

Применение мультиагентной технологии позволяет при интеллектуальной обработке данных: оптимизировать процессы мониторинга и управления за счет иерархии интеллектуальных агентов; сократить время обработки данных за счет клонирования агентов и параллельных вычислений; повысить точность обработки данных за счет использования цифрового двойника объекта и его оптимизационной модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пешкин, К.С. Назначение и перспективы развития киберфизических систем управления технологическими процессами // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2023. №1 (77). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/naznachenie-i-perspektivy-razvitiya-kiberfizicheskikh-sistem-upravleniya-tehnologicheskimi-protsessami> (дата обращения: 04.10.2024).

2. Балюк, А.А. Многоагентная аутентификация цифровых двойников в киберфизических системах / А.А. Балюк, О.А. Финько // Вопросы кибербезопасности. 2022. № 5(51). С. 100-113. DOI 10.21681/2311-3456-2022-5-100-113.

3. Куприяновский, В.П. Киберфизические системы как основа цифровой экономики / В.П. Куприяновский, Д.Е. Намиот, С.А. Синягов // International Journal of Open Information Technologies. 2019. № 4. С. 31–42.

4. Паршаков, С.И. Основы управления техническими процессами и системами : учебное пособие / С.И. Паршаков, М.В. Ерпалов ; научный редактор Ю.В. Инатович ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2017. 148 с.

УДК 66.086

Болотов В.А., Голубь Ф.С., Пармон В.Н.
(Федеральный исследовательский центр
«Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН)

ПРЯМОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ НАГРЕВ В НЕФТЕГАЗОХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ: ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

В последнее время с развитием технологий генерации электроэнергии из возобновляемых источников энергии (ВИЭ) возникает интерес к использованию прямого электрического нагрева в нефтегазохимической

промышленности с целью снижения выбросов углекислого газа. Кроме того, основные процессы нефтегазохимии, такие как паровая конверсия метана, крекинг (пиролиз) и дегидрирование углеводородов, являются эндотермическими, и требуют быстрого подвода значительного количества тепла в зону реакции. Традиционно в промышленности нагрев реактора осуществляют с помощью газовых горелок, которые обеспечивают интенсивный тепловой поток, необходимый для поддержания скорости эндотермической реакции, однако, это сопровождается высокой эмиссией CO_2 , образующегося при сжигании природного или топливных газов НПЗ. Например, мировой объем выбросов углекислого газа только при производстве синтез-газа в ходе паровой конверсии метана оценивается в 366 млн.т/год. Применение прямого электрического нагрева стенок реактора, либо, непосредственно, структурированного резистивного катализатора внутри реакционного объема, помимо очевидного снижения эмиссии CO_2 , имеет ряд особенностей. Среди которых необходимо выделить возможность быстрого подвода большого количества теплоты в реакционную зону, что снижает инерционность нагрева и позволяет в широком диапазоне управлять параметрами технологического процесса, тем самым повышая энергоэффективность производства в целом путем интенсификации процессов тепло-массопереноса. Безусловно, технологический переход на электрический нагрев требует решения задач, связанных с разработкой специальных структурированных резистивных катализаторов и/или подбором электропроводящих материалов стенок реактора, а также с обеспечением их надежного и безопасного контакта с высокоточными источниками электроэнергии. В текущем году компания BASF совместно с SABIC и Linde анонсировала запуск электрифицированной пилотной установки паровой конверсии метана мощностью 6 МВт, получаемых с помощью ВИЭ, для отработки технологии в промышленном масштабе.

В настоящее время перспективным способом прямого ввода теплоты в реактор также рассматривается метод индукционного (ТВЧ) нагрева, одной из характерных особенностей которого является то, что передача энергии, необходимой для нагрева, происходит дистанционно. Это позволяет осуществлять бесконтактный селективный нагрев реакционной смеси путем размещения поглотителей электромагнитного излучения (ЭМИ) – сенсibilизаторов непосредственно внутри химического реактора. Для индукционного нагрева характерно использование относительно низкочастотного диапазона электромагнитного излучения от 50 Гц до 100 кГц. Этим он отличается от другого популярного способа дистанционного нагрева – посредством использования СВЧ излучения. СВЧ излучение представляет собой электромагнитное излучение с частотой

порядка нескольких ГГц. Сенсибилизатор, которым может являться активный компонент или носитель катализатора, обладающий ферромагнитными свойствами, нагревается магнитной составляющей ЭМИ. В случае СВЧ излучения такими сенсибилизаторами служат материалы, обладающие высокими диэлектрическими потерями (т.н. «СВЧ катализаторы»). Они могут быть различного состава и размера, в частности, они могут выполнять функции катализатора. ЭМИ свободно проникает через газообразные и жидкие углеводороды, что позволяет размещать сенсибилизатор в любом желательном месте химического реактора. Очевидным преимуществом дистанционного нагрева является, во-первых, экономия тепловой энергии. Во-вторых, облегчается эксплуатация химического реактора, поскольку из-за более низкой температуры на его стенках резко снижаются процессы коагуляции (например, зауглероживание в случае пиролиза углеводородов) и т.д.

Однако, этим преимущества бесконтактного селективного нагрева реакционной смеси внутри реактора не ограничиваются. При применении электромагнитных технологий к процессам переработки углеводородного сырья открывается ряд новых возможностей. В частности, при проведении процессов термкрекинга парафиновых углеводородов, способ воздействия на ход реакции в желательном направлении значительно больше, чем в обычном пиролизном реакторе. В случае использования индукционного/СВЧ нагрева для крекинга углеводородного сырья парогазовая фаза, в которой происходит цепная радикальная реакция крекинга, образуется между сенсибилизатором и жидким, предварительно разогретым сырьем.

Оптимальными условиями для проведения крекинга является такой режим прокачки сырья, который обеспечивает температурный градиент между раскаленной поверхностью сенсибилизатора $600 - 700^{\circ}\text{C}$ и относительно холодной ($250 - 350^{\circ}\text{C}$) жидкостью. В этом случае, реакция происходит, в основном, в газовой фазе. Продукты попадают в более холодную жидкость, температуры которой недостаточно для протекания вторичных(побочных) реакций, например, реакций терморазложения, таким образом происходит их закалка, что существенно увеличивается селективность образования целевых продуктов. Это дает возможность проводить пиролиз в жидкой фазе, и, таким образом, позволяет отказаться от использования перегретого водяного пара.

Индукционный нагрев переменным магнитным полем широко применяется в науке и технике. Многолетний опыт в эксплуатации данного способа нагрева в металлургии привело к созданию и серийному выпуску очень мощных источников индукционного нагрева (от 10 кВт до 5МВт и выше). При правильном согласовании ТВЧ генераторов

с нагрузкой достигаются очень высокие значения КПД (до 96%). Таким образом, использование индукционного нагрева в переработке углеводородного сырья представляется весьма перспективным.

В ИК СО РАН разработан демонстрационный лабораторный стенд (рис.1), обеспечивающий проведение процесса термического крекинга различных видов углеводородного сырья в условиях индукционного нагрева в проточном режиме.



Рисунок 1 – Проточная установка крекинга углеводородного сырья в условиях индукционного нагрева

Проведено исследование термического крекинга гача 4 погона (продукты депарафинизации масляных фракций) и непрореагировавшего остатка гидрокрекинга (ГК), типичный состав продуктов представлен в таблицах 1 и 2 соответственно. Показана принципиальная возможность получения с высоким выходом олефинов, которые являются высоко востребованными в химической промышленности прекурсорами при производстве широкой номенклатуры высокомаржинальных продуктов, высших спиртов (детергенты и пластификаторы), линейных алкилбензолсульфонатов (ПАВ) и полиолефинов качестве со-мономеров.

Таблица 1 – Структурно-групповой состав (мас.%) жидких продуктов индукционного крекинга гача

Фракция Т _{нк} -Т _{кк} , С	Парафины	Нафтены	Ароматика	Изопарафины	Олефины	Алкадиены	Сумма
<200	2,1	2,2	3,6	0	26,6	3,5	38
200-340	3,6	1,2	1,7	0	28,6	4,9	40
350-500	10,5	0,7	0,1	1,2	8,7	0,6	21,9
>500	0	0	0	0	0	0	0,1
Сумма	16,2	4,1	5,4	1,3	63,9	9,1	100

Таблица 2 – Структурно-групповой состав (мас.%) жидких продуктов индукционного крекинга остатка ГК, мас.%

Фракция Т _{НК} -Т _{КК} , С	Парафины	Нафтены	Ароматика	Изопарафины	Олефины	Алкадиены	Сумма
<200	1,5	2,7	1,1	0,0	41,6	6,1	53,0
200-340	1,9	2,6	0,7	0,1	31,5	3,9	40,7
350-500	1,0	0,1	0,0	3,0	2,1	0,0	6,2
>500	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Сумма	4,4	5,3	1,9	3,2	75,2	10	100

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института катализа СО РАН (проект FWUR-2024-0036).