



СИНТЕЗ
ГЕТЕРОГЕННЫХ
КАТАЛИЗАТОРОВ

ПОЛИМЕРИЗАЦИЯ
МОНОМЕРОВ

КАТАЛИТИЧЕСКИЙ
ПИРОЛИЗ

Нефтегаз.RU

ДЕЛОВОЙ ЖУРНАЛ

ИНТЕРЕСНО О СЕРЬЕЗНОМ

ISSN 2410-3837

5 [161] 2025

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА НА НПЗ



Входит в перечень ВАК (К1)

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К БЕЗОПАСНОСТИ ТЭК

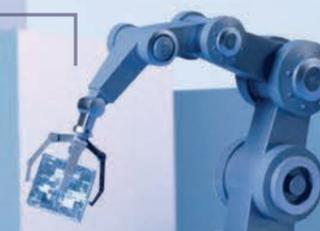
ВЗГЛЯД ИЗ КОСМОСА ↘



ЦИФРОВАЯ БУРОВАЯ —
↙ НОВАЯ СТУПЕНЬ БЕЗОПАСНОСТИ

АВТОМАТИЗАЦИЯ
И РОБОТЫ ↘

ENSMAS



НЕ ВКЛЮЧАТЬ
РАБОТАЮТ ЛЮДИ

ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР ↗



↑ ИСКУССТВЕННЫЙ
ИНТЕЛЛЕКТ



ПромМашТест



АБС Электро

ЗАЩИТА ПРОМЫШЛЕННОГО
ОБОРУДОВАНИЯ ↙

КЭАЗ ЭНЕРГИЯ
ЕДИНСТВА

↗ ПОЛИТИКА БЕЗОПАСНОСТИ



Safety.neftegaz.ru

РЕКЛАМА



ANT ENGINEERING

↙ БПЛА: ЗАЩИТА И УГРОЗА

ТЕРРАЛИНК
ТЕХНОЛОГИС



pt

↑ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТЬ

kaspersky



ГАЗСТРОЙПРОМ
СТРОЙТРАНСНЕФТЕГАЗ **СТНГ**

СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ СООРУЖЕНИЙ ↙



↙ ЗАЩИТА ДАННЫХ



↗ НОВОСТИ

Особенности синтеза гетерогенных катализаторов для пиролиза углеводородного сырья



14

Влияние СВЧ-воздействия различной частоты на скорость протекания процесса полимеризации смесей мономеров



18

Снижение загрязнений в теплообменном оборудовании и увеличение эффективности теплообмена на НПЗ



24

Каталитический пиролиз в России: переход к газовому сырью и разработка катализаторов



36

Эпохи НГК 4

РОССИЯ *Главное*

Российский газ: исход 6

Энергостратегия-2050 8

События 10

Первой строчкой 12

ПЕРЕРАБОТКА

Особенности синтеза гетерогенных катализаторов для пиролиза углеводородного сырья 14

Влияние СВЧ-воздействия различной частоты на скорость протекания процесса полимеризации смесей мономеров 18

ПЕРЕРАБОТКА

Снижение загрязнений в теплообменном оборудовании и увеличение эффективности теплообмена на НПЗ 24

Использование магнитного поля для управления движением УМК в гидродинамическом потоке 32

Каталитический пиролиз в России: переход к газовому сырью и разработка катализаторов 36

НЕФТЕСЕРВИС

Сибирская Сервисная Компания: 25 лет успешного развития 42

Жидкость глушения: влияние на динамику изменения дебита скважин низкопроницаемого карбонатного коллектора Юрубчено-Тохомского месторождения 46

Хронограф 51

Технико-экономическое обоснование разработки Западно-Вишневского месторождения Саратовской области



62

30 лет нейтралитета Туркменистана: эволюция многовекторной нефтегазовой дипломатии



79

Сравнительный анализ свойств арктической нефти



88

Особенности применения методологического инструментария комплексного освоения углеводородных запасов



94

НЕФТЕСЕРВИС
Эжекционная очистка скважин по технологии «труба в трубе» 52

ЭКОНОМИКА
Актуальность применения метода Ланга в России: методология и практическое применение 56

Календарь событий 61

Технико-экономическое обоснование разработки Западно-Вишневского месторождения Саратовской области 62

Россия в заголовках 67

ЮБИЛЕЙ
«Работай на нефть, работай!»: история инженера, который посвятил нефтедобыче 65 лет 68

ВЫСТАВКИ И КОНФЕРЕНЦИИ
Нефтегаз-2025 74

МЕЖДУНАРОДНЫЕ ОТНОШЕНИЯ
30 лет нейтралитета Туркменистана: эволюция многовекторной нефтегазовой дипломатии 79

ПРИКЛАДНАЯ НАУКА
Сравнительный анализ свойств арктической нефти 88

ГОСРЕГУЛИРОВАНИЕ
Особенности применения методологического инструментария комплексного освоения углеводородных запасов 94

Новости науки 104

Нефтегаз Life 106

Классификатор 108

Цитаты 112

СОДЕРЖАНИЕ

ЭПОХИ НГК

6 тысяч лет назад

В 4 000 году до н.э. природный асфальт использовался при строительстве стен и башен Вавилона.

430 лет назад

В 1595 году в рассказе сэра Уолтера Рэли «О тринидадском озере Питч» встречается первое упоминание о нефти на Американском континенте.

415 лет назад

В 1710 году врач из Швейцарии Эйрини д'Эйринис обнаружила асфальт в Валь-де-Траверсе. В 1719 году она основала битумную шахту (де ла Преста), которая действовала до 1986 года.

280 лет назад

В 1745 году в Ухте Ф. Прядунов построил первую нефтяную скважину и нефтеперерабатывающий завод. В процессе перегонки «каменного масла» он получил вещество, похожее на керосин, которое использовалось в масляных лампах для церквей и монастырей, при этом в домах по-прежнему пользовались свечами.

227 лет назад

В 1798 году в Англии впервые появилось газовое освещение, фонарями был освещен главный корпус мануфактуры Джеймса Уатта.

202 года назад

В 1823 году на Кавказе появился первый нефтеперегонный завод, построенный братьями Дубиниными.

175 лет назад

В 1850 году канадский геолог Авраам Пайно Геснер разработал процесс получения жидкого топлива из угля, битума и горючих сланцев, которое назвал керосином. Он основал компанию по производству керосиновых газовых ламп и начал устанавливать освещение на улицах городов.

155 лет назад

В 1870 году в Бакинском районе насчитывалось 47 нефтеперегонных заводов, а через 20 лет после отмены откупной системы их число выросло до 69.

136 лет назад

В 1889 году В.Д. Соколов высказал предположение о космическом происхождении нефти.

114 лет назад

В 1911 году американский инженер Д. Юз изобрел шарошечное долото (шарошки долго именовались «конусами Юза»).

Neftegaz.RU

Издательство Neftegaz.RU

РЕДАКЦИЯ

Главный редактор
Ольга Бахтина

Шеф-редактор
Анна Павлихина

Редактор
Анастасия Никитина

Аналитик
Анатолий Чижевский

Журналисты
Анна Игнатьева
Елена Алифирова
Анастасия Гончаренко
Анастасия Хасанова
Анна Шевченко

Дизайн и верстка
Елена Валетова

Корректор
Виктор Блохин

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Ампилов Юрий Петрович
д.т.н., профессор, МГУ им. М.В. Ломоносова

Алюнов Александр Николаевич
к.т.н., ФГБОУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации»

Бажин Владимир Юрьевич
д.т.н., эксперт РАН, Санкт-Петербургский горный университет

Гриценко Александр Иванович
д.т.н., профессор, академик РАН

Гусев Юрий Павлович
к.т.н., профессор, ФГБОУ ВПО НИУ МЭИ

Данилов-Данильян Виктор Иванович
д.э.н., профессор, член-корреспондент РАН, Институт водных проблем РАН

Двойников Михаил Владимирович
д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский горный университет

Еремин Николай Александрович
д.т.н., профессор, РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина

Илюхин Андрей Владимирович
д.т.н., профессор, Советник РААСН, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет

Каневская Регина Дмитриевна
действительный член РАН, д.т.н., профессор, РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина

Макаров Алексей Александрович
д.э.н., профессор, академик РАН, Институт энергетических исследований РАН

Мастепанов Алексей Михайлович
д.э.н., профессор, академик РАН, Институт энергетической стратегии

Панкратов Дмитрий Леонидович
д.т.н., профессор, Набережночелнинский институт

Половинкин Валерий Николаевич
научный руководитель ФГУП «Крыловский государственный научный центр», д.т.н., профессор, эксперт РАН

Салыгин Валерий Иванович
д.т.н., член-корреспондент РАН, профессор МИЭП МГИМО МИД РФ

Третьяк Александр Яковлевич
д.т.н., профессор, Южно-Российский государственный политехнический университет, академик РАН

Neftegaz.RU

Издательство:
ООО Информационное агентство
Neftegaz.RU

Директор
Ольга Бахтина

Отдел рекламы
Дмитрий Аверьянов
Валентина Горбунова
Анна Егорова
Марина Шевченко
Галина Зуева
Евгений Короленко

account@neftgaz.ru
Тел.: +7 (495) 778-41-01

Служба технической поддержки
Сергей Прибытков

Выставки, конференции, распространение
Мария Короткова

Отдел по работе с клиентами
Екатерина Данильчук

Деловой журнал Neftegaz.RU зарегистрирован федеральной службой по надзору в сфере массовых коммуникаций, связи и охраны культурного наследия в 2007 году, свидетельство о регистрации ПИ №ФС77-46285

Адрес редакции:
123001, г. Москва, Благовещенский пер., д. 3, с.1
Тел.: +7 (495) 778-41-01
www.neftgaz.ru
e-mail: info@neftgaz.ru
Подписной индекс Урал Пресс 013265

Переписка материалов журнала Neftegaz.RU невозможна без письменного разрешения главного редактора. Редакция не несет ответственности за достоверность информации, опубликованной в рекламных объявлениях, а также за политические, технологические, экономические и правовые прогнозы, представленные аналитиками. Ответственность за инвестиционные решения, принятые после прочтения журнала, несет инвестор.

Отпечатано в типографии «МЕДИАКОЛОР»

Заявленный тираж
8000 экземпляров



У ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ФОРУМ

01-03 ОКТЯБРЯ 2025
ИРКУТСК, РОССИЯ

РАСТВОРИМЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И ОСВОЕНИЯ НЕФТЕГАЗОВЫХ СКВАЖИН

OIL ENERGY
M14



РЕКЛАМА

К 2027 г.

будет полностью прекращен импорт российского газа странами ЕС

В Мексике планируется строительство пяти СПГ-заводов общей мощностью

28 млн т/год

В I квартале производство СПГ в России сократилось

на 4,1 %

Китай снизил объемы закупок газа

на 24 % в I квартале 2025 года

РОССИЙСКИЙ ГАЗ: ИСХОД

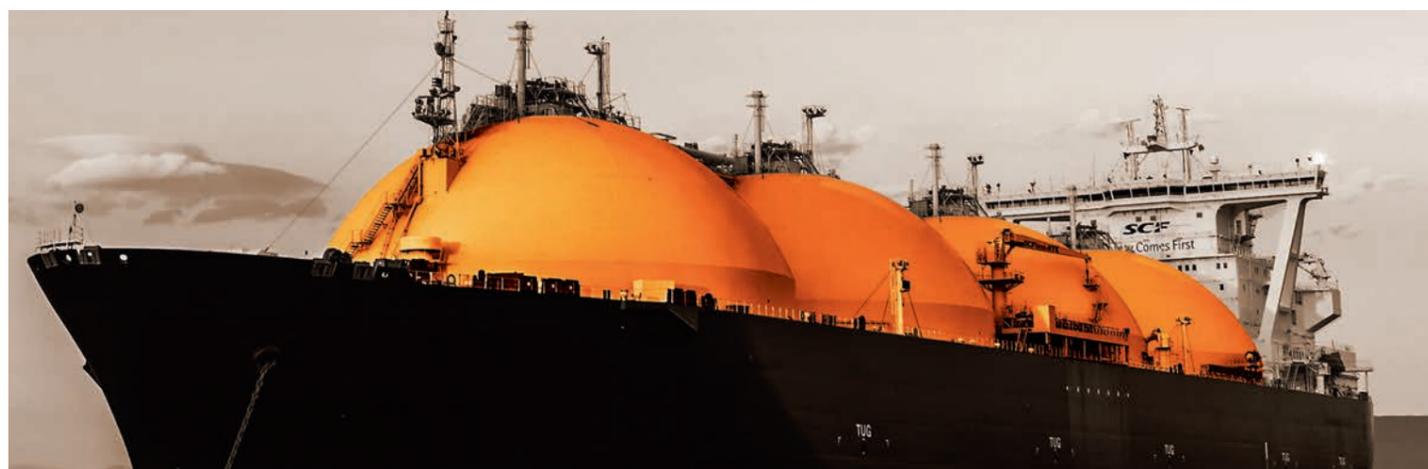
В МАЕ ЕВРОКОМИССИЯ ОПУБЛИКОВАЛА НА СВОЕМ САЙТЕ «ДОРОЖНУЮ КАРТУ» ПО ОТКАЗУ ОТ РОССИЙСКИХ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ. В ЧАСТНОСТИ, К 2027 ГОДУ БУДЕТ ПОЛНОСТЬЮ ПРЕКРАЩЕН ИМПОРТ ГАЗА. ПОЛУЧИТСЯ ЛИ У СТРАН ЕС СЛЕДОВАТЬ ПО НАМЕЧЕННОМУ МАРШРУТУ И КУДА РОССИЯ ПЕРЕНАПРАВИТ СВОИ ЭКСПОРТНЫЕ ПОТОКИ?

Анна Павлихина

Налоги от продажи нефти и газа составляют треть российского бюджета. Это огромная сумма и справедливо предположить, что, лишившись ее, страна понесет колоссальные убытки. Поэтому в 2022 году европейские страны решительно заявили о намерении отказаться от покупки российских углеводородов. В частности, свести к минимуму и наконец совсем прекратить импорт газа. За прошедшие три года Россия сократила его поставки странам ЕС с 40 до 19%, заработав на этом 100 млрд евро. Но и в этих 19 процентах европейские политики усматривают угрозу своей энергетической безопасности.

Еще насколько лет назад европейский рынок рассматривался Россией как премиальный, что стало причиной реализации крупных и дорогостоящих инфраструктурных проектов. С 1 января остановлен транзит по ГТС Украины, с мая 2022 г. в связи с контрсанкциями не действует МГП Ямал – Европа, от «Северных потоков» осталась одна ветка. Сегодня газ в Старый Свет поступает только по МГП «Турецкий поток» (его получают потребители в Венгрии и Словакии), загрузка которого в апреле снизилась до 44 млн м³ в сутки. Прекращение оставшихся трубопроводных поставок снизит российский экспорт на 14 млрд м³.

«Дорожная карта» предусматривает возможность разрывать действующие контракты на поставки газа без выплаты штрафов и в обход принципа «бери или плати», новые контракты заключаться не будут, а спотовые продажи российского СПГ с немедленной оплатой планируют прекратить к концу этого года. Однако точные сроки зависят от возможности обеспечить альтернативные поставки.



Среди крупных экспортеров газа в ЕС играют важную роль Алжир, Ливия и Катар. Среди крупных поставщиков мог оказаться также Иран, но санкционные ограничения не дают возможности проводить активную инвестиционную политику, что делает доступ к энергоресурсам этой страны очень дорогим. Но самым крупным продавцом сжиженного природного газа в Европу с 2022 года являются Соединенные Штаты, на долю которых в прошлом году пришлось 45% европейского импорта СПГ. Несмотря на декларируемое стремление к диверсификации поставок, ЕС заявляет о готовности обсуждать увеличение объемов закупок газа у США. Такие возможности у Штатов, конечно, есть. К 2027 году благодаря строительству и расширению пяти терминалов мощности страны по производству СПГ должны увеличиться на 74 млн тонн. Это на 86% превышает мощности всех ныне действующих российских терминалов СПГ, что можно рассматривать как очень сильный механизм по завоеванию рынка, который в конечном итоге и без «Дорожной карты» позволил бы вытеснить российских экспортеров из Европы, а последних поставил перед необходимостью искать новые рынки сбыта. Что они и начали делать.

В апреле глава Минэнерго С. Цивилев посетил Китай, чтобы обсудить перспективы увеличения поставок российских энергоносителей и реализацию совместных СПГ-проектов. Китай уже участвует в двух – в «Ямал СПГ» и «Арктик СПГ-2», но российские инвесторы интересуются также строительством в КНР регазификационных терминалов. Сжиженный газ из России Китаю как никогда интересен, учитывая новый

виток торговой войны с США, в результате которого поставки СПГ из Штатов были обложены повышенными пошлинами. В условиях переориентации американцев на европейский рынок, поставки СПГ в Китай все равно пришлось бы урезать, а освободившуюся экспортную нишу может занять сжиженный газ из России. Азиатский рынок очень емкий, но покупать газ по высоким ценам ни Китай, ни Индия не будут. Так, став по итогам прошлого года крупнейшим импортером СПГ, Китай снизил объемы закупок в I квартале 2025 года на 24% и вновь активизировал покупательский интерес, как только цены на газ пошли вниз. То же касается и Индии, которая увеличила закупки российского СПГ на четверть, но как только цены на мировом рынке стали расти, перевела свои газовые котельные и перерабатывающие заводы на легкодоступную нефть.

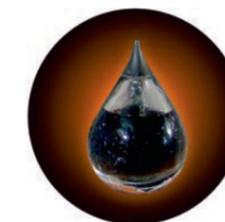
Российские экспортеры газа не теряют надежды увеличить в восточном направлении также трубопроводные поставки, для реализации которых продвигают инфраструктурные проекты. В прошлом году шли активные обсуждения соглашения по МГП «Сила Сибири-2». Переговоры не дали результатов, но торговое противостояние США и КНР в газовой сфере добавляет очки проекту. Помимо прочих разногласий, Китай против прохождения трубопровода через территорию Казахстана, но, возможно, одобрит его маршрут через Монголию, которая не против и уже согласовала линию на карте. На 2027 год анонсировано начало поставок по магистральному газопроводу Сахалин – Хабаровск – Владивосток, от которого также планируется протянуть ветку на Китай.

Несмотря на то, что Китай и Индия крупнейшие покупатели, бросать все силы на маршруты одного направления нецелесообразно. Опыт работы с европейским рынком заставляет думать о диверсификации импорта. Ведь зависимость от одного покупателя чревата не меньшими проблемами, чем зависимость от одного продавца. Поэтому стоит согласиться с теми специалистами, которые в последнее время все настойчивее говорят о третьем пути, предлагают выйти за рамки полярного видения «Запад–Восток» и обратить внимание на страны Средней и Южной Азии, Африки и Латинской Америки.

Постепенность потери европейского рынка дала возможность рассмотреть отступные пути. В прошлом году Газпром заключил соглашение с QazaqGaz о транзите через территорию Казахстана российского газа для Узбекистана и Кыргызстана в 2025–2040 гг. Страны уже готовят проекты модернизации для увеличения мощностей своих газотранспортных систем.

В поисках новых партнеров был обращен пока не обнаруживший логической канвы, взгляд на Мексику. Страна заявляет о стремлении войти в четверку ключевых экспортеров СПГ, кого из лидеров – США, Катар, Австралию или Россию – она собирается потеснить, пока не ясно. Но в Мексике планируется строительство пяти заводов по сжижению газа общей мощностью 28 млн т в год. Проекты буксуют, ведь у страны нет ни собственных технологий, ни собственной ресурсной базы: 72% газа поступает из США, импорт к 2035 г. потенциально вырастет более чем в два раза, до 340 млн м³ в сутки. Учитывая это, интересы России в Мексике могут быть сконцентрированы на инфраструктуре, регазификационных терминалах или на добычных проектах.

Пока российские компании ищут новые рынки сбыта и новых партнеров, сама российская газовая отрасль в I квартале продемонстрировала падающую динамику: производство СПГ сократилось на 4,1%, добыча природного газа – на 5,5% по сравнению с аналогичным периодом прошлого года. ●



ЭНЕРГОСТРАТЕГИЯ-2050

Елена Алифирова

Правительство РФ утвердило Энергетическую стратегию РФ на период до 2050 г. Стратегия учитывает рост мирового спроса на все виды энергетических источников на 20% к 2050 г. и предусматривает обеспечение внутреннего рынка энергоресурсами, реализацию экспортного потенциала, диверсификацию поставок ресурсов, развитие новых логистических маршрутов и развитие партнерств с Азией и Глобальным Югом в целом.

В основу прогнозных оценок положены 5 сценариев: стресс-сценарий, предполагающий снижение производственных показателей отраслей ТЭК на фоне сокращения экспортных возможностей и ухудшения внешних условий его функционирования; инерционный – сохранение сложившихся трендов и действующих подходов без значительных инвестиций; целевой – реализация мероприятий для сбалансированного развития отраслей ТЭК с учетом оптимального соотношения надежного и экологичного обеспечения внутреннего рынка с наименьшими издержками и эффективной реализации экспортного потенциала, достижения национальных целей в области климатической политики, технологического суверенитета и конкурентоспособности; сценарий технического потенциала – максимально возможные уровни производственных показателей без учета экономической рентабельности и целесообразности проведения возможных мероприятий; сценарий ускоренного энергетического перехода – возвращение к быстрым темпам декарбонизации мировой энергетики, снятие ограничений на поставки в РФ технологий и оборудования.

В стресс-сценарии к 2050 г. добыча нефти в России может опуститься до 171 млн т в год, а экспорт – до 0. В сценарии технического потенциала добыча к 2050 г. достигает 547 млн т в год, а мощность экспортной инфраструктуры опустится до 228 млн т в год. В перерабатывающей отрасли рост составит 90% к 2030 г., объем производства СПГ увеличится до 110–175 млн т в год к 2050 г., запуска новых СПГ-заводов не ожидается.

Сценарий технологического производства предполагает рост экспорта трубопроводного газа до 307 млрд м³ в год, СПГ – до 342 млрд м³ в год. Установленная мощность объектов электрогенерации вырастет с 254,3 ГВт в 2023 г. до 331,2 ГВт к 2050 г. ●

Рейтинги Neftegaz.RU

В Россию начинают возвращаться компании, покинувшие ее 3 года назад. За это время многое изменилось: российские предприятия освоили освободившиеся ниши и инвестировали в развитие, а потребители переориентировались на других поставщиков. Какие изменения повлечет за собой возвращение иностранцев?

Как возвращение западных компаний повлияет на российский рынок?

25%
Вернутся только американские предприятия и заполнят те сегменты, которые не были освоены российскими компаниями

15%
Иностранцы снова заберут долю на рынке, вытеснив российских производителей

34%
Правительство введет протекционистские меры

16%
Западным производителям придется завоевывать рынок заново

10%
Россия выиграет от возвращения западных компаний в отраслях, связанных с высокими технологиями

Старт проекта TAL-PLUS позволит Венгрии, Словакии и Чехии получать нефть нероссийского происхождения. Проект расширения Трансальпийского нефтепровода был реализован к апрелю этого года. Какое влияние окажет строительство нового нефтепровода на рынок нефти?

Какие основные изменения ждут нефтяной рынок с запуском нефтепровода TAL+?

29%
Россия не много потеряет в объемах экспорта: в 2024 г. Россия поставила Чехии 2,7 млн т нефти, Китаю – 108,47 млн т

25%
Белоруссия и Украина лишатся дохода от потери транзита через свои территории

15%
Чехия будет получать нефть из почти 20 стран, решив таким образом задачу диверсификации поставок

11%
Проект TAL+ предусматривает увеличение пропускной способности Трансальпийского нефтепровода на 4 млн т в год, что позволит полностью покрыть годовую потребность Чехии в поставках нефти

20%
Перестановок на рынке не произойдет, поставлять нефть в TAL+ будут страны, которые уже направляют нефть в Трансальпийский нефтепровод – Азербайджан, Казахстан, США, Ирак и др.



ВАРТЕЕС LTD

ПРЕЖНЕЕ НАЗВАНИЕ «BEIJING AEROSPACE PETROCHEMICAL TECHNOLOGY AND EQUIPMENT ENGINEERING CORPORATION LIMITED»



Высокоскоростной центробежный насос со встроенным редуктором (API 610 OH6)



Вертикальный насос (OH6)

Насосные агрегаты • Запасные части • Сервис

- ▶ **Расход** 1~360 м³/ч, напор: 80~3600 м
- ▶ **Мощность двигателя** 5,5~2000 кВт
- ▶ **Температура** -130~+340 °С
- ▶ **Область применения:** нефтеперерабатывающая, нефтехимическая, химическая отрасли
- ▶ **Типичное применение:** этилен, пропилен, ПЭ, ПП, ТФК и др.
- ▶ **ISO Сертификаты:** ISO9001, ISO14001, OHSAS 18001
EAC Сертификаты: TP TC 010/2011, TP TC 012/2011, TP TC 020/2011
- ▶ **Квалифицированный поставщик:** BASF, BP, CTCL, Daelim, Enter, Fluor, Foster Wheeler, GS, Hyundai, Saipem, Samsung, Tecnimont, Toyo
- ▶ **Насосы применялись** в процессах, лицензированных Invista, BP, Univation, Technip, UOP, Axens, Fluor, Siemens и Johnson Matthey
- ▶ **Конечные потребители в СНГ:** ООО «Амурский газохимический комплекс» (Сибур), Иркутская нефтяная компания, АО «ПОЛИЭФ» (Сибур), Руссоко и ПКОП Шымкентский НПЗ



Цех



Испытательный стенд



Сервис на площадке Сибур

Штаб-квартира г. Пекин, Китай
Контактное лицо: Лю Сяо
Тел: +86-10-87094356, 87094328
+8617319371970
E-mail: liux@calt11.cn, burw@calt11.cn

Авторизованный ООО «Юникс Инжиниринг»
дилер Тел/Факс: +7(495) 648-62-78
E-mail: office@unix-eng.ru

www.calt11.com

Обвал рынка акций
Выборы президента
Газовые войны
Запуск нового производства
Северный поток
Новый глава Роснефти
Слияние капиталов
Цены на нефть

Второй венка ВСТО
Богучанская ТЭС запущена
Южный поток
Цены на газ
Дошли руки до Арктики
Северный поток достроили

Первый углеродно-нейтральный завод

Тверское предприятие СИБУР-ПЭТФ стало первым среди российских заводов, которое полностью компенсировало свои энергетические выбросы парниковых газов. СИБУР-ПЭТФ производит гранулят полиэтилентерефталата и обеспечивает переработку технического ПЭТФ. Полимеры имеют преимущества по снижению экологического воздействия на всех этапах жизненного цикла. Благодаря термопластичности и энергоэффективным технологиям рециклинга они могут многократно перерабатываться и использоваться снова. Инструментом для обеспечения экологичности энергообеспечения стали, помимо прочего, сертификаты происхождения электроэнергии. Общий объем выбросов парниковых газов (Охваты 1 и 2), оставшийся

Аргентина впервые экспортировала 500 тыс. м³ газа со сланцевого месторождения Vaca Muerta в Бразилию по газопроводам, проходящим через территорию Боливии. Целью этой операции было тестирование технической жизнеспособности логистической сети. Поставка выполнена в рамках трехсторонней сделки между TotalEnergies, YPFB и Matrix Energia. Соглашение включает в себя спотовый контракт, позволяющий прерывать поставки в Бразилию в период повышенного зимнего спроса в Аргентине

после проведения мероприятий по энергоэффективности в 2024 г. составил 22,2 тыс. т CO₂ экв. Две трети этого объема были компенсированы углеродными единицами от климатического проекта на ЗапСибНефтехиме, а оставшаяся часть связана с потребленной электроэнергией в объеме 26 040 МВт·ч, была погашена с помощью «зеленых» сертификатов, которые обеспечили

предприятию энергию с нулевыми выбросами. В рамках мероприятий по сокращению углеродных выбросов СИБУР использует энергию из возобновляемых источников, которую компания закупает в эквиваленте «зеленых» сертификатов, а также вырабатывает сама.

Китайцы выходят из американских проектов

Британская Ineos завершила приобретение активов китайской CNOOC в Мексиканском заливе на шельфе США. Сделка включает в себя портфель неосвоенных активов, построенных вокруг двух глубоководных месторождений: доля участия в морской платформе Arromattox, оператором которой является Shell, МП Stampede (оператор Hess), долю участия в зрелых месторождениях и вспомогательные бизнес-единицы. Сделка добавила в добычной портфель Ineos 90 тыс. бнэ в сутки. CNOOC реализует планы по выходу с внутреннего рынка США из-за геополитических рисков, но сотрудничество с американскими компаниями продолжается на нейтральных территориях. CNOOC владеет долей участия 25% в проекте ExxonMobil по разработке месторождения Стабрук в Гайане, чрезвычайно важного для будущего развития ExxonMobil.

Совет Федерации одобрил закон, который дает работникам ведомственной охраны дополнительные возможности при защите объектов ТЭК, а именно, право применять физическую силу, огнестрельное оружие и специальные средства вне территории охраняемых объектов ТЭК для их защиты от БПЛА. Отдельные положения регулируют вопросы противодействия БПЛА со стороны органов государственной власти, в частности, на них не будут распространяться положения, обязывающие прекращать применение аппаратов и установок, создающих помехи линиям управления беспилотниками

TotalEnergies завершает международные сделки по приобретению ВИЭ-проектов: покупке европейской VSB Group, африканской SN Power и принадлежащих им мощностей, а также закрывает первую сделку с североамериканской RES. Это поможет достичь целей по созданию 35 ГВт общей мощности ВИЭ в 2025 г., увеличить выработку чистой электроэнергии на более чем 100 ТВт·ч к 2030 г. и укрепить позиции компании в сфере интегрированной энергетики

Новый турбоагрегат на Смоленской ТЭЦ

Росатом завершил первый этап модернизации Смоленской ТЭЦ-2. Новый турбоагрегат теплоэлектроцентрали мощностью 130 МВт введен в эксплуатацию и начал поставки электроэнергии в Единую энергосистему страны. Все основное оборудование было изготовлено на территории России. Мощность нового агрегата на 20 МВт выше, чем у выведенного из эксплуатации. Турбоагрегат оснащен системой, позволяющей осуществлять автоматическое управление технологическими процессами – эта система полностью обеспечивает управляющие, информационные и сервисные функции, необходимые для надежной работы оборудования в различных режимах. В результате ввода нового оборудования вырастет выработка электроэнергии,

Совет Федерации одобрил закон, который устанавливает правовые основы федерального надзора в области использования атомной энергии. В нововведениях прописываются ограничения для должностных лиц Ростехнадзора, например, продолжительность инспекции не может превышать 10 рабочих дней. Документ предоставляет возможность установить режим постоянного госнадзора за юридическими лицами, занимающимися строительством судов с ядерными реакторами. Эта мера необходима для минимизации рисков аварий на таких объектах

увеличится срок службы станции и повысится надежность функционирования ТЭЦ. На втором этапе модернизации Смоленской ТЭЦ-2 планируется введение в эксплуатацию еще одного турбоагрегата отечественного производства. Установленная электрическая мощность станции увеличится до 316 МВт, а тепловая – до 819 Гкал·ч.

Правительство Мексики планирует снять ограничение на добычу сланцевого газа внутри страны, чтобы снизить зависимости от США, т.к. власти обеспокоены непредсказуемой торговой политикой Д. Трампа. Мексика находится на 6-м месте в мире по запасам сланцевого газа, и разработка месторождений позволила бы обеспечить сырьевую независимость, но в стране действуют жесткие ограничения на добычу сланцевого газа, которая требует применения ГРП. Президент Мексики К. Шейнбаум поддерживала эти ограничения, однако теперь ее позиция меняется

Газпром нефть получила новые лицензии на технологические полигоны для внедрения отечественных решений по добыче ТРИЗ. На новых площадках будут испытывать оборудование для геофизических исследований скважин, бурения и ГРП. Техполигоны будут созданы на Верхнесалымском и Холмогорском участках в ХМАО-Югре. Компания также займется тестированием решений для разработки ачимовских отложений на Ямбургском технологическом полигоне в ЯНАО

МЭА снизило оценку роста спроса на нефть

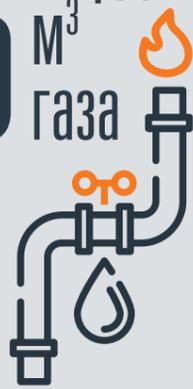
Международное энергетическое агентство (МЭА) понизило прогноз по росту глобального спроса на нефть в 2025 г. до 730 тыс. барр. в сутки. По сравнению с предыдущим докладом прогноз по росту спроса понижен на 300 тыс. барр. в сутки, а по самому спросу – на 400 тыс. барр. в сутки за счет корректировки в сторону понижения оценки спроса в 2024 г. МЭА впервые представило прогнозы на 2026 г., ожидая что спрос вырастет на 690 тыс. барр. в сутки, до 104,2 млн барр. в сутки. Резкое снижение прогноза агентство объясняет нестабильной макроэкономической средой и эскалацией торговой напряженности из-за объявленных США дополнительных торговых пошлин. Ранее свой ежемесячный доклад представило Управление энергетической информации Минэнерго США (EIA): по прогнозу которого, в 2025 г. глобальный спрос на нефть вырастет на 0,9 млн барр. в сутки, до 103,64 млн барр. в сутки, в 2026 г. – на 1,04 млн барр. в сутки, до 104,68 млн барр. в сутки, прогноз по росту спроса в 2025 г. понижен на 370 тыс. барр. в сутки, на 2026 г. – на 130 тыс. барр. в сутки. ●

На **40** %, до **6,49** млрд руб.,



выросла чистая прибыль компании Газпром энергосбыт в 2024 году

Более **4,5** млрд м³ газа поставлено в Европу по 2-й нитке Турецкого потока с начала 2025 г.



До **130** МВт увеличила мощность Угличская ГЭС благодаря модернизации



В **85** млрд руб. оценивается экологический ущерб от крушения танкеров в Черном море



10,2 млн т составила отгрузка СПГ с проекта Сахалин-2



12,2 ГВт достигла солнечная генерация в Великобритании



До **70** % выросла доля коммерческих заказов в портфеле Росгеологии в 2024 г.



665 тыс. тонн составил объем вывоза угля на экспорт в восточном направлении из Хакасии по итогам 1-го квартала, что на **1,8%** меньше аналогичного периода 2024 г.



100,3 млрд руб. получили по демпферу нефтяные компании в марте 2025 года



На **411** тыс. барр. в сутки повысили квоты на добычу страны ОПЕК+ в мае 2025 г.



На **9,8** % снизились нефтегазовые доходы федерального бюджета РФ в 1-м квартале 2025 г.



50 резервных дизель-генераторов будет закуплено для электроснабжения Приморья в 2025 г.



51,414 млн т нефти импортировала КНР в марте



На **1,1** % НОВАТЭК увеличил добычу природного газа в 1-м квартале 2025 г.



На **5,5** % Азербайджан сократил добычу нефти и газового конденсата с начала 2025 года



На **150** тыс. барр. / сутки ОПЕК понизила прогноз роста спроса на нефть в 2025 г.



3-е место в мире заняла Индия по выработке ветровой и солнечной энергии



На **18** % Южная Корея увеличила импорт СПГ в марте 2025 г.



На **6** % снизил импорт угля Китай в марте 2025 г. из-за падения внутренних цен



6,4 трлн руб. составили нефтегазовые доходы РФ в 1-м квартале 2025 г.



ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА ГЕТЕРОГЕННЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ для пиролиза углеводородного сырья

Жагфаров Фирдавес Гаптелфартович

заведующий кафедрой газохимии,
профессор,
д.т.н.

Бельков Тимофей Михайлович

лаборант кафедры газохимии

РГУ нефти и газа (НИУ)
имени И.М. Губкина

В ПОСЛЕДНИЕ ГОДЫ ВСЕ БОЛЬШУЮ РОЛЬ В НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ИГРАЮТ НИЗШИЕ ОЛЕФИНЫ. СРЕДИ РАЗРАБОТАННЫХ СПОСОБОВ МОДЕРНИЗАЦИИ ПИРОЛИЗА НАИБОЛЬШИЙ ИНТЕРЕС ВЫЗЫВАЕТ ПИРОЛИЗ В ПРИСУТСТВИИ КАТАЛИЗАТОРОВ, СНИЖАЮЩИХ ЭНЕРГИЮ АКТИВАЦИИ РЕАКЦИЙ ПИРОЛИЗА, А ТАКЖЕ КОКСООБРАЗОВАНИЕ, ПОВЫШАЮЩИЕ ВЫХОД ЭТИЛЕНА И СУММЫ НЕНАСЫЩЕННЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ C2–C4. В СТАТЬЕ РАССМОТРЕНЫ ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ СИНТЕЗА ГЕТЕРОГЕННЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ, ИХ ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ

IN RECENT YEARS, LOWER OLEFINS HAVE BEEN PLAYING AN INCREASINGLY IMPORTANT ROLE IN THE PETROCHEMICAL INDUSTRY. AMONG THE DEVELOPED METHODS OF STEAM CRACKING MODERNIZATION, STEAM CRACKING IN THE PRESENCE OF CATALYSTS THAT REDUCE THE ACTIVATION ENERGY OF STEAM CRACKING REACTIONS, AS WELL AS COKE FORMATION, WHICH INCREASES THE YIELD OF ETHYLENE AND THE NUMBER OF UNSATURATED HYDROCARBONS C2-C4, IS OF THE GREATEST INTEREST. THE ARTICLE DISCUSSES THE MAIN METHODS OF SYNTHESIS OF HETEROGENEOUS CATALYSTS, THEIR ADVANTAGES AND DISADVANTAGES

Ключевые слова: пиролиз, каталитический пиролиз, синтез катализаторов, методы получения катализаторов.

В современных нефтегазохимических производствах ведущую роль играют низшие олефиновые углеводороды – этилен и пропилен, выступая в качестве сырья процессов полимеризации, а также производства разнообразного ряда нефтехимических продуктов.

На сегодняшний день основным процессом производства легких олефинов остается процесс термического пиролиза углеводородного сырья в трубчатых печах при повышенной температуре.

Термический пиролиз углеводородного сырья сопряжен с повышенным энергопотреблением, а также с процессами интенсивного коксообразования на поверхности труб реакционных змеевиков.

Перечисленные недостатки процесса пиролиза ведут к необходимости разработки и исследований различных способов его модернизации и модификации, наибольший интерес из которых представляет пиролиз в присутствии гетерогенных катализаторов [1].

Катализатор в процессе пиролиза снижает энергии активации радикальных реакций, что позволяет вести процесс в более мягких условиях, а также повысить выход легких олефинов и снизить выход кокса [2].

Катализатор пиролиза должен обладать высокой активностью, механической и термической стабильностью. Помимо качественного и количественного состава, важную роль в активности гетерогенного катализатора пиролиза играет метод его синтеза.

Целью данной работы является изучение особенностей синтеза гетерогенных катализаторов для процесса пиролиза.

В общем случае приготовление катализатора заключается в распределении активного компонента по поверхности носителя, осуществляемого тремя различными способами: пропиткой, смешением и упариванием.

Стоит отметить, что для катализаторов высокотемпературной деструкции углеводородов требуется сравнительно невысокая удельная поверхность (порядка 10–20 м²/г), а также

ФАКТЫ

6 часов

составляет оптимальное время пропитки для гранул оксида алюминия сферической формы с диаметром 2–3 мм

невысокая порозность, обусловленная повышенной коксуемостью в порах, что приводит к снижению активности [3].

Метод пропитки

Метод пропитки является наиболее простым способом синтеза катализаторов пиролиза, позволяя при этом достичь равномерного распределения активных центров по поверхности носителя [4] (рисунок 1).

Для приготовления катализатора заранее рассчитанное количество формы активного компонента растворяют в количестве воды, соответствующей максимальной сорбционной емкости носителя. Затем полученный раствор прибавляют к носителю и ведут пропитку в течение времени,

РИСУНОК 1. Катализатор на основе соединений железа и ванадия, нанесенный на α-окись алюминия методом пропитки



зависящего от фракционного состава гранул. В зависимости от времени пропитки достигается различная глубина проникновения активного компонента в объем носителя. Так, для гранул оксида алюминия сферической формы с диаметром 2–3 мм оптимальное время пропитки составляет 6 часов. При неполной пропитке носителя раствором активного компонента в процессе пиролиза коксообразование преимущественно протекает внутри непропитанной области гранул катализатора, что приводит к потере его активности.

Важным этапом приготовления катализаторов методом пропитки является процесс сушки, предотвращающий разрыв гранул при резком нагреве и испарении влаги, адсорбированной на поверхности и в порах носителя. Процесс сушки, как правило, ведут под вакуумом в течение продолжительного времени для наиболее полного удаления влаги из будущего катализатора.

После сушки катализатор подвергают прокаливанию в печи при температуре порядка 1000 °С, при этом оксид алюминия, содержащийся в большинстве носителей для каталитического пиролиза, переходит в α -форму. Кроме того, при данной температуре происходит разложение исходных солей (нитратов, ацетатов и др.) до металлов или их оксидов, являющихся активными компонентами катализаторов пиролиза. Процесс ведут с постепенным нагревом (3–4 °С/мин для исключения термического разрыва гранул) до заданной температуры, при достижении которой проводят выдержку в течение 1–2 часов для наиболее полного аллотропного перехода оксида алюминия [5].

Конечные механические свойства полученного катализатора напрямую зависят от свойств носителя [6].

К недостаткам метода пропитки можно отнести:

- длительность всех технологических операций;
- неполнота распределения активного компонента, закоксовывание центров гранул;
- невозможность нанесения компонентов, нерастворимых в пропиточной жидкости.

Метод смешения

Данный метод основан на смешении компонентов носителя, катализатора, промоторов и добавок в единую массу с последующей экструзией [7]. В результате можно получать гранулы различных форм и размеров (рисунки 2).

Для приготовления катализатора данным методом все его компоненты смешивают в определенных пропорциях. При необходимости на данном этапе в смесь также вводят уголь или раствор карбоксиметилцеллюлозы, которые, сгорая в процессе прокаливания, образуют поровую структуру катализатора. Для повышения прочностных свойств будущего катализатора необходимо его армирование фиброматериалом, представляющим из себя волокна огнеупорных неорганических материалов (асбест, каолин, базальт и др.).

РИСУНОК 2. Катализатор на основе оксидов циркония и магния, приготовленный методом смешения



ФАКТЫ

1000 °C

температура, при которой происходит разложение исходных солей до металлов или их оксидов, являющихся активными компонентами катализаторов пиролиза

0,18 % масс.

выход кокса на катализаторе, приготовленном методом пропитки, выше по сравнению с катализатором, приготовленным методом смешения

К полученной смеси прибавляют воду, выступающую в роли связующего агента, и тщательно вымешивают до однородной пластичной массы.

Процесс экструзии заключается в продавливании полученной массы через насадку, определяющую форму получаемых гранул [8].

Сушка и прокаливание катализатора принципиально не отличаются от приготовления методом пропитки.

Метод смешения позволяет достичь равномерного распределения активного компонента по всей поверхности носителя, а также варьировать пористость, размеры и форму гранул, использовать нерастворимые в воде соли активной массы катализатора [9].

К недостаткам метода смешения можно отнести:

- сложность технологических операций;
- неоднородность фракционного состава катализаторов;
- низкие прочностные свойства катализаторов [10].

Метод упаривания

Метод упаривания предполагает осаждение активного компонента на поверхности носителя путем упаривания маточного раствора до полного испарения жидкости.

Маточный раствор может представлять из себя как истинный раствор, так и суспензию активных компонентов, промоторов и добавок, входящих в состав будущего катализатора.

Непосредственно упаривание ведут при постоянном перемешивании, чтобы обеспечить наиболее равномерное распределение компонентов по поверхности носителя.

Поскольку при упаривании удаляется практически вся влага, стадию сушки можно исключить из приготовления.

Процесс прокаливания ведут аналогично двум вышеприведенным методам.

К недостаткам метода упаривания можно отнести сложность технологических операций, трудновоспроизводимость.

В лабораторном синтезе катализаторов пиролиза углеводородного сырья в том или ином виде находят применение все перечисленные способы, поскольку каждый из них имеет свои недостатки и область применения.

При исследовании каталитического пиролиза этана с чистотой 99,95 % наилучшие результаты показывает катализатор на основе соединений железа, в качестве носителя для которого применялась α -форма оксида алюминия ($\text{Fe}, \text{NaF}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), приготовленный методом смешения. Для данного катализатора в кварцевом реакторе при температуре 800 °С и времени контакта 0,25 с выход этилена составил 52,5 % масс., выход суммы ненасыщенных углеводородов C2–C4 – 58,3 % масс., выход кокса – 0,12 % масс. на пропущенное сырье. Полученные выходы легких олефинов превышают на 0,5 % масс. эти же показатели для катализатора того же состава, но приготовленного методом пропитки. Кроме того, выход кокса на катализаторе, приготовленном методом пропитки, выше на 0,18 % масс. по сравнению с катализатором, приготовленным методом смешения, что, вероятно, связано с неполной пропиткой всей его поверхности и пор. ●

Литература

1. Пугачев И.О. и др. Состояние каталитического пиролиза в Российской Федерации // Нефтегазохимия. – 2020. – № 1. – С. 46–49.
2. Николаева О.В. Современные процессы пиролиза углеводородного сырья // Вестник магистратуры. – 2020. – № 5–3 (104). – С. 134–135.
3. Хафизов И.Ф., Мусин Р.Р. Современные тенденции развития процесса пиролиза // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 2. – С. 231–234.
4. Филофеев С.В. Каталитический пиролиз легких алканов в присутствии соединений металлов VI и VIII групп: специальность 02.00.04 «Физическая химия»: диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук / Филофеев С.В. – Нижний Новгород, 2016. – 109 с.
5. Цыганова Е.И. и др. Каталитический пиролиз легких алканов в присутствии соединений металлов шестой группы // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия. – 2016. – Т. 8. – № 3. – С. 19–27.
6. Жагфаров Ф.Г. Кинетические модели пиролиза с ингибированием коксообразования / Ф.Г. Жагфаров, П.С. Столярова, А.Б. Карпов // Научный журнал Российского газового общества. – 2024. – № 4 (46). – С. 36–43.
7. Жагфаров Ф.Г. Разработка носителей и катализаторов пиролиза углеводородного сырья и изучение кинетических характеристик / Ф.Г. Жагфаров, М.М. Буранбаева, П.С. Столярова // Neft va gaz sanoatining dolzarb muammolari va istiqbollari. 15–16 октября 2024 года, 2024. – С. 127–132.
8. Буранбаева М.М. Носители для катализаторов пиролиза и их влияние на выход наших олефинов / М.М. Буранбаева, Ф.Г. Жагфаров // Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России: Тезисы докладов VIII Региональной научно-технической конференции, посвященной 100-летию профессора Ю.П. Желтова, Москва, 07–11 октября 2024 года. – Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, 2024. – С. 305–306.
9. Андреев В.С. О закономерностях механизма каталитического пиролиза углеводородного сырья / В.С. Андреев, Ф.Г. Жагфаров // Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России: Тезисы докладов VIII Региональной научно-технической конференции, посвященной 100-летию профессора Ю.П. Желтова, Москва, 07–11 октября 2024 года. – Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, 2024. – С. 235–236.
10. Буранбаева М.М. Носители для катализаторов пиролиза углеводородного сырья и их влияние на показатели процесса / Ф.Г. Жагфаров, М.М. Буранбаева // Neftgaz.RU. – 2025. – № 3 – С. 108–113.

KEYWORDS: steam cracking, catalytic steam cracking, synthesis of catalysts, methods of obtaining catalysts.



КОНТЕЙНЕРЫ ССС2М3

для работы с катализаторами

- OLIM (инертные керамические материалы)
- RASCHOL (кислотоупорные насадки)
- MAXOL (катализаторы Клауса)
- OLMAX (защитные материалы)
- CHLOROL (адсорбенты хлора)
- OLSORBS (широкий спектр адсорбентов)
- FLOCOL (флокулянты нового поколения)

ВЛИЯНИЕ СВЧ-ВОЗДЕЙСТВИЯ РАЗЛИЧНОЙ ЧАСТОТЫ

на скорость протекания процесса полимеризации смесей мономеров

**Замрий
Анатолий Владимирович**

генеральный директор
Межотраслевого экспертно-
аналитического центра

**Егоров
Сергей Васильевич**

старший научный сотрудник
ИПФ РАН,
к.ф.-м.н.

**Крапивницкая
Татьяна Олеговна**

научный сотрудник
ИПФ РАН,
к.т.н.

**Папушкина
Анастасия Алексеевна**

старший аналитик
Межотраслевого экспертно-
аналитического центра

**Ким
Ванесса Руслановна**

аналитик
Межотраслевого экспертно-
аналитического центра

**Ананичев
Андрей Алексеевич**

младший научный сотрудник
ИПФ РАН

**Ананичева
Светлана Андреевна**

младший научный сотрудник
ИПФ РАН

В СТАТЬЕ ПРИВЕДЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С РАЗНОЙ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ И ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ НА ПРОЦЕСС ПОЛИМЕРИЗАЦИИ МОНОМЕРОВ. БЫЛА ИССЛЕДОВАНА СКОРОСТЬ ПРОТЕКАНИЯ ПРОЦЕССА ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ПРИ ВАРИАТИВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ И РАЗЛИЧНЫХ ВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПОКАЗЫВАЮТ, ЧТО МИКРОВОЛНОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ОКАЗЫВАЕТ ЗНАЧИТЕЛЬНОЕ ВЛИЯНИЕ НА СКОРОСТЬ И КАЧЕСТВО ПОЛИМЕРИЗАЦИИ МОНОМЕРОВ. ОПРЕДЕЛЕНА ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СВЧ-ОБЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ НАИБОЛЬШЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ. ЭТИ РЕЗУЛЬТАТЫ МОГУТ БЫТЬ ПОЛЕЗНЫ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ НОВЫХ МЕТОДОВ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ И УЛУЧШЕНИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ, ЧТО В ДАЛЬНЕЙШЕМ ПОЗВОЛИТ ИСПОЛЬЗОВАТЬ ЭТОТ ПРОЦЕСС ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ С ТРЕБУЕМЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОБОЛОЧКИ УМНЫХ МИКРОКОНТЕЙНЕРОВ

THE ARTICLE PRESENTS THE RESULTS OF A STUDY OF MICROWAVE RADIATION WITH DIFFERENT INTENSITY AND DURATION EFFECT ON THE POLYMERIZATION OF MONOMERS. THE POLYMERIZATION RATE WAS STUDIED UNDER VARIABLE MICROWAVE EXPOSURE AND DIFFERENT TIME CONDITIONS. THE RESULTS SHOW THAT MICROWAVE EXPOSURE HAS A SIGNIFICANT EFFECT ON THE RATE AND QUALITY OF POLYMERIZATION OF MONOMERS. OPTIMAL PARAMETERS OF MICROWAVE IRRADIATION FOR ACHIEVING THE HIGHEST POLYMERIZATION EFFICIENCY WERE DETERMINED. THESE RESULTS CAN BE USEFUL FOR DEVELOPING NEW POLYMERIZATION METHODS AND IMPROVING EXISTING PROCESSES, WHICH WILL FURTHER ALLOW THIS PROCESS TO BE USED TO OBTAIN POLYMERS WITH THE REQUIRED CHARACTERISTICS FOR CREATING A SHELL FOR SMART MICROCONTAINERS

Ключевые слова: СВЧ-излучение, полимеризация, скорость реакции, гиротроны, микроволновый синтез.

УДК 66.095.26

ТАБЛИЦА 1. Составы используемых смесей

№	Смесь	Код смеси
1	(50 масс. % ИА + 50 масс. % Ст) + 1 масс. % AIBN + 0,5 масс. % ПЭТА	СМ-1
2	(50 масс. % ИА + 50 масс. % MMA) + 1 масс. % AIBN + 0,5 масс. % ПЭТА	СМ-2
3	(25 масс. % БА + 75 масс. % MMA) + 1 масс. % AIBN + 0,5 масс. % ПЭТА	СМ-3
4	(50 масс. % БА + 50 масс. % Ст) + 1 масс. % AIBN + 0,5 масс. % ПЭТА	СМ-4
5	(50 масс. % Ст + 50 масс. % MMA) + 1 масс. % AIBN + 0,5 масс. % ПЭТА	СМ-5

Ускорение процессов полимеризации является одним из актуальных вопросов для современной промышленности. Во многих литературных источниках описываются процессы полимеризации под воздействием различных физических факторов [1, 2, 3, 4], в том числе и сверхвысокочастотного излучения [5, 6, 7, 8]. Данные исследования являются продолжением работ по изучению воздействия физических факторов на полимеризацию акриловых мономеров в рамках проекта «Умные микроконтейнеры», в которых ранее уже рассматривалось влияние воздействия магнитной индукции [9]. В текущей статье будет рассмотрен следующий фактор – сверхвысокочастотное излучение.

Научные исследования в области микроволнового излучения за последние десять лет позволили с большой уверенностью говорить о внедрении данной технологии во многие отрасли промышленности, науки, медицины и техники. Одним из самых перспективных направлений стало применение данного метода в процессах полимеризации, что обусловлено целым рядом факторов. Так, исходя из современных исследований в области микроволнового воздействия на получение полимеров, можно определить основные преимущества данной технологии: значительное уменьшение времени реакции; повышение чистоты получаемого полимера, а также его выхода и молекулярной массы; возможность получения продукта с заданными свойствами за счет регулирования параметров процесса.

Очевидно, что использование микроволнового излучения в промышленных процессах имеет ряд преимуществ, но также оно имеет и ряд ограничений.

Одним из недостатков является невозможность применения данного метода для проведения реакций в больших периодических реакторах. Распределение микроволнового поля в среде сильно зависит от ее диэлектрических свойств и частоты излучения. Во многих полярных жидкостях диэлектрический нагрев может ограничиться слоем в несколько сантиметров у границы раздела фаз. В результате распространение тепла происходит в основном за счет конвекции, а не за счет прямого диэлектрического нагрева [10].

Тем не менее промышленное использование микроволнового излучения в качестве альтернативы тепловому нагреву в процессе полимеризации в последнее время вызвало интерес благодаря быстрой реакции. Имеются сообщения, демонстрирующие явное увеличение скорости реакции при микроволновом излучении по сравнению с тепловым методом при аналогичных условиях реакции, что указывает на специфический эффект, отличный от диэлектрического нагрева.

Микроволновый режим нагрева предлагает хорошую альтернативу обычному нагреву, потребляя меньше времени и энергии, что снижает стоимость и экологический эффект химии и переработки полимеров. Недавно было установлено, что использование микроволнового излучения в исследованиях полимеров является надежным методом ускорения химических реакций [11].

Данный способ нагрева основан на возбуждении вращательного движения молекулярных диполей в переменном электромагнитном поле. Он считается высокоэффективным способом повышения температуры полимерных материалов

благодаря глубокой проникающей способности [12]. Эффективность нагрева в значительной степени зависит от диэлектрических свойств материала.

Органический синтез с помощью микроволнового излучения, о котором впервые сообщалось в конце 1980-х годов, основан на применении микроволнового излучения в качестве источника энергии для реакций, включающего электромагнитное излучение с частотой от 0,3 до 300 ГГц [13]. Подобный синтез стал привлекательным синтетическим инструментом благодаря более короткому времени протекания реакции, более высоким выходам и ограниченному образованию побочных продуктов [14].

Исходя из этого, целью данного исследования является изучение влияния СВЧ-излучения различной частоты на скорость протекания процесса полимеризации различных смесей мономеров. Мономеры были выбраны на основании анализа научных публикаций в сфере микроволновой полимеризации. Были исследованы процессы при частотах 2.45 ГГц, 24 ГГц и 263 ГГц.

Материалы

Согласно литературным данным, для работы были подобраны компоненты состава смесей (табл. 1). Для приготовления использовали следующие компоненты: метилметакрилат (ММА), бутилакрилат (БА), изоборнилакрилат (ИА), стирол (Ст). В качестве инициатора выступал азобисизобутиронитрил (AIBN), а в качестве агента сшивки – пентаэритрит триакрилат (ПЭТА).

Важным параметром при обработке мономеров микроволновым излучением является полярность. Растворимость мономера в воде

ТАБЛИЦА 2. Физические свойства используемых мономеров

	T _{Кипения} , °C	T _{Воспламенения} , °C	T _{Вспышки} , °C	Растворимость в воде, г/100 г (20 °C)
ММА	101	460	10	1,59
ИА	120	207	–	0,198
БА	147	280	36	0,2
Ст	145	490	31	0,125

может быть мерой полярности гомополимера: при ее увеличении возрастает полярность образующегося полимера [15].

При изучении влияния СВЧ на полимеризацию установлено, что при длительной обработке микроволновым излучением в случае с метилметакрилатом в присутствии азобисизобутиронитрила эффективной полимеризации не наблюдается [16].

ММА обладает самой высокой полярностью по сравнению с другими компонентами смеси, что может приводить к бурному процессу при воздействии СВЧ-излучения

Данный факт объясняется его физико-химическими свойствами, такими как низкая температура кипения (101 °C) и высокая летучесть (192 мг/л при 20 °C), в связи с этим происходит интенсивное испарение смесей, содержащих ММА.

ММА обладает самой высокой полярностью по сравнению с другими компонентами смеси, что может приводить к бурному процессу при воздействии СВЧ-излучения. Даже при очень коротком времени воздействия на смесь она теряет объем, что может быть связано с более равномерным нагревом системы за счет более длительного времени выхода на заданную температуру.

В работе [17] рассматривалась радикальная гомополимеризация стирола и н-бутилакрилата в массе при 80 °C в присутствии агентов обратимой передачи цепи [18] (дибензилтретиокарбоната, полистиролтретиокарбоната и поли(н-бутилакрилат) третиокарбоната). Обнаружено, что в случае стирола скорость полимеризации слабо зависит от концентрации агента обратимой

передачи цепи, однако в случае бутилакрилата она существенно понижается при увеличении концентрации соответствующего агента.

Реакция полимеризации стирола имеет определенное время индукции, после которого начинается инициирование процесса. В работе [19] была изучена и проведена свободно радикальная микроволновая полимеризация

стирола с введением инициатора, нитроксида–(2,2,6,6-тетраметилпиперидин-1-ил) оксида. Установлено, что под действием микроволнового излучения процесс полимеризации в массе проходит более интенсивно, чем при простом нагревании, и есть зависимость между мощностью микроволнового излучения и скоростью полимеризации, время индукции при этом также сокращается.

Под действием микроволнового излучения процесс полимеризации в массе проходит более интенсивно, чем при простом нагревании. Кроме того, наблюдается зависимость между мощностью микроволнового излучения и скоростью полимеризации, время индукции при этом также сокращается

Полимеризация стирола под действием микроволнового излучения изучалась также с инициаторами – азобисизобутиронитрилом и бензоилопероксидом [20]. Существенной разницы при

добавлении каждого их них, по показателям продукта полимеризации, не наблюдалось, в отличие от опытов без добавления инициаторов, полимеризация в которых была не эффективна. Конверсия полистирола при обработке микроволнами 687 Вт в течение 20 минут без инициаторов была на уровне 80 %, однако образовывался низкомолекулярный полимер. При этом обработка стирола, при тех же значениях времени и мощности микроволнового излучения, с добавлением азобисизобутиронитрила 0,05 % масс. привела к конверсии, равной 90 %, с образованием полимера с более высокой молекулярной массой и характеризующегося очень высокой степенью дисперсности.

Для изучения факторов, влияющих на период индукции и скорость полимеризации, в качестве мономера был изучен н-бутилакрилат [21]. Индукционный период такой реакции оказался весьма малым даже в отсутствие инициатора. Повышение температуры, выходной мощности и концентрации ПАВ (додецилсульфат натрия), уменьшение концентрации

мономера приводит к дальнейшему уменьшению индукционного периода и увеличению скорости полимеризации. В оптимизированных условиях реакции конверсия н-бутилакрилата достигает 92 % за 11 мин.

При этом в отсутствие ПАВ полимеризация бутилакрилата была чрезвычайно медленной.

Так как в целом текущие эксперименты носят ознакомительный характер, подбор временного интервала воздействия варьировался в диапазоне 20–1000 с в зависимости от демонстрируемого (индивидуального) отклика различных составов.

Поведение смесей зависело от физико-химических характеристик их компонентов (таблица 2).

Оборудование

Работа на выбранных частотах сопровождалась использованием отдельного стенда. Для генерации частоты 263 ГГц и 24 ГГц излучения использовались установки гиротронные стенды [DOI: 10.1063/1.4921322, DOI: 10.1109/TPS.2004.823904]. Технические особенности компонентов остальных подсистем определяются назначением конкретного комплекса.

Гиротронные комплексы представляют собой совокупность следующих взаимосвязанных устройств и подсистем:

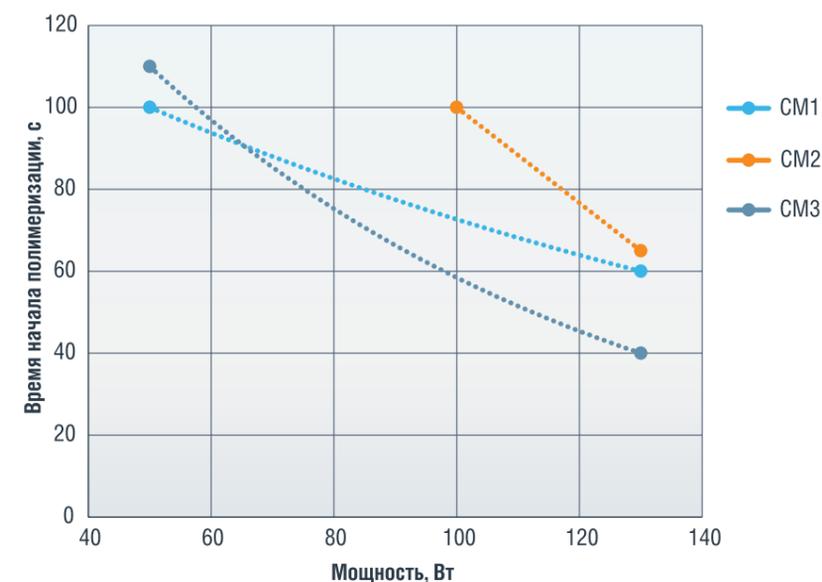
- 1) источник СВЧ-излучения, основными компонентами которого являются гиротрон и его магнитная система;
- 2) система электропитания комплекса;
- 3) система охлаждения компонентов комплекса;
- 4) линия преобразования и транспортировки излучения;
- 5) рабочая камера;
- 6) автоматизированная система управления и защиты.

В рамках работы с применением излучения с частотой 2,45 ГГц использовался микроволновый стенд резонаторного типа с периодическим режимом работы, мощностью до 1 кВт.

В конструкции установки предусмотрены следующие основные элементы:

- 1) СВЧ-источник – магнетрон;
- 2) высоковольтный источник питания;
- 3) СВЧ-резонатор, внутрь которого помещается обрабатываемый материал;

РИСУНОК 1. График зависимости времени начала процесса полимеризации от мощности СВЧ-излучения



4) система транспортировки СВЧ-излучения от источника в резонатор, система контроля параметров реакции.

Переменными параметрами являлись показатели мощности и времени, которые выбирались на основании литературных данных в зависимости от частоты.

Исследования проводились в борсиликатных виалах, поэтому важно дополнительно учитывать погрешность, связанную с поглощением части излучения материалом.

Излучение 263 ГГц

Согласно литературным данным, рекомендуемое значение мощности СВЧ в процессах полимеризации варьируется в диапазоне 90–110 Вт [22]. Для того чтобы получить более четкое представление о реагировании исследуемых смесей, данный диапазон расширили до 50–130 Вт. В рамках текущего исследования по изучению влияния СВЧ-излучения на скорость полимеризации мономеров проводили ряд экспериментов при постоянной частоте 263 ГГц, температуре окружающего воздуха 23 °C.

Конечный продукт обработки проб был представлен в виде равномерно загустевшего продукта либо во вспененном состоянии. Его масса была меньше в связи с испарением или выкипанием

компонентов состава. Необходимо учитывать, что полученные полимеры, вероятно, имеют низкую молекулярную массу.

Смеси, содержащие ММА (СМ-2 и СМ-3), при обработке СВЧ-излучением высокой мощности (100–130 Вт) подвержены активному кипению и испарению, процесс увеличения вязкости проходит неравномерно в связи с самой низкой температурой кипения ММА (табл. 1) из всех исследуемых мономеров, поэтому он испаряется в процессе воздействия СВЧ-излучения.

Повышение вязкости и загущение смесей проходит равномернее при более низких мощностях (70–50 Вт), смеси кипят не так активно. Можно предположить, что смеси не перегреваются и остывают равномерно.

Построены зависимости начала времени реакции полимеризации от мощности проведения процесса для каждого из составов (рисунок 1). Для всех смесей сохраняется схожая зависимость: уменьшение индукционного периода с увеличением мощности СВЧ-излучения. Однако необходимо учитывать, что при высоких мощностях образуются неравномерно застывшие составы – в виде пузырей. По этой причине более низкие мощности предпочтительнее, но время начала процесса при этом увеличивается.

ТАБЛИЦА 3. Оптимальное время воздействия среднечастотного излучения на смеси

Код смеси	Нижний предел оптимума времени полимеризации, с	Верхний предел оптимума времени полимеризации, с
СМ-1	200	300
СМ-2	20	60
СМ-3	150	250
СМ-4	Отсутствие реакции	Отсутствие реакции
СМ-5	Отсутствие реакции	Отсутствие реакции

Предположительно, обработка СВЧ-излучением высокой частоты не приводит к быстрой полимеризации мономера. Это может указывать на то, что при высокочастотном излучении процессы деполимеризации, выкипания преобладают над процессом полимеризации.

Излучение 24 ГГц

Была произведена обработка составов при средних мощностях 150–300 Вт. Исходя из результатов эксперимента, можно сделать следующие выводы.

Система СМ-1 показывает наилучшие результаты при обработке СВЧ-излучением. Она не теряет объем, не реагирует на незначительные перегревы (более длительное воздействие), в отличие от других систем реагирует одинаково как на короткое, так и на длительное время воздействия.

Обработка системы СМ-2 в течение 50 секунд позволяет уменьшить потерю объема при нагреве, вероятно, благодаря более равномерному нагреву системы. Нижний и верхний пределы оптимума определяются возможностью процесса полимеризации в данных пределах, однако стоит учитывать, что при их достижении возможно нежелательное вспенивание полимера.

Для системы СМ-3 оптимальным временем обработки является промежуток от 150 до 250 секунд, после чего происходит полное выкипание состава.

Системы СМ-4 и СМ-5 не реагируют положительно на воздействие СВЧ-излучения независимо от времени обработки в связи с кипением состава.

Таким образом, в данном исследовании наиболее

эффективным составом оказывается СМ-1, для каждого из составов определены оптимальные промежутки времени при воздействии СВЧ-излучения (таблица 3).

Излучение 2,45 ГГц

Исследование влияния мощностей проводилось в промежутке от 320 до 800 Вт. Погрешность в измерении температуры составляет ±15 °С, т.к. измерения проводили с помощью пирометра.

Исследование влияния мощностей на составы показало, что оптимальные параметры обработки зависят от конкретного состава. Для составов СМ-2 и СМ-3, которые содержат ММА, лучшие результаты были достигнуты при длительной обработке со средней мощностью в промежутке от 320 до 800 Вт. Это позволило добиться равномерного застывания и сохранения большей части объема. Однако для состава СМ-5 с добавлением стирола оптимальные параметры оказались сложнее

подобрать, поскольку требовалась длительная обработка, и системы перегревались, приводя к потере объема и изменению цвета. Присутствие стирола также ослабляло микроволновый эффект из-за его низкой полярности. При мощности выше 640 Вт все составы перегревались и показывали неудовлетворительный результат.

Для СМ-1 оптимальными параметрами обработки являются мощность 320 Вт и время воздействия 50 с. Более короткое время не дает положительного отклика, а более длительная обработка вызывает перегрев и изменение цвета состава.

В случае с СМ-2 происходит интенсивное испарение, обусловленное физико-химическими свойствами ММА, но это не сильно влияет на процесс, так как смесь СМ-2 показывает положительный отклик даже при минимальном времени обработки. Оптимальными параметрами для этого состава являются мощность 320 Вт и время 40 с, что позволяет

сохранить большую часть объема и обеспечивает равномерную полимеризацию.

СМ-3 обладает также характерными свойствами, обусловленными наличием ММА в составе, поэтому при нагревании смеси в микроволновой печи с мощностью 480 Вт и временем 40 с происходит интенсивное кипение. Эти параметры являются оптимальными для данного состава. За указанное время происходит полимеризация и смесь полностью застывает. Однако следует отметить, что процесс полимеризации происходит равномерно и быстро (< 100 с) при мощностях от 320 до 640 Вт, но даже при коротком времени воздействия происходит потеря объема, которая связана с физико-химическими свойствами компонентов смеси.

СМ-4 демонстрирует меньший положительный отклик на микроволновое излучение. Для этой системы оптимальными условиями, в рамках данного исследования, являются мощность 320 Вт и время обработки 270 с. При попытке сократить время воздействия путем увеличения мощности мономер запекается на стенках емкости, что приводит к расслаиванию и изменению цвета смеси.

СМ-5 также в ходе проведения опытов продемонстрировал меньший положительный отклик на воздействие микроволнового излучения. Иницирование реакции затруднено из-за особенностей свойств компонентов смеси. Система сложно поддается контролю из-за высокой летучести ММА, а при сокращении времени воздействия не удается достичь иницирования процесса, из-за чего смесь остается в жидком состоянии.

При данной частоте лучшие результаты были получены для СМ-1 и СМ-2, т.к. удалось добиться равномерного застывания, сохранения большей части объема относительно других систем. Обнаружено, что смеси, в составе которых присутствует ММА, заметно быстрее откликаются на обработку, однако тенденция не сохраняется для состава СМ-5.

Замечено, что в присутствии стирола (СМ-1, СМ-4, СМ-5) подбор оптимальных параметров затруднен – требуется длительная обработка, системы перегреваются с потерей

большого объема и изменением цвета. Низкая полярность стирола обуславливает слабую поляризацию молекул мономера при приложении электромагнитного поля. В результате нагрев реакционных смесей для таких мономеров происходит медленнее, а так называемый микроволновый эффект оказывается недостаточно сильным [23]. Кроме того, обнаружено, что высокая мощность (выше 640 Вт) негативно сказывается на составах мономеров – смеси перегреваются.

График на рисунке 2 демонстрирует оптимальные параметры для каждого из составов.

Вывод

Результаты исследования показывают, что СВЧ-излучение оказывает значительное влияние на полимеризацию мономеров. Таким образом, можно смело говорить о перспективах данного метода и возможности его применения в данной области и существенного изменения их свойств с целью улучшения показателей получаемых продуктов и эффективности процесса. В дальнейшем это может быть использовано для получения соединений с заданными характеристиками, в том числе подходящих для локальной эффективной изоляции, инкапсулирования различных реагентов в полимерную оболочку либо для управляемого раскрытия оболочки – для применения в технологиях УМК. ●

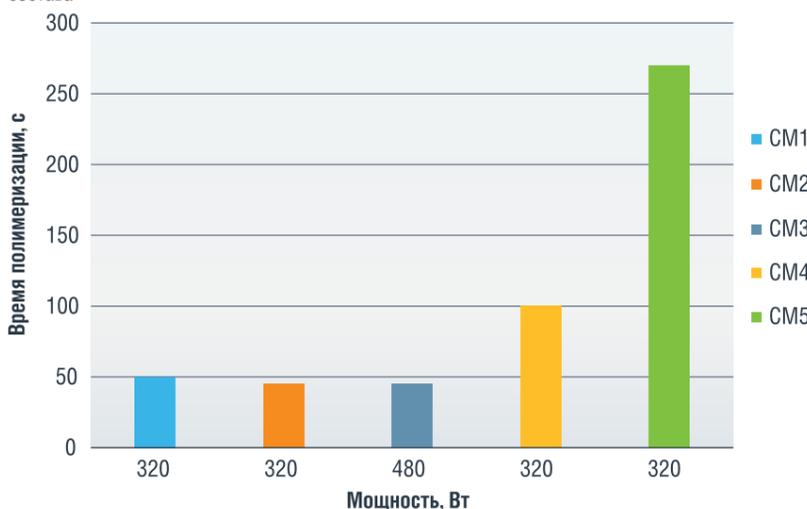
Литература

- D. T. G. McKenzie, F. Karimi, M. Ashokkumar and G.G. Qiao, *Ultrasound and Sonochemistry for Radical Polymerization: Sound Synthesis, Chemistry – A European Journal*, т. 25, № 21, pp. 5372–5388, 2019.
- М.А. Маргулис, *Звукохимические реакции и сонолюминесценция*, Химия, 1986.
- А. Шибашов и Е.Ю. Сокерина *Влияние низкочастотного ультразвукового воздействия на процесс полимеризации мочевино-формальдегидной смолы*, *Актуальные вопросы естествознания*, 2009.
- X. Xu, Z. Zhang, X. Ge and M. Zhang, *Effect of dose rate on emulsion and microemulsion polymerization of styrene*, *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, т. 36, № 2, pp. 257–262, 1998.
- Kempe K., Becer C. R., Schubert U. S. *Microwave-assisted polymerizations: recent status and future perspectives* // *Macromolecules*. – 2011. – Т. 44. – № 15. – С. 5825–5842.
- Wiesbrock F., Hoogenboom R., Schubert U. S. *Microwave-assisted polymer synthesis: state-of-the-art and future perspectives* // *Macromolecular Rapid Communications*. – 2004. – Т. 25. – № 20. – С. 1739–1764.

- Sosnik A., Gotelli G., Abraham G. A. *Microwave-assisted polymer synthesis (MAPS) as a tool in biomaterials science: how new and how powerful* // *Progress in polymer science*. – 2011. – Т. 36. – № 8. – С. 1050–1078.
- Hoogenboom R., Schubert U. S. *Microwave-assisted polymer synthesis: recent developments in a rapidly expanding field of research* // *Macromolecular Rapid Communications*. – 2007. – Т. 28. – № 4. – С. 368–386.
- Максимов А.Л., Антонов С.В., Замрий А.В., Алиева Л.А., Чурина А.А., Ахметзянов И.И., Бахмутов А.В., Безруков Н.П. *Магнитная индукция. Воздействие на мономеры акрилового ряда*, *Деловой журнал Neftegaz.RU*, т. 141, № 9, С. 30–35, 2023.
- Z. Yu and L. Liu, *Microwave-assisted synthesis of poly (ε-caprolactone)-poly (ethylene glycol)-poly (ε-caprolactone) tri-block co-polymers and use as matrices for sustained delivery of ibuprofen taken as model drug*, *Journal of Biomaterials Science*, т. 16, № 8, pp. 957–971.
- Kabir E. *Application of microwave heating in polymer synthesis: A review* // *Results in Chemistry*. – 2023. – Т. 6. – PP. 101178.
- Q. Hu, Y. He, F. W. J. Wu, Z. Ci, L. Chen, R. Xu, M. Yang, J. Lin, L. Han and D. Zhang, *Microwave technology: a novel approach to the transformation of natural metabolites*, *Chinese Medicine*, 2021.
- H. L. Chia, J. Jacob and F. Y. C. Boey, *The microwave radiation effect on the polymerization of styrene*, *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, т. 34, № 1, pp. 2087–2094, 1996.
- J. Bao and A. Zhang, *Poly (methyl methacrylate) nanoparticles prepared through microwave emulsion polymerization*, *Journal of applied polymer science*, т. 93, № 6, pp. 2815–2820, 2004.
- Е.С. Пикалов и А.С. Торлова *Получение, свойства и применение полиакрилатов*, [В Интернете]. Available: <https://scienceforum.ru/2017/article/2017033887>.
- Gabriel, S. Gabriel, E. H. Grant, E. H. Grant, B. S. J. Halstead and D. M. P. Mingos, *Dielectric parameters relevant to microwave dielectric heating*, *Chemical Society Reviews*, № 3, pp. 213, 1998.
- Черникова Е.В. и др. *Контролируемая радикальная полимеризация стирола и н-бутилакрилата в присутствии триэтиленгликоля* // *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. – 2007. – Т. 49. – № 2. – С. 208–221.
- Черникова Е.В. и др. *Радикальная полимеризация метилметакрилата в присутствии дитиобензоатов в качестве агентов обратной передачи цепи* // *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. – 2008. – Т. 50. – № 4. – С. 565–578.
- J. L. Xiulin, Z. J. Zhu and Z. Cheng, *Radiation Physics and Chemistry*, т. 75, № 2, pp. 253–258, 2006.
- A. Fores, P. B. L. Sadicoffa, M. C. V. Amorim and M. C. S. d. Mattos, *Microwave-assisted free radical bulk-polyaddition reactions in a domestic microwave oven*, *Polymer Testing*, т. 21, № 2, pp. 145–148, 2002.
- H.M. Cheung and K. Gaddam, *Ultrasound-assisted emulsion polymerization of methyl methacrylate and styrene*, *Journal of applied polymer science*, т. 76, № 1, pp. 101–104, 2000.
- L.J. Fang, G. Han and H.Q. Zhang, *Microwave-assisted free radical polymerizations*, *Advances in Polymer Science*, т. 274, pp. 87–129, 2016.
- A.N. Mudrova, A.S. Tishchenkoa, T.A. Ageeva and O. I. Koifmana, *Kinetic Features of Radical Polymerization of Styrene under Microwave Irradiation Conditions*, *Russian Journal of General Chemistry*, т. 86, № 6, pp. 1510–1514, 2016.

KEYWORDS: *microwave radiation, polymerization, reaction rate, gyrotrons, microwave synthesis.*

РИСУНОК 2. График оптимальных параметров обработки СВЧ-излучением для каждого состава



Полная версия журнала
доступна по подписке