

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРОЦЕСС ДЕСУЛЬФУРИЗАЦИИ МАЗУТА

Е.И. Маракина<sup>1</sup>

vioes@mail.ru

Н.С. Коботаева<sup>2</sup>

nat@ipc.tsc.ru

В.И. Сачков<sup>1</sup>

vicsachkov@ngs.ru

О.С. Андриенко<sup>3</sup>

aos@iao.ru

Т.С. Скороходова<sup>2</sup>

see@ipc.tsc.ru

<sup>1</sup> ТГУ, Томск, Российская Федерация

<sup>2</sup> ИХН СО РАН, Томск, Российская Федерация

<sup>3</sup> ИОА СО РАН, Томск, Российская Федерация

---

### Аннотация

Интенсификация многих химических процессов происходит под воздействием микроволнового излучения. Основным фактором, определяющим целесообразность использования микроволн в большинстве превращений органических соединений, является сокращение продолжительности реакции с получением максимального выхода целевого продукта. Наличие серы в нефти и нефтепродуктах губительно для оборудования переработки, а также оказывает негативное воздействие на экологию в виде отходов, образованных при переработке. В связи с этим разработка методов по удалению серосодержащих соединений из нефтепродуктов и нефти за счет их превращений (в частности, окисления) и последующего удаления весьма актуальна. Окислительное обессеривание мазута занимает до нескольких часов в зависимости от используемых реагентов. При выполнении настоящей работы была предпринята попытка значительно сократить продолжительность процесса. Рассмотрено окисление серосодержащих органических соединений мазута под действием микроволнового излучения, которое протекает в присутствии окислителя (пероксида водорода) и катализатора (диоксида титана). Установлено, что окислительное обессеривание мазута при микроволновом излучении протекает эффективно и быстро в течение 1...5 мин. Достигнута степень обессеривания 66 % при воздействии микроволнового излучения 5 мин. Изучено влияние

### Ключевые слова

*Микроволновое излучение, окислительное обессеривание, мазут, вода*

количества воды в реакционной смеси на эффективность протекания окислительного обессеривания мазута при микроволновом излучении; установлено, что оптимальное отношение вода : мазут составило (1–1,2) : 1

Поступила 20.01.2021

Принята 02.03.2021

© Автор(ы), 2021

---

**Введение.** Одним из перспективнейших направлений при создании энергосберегающих технологий является использование микроволнового излучения (МВИ). Интенсификация многих технологических процессов, таких как создание строительных материалов, разработка нефтяных месторождений, производство фарфоровых и фаянсовых изделий, сушка древесины и т. д., происходит под воздействием МВИ. Применение энергии микроволн взамен теплоносителей, используемых в большинстве промышленных установок, позволяет значительно упростить технологическую схему, исключив все процессы и аппараты, связанные с подготовкой теплоносителя [1].

Проведенные лабораторные химические исследования показали, что МВИ может во много раз ускорять многие химические реакции, вызывать быстрый объемный нагрев жидких и твердых образцов, эффективно удалять влагу из твердых материалов (соли, оксиды металлов и др.) [2, 3]. Микроволновое излучение применяют в органическом синтезе при проведении реакций в условиях нормального давления, а также при повышенном давлении с использованием автоклавов. Основным фактором, определяющим целесообразность использования микроволн в большинстве превращений органических соединений, является сокращение продолжительности реакции с получением максимального выхода целевого продукта [3]. При традиционном нагреве передача теплоты нагревателя нагреваемому объекту происходит постепенно за счет конвекции, теплопроводности и радиационного переноса тепловой энергии от внешних участков к внутренним и связана с возникновением температурного градиента. При воздействии на образец МВИ нагрев обусловлен взаимодействием МВИ с молекулами (ионами) по всему объему облучаемого материала. В результате нагрев происходит сразу по всему объему облучаемого образца. Учитывается, что использование МВИ приводит к быстрому и значительному нагреву многих органических растворителей, кроме того, способствует активации молекул реагентов и может вызвать их диссоциацию на ионы и свободные радикалы [4]. Эффективность использования микроволнового нагрева была продемонстрирована на примере реакции алкилирования ацетата калия 1-бромоктаном: выход октилацетата при термическом нагреве (100 °С, 5 ч) с использо-

ванием в качестве носителя  $\text{Al}_2\text{O}_3$  составил 93 %, с использованием  $\text{SiO}_2$  — 69,5 %; при микроволновом нагреве (600 Вт, 10 мин) 91 и 82 % соответственно [5].

Вследствие таких особенностей микроволновый нагрев стал активно использоваться для отверждения полимерных материалов, например, в стоматологии [6, 7], при получении гетерогенных катализаторов и т. д. Использование СВЧ-воздействия ускоряет процесс приготовления катализаторов, осуществляет равномерный нагрев их объемной фазы, а в некоторых случаях позволяет достичь более равномерного распределения активных компонентов [8, 9].

Много работ в микроволновой химии посвящено использованию микроволнового нагрева в синтезе металлоорганических соединений, которые синтезированы в герметичных тефлоновых сосудах. Ряд димеров  $\text{Rh(I)}$  и  $\text{Ir(I)}$ , широко используемых в металлоорганическом синтезе, был получен с высокими выходами при нагреве микроволнами продолжительностью менее 1 мин, в то время как при термическом нагреве синтез происходит в течение 4...36 ч [5].

Рассмотрено применение МВИ при переработке растительного сырья (экстракция низкомолекулярных соединений, выделение биополимеров — целлюлоза, лигнин, гемицеллюлоза, процессы высушивания, пиролиз древесины, химическое модифицирование растительного сырья без предварительного разделения на отдельные компоненты и др.) [10]. Отмечено, что использование МВИ в процессах переработки растительного сырья приводит к значительному их ускорению, а также к снижению энергозатрат, таким образом была доказана эффективность МВИ в указанных процессах.

Используют МВИ и в процессах нефтехимической переработки, во многих случаях происходит ускорение скорости реакции, увеличение селективности и выхода продуктов. Способ термической переработки высокомолекулярного углеродсодержащего сырья с вводом примесей ( $\text{Al} + \text{Al}_2\text{O}_3$ ) в зону химического превращения, которые нагреваются МВИ, предложен в [11]. Процесс проводят в жидкой кипящей фракции, что вызывает хаотичное движение частиц мелкодисперсного материала. Этот метод предлагается использовать для процессов крекинга и пиролиза мазута, отработанного масла, нефтешлама и т. п. Для получения автомобильного топлива использовали технологию получения эмульсии [12], которая заключалась в том, что исходное углеводородное автомобильное топливо смешивают с дистиллированной водой в равных соотношениях, полученную смесь подвергают воздействию МВИ в проточном реакторе (вихревой реактор с никелевыми

завихрителями). При действии МВИ на эмульсию вода (нижний слой) начинает быстро закипать и подниматься к углеводородам (верхний слой), образуя мелкодисперсную наноразмерную эмульсию [13]. В качестве сырья использовали дизельное топливо. В результате проведенных исследований удалось упростить технологический процесс получения углеродсодержащего топлива [12, 13].

Изучение аспектов воздействия МВИ на протекание процессов органического синтеза, нефтехимической переработки является весьма актуальным и перспективным направлением.

В нефтеперерабатывающей промышленности острой проблемой является повышение качества нефтепродуктов, связанное с высоким содержанием гетероатомных, в частности сероорганических соединений. Одно из приоритетных направлений в области повышения качества нефтепродуктов — окислительное обессеривание (ОО). Процесс проводят при низких значениях температуры и атмосферного давления, кроме того, окисленные серосодержащие соединения, полученные при ОО, могут быть использованы во многих областях, например металлургия, ветеринария, химическая промышленность и др. Окислительное обессеривание проводят в присутствии окислителей, в качестве которых применяют пероксид водорода, органические пероксиды, кислород, озон и др. Как правило, процессы проводят в присутствии катализаторов, соединений переходных металлов [14]. Предпочтительно применение молибденовых, ванадиевых, хромовых, титановых и других катализаторов.

*Цель работы* — исследовать ОО мазута при микроволновом воздействии, выполнить сравнительную оценку параметров процесса при термическом нагреве и при действии МВИ, а также исследовать влияние воды в реакционной системе на ОО мазута при воздействии МВИ.

**Материалы и методы решения задач.** Окислительное обессеривание мазута при воздействии МВИ осуществляли следующим образом: 10 г топочного мазута (с исходным содержанием общей серы 0,94 % (масс.)) помещали в реакционный сосуд, нагревали до температуры 50 °С, добавляли 1 % катализатора (диоксид титана), дистиллированную воду (10 мл) и на магнитной мешалке доводили до однородной массы. К полученной смеси добавляли пероксид водорода, перемешивали и подвергали воздействию МВИ в течение 1, 2, 3, 5 или 10 мин в СВЧ-печи бытового назначения. Рабочая частота излучения 2 450 МГц, максимальная выходная мощность 800 Вт. Массовое отношение окислитель : мазут 1 : (1–3). В качестве окислителя использовали 30%-ный водный раствор пероксида

водорода. Содержание серы в исходном и очищенном мазуте определяли методом сжигания в лампе по ГОСТ 19121–73 «Нефтепродукты. Метод определения содержания серы сжиганием в лампе». Окисленные органические серосодержащие соединения извлекали из мазута однократной экстракцией водным раствором диметилформаида (вода 20 % (об.)) в массовом отношении экстрагент : мазут 2 : 1. Температура экстракции 35...40 °С, продолжительность 60 мин. По окончании разделения очищенный нефтепродукт 2 раза промывали водой. Промывные воды поступали на вакуумную перегонку. Нефтепродукт подсушивали при температуре 100 °С в течение 30...60 мин. Степень обессеривания мазута определяли как отношение разности исходного и конечного содержания серы в мазуте к начальному содержанию серы в мазуте, выраженному в процентах (т. е. умноженному на 100 %).

**Результаты.** Результаты ОО мазута с использованием МВИ и без него приведены в табл. 1, 2 соответственно.

Таблица 1

**Результаты ОО мазута с применением МВИ**

Время воздействия МВИ, мин	Общее содержание серы в очищенном мазуте, % (масс.)	Степень обессеривания мазута, %
<i>Массовое отношение окислитель : мазут 1 : 3</i>		
1	0,67	28,7
2	0,63	33,0
3	0,62	34,0
5	0,60	36,2
10	0,65	30,9
<i>Массовое отношение окислитель : мазут 1 : 2</i>		
1	0,53	43,6
2	0,33	64,9
3	0,33	64,9
5	0,32	66,0
10	0,34	57,8
<i>Массовое отношение окислитель : мазут 1 : 1</i>		
1	0,55	41,5
2	0,42	55,3
3	0,38	59,6
5	0,38	59,6
10	0,41	56,4

**Результаты ОО мазута при термическом нагреве**

Время процесса*, мин	Общее содержание серы в очищенном мазуте, % (масс.)	Степень обессеривания мазута, %
60	0,62	34,0
120	0,52	44,7
180	0,41	56,4

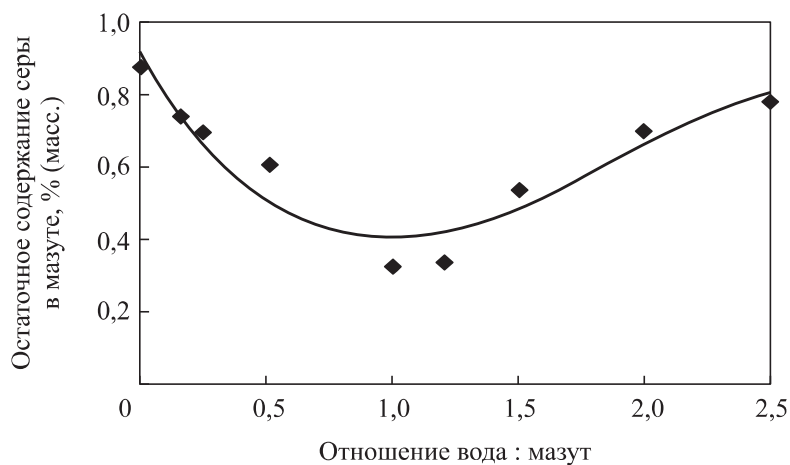
\* Обессеривание протекает при температуре 50 °С в течение всего времени. Массовое отношение мазут : окислитель 1 : 1.

Согласно результатам анализа данных, приведенных в табл. 1, ОО мазута при МВИ интенсивно протекает первые 1...3 мин, замедляясь при увеличении времени облучения. Общее содержание серы в мазуте снизилось с 0,94 до 0,33 % (масс.) при воздействии МВИ в течение 2 мин и до 0,32 % (масс.) при воздействии МВИ 5 мин (отношение окислитель : мазут 1 : 2). Степень обессеривания мазута составила 64,9 и 66,0 % соответственно.

При сопоставлении данных, приведенных в табл. 1, 2 (отношение окислитель : мазут 1 : 1), видно, что достичь соизмеримые значения степени обессеривания мазута (56,4 %) удастся при термическом нагреве в течение 180 мин, в то время как при воздействии МВИ — в течение 5 мин.

Установлено, что увеличение количества окислителя (пероксида водорода) в реакционной смеси не снижает количество серы в мазуте. Вероятно, это связано с частичным разложением пероксида водорода при воздействии МВИ.

В диапазоне значений более 300 МГц в большинстве материалов энергию электромагнитного СВЧ-поля в первую очередь поглощает вода [15], поэтому исследование влияния воды на протекание ОО мазута весьма значимо. Исследование проводили следующим образом: к мазуту добавляли различное количество воды (отношение вода : мазут 0,15–2,5), тщательно перемешивали, добавляли 1 % катализатора и окислитель (пероксид водорода) в отношении окислитель : мазут 1 : 2, все тщательно перемешивали до однородного состояния и подвергали реакционную смесь воздействию МВИ в течение 2 мин. Реакцию проводили в закрытой химической емкости. По окончании процесса проводили экстракцию окисленных серосодержащих соединений по описанному выше методу. Результаты эксперимента приведены на рисунке.



Влияние количества воды в реакционной смеси на ОО мазута при воздействии МВИ (время воздействия МВИ 2 мин)

**Обсуждение полученных результатов.** Согласно результатам исследований, ОО при МВИ протекает достаточно эффективно (см. табл. 1). Возможно, это связано с перегревом растворителя в первые минуты реакции, что и приводит к ускорению процесса. Исследователи отмечали перегрев растворителей выше точки кипения, который связывали с высокой скоростью нагрева, когда конвекция теплоты к поверхности жидкости и испарение оказываются неэффективны. При термическом нагреве характерна передача теплоты в объем вещества с его поверхности за счет теплопроводности и конвекции. Если теплопроводность объекта низка, то нагрев происходит очень медленно с локальным перегревом поверхности.

Микроволновое излучение не влияет на протекание реакций [10], состав продуктов и энергию активации. Только высокая частота и эффективность соударений реагирующих молекул при объемном тепловом эффекте и отсутствии температурных градиентов в реакционной смеси являются причинами ускорения реакций в открытой микроволновой системе. Это подтверждается и в рассматриваемом случае, когда в процессе ОО мазута при МВИ и термическом нагреве происходит образование одних и тех же окисленных продуктов (сульфонов, сульфоксидов). Окислительное обессеривание протекает достаточно быстро, удается достичь значительной степени обессеривания при малых временных затратах (2...5 мин), в то время как при термическом нагреве реакционной смеси для достижения соизмеримого значения степени обессеривания необходимо больше времени (180 мин) (см. табл. 1, 2). Такое различие времени протекания процесса, вероятно, обусловлено тем, что при традиционном

нагреве ОО лимитируется низким теплопереносом с поверхности реакционной смеси в объем. Использование МВИ при проведении указанного процесса позволяет сократить энергетические затраты, что не менее важно при прогнозировании и разработке технологических процессов.

Вода является отличным поглотителем МВИ, следовательно, наличие воды в реакционной системе определенным образом влияет на протекание исследуемого процесса. В связи с этим при проведении исследований было изучено влияние количества воды в реакционной смеси на характер протекания процесса. В процессе ОО при отсутствии воды и минимальном ее содержании (отношение вода : мазут 0,15) наблюдается вскипание реакционной смеси (размазывание по стенкам химической емкости). Увеличение количества добавляемой воды приводит к разогреву реакционной смеси, при этом смесь достаточно однородна, вскипания не наблюдается. Такое равномерное протекание реакции наблюдается до отношения вода : мазут 1,2, однако уже при отношении вода : мазут 1 заметно испарение воды (капельки на крышке химической емкости). Дальнейшее увеличение содержания воды в реакционной смеси приводит к образованию системы мазут-вода, при действии МВИ происходит вскипание воды и выбрасывание мазута из химической емкости, т. е. проведение ОО при выбранных технологических условиях затруднительно. Вследствие высокой диэлектрической проницаемости вода поглощает большую часть МВИ, нагревается и интенсивно испаряется, т. е. излишнее количество воды не приводит к сверхвысоким показателям уменьшения содержания серы в мазуте, а ведет к потерям сырья (мазута) за счет выбрасывания из реакционной зоны. Быстрый нагрев реакционной смеси может быть связан не только с эффективным поглощением микроволн водой, но и с полярными реагентами (сульфоны, сульфоксиды), которые образуются при окислении серосодержащих соединений мазута. Однако они незначительно влияют на протекание окисления. Поскольку в процессе ОО мазута при отсутствии воды под воздействием МВИ в течение 2 мин содержание серы в мазуте снижается с 0,94 (начальное) только до 0,87 % (масс.) (см. рисунок).

Сопоставляя данные, полученные при проведении ОО мазута без воды и при ее наличии (см. рисунок), было установлено, что отсутствие воды в реакционной смеси неблагоприятно влияет на протекание окисления при воздействии МВИ. Вероятно, присутствие воды не только приводит к быстрому нагреву изнутри, но и дополнительно влияет на перенос реагентов в реакционной смеси, а следовательно, позволяет протекать достаточно активно диффузии окислителя и катализатора в мазут, что приводит к ускорению окисления. В ходе исследований было показано, что даже



незначительное количество воды (1,5 мл, отношение вода : мазут 0,15) в реакционной смеси, которое не может значительно повлиять на перенос реагентов, приводит к существенному нагреву реакционной смеси изнутри, изменяет вязкость мазута. Вероятно, при этом возрастает число соударений реагирующих молекул, вследствие чего окисление серосодержащих соединений мазута под воздействием МВИ протекает заметно эффективней, чем при отсутствии воды.

Следовательно, оптимальное отношение вода : мазут в реакционной системе для проведения ОО углеводородного сырья при воздействии МВИ должно оставлять (1–1,2) : 1. При таком оптимальном содержании воды в реакционной смеси и времени воздействия МВИ 2...5 мин удастся провести ОО мазута более полно и достичь степени обессеривания более 64 %.

**Заключение.** Рассмотрено ОО мазута при воздействии МВИ. Установлено, что процесс протекает эффективно и быстро в течение 1...5 мин. Степень обессеривания составляет более 64 %. Использование МВИ в ОО мазута значительно сокращает продолжительность процесса с 180 мин при термическом нагреве до 2...5 мин при действии МВИ при прочих равных условиях. Немаловажно влияние количества воды в реакционной смеси, оптимальное отношение которой к используемому сырью (мазуту) должно составлять (1–1,2) : 1. При таком содержании воды в реакционной системе удастся провести ОО мазута достаточно продуктивно в течение 2...5 мин. Окислительное обессеривание мазута с применением МВИ является энергосберегательным, а следовательно, конкурентоспособным.

Проведенные исследования подтвердили целесообразность использования МВИ при проведении химических процессов, в частности при переработке углеводородного сырья.

Кроме того, показана роль воды в рассмотренном химическом процессе при действии МВИ, которая достаточно весома, ее присутствие влияет на характер протекания процесса и на его продолжительность.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Молодцова М.А., Севастьянова Ю.В. Возможности и перспективы использования микроволнового излучения в промышленности (обзор). *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*, 2017, № 2, с. 173–187.

DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.2.173>

[2] Даминев Р.Р., Бикбулатов И.Х., Шарипова Э.Б. и др. Использование электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона для сушки минеральных солей. *Известия вузов. Химия и химическая технология*, 1999, т. 42, № 2, с. 135–138.

- [3] Рахманкулов Д.Л., ред. Микроволновое излучение и интенсификация химических процессов. М., Химия, 2003.
- [4] Бердонос С.С. Микроволновая химия. *Соросовский образовательный журнал*, 2001, № 1, с. 32–38.
- [5] Шавшукова С.Ю. Интенсификация химических процессов воздействием микроволнового излучения. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа, НИИРеактив, 2003.
- [6] Новикова О.Б. Клинико-экспериментальное обоснование возможности СВЧ-излучения для полимеризации пластмасс в стоматологии. Автореф. ... дис. канд. мед. наук. М., ММСИ, 1997.
- [7] Сутугина Т.Ф., Поюровская И.Я., Руденко К.Н. и др. Способ получения акрилового базиса микроволновой полимеризации. Патент РФ 2171104. Заявл. 07.09.2000, опубл. 27.07.2001.
- [8] Даминев Р.Р., Бикбулатов И.Х., Юнусов Д.Ш. и др. Подготовка модифицированных катализаторов для использования в процессах синтеза мономеров под действием СВЧ-излучения. *Башкирский химический журнал*, 2009, т. 16, № 3, с. 110–112.
- [9] Каримов О.Х., Даминев Р.Р., Касьянова Л.З. и др. Применение СВЧ-излучения при приготовлении металлооксидных катализаторов. *Фундаментальные исследования*, 2013, № 4, с. 801–805.
- [10] Маркин В.И., Чепрасова М.Ю., Базарнова Н.Г. Основные направления использования микроволнового излучения при переработке растительного сырья (обзор). *Химия растительного сырья*, 2014, № 4, с. 21–42.  
DOI: <https://doi.org/10.14258/jcprm.201404597>
- [11] Пармон В.Н., Танашев Ю.Ю., Удалов Е.И. и др. Способ термической переработки высокомолекулярного углеродсодержащего сырья в более легкие соединения. Патент РФ 2385344. Заявл. 24.07.2008, опубл. 27.03.2010.
- [12] Коваленко К.В., Кривохижа С.В., Чайков Л.Л. Способ приготовления мелкодисперсной эмульсии в органической среде. Патент РФ 2349631. Заявл. 20.11.2007, опубл. 20.03.2009.
- [13] Шукин В.А. Способ получения углеводородного автомобильного топлива. Патент РФ 2545059. Заявл. 20.05.2013, опубл. 27.03.2015.
- [14] Kong L., Li G., Wang X., et al. Oxidative desulfurization of organic sulfur in gasoline over Ag/TS-1. *Energy Fuels*, 2006, vol. 20, iss. 3, pp. 896–902.  
DOI: <https://doi.org/10.1021/ef050252r>
- [15] Каримов О.Х., Даминев Р.Р., Касьянова Л.З. и др. Исследование процесса сушки алюмохромового катализатора в электромагнитном поле СВЧ-диапазона. *Нефтегазовое дело: электронный научный журнал*, 2013, № 4.  
URL: [http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/KarimovOKh/KarimovOKh\\_1.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/KarimovOKh/KarimovOKh_1.pdf)

**Маракина Елена Ивановна** — канд. хим. наук, старший научный сотрудник лаборатории химических технологий ТГУ (Российская Федерация, 634050, Томск, пр-т Ленина, д. 36).

**Коботаева Наталья Станиславовна** — д-р хим. наук, старший научный сотрудник лаборатории каталитической переработки легких углеводородов ИХН СО РАН (Российская Федерация, 634055, Томск, Академический пр-т, д. 4).

**Сачков Виктор Иванович** — д-р хим. наук, заведующий лабораторией химических технологий ТГУ (Российская Федерация, 634050, Томск, пр-т Ленина, д. 36).

**Андриенко Олег Семенович** — канд. хим. наук, научный сотрудник лаборатории квантовой электроники ИОА СО РАН (Российская Федерация, 634055, Томск, пл. Академика Зуева, д. 1).

**Скороходова Татьяна Сергеевна** — канд. хим. наук, старший научный сотрудник лаборатории каталитической переработки легких углеводородов ИХН СО РАН (Российская Федерация, 634055, Томск, Академический пр-т, д. 4).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Маракина Е.И., Коботаева Н.С., Сачков В.И. и др. Исследование влияния микроволнового излучения на процесс десульфуризации мазута. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2021, № 6 (99), с. 96–109.

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-6-96-109>

## STUDY OF MICROWAVE RADIATION INFLUENCE ON FUEL OIL DESULPHURIZATION PROCESS

E.I. Marakina<sup>1</sup>

vioes@mail.ru

N.S. Kobotaeva<sup>2</sup>

nat@ipc.tsc.ru

V.I. Sachkov<sup>1</sup>

vicsachkov@ngs.ru

O.S. Andrienko<sup>3</sup>

aos@iao.ru

T.S. Skorokhodova<sup>2</sup>

see@ipc.tsc.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch,  
Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation

<sup>3</sup> V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch,  
Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation

---

### Abstract

Many chemical processes are intensified by microwave radiation. The main factor determining the usefulness of microwaves in most transformations of organic compounds is the reaction time reduction to obtain the

### Keywords

*Microwave radiation, oxidative desulfurization, fuel oil, water*

maximum yield of the target product. The presence of sulphur in oil and petroleum products is detrimental to refining equipment, and also has a negative impact on the environment in the form of waste generated during refining. In this connection development of methods on removal of sulphur-containing compounds from oil products and oil by their transformation (in particular oxidation) and subsequent removal is very significant. Oxidative desulphurisation of fuel oil takes up to several hours depending on the reagents used. In this work an attempt has been made to significantly reduce the duration of the process. Oxidation of sulphur-containing organic compounds in fuel oil under microwave radiation has been considered, which proceeds in the presence of an oxidizer (hydrogen peroxide) and a catalyst (titanium dioxide). It was found that the oxidative desulphurization of fuel oil at microwave radiation proceeds effectively and quickly within 1–5 min. The achieved degree of desulphurization is 66 % when exposed to microwave radiation for 5 min. The influence of the amount of water in the reaction mixture on the efficiency of oxidative desulphurization of fuel oil under microwave radiation has been studied; it was found that the optimum ratio of water : fuel oil was (1–1.2) : 1

Received 20.01.2021

Accepted 02.03.2021

© Author(s), 2021

---

## REFERENCES

- [1] Molodtsova M.A., Sevast'yanova Yu.V. Opportunities and prospects of microwave radiation in industry (review). *Lesnoy zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2017, no. 2, pp. 173–187 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.2.173>
- [2] Daminev R.R., Bikbulatov I.Kh., Sharipova E.B., et al. Using electromagnetic radiation of the ultrahigh frequency range for drying mineral salts. *Izvestiya VUZov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [ChemChemTech], 1999, vol. 42, no. 2, pp. 135–138 (in Russ.).
- [3] Rakhmankulov D.L. (ed.). *Mikrovolnovoe izluchenie i intensivatsiya khimicheskikh protsessov* [Microwave radiation and intensification of chemical processes]. Moscow, Khimiya Publ., 2003.
- [4] Berdonosov S.S. Microwave chemistry. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal*, 2001, no. 1, pp. 32–38 (in Russ.).
- [5] Shavshukova S.Yu. Intensifikatsiya khimicheskikh protsessov vozdeystviem mikrovolnovogo izlucheniya. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk [Intensification of chemical processes by exposure to microwave radiation. Abs. Cand. Sc. (Eng.) Diss.]. Ufa, NIIReaktiv Publ., 2003 (in Russ.).

- [6] Novikova O.B. Kliniko-eksperimental'noe obosnovanie vozmozhnosti SVCh izlucheniya dlya polimerizatsii plastmass v stomatologii. Avtoref. dis. kand. med. nauk [Clinical and experimental substantiation of possibility of microwave radiation to polymerize plastic in dentistry. Abs. Cand. Sc. (Med.) Diss.]. Moscow, MMSI Publ., 1997 (in Russ.).
- [7] Sutugina T.F., Poyurovskaya I.Ya., Rudenko K.N., et al. Sposob polucheniya akrilovogo bazisa mikrovolnovoy polimerizatsii [Method for producing acryl base of microwave polymerization]. Patent RU 2171104. Appl. 07.09.2000, publ. 27.07.2001 (in Russ.).
- [8] Daminev R.R., Bikbulatov I.Kh., Yunusov D.Sh., et al. Preparation of the modified catalysts for use in processes of synthesis monomers under action of the microwave radiation. *Bashkirskiy khimicheskiy zhurnal* [Bashkir Chemistry Journal], 2009, vol. 16, no. 3, pp. 110–112 (in Russ.).
- [9] Karimov O.Kh., Daminev R.R., Kas'yanova L.Z., et al. Application of microwave radiation for preparation metal oxide catalysts. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research], 2013, no. 4, pp. 801–805 (in Russ.).
- [10] Markin V.I., Cheprasova M.Yu., Bazarnova N.G. Basic directions of use microwave radiation in the processing of plant raw material (review). *Chemistry of Plant Raw Material*, 2014, no. 4, pp. 21–42 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.14258/jcprm.201404597>
- [11] Parmon V.N., Tanashev Yu.Yu., Udalov E.I., et al. Sposob termicheskoy pererabotki vysokomolekulyarnogo ugle rodsoderzhashchego syr'ya v bolee legkie soedineniya [Method of thermal processing high molecular carbon containing raw material into more light compounds]. Patent RU 2385344. Appl. 24.07.2008, publ. 27.03.2010 (in Russ.).
- [12] Kovalenko K.V., Krivokhizha S.V., Chaykov L.L. Sposob prigotovleniya melkodiespersnoy emul'sii v organicheskoy srede [Method of preparing fine aqueous emulsion in liquid organic medium]. Patent RU 2349631. Appl. 20.11.2007, publ. 20.03.2009 (in Russ.).
- [13] Shchukin V.A. Sposob polucheniya uglevodorodnogo avtomobil'nogo topliva [Method of producing hydrocarbon motor fuel]. Patent RU 2545059. Appl. 20.05.2013, publ. 27.03.2015 (in Russ.).
- [14] Kong L., Li G., Wang X., et al. Oxidative desulfurization of organic sulfur in gasoline over Ag/TS-1. *Energy Fuels*, 2006, vol. 20, iss. 3, pp. 896–902. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef050252r>
- [15] Karimov O.Kh., Daminev R.R., Kas'yanova L.Z., et al. Research of drying chromia-alumina catalyst in the electromagnetic field of microwave range. *Neftegazovoe delo* [Oil and Gas Business], 2013, no. 4 (in Russ.). Available at: [http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/KarimovOKh/KarimovOKh\\_1.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/KarimovOKh/KarimovOKh_1.pdf)

**Marakina E.I.** — Cand. Sc. (Chem.), Senior Research Fellow, Chemical Technology Laboratory, National Research Tomsk State University (Lenina prospekt 36, Tomsk, 634050 Russian Federation).

**Kobotaeva N.S.** — Dr. Sc. (Chem.), Senior Research Fellow, Light Hydrocarbons Catalytic Conversion Laboratory, Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (Akademicheskii prospekt 4, Tomsk, 634055 Russian Federation).

**Sachkov V.I.** — Dr. Sc. (Chem.), Head of Chemical Technology Laboratory, National Research Tomsk State University (Lenina prospekt 36, Tomsk, 634050 Russian Federation).

**Andrienko O.S.** — Cand. Sc. (Chem.), Research Fellow, Quantum Electronics Laboratory, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (Akademika Zueva ploshchad 1, Tomsk, 634055 Russian Federation).

**Skorokhodova T.S.** — Cand. Sc. (Chem.), Senior Research Fellow, Light Hydrocarbons Catalytic Conversion Laboratory, Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (Akademicheskii prospekt 4, Tomsk, 634055 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Marakina E.I., Kobotaeva N.S., Sachkov V.I., et al. Study of microwave radiation influence on fuel oil desulphurization process. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2021, no. 6 (99), pp. 96–109 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-6-96-109>