CO₂ достаточно широко осуществляется на никель-хромовом катализаторе НИАП-12-05.

Для удаления хлорсодержащих соединений рекомендовано использовать поглотители хлора НИАП-02-10, которые выпускаются под двумя марками. Первая изготовлена на основе комбинации оксидов металлов и характеризуется высокой хлороемкостью. Вторая производится на алюмооксидной основе и отличается повышенной селективностью.

Приведенные инновационные разработки в области промышленного катализа способствуют снижению «углеродного следа» на предприятиях, осуществляющих переработку природного газа.

Получаемый при этом водород рассматривается как энергоноситель, способный в перспективе обеспечить человечество надежной, доступной, стабильной и экологичной энергией. Многие страны занимаются разработкой стратегии развития, которая позволит обеспечить исследования, результаты которых привели бы к реализации основных задач в области водородной энергетики. ●

Литература

1. Афанасьев С.В. Инновации и «зеленые технологии» в газохимии и нефтедобыче. Монография. – Самара: Изд-во СНЦ РАН. 2022. – 198 с.
2. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации // Распоряжение Правительства Российской Федерации от 5 августа 2021 г. № 2162-р. – М.: 23 с.

ФАКТЫ

Алюмо-палладиевый катализатор

и его аналоги широко используются для освобождения технологических газов от диоксида углерода и от горючих газов, включая водород

3. Афанасьев С.В., Садовников А.А., Гартман В.Л., Дульнев А.В., Обысов А.В. Очистка природного газа от сернистых соединений // *Neftgaz.RU. Деловой журнал*. 2018. № 10. С. 88–95.
4. Афанасьев С.В., Гартман В.Л. Каталитическая конверсия оксида углерода 1-й и 2-й степени // *Neftgaz.RU. Деловой журнал*. 2021. № 7. С. 29–33.
5. Афанасьев С.В., Садовников А.А., Гартман В.Л., Обысов А.В., Дульнев А.В. Каталитические процессы в газохимии. Монография. Под ред. д.т.н. С.В. Афанасьева. – Самара: Изд-во СНЦ РАН. 2021 – 244 с.
6. Технология переработки нефти и газа. Процессы глубокой переработки нефти и нефтяных фракций в 2-х ч. / Сост.: С.М. Ткачев – Новополюцк: ПГУ, 2006. – 345 с.
7. Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2017. № 2 (<http://ogbus.ru>). Дата обращения: 14.02.2024 г.
8. Афанасьева Ю.И., Кривцова Н.И., Иванчина Э.Д., Занин И.К., Татауршиков А.А. Разработка кинетической модели процесса гидроочистки дизельного топлива // *Известия Томского политехнического университета*. 2012. Т. 321. № 3. С. 121–125.
9. Яковенко Р.Е., Ильин В.Б., Савостьянов А.П., Зубков И.Н., Дульнев А.В., Семенов О.А. Конверсия сжиженных углеводородных газов на промышленных никелевых катализаторах // *Катализ в промышленности*. 2019. № 6. С. 455–464.
10. Iyin V.B., Yakovenko R.E., Belashov D.M., Zemlyakov N.D., Savost'yanov A.P. Thermodynamic Study of Associated Petroleum Gas Reforming to Methane // *Petroleum Chemistry*, 2019, Volume 59, Issue 6, pp. 641–649.
11. Мурзин Д.Ю., Власов Е.А., Постнов А.Ю., Омаров Ш.О., Мальцева Н.В. Каталитическая конверсия n-гептана // *Известия СПбГИ(ТУ). Технология неорганических веществ*. 2014. № 26. С. 13–19.
12. Голосман Е.З., Ефремов В.Н., Кашинская А.В. Промышленные катализаторы метанирования для предприятий нефтепереработки, нефтехимии и химической промышленности // *Нефтегазохимия*. 2015. № 2. С. 39–43.
13. Гартман В.Л., Обысов А.В., Дульнев А.В., Афанасьев С.В. Новая базовая форма катализаторов для реакторов конверсии углеводородов // *Катализ в промышленности*. 2012. № 3. С. 57–61.
14. Голосман Е.З., Дульнев А.В., Ефремов В.Н., Круглова М.А., Лукин В.В., Обысов М.А., Поливанов Б.И., Ткаченко И.С., Ткаченко С.Н. Инновационные катализаторы для химической, нефтехимической, металлургической и других отраслей промышленности // *Катализ в промышленности*, 2017. Т. 17 (6). С. 487–509.
15. Вакк Э.В., Шуклин Г.В., Лейтес И.Л. Получение технологического газа для производства аммиака, метанола, водорода и высших углеводородов. – М.: 2011. – 480 с.
16. Семенов В.П., Киселев Г.Ф., Орлов А.А. и др. Производство аммиака. Под ред. В.П. Семенова. – М.: Химия. 1985. – 368 с.
17. Голосман Е.З. Очистка технологических и выбросных газов с использованием промышленных цементосодержащих катализаторов. Ч.1. // *Химическая технология*. 2000. № 12. С. 25–35.

KEYWORDS: catalysts, hydrogen production, methane conversion, gas purification.

КАЛЕНДАРЬ СОБЫТИЙ

3–8 июня

12-я международная научно-практическая конференция

Интеллектуальное месторождение: инновационные технологии от пласта до магистральной трубы

г. Сочи

ИЮНЬ

П	3	10	17	24
В	4	11	18	25
С	5	12	19	26
Ч	6	13	20	27
П	7	14	21	28
С	1	8	15	22
В	2	9	16	23
				30

4–7 июня

Международная специализированная выставка

Недра России 2024

г. Новокузнецк, ВК «Кузбасская ярмарка»

11–13 июня

Международная выставка и конференция по энергетике

Global Energy Show 2024

Канада, Калгари

19–21 июня

Международная промышленная выставка и бизнес-форум

Expo Eurasia Kazakhstan 2024

Казахстан, Алматы

19–22 июня

Мексиканский нефтяной конгресс и выставка

Congreso Mexicano del Petroleo 2024

Мексика, Тампико