

УДК/UDC 621.365.5:628.477

DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-3-83-91

EDN: WBRLVS

Научная статья / Original article

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИНДУКЦИОННОГО, МИКРОВОЛНОВОГО И ДВУХСТАДИЙНОГО ПИРОЛИЗА РАЗЛИЧНЫХ ПОЛИМЕРОВ

В. И. Трушляков, А. А. Петрук

Омский государственный технический университет, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Проведён сравнительный анализ существующих методов на основе пиролиза с использованием электромагнитных токов: индукционного, сверхвысокочастотного, а также совместного двухстадийного (индукционного и сверхвысокочастотного). Рассмотрена возможность создания энергетической независимости процесса пиролиза для каждого метода. Оценена эффективность каждого метода на основе введённых критериев эффективности: температурный режим, время реакции, выход жидкой, парогазовой и твёрдой фракций, энергозатраты, сложность контроля, универсальность и производительность. Все критерии приведены к безразмерной форме. В качестве базового критерия взяты соответствующие критерии индукционного нагрева.

Ключевые слова: пиролиз, индукционный, сверхвысокочастотный, двухстадийный, критерии, энергетическая независимость.

Для цитирования: Трушляков В. И., Петрук А. А. Сравнительный анализ методов индукционного, микроволнового и двухстадийного пиролиза различных полимеров // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2025. Т. 9, № 3. С. 83–91. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-3-83-91. EDN: WBRLVS.



© Трушляков В. И., Петрук А. А., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

COMPARATIVE ANALYSIS OF INDUCTION, MICROWAVE AND TWO-STAGE PYROLYSIS METHODS FOR VARIOUS POLYMERS

V. I. Trushlyakov, A. A. Petruk

Omsk State Technical University, Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The article presents a comparative analysis of existing methods based on pyrolysis using electromagnetic currents: induction, ultra-high frequency and two-stage combination (induction and ultra-high frequency). The authors consider the possibility of creating energy independence of the pyrolysis process for each method. Moreover, the effectiveness of each method is evaluated based on the introduced efficiency criteria: a temperature regime, reaction time, the output of liquid, combined-cycle and solid fractions, energy consumption, the complexity of control, versatility and productivity. All criteria are reduced to a dimensionless form. The corresponding criteria of induction heating are considered as the basic one.

Keywords: pyrolysis, induction, ultra-high frequency, two-stage, criteria, energy independence.

For citation: Trushlyakov V. I., Petruk A. A. Comparative analysis of induction, microwave and two-stage pyrolysis methods for various polymers. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2025. Vol. 9, no. 3. P. 83–91. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-3-83-91. EDN: WBRLVS.



© Trushlyakov V. I., Petruk A. A., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

В настоящее время два варианта утилизации полимерных отходов, такие как захоронение и сжигание, являются наиболее распространенными решениями, что влечет за собой негативное влияние на окружающую среду [1]. Одним из экологичных способов утилизации полимерных отходов считается пиролиз как метод термического разложения полимеров в бескислородной среде, который позволяет получать продукты (газ, жидкость, твердый остаток) при минимальных выбросах [2–4]. Ключевым аспектом эффективности пиролиза является метод нагрева реактора. В последние годы активно исследуются методы электромагнитного нагрева: индукционный [5–9], микроволновый [10–13] и двухстадийный нагрев [14–17], включающий как индукционный, так и микроволновый методы.

В [5] описана экспериментальная установка на основе индукционного нагрева (ИН), применяемая для пиролиза пластиков. Для сравнения характеристик метода ИН рассмотрен метод пиролиза на основе использования реактора с кипящим слоем. По результатам сравнения было показано, что ИН дает больше твердого остатка, но меньший выход парогазовой фракции — 21,5 % против 31,9 %.

В [6] представлена ИН-установка с углеродным катализатором, позволяющая получить выход жидкой фазы до 89,3 %. В [7] приведены обобщения параметров ИН-пиролиза, включая диапазоны частот, температур и времени. В [8] рассмотрен пиролиз полиэтилена низкой плотности (ПНП), полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) и полипропилена (ПП) с использованием катализатора оксида железа (Fe_3O_4). Показан выход газа до 28 % при температуре 650 °C. В [9] предложен энергоэффективный ИН-метод утилизации полиэтилена (ПЭ), обеспечивающий полное разложение полимеров в течение 10 минут и отличающийся от методов пиролиза, таких как реакторы с кипящим слоем и микроволновый пиролиз, где время реакции составляет 30–60 минут.

Для метода пиролиза на основе микроволнового нагрева (МВН) в [10] представлена установка с многорежимными резонаторами на 915 и 2,45 ГГц, мощностью 5 и 6 кВт соответственно, обеспечивающая пиролиз полимерных отходов с равномерным нагревом и степенью утилизации полимерных отходов массой 6 г до 98 % от 1 до 40 минут. В [11] описана установка МВН со шнековой подачей и слоем из SiC (карбида кремния), которая способствует газовому выходу до 74,7 % при мощности микроволнового излучения 9 кВт и температуре до 740 °C. В [12] проведено математическое и физическое моделирование нагрева 25 кг поликарбоната. Выявлено влияние геометрии камеры и волноводов на равномерность температурного поля. В [13] исследованы конструктивные параметры микроволновых реакторов и влияние отражающих элементов на эффективность и равномерность нагрева различных пластиков.

В [14–17] рассмотрены лабораторные стенды, реализующие методы на основе двухстадийного пиролиза (ИН и МВН), изначально разработанные для термообработки пищевых продуктов. Стенды включают индукционный модуль, обеспечивающий быстрый нагрев с помощью специального поглотителя из карбида кремния. Микроволновый модуль обеспечивает равномерный нагрев объема специального поглотителя. В [17] отдельно рассмотрены вопросы автоматизации такой системы: необходи-

мость синхронного управления двумя источниками нагрева с различными частотами и физическими принципами работы; обеспечение стабильного распределения температуры по объёму загрузки реактора за счёт многоточечного контроля; фазовая синхронизация микроволн для уменьшения зон локального перегрева.

Таким образом, возникает необходимость проведения сравнительного исследования существующих установок пиролиза на основе методов ИН, МВН и двухстадийного нагрева (ДСН), в том числе оценка возможности энергетической независимости процесса утилизации на основе каждого метода пиролиза.

Постановка задачи

1. Для решения поставленной цели исследования необходима разработка критериев для сравнения методов пиролиза, реализуемых различными установками по обеспечению температурных режимов реакторов, в том числе по производительности, типу утилизируемого сырья и т.д. В качестве базового варианта для сравнения используется вариант ИН. В дальнейшем для сравнения вариантов используются приведенные безразмерные критерии:

$$\dot{K}_j^i = \frac{K_j^i}{K_{ин}^i}, \quad (1)$$

где $K_{ин}^i$ — критерии базового варианта ИН; i — текущий номер критерия; j — вариант метода; K_j^i — сравниваемый критерий эффективности варианта МВН или ДСН; $\dot{K}_j^i$ — приведенный безразмерный критерий сравнения эффективности.

2. Исследование существующих методов пиролиза на основе ИН, МВН, ДСН с оценкой возможности энергетической независимости процесса.

3. Проведение сравнительного анализа в рамках разработанных критериев.

4. Обсуждение полученных результатов.

Критерии эффективности

Для сравнения методов пиролиза на основе ИН, МВН и ДСН предлагается девять критериев:

- температурный режим процесса в зоне реактора, K_T , °C;
- интервал времени нахождения утилизируемой смеси в зоне реактора, $K_{\Delta t}$, мин.;
- выход жидкой фракции пиролиза, $K_{ж}^i$, %;
- выход парогазовой смеси пиролиза, $K_{пгс}^i$, %;
- выход твердого остатка пиролиза, $K_{тв}^i$, %;
- энергоэффективность процесса пиролиза — затраты энергии на переработку единицы массы сырья с учётом энергетической ценности парогазовой смеси, K_j , МДж/кг;
- сложность установки, которая характеризуется количеством независимых контуров управления, датчиков и управляющих подсистем, необходимых для поддержания стабильного режима работы установки, K_c , шт.;
- универсальность, которая определяется количеством типов утилизируемого сырья, $K_{ун}^i$, шт.;
- производительность — перерабатываемая установкой масса сырья за единицу времени, $K_{пр}^i$, кг/ч.

Для приведения существующих экспериментальных установок к единому безразмерному виду при сравнительном анализе рассматривается базовый вариант — метод на основе ИН [9].

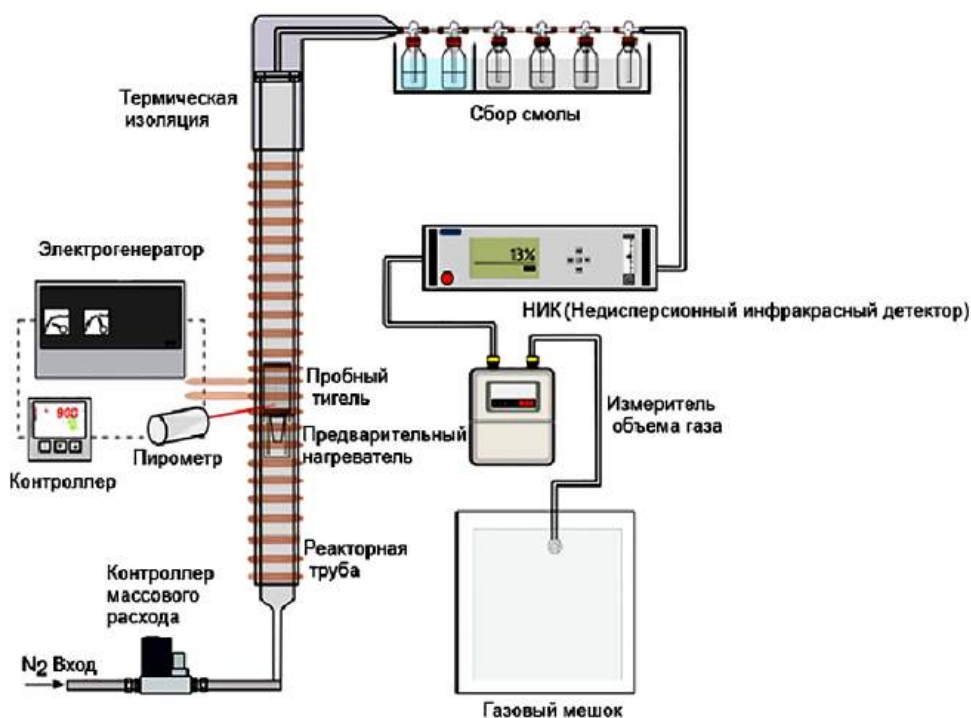


Рис. 1. Система индукционного нагрева
Fig. 1. Induction heating system

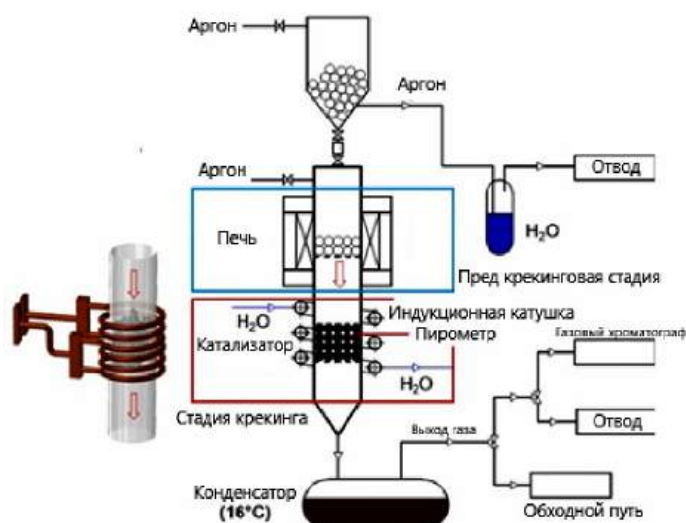


Рис. 2. Индукционный реактор с углеродным катализатором
Fig. 2. Induction reactor with a carbon catalyst

Установки на основе метода индукционного нагрева

Метод индукционного нагрева основан на создании вихревых токов в проводящем материале переменным магнитным полем. Вихревые токи вызывают нагрев за счет электрического сопротивления [6].

В [5] описана лабораторная установка с ИН (рис. 1), включающая реактор, систему сбора продуктов и аналитические модули.

В [6] описана индукционная установка с углеродным катализатором, обеспечивающая выход жидких углеводородов до 89,3 % при 470 °С. Схема установки приведена на рис. 2.

В [7] описан диапазон частот индукционного нагрева от 10 кГц до 2 МГц; температура процессов — 100–500 °С; время реакции — от 1

до 15 мин., мощность — от 500 Вт до 5 кВт. В качестве сырья использовались полимеры с ферромагнитными добавками (Fe_3O_4 , графит, Ni) — для повышения температуры и скорости протекания процесса за счет усиленного поглощения энергии индукционного поля. В [8] использовалась индукционная установка мощностью 1,2 кВт, достигавшая температуры 650 °С за 10 мин. Жидкая фаза составила 70–72 %; парогазовая — 25–28 %; твердая — 5–6 %. Сырьё — полиэтилен низкой плотности (ПНП); полиэтилен высокой плотности (ПЭВП) и полипропилен (ПП). В [9] рассмотрен ИН-пиролиз ПНП, ПЭВП и ПП. Температура процесса пиролиза составила 420 °С при продолжительности процесса до 10 мин. Выход жидкой фазы — 24–32 %; парогазовой — 61–70 %; твердой — 6–7 % в зависимости от катализатора (Fe_3O_4 , Ni, Pt).

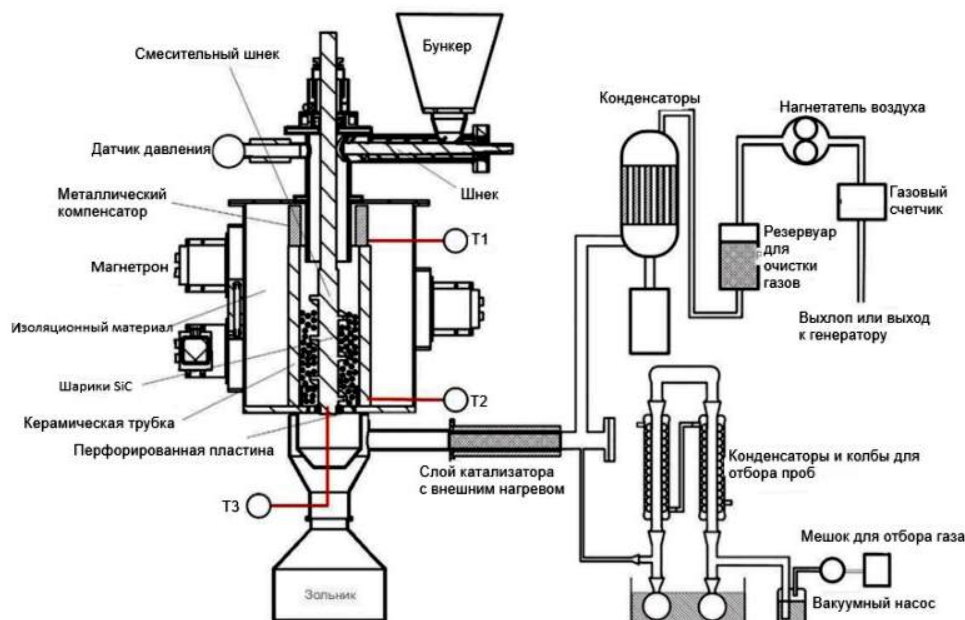


Рис. 3. Система непрерывного МВН-пиролиза
Fig. 3. Continuous microwave heating pyrolysis system

По результатам приведённого обзора работ можно сказать, что ИН позволяет точно контролировать температурные режимы, обладает высокой скоростью нагрева и эффективен при получении жидкой фракции продуктов пиролиза. Однако требует применения катализаторов, чувствительных к условиям эксплуатации.

ИН включает регулирование мощности индуктора и поддержание заданной температуры в реакторе, что реализуется через контур управления всем процессом. Контроль и поддержание температуры в реакторе обеспечиваются за счёт измерений встроенными термодарами, а при нагреве до 500–600 °С изменяются электрические свойства сырья, что может вызывать колебания мощности нагрева и температурного поля. При использовании ферромагнитных катализаторов или сырья с переменной проводимостью возникает необходимость в более точной регулировке частоты и мощности, что увеличивает требования к системе автоматизации.

Анализ энергетических затрат на пиролиз с использованием ИН, согласно данным [9], составляют ~11,6 МДж на 1 кг сырья: 8,6 МДж на основной нагрев и ~3,0 МДж на вспомогательные системы (охлаждение реактора, подогрев катализатора, измельчение утилизируемого сырья, приводы загрузки и систему управления). С учетом того, что при выходе продуктов на 1 кг сырья парогазовая фракция (32 %) с теплотворной способностью 46,5 МДж/кг производит ~14,9 МДж тепловой энергии. Жидкая фракция при оценке энергетической независимости не использовалась.

В качестве базового варианта для приведения введённых критериев к безразмерному виду принята установка пиролиза с ИН [9]. Такой выбор обусловлен следующими факторами:

- индукционный метод подробно описан в ряде публикаций, охватывающих как лабораторные, так и опытные установки;

- параметры процессов варьируются в среднем диапазоне по температуре, времени реакции, выходу фракций и энергоэффективности, что делает

метод репрезентативным для сравнения с другими методами;

- для ИН представлены количественные данные по всем девяти сравниваемым критериям, что позволяет использовать его в качестве эталонного.

Установки на основе метода микроволнового нагрева

Микроволновый нагрев основан на взаимодействии микроволн с полярными молекулами или диэлектрическими свойствами сырья, вызывающем их колебания и выделение тепла [12].

В [10] представлена микроволновая установка с многорежимным резонатором (915 МГц и 2,45 ГГц) и общей мощностью 700 Вт, предназначенная для пиролиза полимерных отходов. Проведены расчёты и эксперименты по распределению электромагнитного и температурного полей, показано улучшение однородности нагрева, а степень утилизации сырья составила до ~98 %, что демонстрирует эффективность многочастотного нагрева по сравнению с одночастотными системами.

Наиболее полно описана система утилизации полимерных отходов с помощью МВН в [11], в которой реализована шнековая подача сырья до 10 кг. При мощности магнетрона 9 кВт выход жидких продуктов составил 47,4 %, 24 %; газовых — 40,5 %, 74,7 %; твердый остаток — 12,1 %, 1,3 % при температурах процесса 500 °С и 740 °С соответственно в течение 60 мин. Система обеспечивает высокую энергоэффективность и глубину пиролиза. Схема установки приведена на рис. 3.

В работе [13] проанализировано влияние конструктивных параметров микроволнового реактора на равномерность нагрева утилизируемого сырья, включая высоту полости, расположение волноводов и применение отражателей различной формы. Показано, что оптимизация геометрии камеры, в том числе установка сферических или конических отражателей и двойных волноводов, позволяет повысить коэффициент поглощения мощности до 53 % и снизить неравномерность температурного поля более чем на 20 %. На эффективность нагрева су-

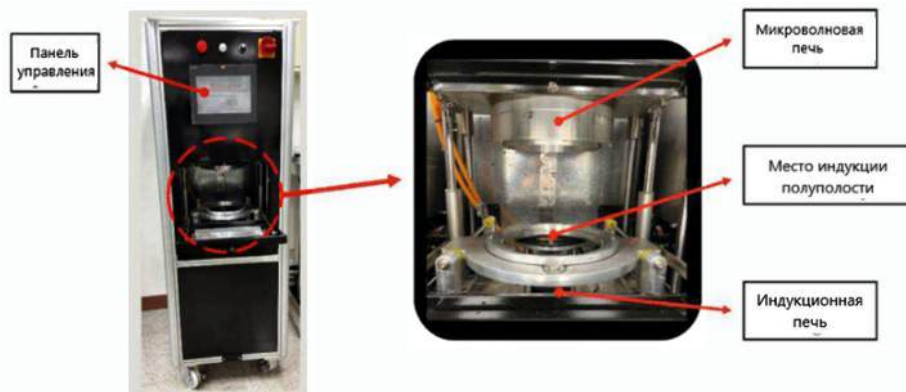


Рис. 4. Фотографии реактора двухстадийного нагрева (ИН и МВН)
Fig. 4. Photos of the two-stage heating reactor (IN and MVN)



Рис. 5. Схема реактора двухстадийного нагрева (ИН и МВН):

- 1 — блок микроволнового нагрева; 2 — волновод;
 - 3 — корпус полусферы микроволнового резонатора;
 - 4 — крышка полусферы микроволнового резонатора;
 - 5 — проводящая полусфера; 5-1 — верхняя крышка проводящей полусферы;
 - 5-2 — герметичный СРЕТ-контейнер; 5-3 — корпус проводящей полусферы;
 - 6 — поворотный стол; 7 — шестерни; 8 — вращающий двигатель;
 - 9 — блок индукционного нагрева; 10 — контроллер мощности индукционного нагрева
- Fig. 5. Reactor of two-stage heating (induction and microwave):
- 1 — microwave heating unit; 2 — waveguide; 3 — housing of the hemisphere of the microwave resonator; 4 — lid of the hemisphere of the microwave resonator; 5 — conductive hemisphere;
 - 5-1 — upper lid of the conductive hemisphere; 5-2 — sealed CPET container;
 - 5-3 — housing of the conductive hemisphere; 6 — rotary table; 7 — gears; 8 — rotating motor;
 - 9 — induction heating unit; 10 — induction heating power controller

щественно влияют такие параметры, как мощность и частота микроволн, используемый катализатор, температура и время процесса, а также диэлектрические свойства утилизируемого сырья.

Использование микроволнового реактора сопровождается специальными поглотителями, так как утилизируемое сырье имеет выраженные диэлектрические свойства. Сложность контроля микроволновых систем отличается наименьшей эксплуатационной сложностью среди рассматриваемых методов. Современные системы работают на фиксированной частоте (2,45 ГГц), а управление ограничивается регулировкой выходной мощности магнетрона. Благодаря объёмному характеру нагрева и высокой воспроизводимости температурного поля достаточно одного-двух измерительных контуров.

Анализ энергетических затрат на процесс пиролиза с помощью МВН показал, что для переработки 1 кг ПНП с помощью системы [11] требуется 6 МДж электроэнергии. 1,9 МДж электроэнергии для магнетронов и 4,1 МДж электроэнергии для других частей (включая систему подогрева слоя катализатора, водяной охладитель и электродвигатели для движущихся частей, измельчение сырья) необходимы для непрерывной переработки 1 кг гранул ПНП. В ходе процесса было получено 21,7 МДж газа. Теплотворная способность продуктов сопоставима с традиционным топливом, достигая 46,5 МДж/кг для газовых продуктов. Из газового продукта можно произвести ~6,1 МДж электроэнергии, что достаточно для обеспечения потребности в электроэнергии ~6,0 МДж и соот-

Таблица 1. Сравнительный анализ критериев эффективности методов пиролиза
Table 1. Comparative analysis of the effectiveness criteria of pyrolysis methods

№	Критерий	Обозначение	ИН	ИН: приведенное	МВН: значение	МВН: приведенное	ДСН: значение	ДСН: приведенное
1	Температурный режим, °С	K_T	420 °С	1,00	740 °С	1,76	900 °С	2,14
2	Время реакции, мин.	$K_{\Delta t}$	10 мин.	1,00	~60 мин.	6	90 мин.	9
3	Выход жидкой фракции, %	$K_{ж}$	61 – 70 %	1,00	до 47,4 %	0,68	0 %	0,0
4	Выход парогазовой фракции, %	$K_{пгс}$	24 – 32 %	1,00	до 74,7 %	2,33	95 %	2,97
5	Выход твёрдого остатка, %	$K_{т}$	6 – 7 %	1,00	до 5 %	0,71	5 %	0,71
6	Энерго-эффективность, МДж	K_{ϵ}	~14,9	1,00	~6,0	0,4	20,6	1,38
7	Сложность контроля, шт.	K_c	1,00	1,00	0,5	0,5	3	3
8	Универсальность, шт.	$K_{ун}$	Полиэтилен высокой плотности (ПЭВП), полиэтилен низкой плотности (ПНП), полистирол (ПС)	1,00	Полиэтилен высокой плотности (ПЭВП), полиэтилен низкой плотности (ПНП), полистирол (ПС)	1,0	Полистирол (ПС), полипропилен (ПП), полиэтилен (ПЭ)	1,0
9	Производительность, кг/ч	$K_{пр}$	~1,5 – 2 кг/ч	1,00	~10 кг/ч	5	~10 кг/ч	5

ветствует энергетической независимости системы. Жидкая фракция при оценке энергетической независимости не использовалась.

Для количественного сравнения методов пиролиза используется приведение к безразмерному виду критериев.

На основе проведённого обзора следует, что МВН обладает определённой универсальностью, что соответствует приведённым критериям, за счёт объемного и равномерного распределения температуры, сокращения времени выхода на рабочую температуру и повышения выхода газообразных продуктов.

Установки на основе метода двухстадийного нагрева

Двухстадийный пиролиз сочетает контактный индукционный нагрев и объёмный микроволновый. Такая схема позволяет быстро достичь высоких температур в заданных зонах с помощью локального нагрева методом индукционного пиролиза и равномерно распределить тепловой поток в реакционном объёме с помощью метода микроволнового пиролиза.

В [14 – 17] описаны лабораторные установки, включающие два источника тепла: индукционный модуль (60 Гц, до 1,8 кВт), направленный на локальный нагрев карбида кремния (SiC) и микроволновый (2,45 ГГц, до 1,3 кВт), для равномерного объемного нагрева. Такая архитектура обеспечивает нагрев до 130 °С за 80 с. и применялась в условиях до 120 °С. Все рассмотренные работы относятся к системам низкотемпературного нагрева и ориентированы на пищевую промышленность. Таким образом, отсутствуют данные о поведении подобных систем в температурном диапазоне, ха-

рактерном для пиролиза пластиковых отходов (600 – 700 °С).

Фотографии реактора двухстадийного нагрева (ИН и МВН) приведены на рис. 4. Схема реактора двухстадийного нагрева (ИН и МВН) приведена на рис. 5.

Анализ энергетических затрат на процесс пиролиза с помощью ДСН показал, что при последовательном использовании двух этапов нагрева достигается практически полная утилизация углеводородов в газообразное топливо. Расчёты выполнены на основе экспериментальных данных из работ [9, 11].

Суммарные затраты электроэнергии на переработку 1 кг полимерного сырья в комбинированной установке составляют около 20,6 МДж, включая ~8,6 МДж на индукционный нагрев сырья; ~7,0 МДж на микроволновый нагрев жидкой фракции; ~5,0 МДж на вспомогательные системы.

На выходе после индукционного процесса пиролиза формируется ~70 % жидкой, ~25 % парогазовой фракции и ~5 % твёрдой фазы. Микроволновый пиролиз позволяет довести поступающую жидкую фракцию в парогазовую смесь с выходом до 95 %, что эквивалентно ~44,2 МДж газа, что делает метод ДСН энергетически независимым.

Обсуждение полученных результатов

Значения критериев эффективности для каждого метода приведены в табл. 1.

Результаты сравнения методов пиролиза ИН, МВН и ДСН по разработанным критериям приведены на рис. 6 – 8 соответственно.

Сравнительный анализ показал, что каждый из трёх методов пиролиза — ИН, МВН, ДСН — обладает как преимуществами, так и ограничениями,

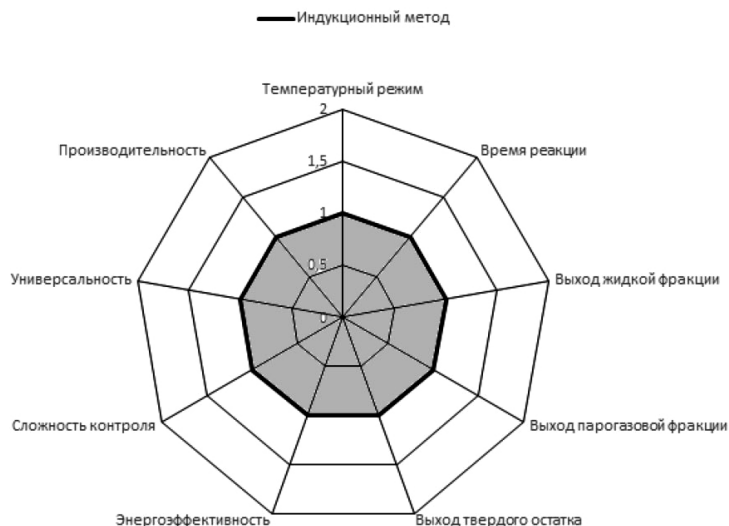


Рис. 6. Индукционный метод пиролиза пластмасс по критериям эффективности

Fig. 6. Induction method of plastic pyrolysis according to efficiency criteria

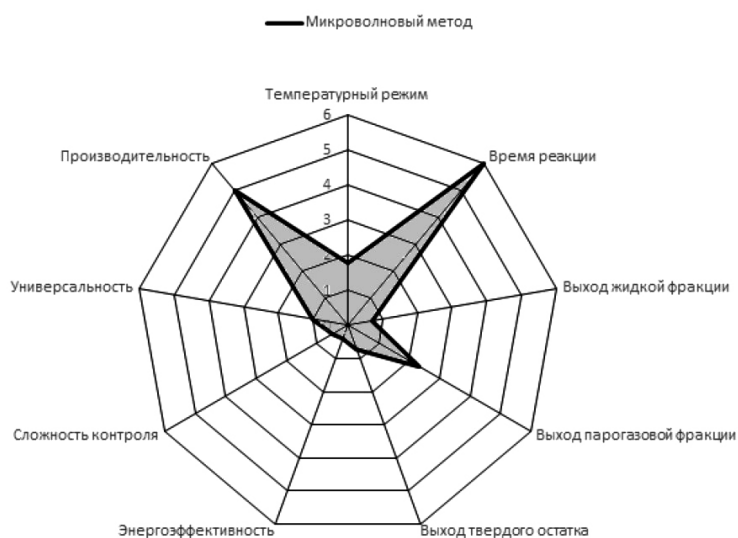


Рис. 7. Микроволновый метод пиролиза пластмасс по критериям эффективности

Fig. 7. Microwave method of plastic pyrolysis according to efficiency criteria

определяющими их применимость в различных условиях.

ИН обеспечивает точный контроль температурных режимов и высокую скорость нагрева, что делает его эффективным для получения жидкой фракции. Выход жидких продуктов достигает 70 %, при этом парогазовая фракция составляет около 32 %. Оценки энергетических затрат на утилизацию 1 кг пластикового сырья составляют 11,6 МДж, из которых 8,6 МДж приходится на сам нагрев, а около 3 МДж — на вспомогательные системы. Энергетический потенциал парогазовой фракции полностью компенсирует затраты, делая процесс потенциально энергетически независимым. Тем не менее применение катализаторов усложняет эксплуатацию и требует точной настройки частоты и мощности индукционного поля.

Микроволновый нагрев демонстрирует максимальную универсальность, обеспечивая равно-

мерное распределение температуры и высокую гибкость в зависимости от свойств сырья. Газовый выход при этом достигает до 74,7 %, а энергозатраты на переработку 1 кг ПНП составляют около 6 МДж, включая работу магнетронов и систем охлаждения. При использовании газа в составе замкнутого энергетического цикла процесс также становится энергетически независимым.

Управление микроволновым процессом требует минимального количества контуров контроля, что делает его простым в эксплуатации и масштабируемым решением.

Наиболее перспективной, с точки зрения утилизации и энергетической независимости системы, является метод на основе ДСН. Несмотря на высокую суммарную энергоёмкость процесса (около 20,6 МДж на 1 кг сырья), достигается почти полная конверсия утилизируемого сырья в газ — до 95 %, а твердая фракция составляет 5 %. Объем гене-

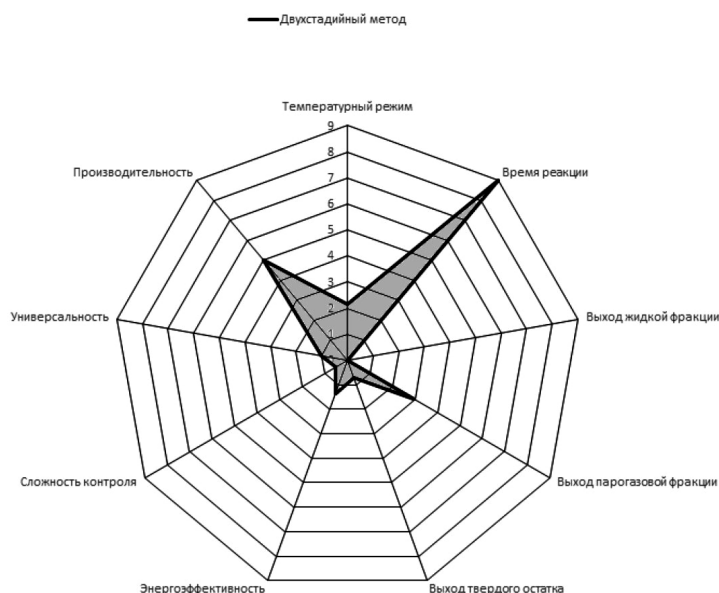


Рис. 8. Двухстадийный метод пиролиза пластмасс по критериям эффективности

Fig. 8. Two-stage method of plastic pyrolysis according to efficiency criteria

пируемой парогазовой продукции позволяет получить до 44,2 МДж потенциальной энергии, что делает установку потенциально энергетически независимой.

Выводы

1. Проведён сравнительный анализ трёх методов пиролиза, использующих электромагнитные нагревы: индукционный, микроволновый и двухстадийный. В качестве базового варианта для приведения критериев к безразмерной форме была рассмотрена индукционная установка [9].

2. Введены безразмерные критерии эффективности: температурный режим, производительность, выход продуктов пиролиза, длительность реакций, энергозатраты, сложность реализации и универсальность утилизируемого сырья.

3. Показана возможность реализации энергетической независимости каждого варианта пиролиза.

Список источников / References

1. Julian A., García-Jiménez [et al.]. Advances in the circularity of end-of-life fibre-reinforced polymers by microwave intensification. *Chemical Engineering and Processing — Process Intensification*. 2022. Vol. 178. P. 109015. DOI: 10.1016/j.cep.2022.109015.
2. Giorgini L., Benelli T., Brancolini G. Recycling of carbon fiber reinforced composites waste. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 2020. Vol. 26. P. 100368. DOI: 10.1016/j.cogsc.2020.100368.
3. Karuppannan Gopalraj S., Kärki T. A review on the recycling of waste carbon: fibre recovery, properties and life-cycle analysis. *SN Applied Sciences*. 2020. Vol. 2. P. 433. DOI: 10.1007/s42452-020-2195-4.
4. Hu X., Ma D., Zhang G. [et al.]. Microwave-assisted pyrolysis of waste plastics for their resource reuse. *Carbon Resources Conversion*. 2023. Vol. 6. P. 215–228. DOI: 10.1016/j.crcon.2023.03.002.
5. Sabogal O., Valin S., Thiery S. [et al.]. Design and thermal characterization of an induction-heated reactor for pyrolysis of solid waste. *Chemical Engineering Research and Design*. 2021. Vol. 173. P. 206–214. DOI: 10.1016/j.cherd.2021.07.018.

6. Cuong Duong-Viet, Lai Truong-Phuoc, Lam Nguyen-Dinh [et al.]. Magnetic induction assisted pyrolysis of plastic waste to liquid hydrocarbons on carbon catalyst. *Materials Today Catalysis*. 2023. Vol. 3. P. 100028. DOI: 10.1016/j.mtcata.2023.

7. Mariani A., Malucelli G. Insights into induction heating processes for polymeric materials. *Energies*. 2023. Vol. 16. P. 4535. DOI: 10.3390/en16114535.

8. Whajah B., Moura N., Blanchard J. [et al.]. Catalytic depolymerization of waste polyolefins by induction heating. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2021. Vol. 60. P. 15141–15150. DOI: 10.1021/acs.iecr.1c02674.

9. Syie Luing W., Armenise S., Nyakuma B. [et al.]. Catalytic pyrolysis of plastics over maghemite-impregnated mesocellular foam using induction heating. *Chemical Engineering Transactions*. 2022. Vol. 97. P. 25–30. DOI: 10.3303/CET2297005.

10. Frisa-Rubio A., González-Niño C., Royo P. [et al.]. Chemical recycling of plastics assisted by microwave multi-frequency heating. *Cleaner Engineering and Technology*. 2021. Vol. 5. P. 100297. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100297.

11. Zhou N., Dai L., Lyu Y. [et al.]. Catalytic pyrolysis of plastic wastes in a continuous microwave assisted pyrolysis system. *Chemical Engineering Journal*. 2021. Vol. 418. P. 129412. DOI: 10.1016/j.cej.2021.129412.

12. Betancourth Mendoza J. D. Evaluation of manufacturing processes, materials, and energy efficiency in the Italian Eyewear Industry. Universitat Politècnica de Catalunya, 2024. 50 p.

13. Jeon S., Kim J., Yang D. Design of large-scale microwave cavity for uniform and efficient plastic heating. *Polymers*. 2022. Vol. 14, Issue 3. P. 541. DOI: 10.3390/polym14030541.

14. Lee Y. C., Hwang C. C., Tsai Y. H. [et al.]. Development and pasteurization of in-packaged ready-to-eat rice products prepared with novel microwave-assisted induction heating (MAIH) technology. *Applied Food Research*. 2025. Vol. 5, Issue 1. P. 100697. DOI: 10.1016/j.afres.2025.100697.

15. Lee Y. C., Hwang C. C., Huang Y. T. Application of novel microwave-assisted induction heating technology for extending the shelf life of ready-to-eat rice through microbial, physical, and chemical quality preservation. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2024. Vol. 93. P. 103640. DOI: 10.1016/j.ifset.2024.103640.

16. Lee Y. C., Tsai Y. H., Hwang C. C. [et al.]. Evaluating the effect of an emerging microwave-assisted induction heating on the quality and shelf life of pre-packaged Pacific white shrimp

Litopenaeus vannamei stored at 4 °C in Taiwan. *Food Control*. 2022. Vol. 133. P. 108509. DOI: 10.1016/j.foodcont.2021.108509.

17. Tsai Y. H., Hwang C. C., Lin C. S. [et al.]. Comparison of microwave-assisted induction heating system (MAIH) and individual heating methods on the quality of pre-packaged white shrimp. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2021. Vol. 73. P. 102787. DOI: 10.1016/j.ifset.2021.102787.

ТРУШЛЯКОВ Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Авиа- и ракетостроение» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 2910-2159

ORCID: 0000-0001-6171-5438

AuthorID (SCOPUS): 56454317700

ResearcherID: D-7270-2015

Адрес для переписки: vatrushlyakov@yandex.ru

ПЕТРУК Антон Андреевич, аспирант кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2452-8140

ORCID: 0009-0009-9709-1247

Адрес для переписки: apetruk1800@gmail.com

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 15.02.2025; одобрена после рецензирования 13.08.2025; принята к публикации 10.09.2025.

TRUSHLYAKOV Valery Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Aircraft and Rocket Building Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 2910-2159

ORCID: 0000-0001-6171-5438

AuthorID (SCOPUS): 56454317700

ResearcherID: D-7270-2015

Correspondence address: vatrushlyakov@yandex.ru

PETRUK Anton Andreevich, Postgraduate of the Aircraft and Rocket Building Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2452-8140

ORCID: 0009-0009-9709-1247

Correspondence address: apetruk1800@gmail.com

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 15.02.2025; approved after reviewing 13.08.2025; accepted for publication 10.09.2025.