

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЯМОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА В ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ (ОБЗОР)

© 2024 г. П. С. Кузнецов*, К. И. Дементьев, Т. А. Паланков, А. Л. Максимов

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

**E-mail: pkuznetsov@ips.ac.ru*

Поступила в редакцию 24 апреля 2024 г.

После доработки 19 июня 2024 г.

Принята к публикации 01 августа 2024 г.

В обзоре проведен анализ существующих концепций использования электроэнергии для нагрева химических реакторов, прежде всего применяемых для проведения гетерогенно-каталитических процессов. Кратко рассмотрены основные способы использования электронагрева в химических реакциях, приведены примеры внедрения электронагрева на промышленном уровне, а также дана оценка перспектив перехода промышленности с традиционных систем нагрева на электрические.

Ключевые слова: электронагрев, резистивный нагрев, индукционный нагрев, микроволновый нагрев, радиочастотный нагрев, каталитические реакторы, каталитические процессы

DOI: 10.31857/S0028242124050014, **EDN:** MVJOSJ

Большая часть крупнотоннажных химических процессов протекает при повышенной температуре и, соответственно, требует нагрева технологических сред и химического оборудования. По данным американского Министерства энергетики, в 2021 г. [1] на долю химической промышленности и нефтепереработки приходилось около 60% всего энергопотребления США, большая часть из которого шла именно на нагрев. На сегодняшний день в промышленности для нагрева используют ископаемое топливо, сжигание которого приводит к значительным выбросам парниковых газов в атмосферу [2, 3]. Несмотря на распространенность и дешевизну данного метода, вероятно, в обозримом будущем компаниям, связанным с промышленным производством, придется существенно модернизировать или менять способы нагрева. Это обусловлено современной тенденцией к переходу к низкоуглеродной энергетике. В частности, в странах ЕС постепенно вводится “углеродный” налог, закладываемый в стоимость каждого продукта и соответствующий объему выброшенного в атмосферу CO_2 при его производстве [4, 5]. Решением проблемы декарбонизации промышленности может стать переход на возобновляемую энергию, полученную

за счет природных источников — ветра, солнца или геотермальных источников [6].

Один из сценариев такого перехода основан на концепции “Power-to-X”, предполагающей переработку CO_2 техногенного происхождения, воды и азота в топлива и химические продукты за счет электроэнергии [7–9]. Концепция может строиться на фото- или электрохимической конверсии диоксида углерода [10–13], в которых электрический ток является своего рода участником химических реакций. Подход “Power-to-X” детально описан в ряде работ, например [14]; подробное его рассмотрение выходит за рамки настоящего обзора. Кроме того, в рамках этой концепции возобновляемая электроэнергия используется только на первой стадии переработки CO_2 , в то время как последующая конверсия проводится за счет традиционных способов нагрева, основанных на сжигании ископаемого топлива; также “Power-to-X” не решает проблему выбросов уже существующих систем нагрева. Поэтому для снижения углеродного следа промышленности и производимых ею продуктов необходима замена традиционных нагревательных систем на электрические.

Несмотря на повсеместное применение электричества для нагрева маломощных систем, распространенность электронагрева в промышленности ограничена. Цель обзора — анализ и обобщение литературы, посвященной современным способам электрического нагрева каталитических реакторов и различных технологических блоков, а также анализ данных по практическому применению электронагрева в промышленности. В заключении дана оценка перспектив использования электрического нагрева в промышленности взамен традиционным системам нагрева.

ТИПЫ ЭЛЕКТРОНАГРЕВА

Электричество широко применяется в качестве источника энергии при нагреве различных технологических блоков лабораторных, пилотных и полупромышленных установок [15]. Использование электричества обладает рядом неоспоримых преимуществ в сравнении с традиционным паровым нагревом: простота использования, точность регулирования температурного режима, относительная простота обслуживания оборудования, а также распространенность электроэнергетической инфраструктуры.

Передача энергии системе при электронагреве может протекать контактным и бесконтактным способом. Бесконтактная передача энергии происходит за счет нагревания частиц образца электромагнитным излучением, порожденным переменным электрическим полем. В зависимости от частоты тока условно различают индукционный нагрев (10 Гц–0.3 МГц), радиочастотный нагрев (0.3 МГц–300 МГц) и микроволновый нагрев (300 МГц–300 ГГц) [16]. Несмотря на единый принцип передачи энергии системе, технологически схемы каждого из перечисленных типов нагрева имеют различия. Так, при микроволновом нагреве (МВН) электромагнитные волны генерируются магнетроном, далее они проходят через волновод и попадают в металлическую камеру или полость, куда помещается нагреваемый материал. Микроволны отражаются от металлических стенок внутренней полости, воздействуя на нагреваемый образец с разных сторон (рис. 1а). В камере создают резонансный режим электромагнитных стоячих волн [17], что позволяет улучшить однородность электромагнитного излучения, а следовательно, и повысить эффективность нагрева.

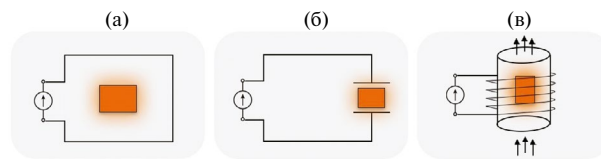


Рис. 1. Схемы установок бесконтактного нагрева: а) микроволновый; б) радиочастотный; в) индукционный.

Радиочастотный нагрев (РЧН) образца проводят посредством высокочастотного электрического поля, которое создается между двумя электродами (рис. 1б) [18]. Один из электродов заземлен, таким образом, система становится конденсатором, который может накапливать электрическую энергию для ее последующего преобразования в тепловую энергию в образце.

Индукционный нагрев (ИН) проводят за счет помещения образца в т.н. индуктор, представляющий собой, как правило, один или несколько витков медного провода (рис. 1в). Вокруг индуктора создается электромагнитное поле [19], приводящее к появлению вихревых токов, нагревающих образец.

Контактным способом электронагрева является резистивный нагрев, в котором генерация тепла происходит при пропускании тока через проводник с определенным сопротивлением. Передача энергии происходит за счет непосредственного контакта проводника с нагреваемым материалом [20]. Далее подробно будет рассмотрен каждый тип нагрева, а также приведены данные по промышленному применению электронагрева в каталитических реакторах.

МИКРОВОЛНОВЫЙ НАГРЕВ

Микроволновые системы нагрева начали развиваться в 50-х гг. прошлого века. В случае нагревания химических систем МВН первоначально применяли в жидкофазных процессах, в частности в реакции полимеризации [21–24]. Далее МВН использовали в газофазных процессах, протекающих на гетерогенных катализаторах [25].

МВН позволяет бесконтактно нагреть систему до десятков-сотен тысяч градусов. Энергия передается системе посредством колебательных и вращательных движений диполей или ионов, что вызывает внутреннее трение и приводит к нагреву системы. С теоретическими основами

МВН можно подробнее ознакомиться в работах [25, 26].

Эффективность поглощения энергии микроволнового излучения (МВИ) существенно различается в зависимости от дипольной поляризации нагреваемых веществ, их ионной проводимости, магнитных свойств и др. Другой важный фактор — глубина проникновения МВИ, которая может варьироваться от нескольких микрон до нескольких метров в зависимости от материала [27]. Эти факторы приводят к неравномерному нагреву системы (особенно при коротких временах нагрева), что необходимо учитывать в случае разработки промышленных каталитических реакторов, так как загрузка для них может отличаться на порядки в сравнении с лабораторными системами, а следовательно, данный эффект будет усиливаться [28].

Неравномерность МВН в объеме может приводить к локальному перегреву катализатора и компонентов реакции [29] — растворителя или определенных активных центров [30, 31]. Стоит отметить, что неравномерность является характерным явлением для МВН, причем как для жидких, так и для твердых соединений, однако причины такого поведения могут отличаться [28]. В случае нагрева жидкостей важным фактором, влияющим на температуру, является полярность компонентов. Для твердых систем таким фактором является различие магнитного момента материала и магнитного поля МВИ, а также возникающие взаимодействия диполей или ионов с различными реакционными группами, присутствующими в кристаллической решетке катализатора, например OH^- или Na^+ [15, 29, 32, 33]. Температура в объеме реактора и в местах локального перегрева может отличаться на 100–200°C, что приводит к изменению скорости и селективности реакции [34]. В работе [30] было показано, что МВН может значительно поглощаться носителями катализаторов. Так, для нанесенных MoS_2 и Pt поглощение МВИ преобладает для катализаторов с носителем Al_2O_3 по сравнению с SiO_2 . Авторы связывают такой эффект с отличием коэффициента диэлектрических потерь для данных материалов (энергия, рассеиваемая в диэлектрике при воздействии на него электрического поля). Для катализаторов $\text{MoS}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{MoS}_2/\text{SiO}_2$ было предложено эмпирическое уравнение (1), позволяющее рассчитывать долю поглощенной мощности МВИ в зависимости от температуры.

$$\gamma = C_A + C_M \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (1)$$

где γ — количество поглощенного МВИ; C_A и C_M — эмпирические константы; E_a — энергия активации, кДж/моль (энергия, необходимая для возбуждения частиц, восприимчивых к МВИ).

Согласно расчетам, проведенным авторами, доля поглощенного МВИ может достигать 25% для Al_2O_3 при нагреве свыше 500°C. Следует отметить, что уравнение (1) является сугубо эмпирическим.

Для каталитических превращений прогнозирование МВН-системы — важная задача. В литературе имеется ряд моделей, позволяющих рассчитывать температурные профили для реакторов с МВН. В работе [35] при помощи программного пакета COMSOL Multiphysics® была разработана трехмерная математическая модель температурного профиля трубчатого кварцевого реактора, заполненного стационарным слоем цеолитного катализатора NaY . Распределение электромагнитного поля рассчитано с использованием уравнения Максвелла (2); объемное рассеяние мощности МВИ (Q_{MW}) вычислено по формуле (3).

$$\nabla^2 E + \omega^2 \epsilon \mu E = 0, \quad (2)$$

$$Q_{\text{MW}} = \pi f \epsilon_0 \epsilon'' E \cdot E^*, \quad (3)$$

где E — вектор напряженности электрического поля, В/м; E^* — комплексное сопряженное E ; $\omega = 2\pi f$ — угловая частота, рад/с; ϵ и μ — проницаемость и диэлектрическая проницаемость среды.

На основе экспериментально измеренных диэлектрических свойств были смоделированы переходные температурные профили цеолита и кварцевой трубки ϵ' и ϵ'' как функции от температуры. Экспериментальные температурные профили отличались от модели на 10.3% для слоя катализатора и на 13.4% для стенки кварцевого реактора. Результаты моделирования показывают, что энергетическая эффективность МВН зависит не только от конфигурации реактора и нагревателя, но и геометрических параметров слоя катализатора.

Несмотря на перечисленные сложности, в перспективе при проведении каталитических процессов недостатки МВН можно обратить в преимущества [15, 30, 36]. Так, локальные перегревы можно использовать для селективного нагрева активных центров катализаторов в газо-фазных превращениях, при этом температура газовой фазы (сырье и продукты реакции) будет оставаться существенно ниже, что позволит снизить интенсивность протекания побочных процессов.

Стоит отдельно отметить, что при использовании МВН возникает технологическая сложность измерения температуры нагреваемого образца, например катализатора в реакторе [37]. При использовании традиционных термоэлектрических преобразователей в МВИ происходит искажение сигнала. Данную проблему частично решают при помощи экранирования или заземления термопар, однако полностью избавиться от нее не удастся [38]. Другим подходом по контролю температуры является использование инфракрасных датчиков [39], однако и в этом случае остается нерешенным вопрос определения локальных температур внутри слоя катализатора. Существует еще один подход, с использованием волоконно-оптической термометрии [40], лишенной вышеописанных проблем, однако установка таких датчиков требует особой аккуратности для исключения возможности его повреждения во время проведения экспериментов. К сожалению, ни один из подходов не позволяет определять температуру перегретых участков системы, которые были упомянуты выше.

Сегодня системы с МВН активно исследуются и применяются учеными из разных стран, количество работ в этой области постоянно увеличивается: так, согласно ресурсу “Google Patents”, количество патентов, посвященных электронагреву, с 2012 г. выросло более чем в десять раз и составляет в последнее время 500–900 публикаций в год. МВН применяют практически для всех типов каталитических процессов: окисление [41], дегидрирование [42], олигомеризация [43], риформинг [44] и др. Многие лабораторные исследования проводят на оборудовании, аналогичном домашней микроволновой печи, т.е. реактор с реактивами устанавливают в специальный шкаф и облучают МВИ [45, 46]. Однако такой подход неприемлем в крупнотоннажном производстве, поэтому далее будут рассмотрены системы нагрева, которые в пер-

спективе могут быть масштабированы для применения в промышленных установках.

МВН реакторов проводят при помощи источников двух типов: моно/мультимодовые [47] системы (рис. 2) или реакторы с МВН, работающие по принципу “лампа бегущей волны”. Принципиальным отличием данных систем является то, что в случае мультимодового нагрева в нагреваемом объеме формируются стоячие волны (моды) в результате отражения излучения от стенок. Интенсивность поля в объеме неоднородна, что приводит к образованию условных “горячих и холодных” зон, в том числе за счет поглощения энергии образцом и рассеивания энергии в виде тепла в окружающую среду. В случае мономодовых систем энергия через волновод поступает непосредственно на нагреваемый объект, за счет концентрирования МВИ, как показано на рис. 2, поэтому потери энергии, а также общее энергопотребление значительно меньше по сравнению с мультимодовыми системами. Недостаток мономодовых систем — выраженная неравномерность нагрева в объеме, где идет селективное нагревание определенной области образца со стороны МВИ, что усложняет применение мономодового подхода к равномерному нагреву больших количеств вещества.

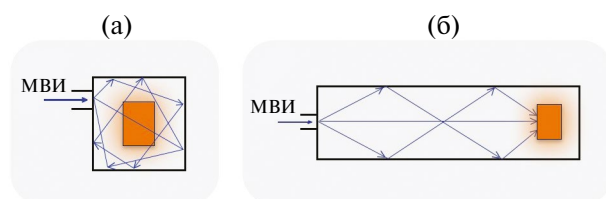


Рис. 2. Типы распределения микроволнового излучения: а) мультимодовая система; б) мономодовая система.

Университетами Сарагосы и Валенсии [48] был разработан реактор, использующий мономодовый тип нагрева для конверсии метана на монолитном катализаторе. Сам реактор представляет собой стальной объем цилиндрической формы с расположенной внутри кварцевой трубкой, облучаемой с одной стороны МВИ. Кварц используется в качестве материала, прозрачного для микроволн. Проблему неравномерного распределения тепла в объеме катализатора (температура катализатора со стороны излучения была существенно выше) авторы решили за счет постоянного вращения реактора вокруг своей оси. В этом случае процесс распределения тепла происходил равномерно по всему объему катали-

затора. Температура катализатора была постоянной в течение 19 ч и составляла 700°C. Несмотря на то, что авторам удалось достичь равномерного нагрева в каталитическом слое, реализовать данный подход в промышленных масштабах будет весьма сложно, в первую очередь из-за необходимости вращения реактора, а также отсутствия возможности использования высокого давления в подобной системе.

В обзоре [28] описаны микроволновые системы для переработки биомассы — процесса с высоким потреблением энергии. Авторы утверждают, что при масштабировании реактора проблему проникновения микроволн вглубь образца можно решить за счет использования определенного диапазона частот или специальной антенны, устанавливаемой в реакторе, которая позволяет уменьшить количество и объем “слепых” для микроволн зон. В качестве примера такой системы авторы приводят реактор непрерывного действия компании “Sairem” [49], позволяющий добиться равномерного нагрева за счет микроволнового генератора мощностью 75 кВт с частотой излучения 915 МГц и постоянно вращающейся шнековой мешалки, установленной внутри реактора.

В отличие от моно/мультимодовых систем, реактор “лампа бегущей волны” сохраняет равномерность нагрева в том числе и при масштабировании. Для реализации данной технологии необходимо подобрать конфигурацию волновода, в первую очередь его форму — круглая, прямоугольная или коаксиальная. В работе [50] рассмотрен коаксиальный тип микроволнового реактора. Авторы утверждают, что данная форма наиболее перспективна для последующего масштабирования, так как обеспечивает равномерное распределение температуры в каждом поперечном сечении слоя катализатора (Pt/C), расположенного в кольцевом пространстве между двумя проводниками. Моделирование показывает, что коэффициент отражения микроволн в разработанной системе составляет около 1% при стандартной рабочей частоте 2.45 ГГц, следовательно, передача энергии происходит максимально эффективно (вдоль реактора не генерируется стоячая волна). Кроме того, предложенная авторами схема загрузки катализатора обеспечивает более эффективную передачу энергии от МВИ к катализатору, что приводит к равномерному распределению температурного профиля внутри каталитического слоя.

Для проведения жидкофазного синтеза авторами работы [51] был разработан реактор с U-образным волноводом со специальной линией передачи МВИ, погруженной в реакционную смесь, что позволяет облучать жидкую фазу изнутри. Данная технология позволяет понизить потребление энергии по сравнению с мономодовыми резонаторами примерно в два раза. Такой эффект достигается благодаря оптимизации рассеивания МВИ в жидкости и минимизации потерь мощности — микроволны после прохождения жидкой фазы отражаются и направляются обратно к магнетрону. Авторы утверждают, что данную технологию можно успешно масштабировать и использовать в промышленности.

Таким образом, МВН каталитических реакторов с каждым годом привлекает все больше внимания исследователей, в первую очередь за счет возможности селективного бесконтактного нагрева частиц катализатора до высоких температур. Восприимчивость системы к МВН в первую очередь зависит от ее диэлектрических свойств (диэлектрический коэффициент ϵ), которые необходимо определять индивидуально, особенно в случае многокомпонентных систем. Наиболее часто в литературе исследуют каталитические системы на основе оксида алюминия и карбида кремния — нагреваемые МВИ носители, а также платина и палладий — каталитически активные металлы, восприимчивые к МВН. К достоинствам микроволнового оборудования можно отнести его компактность, в сравнении с традиционными системами, что позволяет существенно экономить технологические площади. К недостаткам МВН можно отнести неравномерное распределение тепла внутри твердого слоя катализатора (не до конца установлен механизм нагрева), малую глубину проникновения МВИ и несовершенство способов измерения температуры, проявляющееся даже на установках лабораторного масштаба. Использование МВН в крупнотоннажном производстве возможно при разработке специальных реакторов (установок) и катализаторов.

Несмотря на обозначенные трудности, уже сегодня существуют примеры реализации микроволновых нагревателей в промышленности. В 2014 г. компания “Microwave Chemical Co., Ltd.” (Япония) [52] начала строительство в Осаке пилотного химического завода, основой которого являются установки, использующие МВН. К 2019 г. в эксплуатацию было введено

три установки; к сожалению, детальных данных по процессам, которые в них реализуются, компания не приводит [52]. Другим проектом компании является совместный с “Taiyo Kagaku” запуск завода по производству сложных эфиров сахарозы мощностью 1000 т/год. Также существует проект установки “PW6” мощностью 1000 т/год компании “Rugowave” для переработки отходов полимеров [53]. Также имеется информация по реализации компанией “Microwave Chemical Co., Ltd.” проекта по декарбонизации японской промышленности, в планах компании является разработка процесса крекинга с МВН — “M-Cracker” [52].

Опыт частных компаний и постоянно публикуемые новые патенты по использованию МВН для различных каталитических процессов оставляют надежду на дальнейшее расширение сфер использования данной технологии в химической промышленности.

ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ

Индукционный нагрев (ИН) — бесконтактный метод нагрева электропроводящего материала, помещенного в переменное магнитное поле. Наведенное магнитное поле вызывает вихревые токи, протекающие по нагреваемому материалу. Вследствие этого по закону Джоуля—Ленца ввиду наличия конечного ненулевого электрического сопротивления начинает выделяться энергия в виде тепла [54]. Особенность данной технологии — выделение тепла происходит на поверхности материала, а не внутри него, что позволяет снизить риски его деформирования (если не достигать температур плавления материала). Скорость нагрева очень высока — время разогрева материала на сотни градусов может составлять миллисекунды, а эффективность передачи энергии достигает 90%. ИН может обеспечить прямой нагрев катализатора в реакторе, имеются данные о системах с рабочей температурой более 1500°C [55, 56]. К недостаткам индукционной технологии нагрева можно отнести необходимость мощного охлаждения индуктора (водяное охлаждение) и тщательный подбор материала нагревательных элементов. Так, например, магнитная проницаемость ферромагнитного железа начинает ухудшаться при 600°C и фактически отсутствует уже при 750°C [57]. Поэтому использование железа в качестве нагревательного элемента невозможно для процессов, протекающих свыше 750°C.

Индукционная технология нагрева берет свое начало с середины 20 в. Одной из первых компаний, которая начала использовать эту технологию, была компания “Shell”. Shell предложила использовать данный подход для сверхбыстрого нагрева сырья, подаваемого на установку каталитического крекинга [58]. Одна из целей использования ИН — снижение вклада термического крекинга сырья до момента его попадания на катализатор. В результате исследований была разработана система преднагрева сырья, состоящая из индукционной катушки и золотых проволок и перфорированных пластин, которая позволяла разогревать сырье до момента попадания в реактор с 400 до 700°C за 10 миллисекунд.

Повышение скорости теплопередачи возможно также за счет изменения гидродинамики химических реакторов. В работе [56] описан мини-реактор с псевдоожиженным слоем катализатора, имитирующий реактор промышленной установки. Использование ИН позволяет достигать рабочей температуры до 1500°C в реакционной зоне менее чем за 5 с. Сырье подается в реактор и затем равномерно распределяется в разогретом слое катализатора. Данный реактор можно использовать для конверсии твердого сырья, такого как кокс, биомасса или уголь, за счет системы подачи и высокой температуры реакционной зоны. Особенность реактора — симметрично расположенные внутри восемь электропроводящих металлических стержней. Эти стержни являются рабочими частями системы ИН и играют роль нагревательных элементов, позволяющих передавать тепло псевдоожиженному слою катализатора по направлению от центра реактора к его стенке (остальные части установки инертны к ИН). Авторы утверждают, что температура в каталитическом слое остается постоянной, отклонение от заданной температуры составляет $\pm 10^\circ\text{C}$.

Другой подход по использованию ИН был описан в патентах [59, 60], где авторы реализовали нагрев системы за счет ИН непосредственно катализатора в реакторе. В работе [59] авторы применяли специальный ферромагнитный материал (силицид железа) с нанесенными на него каталитически активными компонентами или сердечник, который при нагреве передает тепло окружающему его катализатору в реакторе. Авторы предлагают несколько вариантов исполнения реактора: проходящий по центру стержень цилиндрической формы для инертных к ИН

катализаторов или диски с нанесенными на поверхность частицами катализатора, имеющие отверстия для тока реагентов. Сам реактор авторы предлагают изготавливать из электроизоляционных материалов для ограничения протекания в нем индукционных токов; предпочтительные частоты переменного тока составляют 50–60 Гц, но может использоваться любая частота от 25 до 2500 Гц. В качестве примера применения авторы приводят реакцию дегидрирования этилбензола до стирола на оксиде железа(III) с добавлением оксида хрома и калия, протекающую при температуре до 950°C. К сожалению, информации об эффективности работы катализаторов (выход продуктов, конверсия сырья и др.) в патенте авторы не приводят. В патенте [60] описывается похожая система, где в качестве материала, восприимчивого к ИН, используют гранулы, кольца или стержни. Активным компонентом могут выступать каталитически активные металлы, например платина, платиноиридиевые или платинородиевые сплавы. Металлы наносятся непосредственно на поверхность нагреваемых деталей реактора. Данный тип реакторов предлагается использовать для получения синильной кислоты. Авторы отмечают, что катализатор нагревается практически равномерно, что приводит к более эффективному протеканию химического превращения.

В работах [61, 62] было предложено использовать ИН суперпарамагнитных наночастиц в качестве материалов для неподвижного слоя катализатора в реакторе проточного типа. В работе применяли наночастицы на основе железа, марганца и стальные шарики, покрытые инертным к химическому превращению материалом (силикагель, уголь), содержащим активный компонент. В качестве материала реактора использовали стекло или полимер (полиэфирэфиркетон), которые инертны к ИН, максимальная температура нагрева была достигнута с использованием стальных шариков — 350°C. Авторы провели апробирование данной системы на широком спектре органических реакций в том числе с применением гетерогенных катализаторов на основе переходных металлов (палладий, железо, цинк и др.). Наилучшие результаты были достигнуты в реакциях гидрирования различных функциональных групп и кросс-сочетания, где выход продуктов достигал 92% и 84% соответственно. Авторы отмечают, что при высоких значениях pH может протекать разрушение частиц силикагеля, в случае же стальных шариков наблюдается ло-

кальный перегрев, что может влиять на стабильность активных компонентов и, в свою очередь, на общую эффективность реакционной системы. В целом авторы утверждают, что проведение органического синтеза в проточных реакторах данного типа является перспективным подходом для крупной промышленности, однако необходима разработка новых типов катализаторов. В этом же направлении работала группа Реброва [16, 63, 64], особенность которой заключалась в использовании магнитных материалов (феррит никеля) для нагрева промышленных катализаторов HZSM-5 и Pd/TiO₂ в реакциях изомеризации цитронеллала и гидрирования изопулегола до ментола соответственно. Катализатор и нагревательный материал засыпаются в кварцевый реактор позонно; для поддержания необходимого температурного профиля внутри реакционной зоны гранулы феррита никеля смешивали со стеклянными шариками. Данный подход позволяет создавать каскад из различных типов катализаторов, таким образом, можно проводить сразу несколько последовательных превращений в одном реакторе. Расположение зон нагрева и катализатора оказывает существенное влияние на выход продукта в последовательных реакциях. При оптимальных условиях выход ментола в двухзонном реакторе составил 46%, что существенно больше, чем в изотермическом реакторе с физической смесью катализаторов. Масштабирование подхода с использованием послойного расположения катализатора и нагревательного слоя требует дополнительных исследований.

В патентах [65–69] описаны системы плавления тугоплавких материалов, в том числе диэлектриков (стекло), с помощью индукционной печи). Авторы работы [70] использовали данный подход в реакции риформинга метана. Магнитным полем проводили нагрев сплава Ni₆₀Co₄₀, представлявшего собой спрессованные в диски порошки, до максимальной температуры 950°C; скорость нагрева составила 200°C/мин. Металлический сплав одновременно выполнял роль катализатора реакции и нагревательного элемента. Катализатор стабильно работал в течение 50 ч. Конверсия метана и выход водорода при ИН были сопоставимы с показателями, полученными при обычном нагреве: так, максимальный выход водорода составил 75%.

В патенте [71] описывается еще одна высокотемпературная реакторная система с ИН (950–1400°C) для получения синильной кислоты в га-

зовой фазе. Катализатор (металлы платиновой группы) нанесен на газопроницаемый цилиндр, выполняющий одновременно функции нагревателя и катализатора. Цилиндрический газопроницаемый катализатор, восприимчивый к ИН, может состоять из твердого материала, например пористой пены, или из нескольких слоев газопроницаемых нитевидных структур. Эффективность ИН реактора составляет ~89%. Авторы сообщают о равномерном распределении тепла по всей толщине кольцевого реактора — нагрев внешней поверхности цилиндрического катализатора от внутренней отличается всего на 11% (внутри меньше).

В работе [72] была разработана полупромышленная емкость из нержавеющей стали рабочим объемом 250 л с ИН. Рабочая частота тока соответствует частоте напряжения в сети — 50 Гц, что приводило к вибрации установки и возникновению шумов. Одним из решений данной проблемы являлось увеличение рабочей частоты до 1000–2000 Гц; при этом желательно, чтобы новая частота не была кратна 50 Гц — во избежание резонанса с сетевым напряжением. Однако увеличение рабочей частоты приводит к более сильному нагреву индукционной катушки, что может приводить к выходу ее из строя. Авторы предлагают использовать специально разработанную охлаждающую оболочку, располагающуюся между реактором и индукционной катушкой, обладающую высокой прозрачностью для магнитного поля, производимого генератором. Оптимизация конструкции охлаждающей оболочки позволяет обеспечить снижение уровня потерь мощности, вызванных индукционными токами, КПД разработанной системы может достигать 90%.

В работе [73] была разработана численная модель индукционного нагрева трубы большого диаметра из стали X80. Данные исследования могут быть весьма актуальны при реализации крупных промышленных индукционных систем нагрева.

В настоящее время промышленные образцы реакторов (емкостей) с ИН производит ряд китайских компаний [74–76], предоставляющих услуги по проектированию и поставке данного оборудования. Компании заявляют следующие характеристики оборудования: мощность — до 2000 кВт, вместимость реакторов — до нескольких десятков кубических метров, мак-

симальная температура нагрева — до 800°C. Однако говорить о массовом внедрении и применении технологии ИН в крупнотоннажных каталитических процессах пока не приходится.

ИН имеет большие перспективы применения в промышленности, в первую очередь, за счет высокой скорости нагрева и относительно простого механизма передачи энергии в сравнении с МВН, где требуется учитывать множество свойств всех компонентов реакционной системы. В случае ИН главную роль играет только наличие магнитных свойств материала нагревательного элемента. Сегодня ИН реакторов можно разделить на два основных подхода: а) ИН специальных элементов внутри реактора (стержни), позволяющих передавать тепло катализатору, инертному к магнитному полю; б) ИН частиц (стальные шарики), восприимчивых к магнитному полю, на поверхность которых наносятся каталитически активные компоненты. Вероятно, в будущем ИН будет весьма актуален для процессов с псевдооживленным/циркулирующим слоем катализатора.

РАДИОЧАСТОТНЫЙ НАГРЕВ

Еще один тип бесконтактной передачи энергии — нагрев при помощи токов высокой частоты (0.3–300 МГц), или радиочастотный нагрев (РЧН). В качестве нагреваемого объекта может быть любой диэлектрический материал, помещенный в переменное электромагнитное поле, локализованное между двумя электродами. Нагрев в данном случае возникает вследствие тепловых потерь энергии при дипольной поляризации диэлектриков [77]. Кроме того, наличие нескольких альтернативных механизмов поляризации во внешнем поле (электронно-релаксационная, ионно-релаксационная и т.д.) определяет возможность воздействия поля высокой частоты на жидкости с полярными молекулами и диссоциирующие ионы [78]. В сравнении с МВН радиочастотный нагрев имеет ряд преимуществ: большая глубина проникновения в образец; равномерность нагрева вне зависимости от геометрии образца [79]; более простая конструкция нагревателя за счет отсутствия волновода.

На сегодняшний день РЧН нашел широкое применение в пищевой промышленности — размораживание продуктов питания, их стерилизация, пастеризация и дезинфекция [80], медицине [81], сушке [82–83]. Оборудование

РЧН производят международные компании: Radio Frequency Co. [84] (Италия); Stalam Co. [85] (Италия); Strayfield Co. [86] (Великобритания) и др. Однако в химической промышленности данный метод не используется; принципы его применения пока являются предметом разработок.

В литературе встречаются исследования по нагреву диэлектрических материалов, способных проявлять каталитическую активность, например волокон карбида кремния [79], углеродных нанотрубок [87] и др. В обеих работах использовали радиочастотный аппликатор, подключенный к медным пластинам; максимальные скорости нагрева наблюдались при частоте 60–80 МГц, температура нагрева составляла от 80 до 400°C. К сожалению, лишь в единичных работах представлены исследования по использованию РЧН в каталитических превращениях.

Так, в работе [88] авторы проводили каталитический синтез ацетилена из метана с помощью РЧН. Реактор представлял собой заполненную активированным углем трубку (реагент процесса), помещенную между высоковольтными электродами с одной стороны реактора и заземляющими электродами с другой (компании Radio Frequency Co., Inc.), рабочая частота установки — 40 МГц, пиковая мощность — 2.5 кВт, максимальная температура процесса — ~1000°C. Максимальная селективность химического превращения по ацетилену составила более 92%.

Авторами работы [31] была разработана система каталитического риформинга метанола с использованием РЧН. Установка представляла трубку с расположенным по центру катализатором в виде нити — платина, нанесенная на углеродные нанотрубки и оксид алюминия. Использование углерода позволяет селективно нагревать катализатор в РЧН, максимальный нагрев проводили до 280°C. Авторы утверждают, что полученные результаты по использованию данной системы сравнимы с обычными реакторами, конверсия сырья при максимальной температуре составляла примерно 50%.

В цикле работ группы Лиу [89, 90] авторы использовали РЧН для получения биодизеля из триглицеридов жирных кислот. Процесс проводили в стеклянной колбе с холодильником, помещенной между двумя электродами, температура процесса не превышала 80°C. Также имеются

данные по конструированию реакторов для получения плазмы за счет РЧН [91, 92]. В [91] был разработан радиочастотный реактор для получения аргона в плазменном состоянии, температура нагрева составляла более 4000°C. Радиочастотный усилитель реактора работал в диапазоне от 10 кГц до 250 МГц. В [92] авторы синтезировали алюминиевые наночастицы в радиочастотном плазменном реакторе с рабочей частотой 3 МГц; была достигнута температура ~7000°C.

Исходя из имеющихся данных, можно сказать, что РЧН широко распространен в пищевой и сельскохозяйственной промышленности, однако именно в области каталитических процессов и высокомошных реакторов на сегодняшний день РЧН не используется.

РЕЗИСТИВНЫЙ НАГРЕВ

Резистивный нагрев является самым простым и распространенным видом электронагрева, использующимся уже более 100 лет. Основным принцип резистивного нагрева — использование тепла, выделяющегося при протекании тока в проводнике, за счет теплового действия тока. Мощность нагревателя можно оценить по закону Джоуля–Ленца; тепло равномерно распределяется по всей поверхности материала, играющего роль нагревателя. Для теплопередачи необходим физический контакт нагревательного элемента и нагреваемого объекта. Минус резистивных систем — тепловые потери, расходуемые на нагрев окружающей среды и технологических узлов (невозможен селективный нагрев), что можно компенсировать использованием теплоизоляции или изменением конструкции нагревательной системы. На сегодняшний день эффективность резистивных нагревательных систем может достигать более 95% [93].

Резистивный нагрев выгодно отличается от микроволновых и индукционных систем, в первую очередь за счет более простой концепции использования, не требующей подбора материалов реактора, специальной разработки катализатора процесса, учета особенностей химических превращений, протекающих в реакторе, и др. Кроме того, универсальность резистивных систем позволяет устанавливать их на любые технологические узлы, такие как: трубы, фланцы, фитинги, сосуды, а также теплотрассы. Отдельно стоит отметить простоту установки и обслуживания электрических систем даже

в сравнении с паровым нагревом, где требуется проводить чистку теплообменных труб и поддерживать герметичность системы. В сумме это позволяет утверждать, что с точки зрения промышленного производства данный подход наиболее перспективен и уже сейчас может заместить все существующие паровые системы нагрева [94].

Рынок электронагревательных систем хорошо развит, в первую очередь, за счет бытового использования. Большое количество компаний поставляют электронагревательные системы для обогрева домов (электрокотлы), крыш, труб (ленточные нагреватели) и др. [95]. В основном данное оборудование обладает невысокими температурными характеристиками и позволяет нагревать материалы до температур порядка 200–300°C. С другой стороны, существуют компании ООО “ПК Марион” [96], ООО “Полимернагрев” [97], занимающиеся сегментом высокотемпературных систем нагрева до 1000–1100°C; к ним относятся: керамические, хомутовые нагреватели и высокотемпературные ТЭН. Данные системы позволяют нагревать небольшие емкости и лабораторные/пилотные установки, однако их мощности недостаточно для установок промышленного масштаба.

Промышленные нагревательные системы мощностью десятки-сотни МВт (для сравнения, мощность современных печей на НПЗ в среднем составляет 30–200 МВт) еще 20–30 лет назад не производились [98]. Однако за последнее время произошел существенный скачок в данном направлении, и уже можно с уверенностью утверждать, что высокоомощные электронагреватели существуют на рынке и производятся международными компаниями, например: Watlow (США), Masterwat (Италия), San Electro Heats (Дания), Tutco Heating Solution Group (США) и др. [95, 99–101]. Оборудование данных компаний практически идентично с точки зрения конструкции; главные отличия связаны с технологическими характеристиками. В основе современных высокоомощных ТЭН лежит трубчатый электронагреватель, представляющий металлическую U-образную трубку, заполненную теплопроводящим электрическим изолятором, по центру которого проходит токопроводящая нихромовая нить высокого сопротивления. Материалы и сопротивление нити подбираются под требуемые задачи: диапазон температур, давление в системе, коррозионная устойчивость и др.

Высокомощные нагревательные системы условно делятся на погружные, проточные и канальные. Погружные и проточные нагреватели используют одинаковый электрический блок нагрева, помещенный в разные технологические каркасы. Погружные электронагреватели встраивают в стенку емкости без кожуха и напрямую нагревают содержимое резервуара. В случае проточных нагревателей резистивный элемент помещен в специальный кожух, аналогичный паровому теплообменнику, что позволяет использовать такую систему в качестве поточного нагревателя нефти или других жидкостей.

Канальные системы используются для нагрева воздуха или газа. Нагревательные элементы изготавливаются из обычной или нержавеющей стали, которые монтируются на пластинчатые или стержневые опоры. Для лучшей передачи тепла газу элементы могут иметь оребрение, а в качестве движущей силы перед ними может быть установлен вентилятор.

Компания Masterwatt (Италия) обладает широким ассортиментом промышленных электронагревателей газа, жидкостей (нефть) и пластмасс. Единичная мощность производимых нагревателей может достигать 5 МВт, температура поверхности ТЭН составляет 750°C, проточные системы способны выдерживать давление до 250 бар, при этом заявленный КПД установок достигает 98% [102].

Одна из последних разработок компании Watlow — теплообменник нового поколения с технологией непрерывного спирального тока, позволяющий обеспечить сверхвысокую равномерную теплопередачу — Ultra-Efficient Electric Heat Exchanger [103]. Мощность системы может составлять до 200 МВт, что сравнимо с промышленными аналогами, максимальная температура нагрева заявлена 950°C, при давлении 20.6 МПа. Компанией реализовано множество проектов по всему миру, в том числе в США, Бельгии, Австралии, Нигерии и др.

Еще одними представителями рынка являются компании San Electro Heats и Tutco Heating Solution Group, занимающиеся разработкой и изготовлением оборудования для нагрева газовых потоков. Максимальные температуры промышленных нагревателей составляют до 500°C. Отдельно стоит отметить, что высокоомощные промышленные электронагреватели по разме-

рам меньше или схожи с паровыми, поэтому их замена не требует дополнительного технологического пространства, что упрощает процесс модернизации.

Современный рынок электронагревательных теплообменных систем не ограничен вышеперечисленными компаниями, что свидетельствует о востребованности данного оборудования на рынке, и в перспективе данный сегмент будет только расширяться. Несколько иная ситуация обстоит с электронагревом каталитических реакторов — данное направление носит скорее исследовательский характер, говорить об его массовом использовании пока не приходится.

Резистивные реакторные системы можно условно разделить на два типа. К первому относится омический нагрев, где в качестве материала сопротивления выступают компоненты реакционной системы (сырье, катализатор и др.). Широкое распространение омический нагрев нашел в пищевой промышленности из-за его способности нейтрализовать микроорганизмы путем термического и нетермического повреждения клеток [104]. К сожалению, в литературе имеется небольшое число исследований, посвященных каталитическим процессам, использующим омический нагрев. В работе [105] была представлена нагревательная система для катализатора парового риформинга метана. Основной проблемой использования омического нагрева в катализе является низкая теплопроводность катализатора, что, особенно при наличии у реакции теплового эффекта, создает резкие температурные градиенты на катализаторе. В качестве решения предложено использовать реактор из сплава FeCrAl (сопротивление этого сплава не зависит от температуры) с напыленным внутри реактора слоем никеля (~130 мкм), служащего катализатором процесса. Резистивный нагрев осуществлялся путем подачи переменного тока вдоль стенки реактора, что позволяло обеспечить прямой нагрев каталитического слоя и снизить температурный градиент, а также достигнуть конверсии метана около 90% при температуре 800°C. В другой работе авторы [106] наносили палладиевые катализаторы на внутреннюю поверхность реактора из аналогичного материала для проведения реакций окисления органических соединений как наиболее популярного метода по утилизации выбросов летучих органических соединений. В качестве модели реактор апро-

бировали в каталитической реакции окисления этилена воздухом. Лучшие результаты были получены при нанесении палладия гальваническим способом, где исчерпывающая конверсия этилена была достигнута уже при температуре ~300°C; для других катализаторов аналогичный результат был получен при температуре 350°C и выше. Авторы отмечают, что данная система нагрева и относительно простой метод нанесения катализатора на стенки реактора могут быть применены и в альтернативных каталитических процессах, в которых активным компонентом являются чистые металлы.

Еще один подход был описан в статье [107], где авторы использовали в качестве нагревательного элемента коммерческий карбид кремния, он же являлся носителем для активного компонента, в данном случае никеля. Выбор карбида кремния обусловлен его высокой термической стойкостью, устойчивостью к окислению, коррозии и деформации под нагрузкой. Через кварцевый реактор, заполненный катализатором, подавался электрический ток, что позволило нагреть систему до 800°C. Стоит отметить, что применение омического нагрева в каталитических системах скорее является исключением и вряд ли может быть массово использовано в большинстве промышленных процессов.

Второй тип резистивного нагрева — системы с элементами, нагревающими собой различные технологические блоки внутри или снаружи реактора. Сами элементы при этом не участвуют в химических процессах.

В 2015 г. для реактора компании Siemens [108] была предложена технология нагрева за счет выделения тепла на кремниевых стержнях, через которые подавался постоянный ток. Заявленная температура работы реактора составляла 1373 К при количестве стержней 24 шт. Авторы провели моделирование нагрева данной системы и сравнили ее с промышленными аналогами. Результаты расчета показали, что снизить энергопотребление можно за счет увеличения радиуса стержней, их расположения в реакторе и обработки стенок реактора более подходящими материалами. Имеются данные [109] по использованию в качестве нагревательного материала углеродного волокна с возможностью нанесения на него каталитически активных компонентов, однако полноценных каталитических систем такого типа пока не разработано.

В патентах [110–112] описаны каталитические системы, использующие резистивный нагрев, для проведения высокотемпературных газофазных реакций, в частности парового риформинга метана. Для увеличения эффективности теплообмена между нагревателем и газовым сырьем авторы использовали монолитную реакционную зону, представляющую собой матрицу с пористой структурой либо каналами цилиндрической формы. Отдельное внимание авторы работы [110] уделяют безопасности таких реакторов: корпус реакторного блока помещен в герметичную рубашку с двойными стенками, предусмотрена возможность ее заполнения инертным газом. В патенте [112] отличительной особенностью является возможность замены каталитического картриджа, что позволяет в зависимости от состава сырья быстро подбирать наиболее эффективные катализаторы.

Помимо разработанных реакторных систем, в литературе приводятся работы по моделированию каталитических процессов с использованием электронагревательного оборудования. Так, в работе [113] авторы предлагают модульные конфигурации реакторов с электрическим резистивным нагревом для эндотермических реакций крекинга и парового риформинга углеводородов. Блок каждого каталитического модуля состоит из проводов/трубок, расположенных параллельно или последовательно, что позволяет получить равномерное распределение тепла в зоне реакции. В работе [9] был выполнен расчет с помощью ПО “AspenPlus” для технологической схемы гидрирования CO_2 в метанол. Расчеты показали, что использование реактора с электрическим нагревом повышает общую энергетическую эффективность процесса и позволяет упростить процесс переработки CO_2 по сравнению с существующими технологическими схемами.

В ближайшее время в ЕС планируют реализовать ряд промышленных проектов с использованием электрореакторов. В частности, в Баварии будет построена пилотная установка по производству водорода из биомассы [114, 115]. Новая технология позволит резко снизить энергозатраты при получении водорода за счет интеграции резистивного нагрева в химический реактор. Компания EReTech предлагает разработать реактор с электрическим нагревом для парового риформинга метана, используя установку мощностью 250 кВт. В качестве основы будет использован реактор компании Surox, который

содержит структурированный катализатор на керамическом носителе. Согласно проекту, реактор будет производить примерно 400 кг водорода в день, что сравнимо с коммерческой установкой риформинга биогаза. В случае успеха планируется провести масштабирование установки и повысить ее мощность до 20 МВт.

Таким образом, резистивный нагрев уже сегодня широко применяется в химической промышленности, заменяя традиционные паровые нагреватели в резервуарах, теплотрассах, трубах, фитингах и других технологических блоках, что за редким исключением невозможно сделать МВН и ИН. Обратная ситуация обстоит с резистивным электрообогревом реакторов, данное направление пока находится только в процессе разработки. Количество исследований в этой области увеличивается, но в настоящее время не реализован ни один промышленный проект, их создание планируется в Европе только после 2025 г.

В конце обзора хотелось отметить альтернативный способ нагрева. В работе [116] описан химический реактор мощностью 15 кВт, способный преобразовывать солнечную/электрическую энергии в тепло, что позволило поддерживать температуру внутри реактора до 1700°C. Процесс нагрева заключается в аккумулировании света от мощных ламп на оптическую линзу, которая позволяет сконцентрировать энергию лучей на нагреваемом объекте — реакторе из нержавеющей стали с системой охлаждения. В случае коммерческого образца вместо ламп используется солнечный свет, который направляют на линзу с помощью гелиостатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одним из наиболее перспективных сценариев декарбонизации современной промышленности является замена традиционных нагревательных систем, основанных на использовании энергии ископаемого топлива, на электрические системы нагрева: контактные — резистивный нагрев; бесконтактные — индукционный, радиочастотный и микроволновый типы нагрева. Уровень технологической готовности соответствующих систем варьируется от лабораторных прототипов до промышленных установок.

Из перечисленных видов электронагрева широкое распространение имеют лишь системы

резистивного нагрева, их КПД в зависимости от технологического исполнения нагревателя может достигать более 95%, в отличие от традиционного нагрева, где КПД варьируется от ~70–90%. В этой связи сегодня активно развивается рынок высокоомощных электронагревателей для подогрева технологических потоков, применяемых на современных нефтеперерабатывающих заводах. Существенным недостатком такого типа нагрева является малый коэффициент теплопередачи, что ограничивает применимость для нагрева промышленных реакторов. Пока не существует крупнотоннажных предприятий/заводов, использующих исключительно резистивный нагрев. К сожалению, резистивный нагрев не позволит оптимизировать потребление энергии в химических процессах или добиться технологического прорыва в эффективности промышленного оборудования.

Бесконтактный нагрев находится в начале своего пути по внедрению в химическую промышленность и в основном представлен исследовательскими концептами. Это связано с низким уровнем фундаментальных знаний механизма бесконтактного нагрева, необходимостью подбора специальных материалов, способных нагреваться в электромагнитном поле, сложностью применяемого оборудования и др. Несмотря на это, бесконтактные системы нагрева вызывают большой интерес, что связано с его преимуществами, которых нельзя добиться при контактном нагреве:

- возможность быстрого и сверхбыстрого нагрева вещества, что может позволить вывести каталитические процессы на новый уровень энергоэффективности;

- возможность точечного нагрева частиц или групп частиц, которые участвуют в химическом превращении, что позволит снизить общее энергопотребление установки;

- возможность достижения существенно более высоких температур по сравнению с традиционным нагревом, что открывает перспективы его использования в плазмохимических процессах;

- высокий КПД (более 90%).

Список потенциальных преимуществ не ограничивается перечисленными, поэтому уже сегодня появляются компании, которые активно

разрабатывают и производят готовые аппараты и установки с использованием микроволнового и индукционного нагрева. Возможно, в ближайшем будущем именно бесконтактный нагрев станет основной альтернативой существующим системам нагрева. Также весьма перспективным выглядит комбинирование электронагрева различных типов для обеспечения оптимальной энергоэффективности производств.

Поскольку возобновляемая электроэнергия становится все более доступной и универсальной формой энергии на Земле, производства, работающие на электричестве, будут играть решающую роль в переходе к экономически выгодному и экологически чистому производству топлив и химических продуктов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Денису Баранову, научному сотруднику Institute for Functional Intelligent Materials (NUS), Сингапур, за консультирование и помощь в подготовке разделов, связанных с физическими аспектами бесконтактного электронагрева.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Максимов А. Л. является главным редактором журнала “Нефтехимия”. Дементьев К. И. является заместителем главного редактора журнала “Нефтехимия”. Остальные авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Петр Сергеевич, к.х.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3140-3035>

Дементьев Константин Игоревич, к.х.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8102-8624>

Паланкоев Тимур Ахметович, к.х.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9880-6755>

Максимов Антон Львович, д.х.н., чл.-корр. РАН,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9297-4950>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. URL: <https://www.eia.gov/energyexplained/use-of-energy/industry.php> / сайт американской статистики и анализа “U.S. Energy Information Administration” (дата обращения 28.03.2023).
2. Jeffry L., Ong M.Y., Nomanbhay S., Mofijur M., Mubashir M., Show P.L. Greenhouse gases utilization: a review // *Fuel*. 2021. V. 301. ID121017. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121017>
3. Tanha Z.M., B.N., Baghmisheh G., Younesi H. Greenhouse gas emission estimation of flaring in a gas processing plant: technique development // *Process Saf. Environ. Prot.* 2019. V. 123. P. 289–298. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.01.008>
4. Harrison K. The political economy of British Columbia's carbon tax // *OECD Environment Working Papers*. 2013. № 63. P. 1–22. <https://doi.org/10.1787/5k3z04gkxhkg-en>
5. URL: https://taxation-customs.ec.europa.eu/green-taxation-0/carbon-border-adjustment-mechanism_en / сайт Европейской комиссии “Carbon Border Adjustment Mechanism” (дата обращения 25.12.2023).
6. Bloess A., Schill W.P., Zerrahn A. Power-to-heat for renewable energy integration: a review of technologies, modeling approaches, and flexibility potentials // *Appl. Energy*. 2018. V. 212. P. 1611–1626. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.073>
7. Sandaka B.P., Kumar J. Alternative vehicular fuels for environmental decarbonization: a critical review of challenges in using electricity, hydrogen, and biofuels as a sustainable vehicular fuel // *Chem. Eng. J. Adv.* 2023. V. 14. ID100442. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.100442>
8. Foit S.R., Vinke I.C., de Haart L.G.J., Eichel R.A. Power-to-syngas: an enabling technology for the transition of the energy system? // *Angew. Chem., Int. Ed.* 2017. V. 56. № 20. P. 5402–5411. <https://doi.org/10.1002/anie.201607552>
9. Basini L.E., Furesi F., Baumgärtl M., Mondelli N., Pauletto G. CO₂ capture and utilization (CCU) by integrating water electrolysis, electrified reverse water gas shift (E-RWGS) and methanol synthesis // *J. Cleaner Prod.* 2022. V. 377. ID134280. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134280>
10. Sequeira C.A.C., Santos D.M.F. Electrochemical routes for industrial synthesis // *J. Braz. Chem. Soc.* 2009. V. 20. P. 387–406. <https://doi.org/10.1590/S0103-50532009000300002>
11. Sender M., Ziegenbalg D. Light sources for photochemical processes — estimation of technological potentials // *Chem. Ing. Tech.* 2017. V. 89. № 9. P. 1159–1173. <https://doi.org/10.1002/cite.201600191>
12. Yao Y., Pan Y., Liu S. Power ultrasound and its applications: a state-of-the-art review // *Ultrason. Sonochem.* 2020. V. 62. ID104722. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104722>
13. Marshall R.J., Walsh F.C. A review of some recent electrolytic cell designs // *Surf. Technol.* 1985. V. 24. № 1. P. 45–77. [https://doi.org/10.1016/0376-4583\(85\)90015-9](https://doi.org/10.1016/0376-4583(85)90015-9)
14. Palys M.J., Daoutidis P. Power-to-X: a review and perspective // *Comput. Chem. Eng.* 2022. V. 165. ID107948. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107948>
15. Stankiewicz A.I., Nigar H. Beyond electrolysis: old challenges and new concepts of electricity-driven chemical reactors // *React. Chem. Eng.* 2020. V. 5. № 6. P. 1005–1016. <https://doi.org/10.1039/D0RE00116C>
16. Houlding T.K., Rebrov E.V. Application of alternative energy forms in catalytic reactor engineering // *Green Process. Synth.* 2012. V. 1. № 1. P. 19–31. <https://doi.org/10.1515/greenps-2011-0502>
17. Piyasena P., Dussault C., Koutchma T., Ramaswamy H.S., Awuah G.B. Radio frequency heating of foods: principles, applications and related properties — a review // *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2003. V. 43. № 6. P. 587–606. <https://doi.org/10.1080/10408690390251129>
18. Richardson P. *Thermal Technologies in Food Processing*. Cambridge: Woodhead publishing limited, 2001. P. 163–177.
19. Rudnev V., Loveless D., Cook R.L. *Handbook of Induction Heating*. Boca Raton: CRC Press, 2017. ID816. <https://doi.org/10.1201/9781315117485-3>
20. De Alwis A.A.P., Fryer P.J. The use of direct resistance heating in the food industry // *J. Food Eng.* 1990. V. 11. № 1. P. 3–27. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(90\)90036-8](https://doi.org/10.1016/0260-8774(90)90036-8)
21. Gedye R., Smith F., Westaway K., Ali H., Baldisera L., Laberge L., Rousell J. The use of microwave ovens for rapid organic synthesis // *Tetrahedron Lett.* 1986. V. 27. № 3. P. 279–282. [https://doi.org/10.1016/S0040-4039\(00\)83996-9](https://doi.org/10.1016/S0040-4039(00)83996-9)
22. Rana K.K., Rana S. Microwave reactors: a brief review on its fundamental aspects and applications // *Open Access Library Journal*. 2014. V. 1. № 6. P. 1–20. <https://doi.org/10.4236/oalib.1100686>
23. Dinesen T.R.J., Tse M.Y., Depew M.C., Wan J.K.S. A mechanistic study of the microwave induced catalytic decompositions of organic halides // *Res. Chem. Intermed.* 1991. V. 15. № 2. P. 113–127. <https://doi.org/10.1163/156856791X00020>

24. Zhang X., Hayward D.O. Applications of microwave dielectric heating in environment-related heterogeneous gas-phase catalytic systems // *Inorg. Chim. Acta*. 2006. V. 359. № 11. P. 3421–3433. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2006.01.037>
25. Durka T., Van Gerven T., Stankiewicz A. Microwaves in heterogeneous gas-phase catalysis: experimental and numerical approaches // *Chem. Eng. Technol.* 2009. V. 32. № 9. P. 1301–1312. <https://doi.org/10.1002/ceat.200900207>
26. Sun J., Wang W., Yue Q. Review on microwave-matter interaction fundamentals and efficient microwave-associated heating strategies // *Materials*. 2016. V. 9. № 4. ID231. <https://doi.org/10.3390/ma9040231>
27. Рязанов А.Г., Казбекова К.К., Барышев И.С., Сенин А.В., Михайлов Г.Г. Исследование процесса воздействия электромагнитного поля СВЧ на нагрев цинксодержащих продуктов // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy*. 2021. Т. 21. № 2. С. 5–17. <https://doi.org/10.14529/met210201>
28. Priecel P., Lopez-Sanchez J.A. Advantages and limitations of microwave reactors: from chemical synthesis to the catalytic valorization of biobased chemicals // *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2019. V. 7. № 1. P. 3–21. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b03286>
29. Kappe C.O. Controlled microwave heating in modern organic synthesis // *Angew. Chem., Int. Ed.* 2004. V. 43. № 46. P. 6250–6284. <https://doi.org/10.1002/anie.200400655>
30. Zhang X., Hayward D.O., Mingos D.M.P. Microwave dielectric heating behavior of supported MoS₂ and Pt catalysts // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2001. V. 40. № 13. P. 2810–2817. <https://doi.org/10.1021/ie0007825>
31. Patil N., Mishra N.K., Saed M.A., Green M.J., Wilhite B.A. Radio frequency driven heating of catalytic reactors for portable green chemistry // *Adv. Sustainable Syst.* 2020. V. 4. № 11. ID2000095. <https://doi.org/10.1002/adsu.202000095>
32. Einaga H., Nasu Y., Oda M., Saito H. Catalytic performances of perovskite oxides for CO oxidation under microwave irradiation // *Chem. Eng. J.* 2016. V. 283. P. 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.07.051>
33. Pentsak E.O., Cherepanova V.A., Ananikov V.P. Dynamic behavior of metal nanoparticles in Pd/C and Pt/C catalytic systems under microwave and conventional heating // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2017. V. 9. № 42. P. 36723–36732. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b09173>
34. Zhang X., Hayward D.O., Mingos D.M.P. Apparent equilibrium shifts and hot-spot formation for catalytic reactions induced by microwave dielectric heating // *Chem. Commun.* 1999. № 11. P. 975–976. <https://doi.org/10.1039/A901245A>
35. Nigar H., Sturm G.S.J., Garcia-Baños B., Peñaranda-Foix F.L., Catalá-Civera J.M., Mallada R., Stankiewicz A., Santamaría J. Numerical analysis of microwave heating cavity: combining electromagnetic energy, heat transfer and fluid dynamics for a NaY zeolite fixed-bed // *Appl. Therm. Eng.* 2019. V. 155. P. 226–238. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.117>
36. Ramirez A., Hueso J.L., Abian M., Alzueta M.U., Mallada R., Santamaria J. Escaping undesired gas-phase chemistry: microwave-driven selectivity enhancement in heterogeneous catalytic reactors // *Sci. Adv.* 2019. V. 5. № 3. ID eaau9000. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau9000>
37. Kappe C.O. How to measure reaction temperature in microwave-heated transformations // *Chem. Soc. Rev.* 2013. V. 42. № 12. P. 4977–4990. <https://doi.org/10.1039/C3CS00010A>
38. Will H., Scholz P., Ondruschka B., Burckhardt W. Multimode microwave reactor for heterogeneous gas-phase catalysis // *Chem. Eng. Technol.* 2003. V. 26. № 11. P. 1146–1149. <https://doi.org/10.1002/ceat.200303036>
39. Gangurde L.S., Sturm G.S.J., Devadiga T.J., Stankiewicz A.I., Stefanidis G.D. Complexity and challenges in noncontact high temperature measurements in microwave-assisted catalytic reactors // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2017. V. 56. № 45. P. 13379–13391. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b02091>
40. Bogdal D., Bednarz S., Lukasiewicz M. Microwave induced thermal gradients in solventless reaction systems // *Tetrahedron*. 2006. V. 62. № 40. P. 9440–9445. <https://doi.org/10.1016/j.tet.2006.07.038>
41. Glaspell G., Fuoco L., El-Shall M.S. Microwave synthesis of supported Au and Pd nanoparticle catalysts for CO oxidation // *J. Phys. Chem. B*. 2005. V. 109. № 37. P. 17350–17355. <https://doi.org/10.1021/jp0526849>
42. Eryildirim B., Arbag H., Oktar N., Dogu G. Comparison of microwave and conventionally heated reactor performances in catalytic dehydrogenation of ethane // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2021. V. 46. № 7. P. 5296–5310. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.067>
43. Conde L.D., Marín C., Suib S.L. Oligomerization of methane via microwave heating using Raney nickel catalyst // *J. Catal.* 2003. V. 218. № 1. P. 201–208. [https://doi.org/10.1016/S0021-9517\(03\)00083-6](https://doi.org/10.1016/S0021-9517(03)00083-6)
44. Nguyen H.M., Sunarso J., Li C., Pham G.H., Phan C., Liu S. Microwave-assisted catalytic methane reforming: a review // *Appl. Catal., A*. 2020. V. 599. ID117620. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2020.117620>

45. Lawan I., Garba Z.N., Zhou W., Zhang M., Yuan Z. Synergies between the microwave reactor and CaO/zeolite catalyst in waste lard biodiesel production // *Renewable Energy*. 2020. V. 145. P. 2550–2560. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.008>
46. Ge S., Yek P.N.Y., Cheng Y.W., Xia C., Wan Mahari W.A., Liew R.K., Peng W., Yuan T.Q., Tabatabaei M., Aghbashlo M., Sonne C., Lam S.S. Progress in microwave pyrolysis conversion of agricultural waste to value-added biofuels: a batch to continuous approach // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2021. V. 135. ID110148. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110148>
47. Dios García I. de Stankiewicz A., Nigar H. Syngas production via microwave-assisted dry reforming of methane // *Catal. Today*. 2021. V. 362. P. 72–80. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2020.04.045>
48. Julian I., Ramirez H., Hueso J.L., Mallada R., Santamaria J. Non-oxidative methane conversion in microwave-assisted structured reactors // *Chem. Eng. J.* 2019. V. 377. ID119764. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.08.150>
49. URL: <https://www.sairem.com> / сайт фирмы “Sairem”, 2020 (дата обращения: 28.03.2023).
50. Eghbal S.F., Ghorbani M., Stankiewicz A., Nigar H. Coaxial traveling-wave microwave reactors: design challenges and solutions // *Chem. Eng. Res. Des.* 2020. V. 153. P. 677–683. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.11.022>
51. Komorowska-Durka M., Loo M.B., Sturm G.S.J., Radoiu M., Oudshoorn M., Van Gerven T., Stankiewicz A.I., Stefanidis G.D. Novel microwave reactor equipment using internal transmission line (INTLI) for efficient liquid phase chemistries: a study-case of polyester preparation // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2013. V. 69. P. 83–89. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2013.03.003>
52. URL: <https://mwcc.jp> / сайт фирмы “Microwave Chemical Co., Ltd.” (дата обращения 26.12.2023).
53. URL: <https://www.pyrowave.com/en/equipments/pw6> / сайт фирмы “Pyrowave”, 2021–2023 (дата обращения 28.03.2023).
54. Vishnuram P., Ramachandiran G., Sudhakar Babu T., Nastasi B. Induction heating in domestic cooking and industrial melting applications: a systematic review on modelling, converter topologies and control schemes // *Energies*. 2021. V. 14. № 20. ID6634. <https://doi.org/10.3390/en14206634>
55. Evans M.N. A reactor for high-temperature pyrolysis and oxygen isotopic analysis of cellulose via induction heating // *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 2008. V. 30. № 14. P. 2211–2219. <https://doi.org/10.1002/rcm.3603>
56. Latifi M., Chaouki J. A novel induction heating fluidized bed reactor: its design and applications in high temperature screening tests with solid feedstocks and prediction of defluidization state // *AIChE J.* 2015. V. 61. № 5. P. 1507–1523. <https://doi.org/10.1002/aic.14749>
57. Erickson C.J. Handbook of Electrical Heating for Industry. NY: IEEE; illustrated edition, 1994. P. 145–180.
58. Archibald R.C., May N.C., Greensfelder B.S. Experimental catalytic and thermal cracking at high temperature and high space velocity // *Ind. Eng. Chem.* 1952. V. 44. № 8. P. 1811–1817. <https://doi.org/10.1021/ie50512a032>
59. Patent GB № 2210286A. Griffith J.T., Gardner D.A. Method of performing endothermic catalytic reactions.
60. Patent US № 5958273A. Koch T.A., Krause K.R., Mehdizadeh M., Sengupta S.K., Blackwell B.E. Induction heated reactor apparatus.
61. Ceylan S., Coutable L., Wegner J., Kirschning A. Inductive heating with magnetic materials inside flow reactors // *Chem. Eur. J.* 2011. V. 17. № 6. P. 1884–1893. <https://doi.org/10.1002/chem.201002291>
62. Ceylan S., Friese C., Lammel C., Mazac K., Kirschning A. Inductive heating for organic synthesis by using functionalized magnetic nanoparticles inside microreactors // *Angew. Chem., Int. Ed.* 2008. V. 47. № 46. P. 8950–8953. <https://doi.org/10.1002/anie.200801474>
63. Chatterjee S., Degirmenci V., Rebrov E.V. Design and operation of a radio-frequency heated micro-trickle bed reactor for consecutive catalytic reactions // *Chem. Eng. J.* 2015. V. 281. P. 884–891. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.06.096>
64. Chatterjee S., Degirmenci V., Aiouache F., Rebrov E.V. Design of a radio frequency heated isothermal micro-trickle bed reactor // *Chem. Eng. J.* 2014. V. 243. P. 225–233. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.12.059>
65. Fitch N.E. Induction electric furnace. Patent US № 1830481A.
66. Hiter H.F. Process and apparatus for melting glass by electricity. Patent US № 1906594A.
67. Maurice D. Heating and melting process of vitreous materials and furnace therefor. Patent US № 3205292A.
68. Apple J.M., Zak T. Regulated flow glass melting furnace. Patent US № 3244495A.
69. Schwenninger R.L. A induction heating vessel. Patent US № 4633481A.
70. Varsano F., Bellusci M., La Barbera A., Petrecca M., Albino M., Sangregorio C. Dry reforming of methane powered by magnetic induction // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2019. V. 44. № 38. P. 21037–21044. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.055>

71. Patent US № 7070743B2. *Benny E. Blackwell B.E., Fallon C.K., Kirby G.S., Mehdiqadeh M., Koch T.A., Pereira C.J., Sengupta S.K.* Induction-heated reactors for gas phase catalyzed reactions.
72. *Fireteanu V., Paya B., Nuns J., Neau Y., Tudorache T., Spahiu A.* Medium frequency induction-heated chemical reactor with cooling metallic envelope of the tank // *COMPEL — Int. J. for Comput. and Mat. in Electric. and Electronic Engin.* 2005. V. 24. № 1. P. 324–333.
<https://doi.org/10.1108/03321640510571345>
73. *Fang X., Lu J., Wang J., Yang J.* Parameter optimization and prediction model of induction heating for large-diameter pipe // *Math. Probl. Eng.* 2018. V. 2018. P. 1–12.
<https://doi.org/10.1155/2018/8430578>
74. URL: <http://inductionheater-inc.com/induction-heating-for-chemical-reactor.html> / сайт фирмы “Shenzhen Biyuanda Technology Co. Ltd. (BIYDA)” (дата обращения 28.03.2023).
75. URL: <https://dw-inductionheater.com/product/induction-reactor-heating/> / сайт фирмы “HLQ Induction Equipment Co., Ltd.” (дата обращения 28.03.2023).
76. URL: <http://www.interpowereurope.com/interpower-induction-products/induction-heating-for-vessels-batch-reactors/> / сайт фирмы “Interpowereurope” (дата обращения 28.03.2023).
77. URL: <https://www.ift.org/news-and-publications/food-technology-magazine/issues/2016/august/columns/processing-radio-frequency-processing-of-food/> / сайт института “Institute of Food Technologists” (дата обращения 28.03.2023).
78. *Awuah G.B., Ramaswamy H.S., Tang J.* Radio-Frequency Heating in Food Processing: Principles and Applications. Boca Raton: CRC Press, 2014. P. 3–31.
79. *Patil N., Camacho A.C., Mishra N.K., Singhla P., Sweeney C.B., Saed M.A., Radovic M., Green M.J.* Radio frequency and microwave heating of preceramic polymer nanocomposites with applications in mold-free processing // *Adv. Eng. Mater.* 2019. V. 21. № 8. ID1900276.
<https://doi.org/10.1002/adem.201900276>
80. *Marra F., Zhang L., Lyng J.G.* Radio frequency treatment of foods: review of recent advances // *J. Food Eng.* 2009. V. 91. № 4. P. 497–508.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.10.015>
81. *Ni Y., Mulier S., Miao Y., Michel L., Marchal G.* A review of the general aspects of radiofrequency ablation // *Abdominal Imaging.* 2005. V. 30. № 4. P. 381–400.
<https://doi.org/10.1007/s00261-004-0253-9>
82. *Zhou X., Wang S.* Recent developments in radio frequency drying of food and agricultural products: a review // *Drying Technol.* 2019. V. 37. № 3. P. 271–286.
<https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1452255>
83. *Zhou B., Avramidis S.* On the loss factor of wood during radio frequency heating // *Wood Sci. Technol.* 1999. V. 33. № 4. P. 299–310.
<https://doi.org/10.1007/s002260050117>
84. URL: <https://radiofrequency.com/> / сайт фирмы “Radio Frequency Co.” (дата обращения 28.03.2023).
85. URL: <https://www.stalam.com/eng/> / сайт фирмы “Stalam Radio Frequency Equipment” (дата обращения 28.03.2023).
86. URL: <https://www.strayfield.co.uk/> / сайт фирмы “Strayfield” (дата обращения 28.03.2023).
87. *Anas M., Zhao Y., Saed M.A., Ziegler K.J., Green M.J.* Radio frequency heating of metallic and semi-conducting single-walled carbon nanotubes // *Nanoscale.* 2019. V. 11. № 19. P. 9617–9625.
<https://doi.org/10.1039/C9NR01600G>
88. *Ioffe M.S., Pollington S.D., Wan J.K.S.* High-power pulsed radio-frequency and microwave catalytic processes: selective production of acetylene from the reaction of methane over carbon // *J. Catal.* 1995. V. 151. № 2. P. 349–355.
<https://doi.org/10.1006/jcat.1995.1037>
89. *Liu S., McDonald T., Wang Y.* Producing biodiesel from high free fatty acids waste cooking oil assisted by radio frequency heating // *Fuel.* 2010. V. 89. № 10. P. 2735–2740.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.03.011>
90. *Liu S., Wang Y., McDonald T., Taylor S.E.* Efficient production of biodiesel using radio frequency heating // *Energy Fuels.* 2008. V. 22. № 3. P. 2116–2120.
<https://doi.org/10.1021/ef800038g>
91. *Faudot E., Devaux S., Moritz J., Heuraux S., Molina Cabrera P., Brochard F.* A linear radio frequency plasma reactor for potential and current mapping in a magnetized plasma // *Rev. Sci. Instrum.* 2015. V. 86. № 6. P. 063502.
<https://doi.org/10.1063/1.4921905>
92. *Ghorui S., Sahasrabudhe S., Dhamale G., Kanhe N., Mathe V., Bhoraskar S., Das A.* Characteristics of synthesized alumina nanoparticles in a high-pressure radio frequency thermal plasma reactor // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2014. V. 42. № 3. P. 759–766.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2014.2299871>
93. *Lewis J.* Decarbonising fired process heaters with zero-emission electric heat // *Decarbonisation Technology.* 2022. V. Nov. P. 81–86.
94. *Long D.* Decarbonisation, electrification and the case for modern electric process heaters // *Decarbonisation Technology.* 2020. V. Jul. P. 1–4.
95. URL: <https://masterwatt.ru/> / сайт фирмы ООО “Мастер БАТТ” (дата обращения 28.03.2023).
96. URL: <https://elektroteni.ru/> / сайт фирмы ООО “ПК Марион” (дата обращения 28.03.2023).

97. URL: <https://polymernagrev.ru> / сайт фирмы ООО “Полимернагрев” (дата обращения 28.03.2023).
98. Jones M. Electric process heaters help decarbonise petrochemical refining // *Decarbonisation Technology*. 2022. V. Nov. P. 75–79.
99. URL: <https://www.watlow.com> / сайт фирмы “Watlow” (дата обращения 28.03.2023).
100. URL: <https://www.san-as.com> / сайт фирмы “SAN Electro Heat” (дата обращения 28.03.2023).
101. URL: <https://www.tutco.com> / сайт фирмы “TUTCO Heating Solution Group” (дата обращения 28.03.2023).
102. Пилипенко А.И. Промышленные электронагреватели // *Промышленный электрообогрев и электроотопление*. 2012. № 1. С. 28–34.
103. URL: <https://www.watlow.com/Products/Heaters/Circulation-Heaters/HELIMAX-Heat-Exchanger> / страница продукта фирмы “Watlow” (дата обращения 28.03.2023).
104. Roux S., Courel M., Picart-Palmade L., Pain J.P. Design of an ohmic reactor to study the kinetics of thermal reactions in liquid products // *J. Food Eng.* 2010. V. 98. № 4. P. 398–407.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.01.013>
105. Wismann S.T., Engbæk J.S., Vendelbo S.B., Bendixen F.B., Eriksen W.L., Aasberg-Petersen K., Frandsen C., Chorkendorff I., Mortensen P.M. Electrified methane reforming: a compact approach to greener industrial hydrogen production // *Science*. 2019. V. 364. № 6442. P. 756–759.
<https://doi.org/10.1126/science.aaw8775>
106. Li J., Lu X., Wu F., Cheng W., Zhang W., Qin S., Wang Z., You Z. Electroplated palladium catalysts on FeCr alloy for joule-heat-ignited catalytic elimination of ethylene in air // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2017. V. 56. № 44. P. 12520–12528.
<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b03044>
107. Renda S., Cortese M., Iervolino G., Martino M., Meloni E., Palma V. Electrically driven SiC-based structured catalysts for intensified reforming processes // *Catal. Today*. 2022. V. 383. P. 31–43.
<https://doi.org/10.1016/j.cattod.2020.11.020>
108. Nie Z., Hou Y., Xie G., Cui Y., Yu X. Electric heating of the silicon rods in Siemens reactor // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2015. V. 90. P. 1026–1033.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.040>
109. Kim T., Chung D.D.L. Carbon fiber mats as resistive heating elements // *Carbon*. 2003. V. 41. № 12. P. 2436–2440.
[https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(03\)00288-4](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(03)00288-4)
110. Gal E., Bassen D., Bevelsdorf M., Lina M., Mennarich H., Webb R. Electrically heated reactor and process for carrying out gas reactions at a high temperature using this reactor. Patent CN № 100381200C.
111. Burch S.D., Pettit W.H., Goebel S.G. Fuel processor primary reactor and combustor startup via electrically-heated catalyst. Patent US № 7862631 B2.
112. Mortensen P.M., Klein R., Aasberg-Petersen K. Steam reforming heated by resistance heating. Patent EP № 3801870 B1.
113. Balakotaiah V., Ratnakar R.R. Modular reactors with electrical resistance heating for hydrocarbon cracking and other endothermic reactions // *AIChE J.* 2022. V. 68. № 2. ID e17542.
<https://doi.org/10.1002/aic.17542>
114. URL: <https://energynews.biz/renewable-hydrogen-production-facility-as-a-test-bed> / страница ресурса “H₂ Energy News” (дата обращения 09.01.2024).
115. URL: <https://www.world-energy.org/article/12675.html> / страница ресурса “World-Energy” (дата обращения 09.01.2024).
116. Rowe S.C., Hischer I., Palumbo A.W., Chubukov B.A., Wallace M.A., Viger R., Lewandowski A., Clough D.E., Weimer A.W. Nowcasting, predictive control, and feedback control for temperature regulation in a novel hybrid solar-electric reactor for continuous solar-thermal chemical processing // *Sol. Energy*. 2018. V. 174. P. 474–488.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.09.005>