

УДК 621.365
DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.173

ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ (ОБЗОР)*

М.А. Молодцова, асп., инж.

Ю.В. Севастьянова, канд. техн. наук, доц., дир. инновационно-технологического центра «Современные технологии переработки биоресурсов Севера»

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова,
наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002;

e-mail: m.molodcova@narfu.ru, J.Sevastyanova@narfu.ru

Бурное развитие естественных наук, которое наблюдается в последние десятилетия, опирается на существенное расширение технических возможностей проведения исследований и тесное переплетение достижений химии, физики, биологии и других областей естествознания. Это способствовало тому, что во второй половине XX в. появились новые области химии (лазерная химия, плазмо- и фотохимия, химия высоких давлений). В последние 10...15 лет уже XXI в. к их числу присоединилось и перспективное направление – микроволновая химия, которая возникла на стыке физики и химии. Она включает химические превращения с участием твердых диэлектриков и жидкостей, связанные с использованием энергии микроволнового (или сверхвысокочастотного) поля. Установлено, что микроволновое излучение способно в десятки и сотни раз ускорять многие химические реакции, вызывать быстрый объемный нагрев жидких и твердых образцов, эффективно (быстро и полностью) удалять влагу из твердых, в том числе и высокопористых, препаратов, модифицировать свойства различных сорбентов. Применение энергии микроволн вместо используемой в настоящее время тепловой энергии теплоносителей в промышленных установках позволяет значительно упростить технологические схемы, исключить все процессы и аппараты, связанные с подготовкой теплоносителя, а также снизить вредные выбросы в атмосферу. Ограничения для применения микроволнового излучения связаны главным образом с отсутствием оборудования промышленного назначения.

Ключевые слова: микроволновое излучение, сверхвысокочастотное излучение, растительное сырье, древесина, традиционный нагрев.

*Статья подготовлена при финансовой поддержке Правительства Архангельской области (грант № 10-2016-04а).

Для цитирования: Молодцова М.А., Севастьянова Ю.В. Возможности и перспективы использования микроволнового излучения в промышленности (обзор) // Лесн. журн. 2017. № 2. С.173–187. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.173

Введение

Подобно многим другим открытиям, существенно повлиявшим на повседневную жизнь людей, открытие теплового воздействия микроволн произошло случайно. В 1945 г. американский физик Перси Спенсер, работая в лаборатории компании «Raytheon» с устройством, излучавшим сверхвысокочастотные (СВЧ) волны, обнаружил возможность использования микроволн для приготовления пищи. В 1947 г. появились первые приборы для приготовления пищи с помощью микроволн [10].

Первоначальный всплеск развития СВЧ-технологий был обусловлен военными заказами на разработку радаров во время Второй мировой войны. Это подтолкнуло ученых к изучению свойств микроволн и связанных с ними технологий. Большая часть информации по данной теме была занесена в серию томов, подготовленных Массачусетским технологическим институтом и Национальным исследовательским комитетом обороны США [28].

К настоящему времени накоплен большой опыт по использованию микроволнового излучения (МВИ) в различных отраслях науки и техники, в сельском хозяйстве, медицине, быту. Однако литературы по этому вопросу не так много. В России и за рубежом издаются книги, обзоры, статьи, посвященные отдельным вопросам использования МВИ. К сожалению, эти книги малодоступны для широкого круга читателей в России. Большинство научных публикаций, особенно в области микроволновой химии, носит фрагментарный характер. Практически отсутствует информация о применении МВИ в промышленном производстве. Недостаточно известны новейшие разработки микроволновых установок как лабораторного, так и промышленного масштаба. Несмотря на достаточно большой объем научных публикаций об ускорении химических реакций при микроволновом воздействии причина этого явления остается до конца не ясной [16].

Микроволны и процессы, протекающие при микроволновом излучении

Термин «микроволны» был заимствован из зарубежной литературы и используется в последние годы наряду с ранее употреблявшимся термином «сверхвысокая частота», который определяет тот же диапазон частот [14].

К микроволновой (МВ) области спектра электромагнитного излучения относится диапазон частот 300 ГГц...300 МГц (длина волны от 1 мм до 1 м), который располагается в интервале между инфракрасным и радиоволновым излучением (см. таблицу). Для применения в промышленности, науке и медицине используется в основном частота 2450 МГц [27].

Шкала электромагнитных излучений

Часть спектра	Характеристики	
Невидимая	<i>Вид излучения</i>	
	Радиоволновое	Частота, Гц $10^3 \dots 10^9$
	Микроволновое	$10^9 \dots 10^{12}$
	Инфракрасное	$10^{12} \dots 10^{15}$
	Ультрафиолетовое	$10^{15} \dots 10^{18}$
	Рентгеновское	$10^{18} \dots 10^{21}$
	Гамма-излучение	$10^{21} \dots 10^{23}$
Видимая	<i>Цвет спектра</i>	
	Красный	Частота, Гц $3,95 \cdot 10^{14} \dots 4,83 \cdot 10^{14}$
	Оранжевый	$4,83 \cdot 10^{14} \dots 5,08 \cdot 10^{14}$
	Желтый	$5,08 \cdot 10^{14} \dots 5,36 \cdot 10^{14}$
	Зеленый	$5,36 \cdot 10^{14} \dots 6,00 \cdot 10^{14}$
	Голубой	$6,00 \cdot 10^{14} \dots 6,25 \cdot 10^{14}$
	Синий	$6,25 \cdot 10^{14} \dots 6,66 \cdot 10^{14}$
	Фиолетовый	$6,66 \cdot 10^{14} \dots 7,89 \cdot 10^{14}$

МВИ большой интенсивности используется для бесконтактного нагрева тел в печах (как в бытовых, так и промышленных установках для термообработки металлов), основным элементом в которых является магнетрон*, малой интенсивности – преимущественно в портативных средствах связи (рациях, сотовых телефонах (кроме первых поколений), устройствах Bluetooth, WiFi и WiMAX) [6].

МВИ может взаимодействовать с веществами, находящимися в газообразном, жидком или твердом состоянии. На анализе взаимодействия МВИ с молекулами основана широко используемая в научных исследованиях радиочастотная спектроскопия, позволяющая получать информацию о свойствах молекул.

По разным причинам препаративное проведение химических процессов в газовой фазе с использованием энергии МВ поля пока еще не начато. Для практики наиболее интересно взаимодействие МВИ с жидкими и твердыми веществами. Заметное поглощение МВИ наблюдается при облучении многих жидкостей и жидких растворов. Особенно сильное поглощение отмечено для воды и водных растворов. Взаимодействие МВИ с твердыми образцами может сопровождаться его отражением, поглощением и прохождением через объем образца без ослабления [2].

Устройства для осуществления МВ облучения называют микроволновыми печами. Принципиальная схема микроволновой установки включает:

*Термин «магнетрон» был введен в употребление американским физиком А. Халлом.

генератор электромагнитного излучения (чаще всего магнетрон), волновод, камеру для нагрева (или резонатор), системы вентиляции и охлаждения магнетрона, систему защиты от избыточного излучения, систему измерительных приборов и блок управления (см. рисунок) [16].

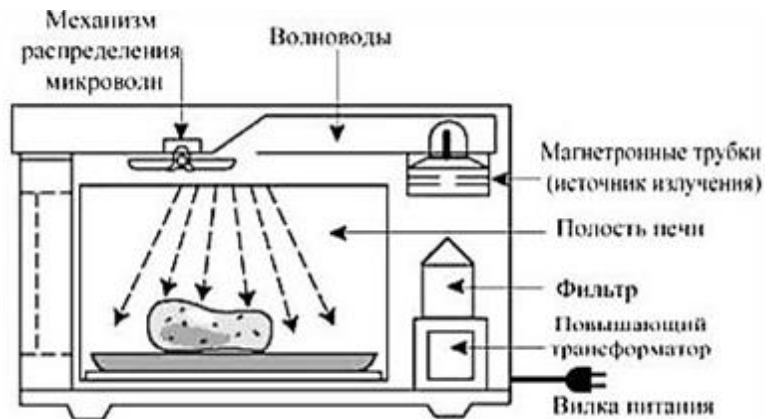


Схема микроволновой установки

Впервые результаты теоретических и экспериментальных исследований работы магнетрона и его конструкция были опубликованы в 1921 г. А. Халлом. В 1940–70-е гг. инженерами многих стран (Великобритания, СССР, США, Япония и др.) в конструкцию магнетрона было внесено множество изменений, для систем радиолокации разработано более тысячи типов многорезонаторных магнетронов и построены специализированные промышленные предприятия по их производству как в России, так и за рубежом [20].

Как было сказано выше, источником МВИ служит магнетрон, представляющий собой цилиндрический диод. В диоде имеется цилиндрический катод, вдоль которого направлено внешнее магнитное поле. В окружающем катод цилиндрическом аноде находится кольцо из взаимосвязанных объемных резонаторов. Разность потенциалов между катодом и анодом достигает нескольких киловольт. Перемещение генерируемых нагретым катодом электронов в магнитном поле приводит к появлению в магнетроне не только высокочастотных колебаний, но и колебаний самих электронов [2]. Колеблющиеся электроны через антенну передают микроволновую энергию в виде электромагнитного излучения в окружающее пространство. Эта энергия по полному металлическому волноводу направляется в специальное устройство – резонатор, далее излучение из резонатора попадает в рабочую зону печи, где и происходит МВ нагрев образцов [2].

При воздействии электромагнитного поля частотой 2450 МГц полярные или поляризуемые молекулы или ионы вещества ориентируются в соответствии с пульсациями поля. Из-за несоответствия по фазе между колебаниями поля и вращением диполей энергия излучения превращается в кинетическую

энергию молекул, происходит разогрев вещества изнутри и во всем объеме в отличие от традиционного нагрева поверхности при теплопередаче. Способность вещества нагреваться под воздействием микроволн характеризуется его диэлектрической проницаемостью [13, 20].

Для того чтобы МВИ не покидало внутреннего пространства печи и не оказывало вредного воздействия на организм человека, используют металлические отражающие стенки, переднюю стеклянную дверцу печи экранируют металлической сеткой. При работе печи в МВ энергию превращается примерно 50 % расходуемой печью электроэнергии, остальная энергия рассеивается как тепловая в окружающее пространство [2].

Первые работы по нагреву при проведении химических реакций появились в 1986 г. В частности, был обнаружен так называемый микроволновый эффект, заключающийся в увеличении скорости химических реакций (или инициации реакций), не протекающих в обычных условиях. Поиском систем, в которых проявляется этот эффект, и его объяснением до настоящего времени заняты ученые многих стран мира. Появилось новое научное направление – микроволновая химия. Химики стали использовать бытовые микроволновые печи, модифицируя их для проведения химических процессов [2, 3].

Практика использования микроволнового излучения

Впервые микроволновый нагрев пищевых продуктов начали исследовать в 1950-е гг. в Институте пищевых технологий (Массачусетс, США) и в Лаборатории исследования пищевых продуктов «Raytheon». Промышленное применение микроволнового нагрева в пищевой отрасли было освоено в 1960-х гг. МВ обработка позволила значительно интенсифицировать технологические процессы производства пищевых продуктов (сушка и досушивание, стерилизация, пастеризация, размораживание, сублимация и др.) и реализовать безотходные и энергосберегающие технологии в пищевой промышленности, значительно увеличить выпуск готовой продукции без больших капитальных затрат на строительство предприятий, улучшить санитарно-гигиенические условия труда [16].

К настоящему времени в пищевой отрасли созданы установки периодического действия, конвейерные микроволновые установки, установки с комбинированным нагревом (вакуумные, конвективные, с инфракрасным нагревом и др.) [16].

В конце 1950-х – начале 1960-х гг. в Уфимском государственном нефтяном техническом университете уже проводились опытно-конструкторские работы по созданию микроволновых установок для отверждения и укрепления грунтов в ответственных местах прокладки нефте- и газопроводов, а также для укрепления фундаментов зданий. В результате обработки микроволнами грунт приобретал прочность кирпича или искусственного камня [1, 8].

В органической химии всплеск исследовательской активности в использовании микроволн произошел после публикации в 1986 г. двух статей французских авторов, которые использовали бытовые микроволновые печи для нагрева реакционных смесей и, несмотря на трудности технического характера, наблюдали значительное сокращение продолжительности реакций Дильса-Альдера, Кляйзена, этерификации, окисления и других при сравнимых выходах целевых продуктов [24, 25].

При воздействии МВИ на растворы передача энергии осуществляется по двум механизмам: за счет переориентации диполей растворителя и в результате перемещения в нем заряженных ионов растворенного вещества, т. е. посредством вращения диполей и ионной проводимости. Влияние МВИ на химические превращения в растворах, структуру растворителя и состояние сольватированных ионов рассмотрено в работах [11, 26]. Обсуждаются и специфические тепловые эффекты, обусловленные природой воздействия МВИ на систему. МВ нагрев, в отличие от традиционного термического, осуществляется равномерно по всему объему, вследствие чего температура раствора оказывается выше, чем у его окружения (стенок сосуда, газовой фазы над раствором и т. д.). При этом раствор может нагреться до температуры, превышающей температуру кипения при атмосферном давлении. Кроме того, в гетерогенных системах возможны термические эффекты на границе раздела фаз, обусловленные межфазной поляризацией. Неоднородность нагрева, связанная с различной способностью веществ поглощать энергию МВИ, приводит к нетривиальным результатам при объемном удалении воды, синтезе на твердых поверхностях, получении и использовании катализаторов [26, 30]. Различие в способности исходных веществ и продуктов реакции поглощать энергию МВИ может служить причиной возникновения автокаталитических реакций [25]. В реакциях органического синтеза непосредственное поглощение энергии промежуточным комплексом способствует значительному увеличению выхода продуктов реакции по сравнению с термическим нагревом при той же объемной температуре [29]. Существенное влияние на протекание химических процессов и состав образующихся продуктов оказывает временной интервал, который для МВ нагрева значительно выше, чем для термического. В результате состав продуктов реакции для процессов, включающих конкурирующие реакции, может быть различным [12].

Для ускорения процессов пробоподготовки, кислотного сжигания, экстракции различных природных и синтетических образцов создавались различные лабораторные микроволновые установки. На 46-й Питсбургской конференции по аналитической химии и прикладной спектроскопии, проходившей в марте 1995 г. (США, Новый Орлеан), около 20 фирм демонстрировали микроволновые установки, предназначенные для химического анализа. Среди лидеров производства микроволновой техники «СЕМ» (США), «Milestone» (Италия), «Prolabo» (Франция) [23].

Успешное применение микроволновой активации в химии различных гетероциклических соединений описано Н.Н. Романовым и др. [19]. Главное преимущество использования МВИ – уменьшение времени проведения реакций до нескольких минут с увеличением скорости реакции на 2-3 порядка.

Одной из важнейших задач современной неорганической химии и неорганического материаловедения является разработка новых методов синтеза и спекания материалов, позволяющих снизить энергозатраты и увеличить скорость образования конечных продуктов. Начиная с 1970-х гг. появилось большое число работ, посвященных использованию МВ нагревания для спекания различных веществ: от слабо поглощающих оксидов алюминия (Al_2O_3) и титана (TiO_2) до активно взаимодействующих с МВ полем уже при комнатной температуре карбидов кремния (SiC) и бора (B_4C), боридов титана (TiB_2). Эксперименты по спеканию индивидуальных оксидов (в частности, оксидов алюминия и циркония) в микроволновой установке с частотой излучения 2,45 ГГц впервые были проведены еще в 1976 г. При этом были установлены как преимущества (высокая скорость спекания, равномерное нагревание всего объема образца), так и специфические недостатки микроволновой обработки (сложность измерения температуры и опасность возникновения локальных перегревов) [5].

Доказана эффективность использования МВИ в процессе переработки целлюлозосодержащего сырья. Приведенные в работе [9] данные показали, что в случае МВ нагрева гидролиз целлюлозы протекает быстрее по сравнению с классическим. МВ нагрев оказался примерно в 3-4 раза эффективнее традиционного нагрева в пересчете на выход сахаров.

Одним из актуальных направлений химической переработки растительного сырья, которое с каждым годом вызывает все больший интерес у исследователей всего мира, является химическое модифицирование древесины и непищевой части биомассы однолетних растений без предварительного разделения на отдельные компоненты. В работе М.Ю. Чепрасовой [22] проведено сравнение свойств продуктов реакции карбоксиметилирования древесины осины, полученных в среде различных растворителей под воздействием МВИ и с использованием традиционного нагрева. Продукты карбоксиметилирования растительного сырья, полученные при использовании МВИ, как и продукты, полученные суспензионным способом при традиционном нагреве, проявляют сорбционную емкость по отношению к ионам железа (III) и могут быть использованы в качестве сорбента

В обзоре [14] рассмотрены основные области применения МВИ в химии и технологии растительного сырья: экстракция из природных растительных объектов низкомолекулярных соединений самых разных классов как в индивидуальном состоянии, так и в виде композиций (например, эфирные масла); выделение высокомолекулярных структурных биополимеров (целлюлоза, лигнин, гемицеллюлозы); процессы высушивания растительных объектов; пиролиз древесины; гидролиз высокомолекулярных компонентов раститель-

ного сырья; химическое модифицирование биополимеров растительного происхождения в целях получения простых и сложных эфиров, а также других производных; химическое модифицирование растительного сырья без предварительного разделения на отдельные компоненты и другие процессы. Показана эффективность МВИ в данных процессах. Отмечено, что оно в целом значительно ускоряет процесс и снижает затраты электроэнергии на его проведение. Приведены примеры реализации описанных процессов в промышленности.

В книге В.С. Побединского [15] обобщены результаты научных исследований отечественных и зарубежных ученых по применению энергии электромагнитных волн СВЧ диапазонов для повышения эффективности технологических процессов текстильного и красильно-отделочного производств (фиксация крутки пряжи, сушка, отварка, беление, карбонизация, крашение и заключительная отделка текстильных материалов). Из работы следует, что применение МВИ при белении содержащих хлопок тканей позволяет получить высокие показатели белизны и капиллярности при сокращении длительности процесса в 20–30 раз. Дополнительно детально исследовано влияние СВЧ излучения (2450 МГц) на свойства хлопчатобумажной ткани. Установлено, что независимо от степени подготовки и влажности текстильного материала СВЧ обработка незначительно влияет на прочностные показатели и эластические свойства хлопчатобумажной ткани.

Необходимость высушивания древесины и пиломатериалов перед их дальнейшим использованием привела к созданию сушильных установок различного типа, микроволновый способ сушки показал свою эффективность и в данном производстве. Сушка древесины заключается в удалении влаги путем испарения. Механические методы обезвоживания к ней не применимы. Ротационное и ультразвуковое обезвоживание недостаточно (до 42...48 %) снижают влажность древесины. Важным преимуществом МВ нагрева является возможность практического применения избирательного, равномерного, сверхчистого, саморегулирующегося нагрева обрабатываемого материала [23].

Механизм сушки твердых горючих ископаемых (ТГИ – торф, бурый уголь) под воздействием микроволновой обработки изложен в работе [27]. Вода, присутствующая в ТГИ в виде влаги, обладает очень высокой диэлектрической проницаемостью. Так, если вода входит в материал как свободная (гигроскопическая) влага, то ее диэлектрическая проницаемость составляет около 80,0. Для воды, адсорбируемой в виде монослоя, диэлектрическая проницаемость равна 2,5. При увеличении содержания адсорбируемой жидкости наступает момент, когда адсорбция прекращается, и, наряду со связанной водой, появляется свободная, что увеличивает диэлектрическую проницаемость [21].

Вследствие высокой диэлектрической проницаемости вода поглощает большую часть МВИ, нагревается и начинает интенсивно испаряться. Так как

внутри образца вода находится в замкнутом пространстве, то с началом ее кипения создается избыточное давление, вследствие чего температура кипения воды повышается. Распределение температуры в объеме материала при МВИ создает наиболее благоприятные условия для ускорения диффузии паровоздушной смеси из внутренних слоев материала к периферийным, так как градиенты температуры, давления и концентрации, определяющие скорость диффузии, здесь направлены в одну сторону [7]. Благодаря этому эффективная сушка обрабатываемого материала, во-первых, происходит при меньших энергозатратах, так как здесь не требуется прогрев всей массы материала для достижения интенсивного испарения воды, во-вторых, повышается качество готового продукта за счет уменьшения температуры нагрева материала при его обработке [7].

МВИ перспективно и для применения в горном деле: при оттаивании мерзлых грунтов, разупрочнении и дроблении пород, разделении руды на составляющие, полном извлечении металлов из отходов и шламов [17]. В Якутском НЦ СО РАН (Институт физико-технических проблем Севера, Институт горного дела Севера) под руководством Н.И. Рябеца проведены масштабные исследования диэлектрических свойств мерзлых пород в МВ диапазоне, а также теоретические и экспериментальные исследования оттаивания мерзлых грунтов под воздействием МВИ [23]. Использование СВЧ генераторов улучшает эффективность обработки горных пород и уменьшает затраты на их обработку.

Заключение

В современной истории науки и техники применение микроволнового воздействия прошло необычный путь – от оборонной промышленности, минуя другие отрасли, в бытовую технику и лишь затем – в науку и промышленность. Внедрение микроволновых технологий в практику сдерживалось отсутствием моделей процессов, протекающих при воздействии МВИ на различные вещества, алгоритмов и автоматизированных систем управления технологическими процессами, методики проектирования микроволновых технологических установок. С появлением дешевых источников МВИ (магнетронов) и разработкой моделей микроволновых технологических процессов МВ технологии стали находить широкое применение в пищевой, медицинской, фармацевтической, целлюлозно-бумажной отраслях народного хозяйства, в промышленности строительных материалов, сельском хозяйстве, горном деле и др. Появляются новые перспективные направления применения микроволновых технологий: исследование химического состава пищевых продуктов (например для определения содержания в них тяжелых металлов); МВ химический синтез лекарственных средств; экология – для очистки грунта от промышленных отходов.

Годовой рынок МВ технологических установок оценивается в более чем 500 млн долл. США [18].

В настоящее время МВИ наиболее широко используют в лабораторной практике при выполнении анализов продуктов питания, технических материалов (сплавы, шлаки, другие отходы производства). Интенсивность проведения таких анализов существенно увеличилась в связи с ростом числа объектов окружающей среды при решении экологических задач и повышением внимания к содержанию в пищевых продуктах различных неорганических и органических примесей.

Кроме того, МВИ применяют во многих промышленных процессах: сушка пищевых продуктов, сушка и склеивание древесины, производство фарфоровых и фаянсовых изделий, строительство, разработка нефтяных месторождений и т. д.

Нагрев МВ излучением отличается высокой скоростью и большой эффективностью. Применение энергии микроволн вместо используемой в настоящее время тепловой энергии теплоносителей в промышленных установках позволяет значительно упростить технологическую схему, исключив процессы и аппараты, связанные с подготовкой теплоносителя, а также вредные выбросы в атмосферу.

Необходимо отметить, что исследования, связанные с определением аспектов воздействия МВИ на протекание ряда химических и нефтехимических процессов, являются важным и актуальным направлением интенсификации этих процессов как на лабораторном уровне, так и в промышленном масштабе.

Ограничения для применения МВИ в промышленности связаны главным образом с отсутствием оборудования промышленного назначения. Все опытно-конструкторские работы заканчиваются на этапе, проводимом на лабораторном оборудовании СВЧ-диапазона. Более широкое внедрение СВЧ-оборудования в различные отрасли возможно при совершенствовании данного класса техники в направлении создания промышленных образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 1807587СССР, МКИ Н 05 В 6/64. Установка для обработки грунтовых блоков СВЧ-излучением / Бабин Л.А., Спектор Ю.И., Смирнов Ю.Ю., Гончарова Л.В., Егоров Ю.М., Удалов В.Н., Рагуз В.В.; заявл. 09.08.1989; опубл. 07.04.1993, Бюл. № 13.
2. Бердоносов С.С. Микроволновая химия // Соросовский образоват. журн. 2001. № 1. С. 32–38.
3. Болотов В.А., Черноусов Ю.Д., Удалов Е.И., Танашев Ю.Ю., Пармон В.Н. Особенности проведения высокотемпературных химических реакций под действием сверхвысокочастотного поля // Вестн. НГУ. Сер.: Физика. 2009. Т. 4, вып. 2. С. 78–83.
4. Большая российская энциклопедия. Режим доступа: [http:// www.bigenc.ru](http://www.bigenc.ru).

5. Ванецев А.С. Спекание оксидных порошков с использованием микроволнового воздействия. Описание задач спецпрактикума «Методы получения и анализа неорганических материалов». М.: МГУ, 2011. 32 с.

6. Википедия – сводная энциклопедия. Режим доступа: <http://www.wikipedia.org/>.

7. Данилов О.С., Михеев В.А., Москаленко Т.В. Микроволновая обработка твердых горючих ископаемых // Горн. информ.-аналит. бюл. 2010. № 3. С. 203–208.

8. Денисов О.Л., Спектор Ю.И., Бабин Л.А., Гончаров Б.В. Применение СВЧ-поля для усиления оснований и устройства фундаментов // Тр. Рос. конф. по механике грунтов и фундаментостроению. 13–15 сент. 1995 г. СПб.: СПбГАСУ, 1995. Ч. 2. С. 277–281.

9. Кисурич И.В., Арапов К.А., Гуцин П.А., Иванов Е.В., Винокуров В.А. Перспективы использования микроволнового излучения в процессе переработки целлюлозо-содержащего сырья // Башк. хим. журн. 2010. Т. 17, № 3. С. 167–170.

10. Коляда В. Прирученные невидимки. Все о микроволновых печах // Наука и жизнь. 2004. № 10. С.136–142.

11. Кубракова И.В. Микроволновое излучение в аналитической химии: возможности и перспективы использования // Успехи химии. 2002. Т. 71, № 4. С. 327–340.

12. Кубракова И.В., Мясоедова Г.В., Еремин С.А., Плетнев И.В., Моходоева О.Б., Морозова В.А., Хачатрян К.С. Подготовка проб в условиях микроволнового нагрева // Методы и объекты хим. анализа. 2006. Т. 1, № 1. С. 27–34.

13. Кузнецов Д.В., Раев В.А., Куранов Г.Л., Арапов О.В., Костиков Р.Р. Применение микроволнового излучения в синтезе органических соединений // Журн. общей химии. 2005. Т. 41, № 12. С. 1757–1787.

14. Маркин В.И., Чепрасова М.Ю., Базарнова Н.Г. Основные направления использования микроволнового излучения при переработке растительного сырья (обзор) // Химия растит. сырья. 2014. № 4. С. 21–42.

15. Побединский В.С. Активирование процессов отделки текстильных материалов энергией электромагнитных волн ВЧ, СВЧ и УФ диапазонов. Иваново: ИХР РАН, 2000. 127 с.

16. Рахманкулов Д.Л., Бикбулатов И.Х., Шулаев Н.С., Шавишуква С.Ю. Микроволновое излучение и интенсификация химических процессов. М.: Химия, 2003. 220 с.

17. Рахманкулов Д.Л., Шавишуква С.Ю., Вихарева И.Н., Чанышев Р.Р. Применение микроволнового излучения для извлечения металлов из промышленных отходов // Башк. хим. журн. 2008. Т. 15, № 2. С. 53–55.

18. Розанов С.В. Исследование процессов массо- и теплопереноса в различных средах под воздействием микроволнового излучения и разработка энергосберегающих микроволновых технологий и установок промышленного применения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2004. 18 с.

19. Романова Н.Н., Кудан П.В., Гравис А.Г., Бундель Ю.Г. Применение микроволновой активации в химии гетероциклических соединений // Химия гетероциклических соединений. 2000. № 10. С. 1308–1320.

20. Сапунов Г.С. Ремонт микроволновых печей. М.: Солон-Пресс, 1998. 268 с.

21. Федюнин П.А., Дмитриев Д.А., Воробьев А.А., Чернышов В.Н. Микроволновая термовлагодетермия / под. общ. ред. П.А. Федюнина. М.: Машиностроение-1, 2004. 208 с.

22. *Чепрасова М.Ю.* Карбоксиметилирование растительного сырья под воздействием микроволнового излучения: автореф. дис. ... канд. хим. наук. Барнаул, 2012. 22 с.
23. *Шавиукова С.Ю.* Интенсификация химических процессов воздействием микроволнового излучения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2003. 24 с.
24. *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. Vol. 27. Pp. 279–282.
25. *Giguere R.J., Bray T.L., Duncan S.M., Majetich G.* Application of Commercial Microwave Ovens to Organic Synthesis // *Tetrahedron Lett.* 1986. Vol. 27. Pp. 4945–4948.
26. *Microwave Enhanced Chemistry: Fundamentals, Sample Preparation and Applications.* Ed. by H.M. Kingston, S.J. Haswell. US, Washington DC, 1997.
27. *Mingos D.M.P., Baghurst D.R.* Microwave-Assisted Solid-State Reactions Involving Metal Powders // *Chem. Soc. Rev.* 1991. No. 20. P. 1.
28. *National Research Council. Microwave Processing of Materials.* US, Washington DC, 1994.
29. *Perreux L., Loupy A.* A Tentative Rationalization of Microwave Effects in Organic Synthesis According to the Reaction Medium, and Mechanistic Considerations // *Tetrahedron Lett.* 2001. Vol. 57. P. 9199.
30. *Thiebaut J.M., Roussy G., Medjram M., Seyfield L., Garin F., Maire J.* Durable Changes of the Catalytic Properties of Alumina-Supported Platinum Induced by Microwave Irradiation // *Catal. Lett.* 1993. Vol. 21. P. 133.

Поступила 14.11.16

UDC 621.365

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.173

Opportunities and Prospects of Microwave Radiation in Industry (Review)

M.A. Molodtsova, Postgraduate Student, Engineer

Yu.V. Sevast'yanova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

Innovative Technological Center "Modern Technologies in Processing of North Biore-sources", Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: m.molodcova@narfu.ru, J.Sevastyanova@narfu.ru

The rapid development of natural sciences, based primarily on a significant expansion of technical capabilities of research and entwinement of the achievements of chemistry, physics, biology and other fields of natural sciences, has been observed in recent decades. This contributed to the appearance of new fields of chemistry (laser chemistry, plasma chemistry, photochemistry, high-pressure chemistry) in the second half of the 20th century. Microwave chemistry as a promising direction, which arose at the intersection of physics and chemistry, joined to these new branches in the last 10...15 years. It includes chemical conversions with participation of solid dielectrics and liquids associated with the use of microwave field ener-

For citation: Molodtsova M.A., Sevast'yanova Yu.V. Opportunities and Prospects of Microwave Radiation in Industry (Review). *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2017, no. 2, pp.173–187. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.173

gy or MW-field. Microwave irradiation (MWI) is capable to accelerate many chemical reactions by a factor of hundreds, cause rapid volumetric heating of liquid and solid samples, efficiently (quickly and completely) remove moisture from solids, including highly porous, drugs and modify the properties of various sorbents. The application of microwave energy instead of currently used thermal energy of heat carriers in industrial installations can significantly simplify the technological schemes, exclude all processes and devices related to the preparation of a heat carrier and reduce harmful emissions into the atmosphere. Limitations for microwave radiation application are mainly due to the lack of equipment for industrial use.

Keywords: microwave radiation, super-high-frequency radiation, plant raw material, wood, conventional heating.

REFERENCES

1. Babin L.A., Goncharova L.V., Egorov Yu.M., Udalov V.N., Spektor Yu.I., Smirnov Yu.Yu., Raguz V.V. *Ustanovka dlya obrabotki gruntovykh blokov SVCh-izlucheniem* [Installation for the Groundwater Units Treatment by Microwave Radiation]. Certificate of Authorship USSR, no. 1807587, 1993.
2. Berdonosov S.S. *Mikrovolnovaya khimiya* [Microwave Chemistry]. *Sorosovskiy obrazovat. zhurn.* [Soros Educational Journal], 2001, no. 1, pp. 32–38.
3. Bolotov V.A., Chernousov Yu.D., Udalov E.I., Tanashev Yu.Yu., Parmon V.N. *Osobennosti provedeniya vysokotemperaturnykh khimicheskikh reaktsiy pod deystviem sverkhvysokochastotnogo polya* [Features of High-Temperature Chemical Reactions under Microwave Irradiation]. *Vestn. NGU. Seriya: Fizika* [Vestnik of the Novosibirsk State University. Series: Physics], 2009, vol. 4, no. 2, pp. 78–83.
4. *Bol'shaya rossiyskaya entsiklopediya* [Great Russian Encyclopedia]. Available at: <http://www.bigenc.ru>.
5. Vanetsev A.S. *Spekanie oksidnykh poroshkov s ispol'zovaniem mikrovolnovogo vozdeystviya. Opisaniya zadach spetspraktikuma «Metody polucheniya i analiza neorganicheskikh materialov»* [Oxide Powder Sintering by Microwave Exposure. Descriptions of Special Practical Problems “Methods of Preparation and Analysis of Inorganic Materials”]. Moscow, 2011. 32 p.
6. *Vikipediya – svobodnaya entsiklopediya* [Wikipedia – Free Encyclopedia]. Available at: <http://www.wikipedia.org>.
7. Danilov O.S., Mikheev V.A., Moskalenko T.V. *Mikrovolnovaya obrabotka tverdykh goryuchikh iskopaemykh* [Microwave Processing of Solid Fuel Fossils]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], 2010, no. 3, pp. 203–208.
8. Denisov O.L., Spektor Yu.I., Babin L.A., Goncharov B.V. *Primenenie SVCh-polya dlya usileniya osnovaniy i ustroystva fundamentov* [The Use of the Microwave Field to Strengthen the Foundations]. *Tr. Ross. konf. po mekhanike gruntov i fundamentam. 13–15 sentyabrya 1995 g. Sankt Peterburg. Ch. 2* [Proc. Russ. Nation. Conf. on Soil Mechanics and Foundation. Engineering (September 13–15, 1995, St. Petersburg). Part 2]. Saint Petersburg, 1995, pp. 277–281.
9. Kisurin I.V., Arapov K.A., Gushchin P.A., Ivanov E.V., Vinokurov V.A. *Perspektivy ispol'zovaniya mikrovolnovogo izlucheniya v protsesse pererabotki tsellyulozoderzhashchego syr'ya* [Prospects for the Use of Microwave Radiation in the Conversion

of Cellulose]. *Bashkirskiy khimicheskij zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2010, vol. 17, no. 3, pp. 167–170.

10. Kolyada V. Priruchennye nevidimki. Vse o mikrovolnovykh pechakh [Tamed Invisible Creatures. Everything of Microwave Ovens]. *Nauka i zhizn'* [Science and Life], 2004, no. 10, pp. 136–142.

11. Kubrakova I.V. Mikrovolnovoe izluchenie v analiticheskoy khimii: vozmozhnosti i perspektivy ispol'zovaniya [Microwave Radiation in Analytical Chemistry: the Scope and Prospects for Application]. *Uspekhi khimii* [Russian Chemical Reviews], 2002, vol. 71, no. 4, p. 327–340.

12. Kubrakova I.V., Myasoedova G.V., Eremin S.A., Pletnev I.V., Mokhodoeva O.B., Morozova V.A., Khachatryan K.S. Podgotovka prob v usloviyakh mikrovolnovogo nagreva [Preparation of Samples under Microwave Heating]. *Metody i ob'ekty khim. analiza* [Methods and Objects of Chemical Analysis], 2006, vol. 1, no. 1, pp. 27–34.

13. Kuznetsov D.V., Raev V.A., Kuranov G.L., Arapov O.V., Kostikov R.R. Primenenie mikrovolnovogo izlucheniya v sinteze organicheskikh soedineniy [The Use of Microwave Radiation in the Organic Compounds Synthesis]. *Zhurn. obshchey khimii* [Russian Journal of General Chemistry], 2005, vol. 41, no. 12, pp. 1757–1787.

14. Markin V.I., Cheprasova M.Yu., Bazarnova N.G. Osnovnye napravleniya ispol'zovaniya mikrovolnovogo izlucheniya pri pererabotke rastitel'nogo syr'ya (obzor) [Basic Directions of Use Microwave Radiation in the Processing of Plant Raw Material (Review)]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of Plant Raw Material], 2014, no. 4, pp. 21–42.

15. Pobedinskiy V.S. Aktivirovanie protsessov otdelki tekstil'nykh materialov energiy elektromagnitnykh voln VCh, SVCh i UF diapazonov [The Process Activation of Textile Materials Finishing by the Energy of Electromagnetic Waves of RF, Microwave and Ultraviolet Ranges]. Ivanovo, 2000. 127 p.

16. Rakhmankulov D.L., Bikbulatov I.Kh., Shulaev N.S., Shavshukova S.Yu. *Mikrovolnovoe izluchenie i intensifikatsiya khimicheskikh protsessov* [Microwaves and Intensification of Chemical Processes]. Moscow, 2003. 220 p.

17. Rakhmankulov D.L., Shavshukova S.Yu., Vikhareva I.N., Chanyshv R.R. Primenenie mikrovolnovogo izlucheniya dlya izvlecheniya metallov iz promyshlennykh otkhodov [Application of Microwave Radiation for Extraction of Metals from Industrial Wastes]. *Bashkirskiy khimicheskij zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2008, vol. 15, no. 2, pp. 53–55.

18. Rozanova S.V. *Issledovanie protsessov masso- i teploperenosa v razlichnykh sredakh pod vozdeystviem mikrovolnovogo izlucheniya i razrabotka energosberegayushchikh mikrovolnovykh tekhnologiy i ustanovok promyshlennogo primeneniya: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Study of Mass and Heat Transfer in a Variety of Environments under the Influence of Microwave Radiation and the Development of Energy-Efficient Microwave Technologies and Industrial Application Systems: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs.]. Saint Petersburg, 2004. 18 p.

19. Romanova N.N., Kudan P.V., Gravis A.G., Bundel' Yu.G. Primenenie mikrovolnovoy aktivatsii v khimii geterotsiklicheskh soedineniy [The Use of Microwave Activation in Chemistry of Heterocyclic Compounds]. *Khimiya geterotsiklicheskh soedineniy* [Chemistry of Heterocyclic Compounds], 2000, no. 10, pp. 1308–1320.

20. Sapunov G.S. *Remont mikrovolnovykh pechey* [Repair of Microwave Ovens]. Moscow, 1998. 268 p.

21. Fedyunin P.A., Dmitriev D.A., Vorob'ev A.A., Chernyshov V.N. *Mikrovolnovaya termovlagometriya* [Microwave Thermo and Water Content Measurements]. Moscow, 2004. 208 p.

22. Cheprasova M.Yu. *Karboksimetilirovanie rastitel'nogo syr'ya pod vozdeystviem mikrovolnovogo izlucheniya*: avtoref. dis. ... kand. khim. nauk [Carboxymethylation of Vegetable Raw Materials under the Influence of Microwave Radiation: Cand. Chem. Sci. Diss. Abs.]. Barnaul, 2012. 22 p.

23. Shavshukova S.Yu. *Intensifikatsiya khimicheskikh protsessov vozdeystviem mikrovolnovogo izlucheniya*: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Intensification of Chemical Processes by Microwave Irradiation: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs.]. Ufa, 2003. 24 p.

24. 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, vol. 27, pp. 279–282.

25. Giguere R.J., Bray T.L., Duncan S.M., Majetich G. Application of Commercial Microwave Ovens to Organic Synthesis. *Tetrahedron Lett.*, 1986, vol. 27, pp. 4945–4948.

26. *Microwave Enhanced Chemistry: Fundamentals, Sample Preparation and Applications*. Ed. by H.M. Kingston, S.J. Haswell. US, Washington DC, 1997.

27. Mingos D.M.P., Baghurst D.R. Microwave-Assisted Solid-State Reactions Involving Metal Powders. *Chem. Soc. Rev.*, 1991, no. 20, p. 1.

28. *National Research Council. Microwave Processing of Materials*. US, Washington DC, 1994.

29. Perreux L., Loupy A. A Tentative Rationalization of Microwave Effects in Organic Synthesis According to the Reaction Medium, and Mechanistic Considerations. *Tetrahedron Lett.*, 2001, vol. 57, p. 9199.

30. Thiebaut J.M., Roussy G., Medjram M., Seyfield L., Garin F., Maire J. Durable Changes of the Catalytic Properties of Alumina-Supported Platinum Induced by Microwave Irradiation. *Catal. Lett.*, 1993, vol. 21, p. 133.

Received on November 14, 2016