

УДК 517.977.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА ПРОПАНА И ПРОПАН-ПРОПИЛЕНОВОЙ ФРАКЦИИ В СРЕДЕ МАТЛАВ© И. М. Губайдуллин^{1*}, А. Е. Мусина², Р. В. Узьябаев³¹Институт нефтехимии и катализа УФИЦ РАН
Россия, Республика Башкортостан, 450075 г. Уфа, пр. Октября, 141.²Уфимский государственный нефтяной технический университет
Россия, Республика Башкортостан, 450062 г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.³Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Огарева
Россия, Республика Мордовия, 430005 г. Саранск, ул. Большевикская 38.

Тел.: +7 (347) 242 07 12.

*Email: irekmars@mail.ru

В статье описана методика моделирования процесса пиролиза пропана, основанная на изменении концентраций компонентов во времени. Модель представляет собой систему обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений, решение которых позволяет получить полную картину о протекании процесса. С помощью программы, написанной в среде MATLAB, был произведен поиск оптимального температурного режима и начального состава сырья процесса пиролиза.

Ключевые слова: пиролиз, математическое моделирование, пропан, пропилен, компактная модель.

Введение

Процесс пиролиза в современной нефтепереработке занимает одно из главных положений, как по масштабам перерабатываемого сырья, так и по объемам получаемых продуктов. Одними из главных продуктов процесса являются олефины (этилен, пропилен, ацетилен, бутadiен, бутилен), которые являются ценным сырьем для многих процессов нефтехимии.

В связи с доминирующим положением процесса пиролиза в современной нефтепереработке, существует необходимость его дальнейшего развития и совершенствования. Наиболее главными путями являются расширение сырьевой базы и изменение конструктивного оформления процесса.

Теоретический анализ

В настоящее время более половины перерабатываемого сырья составляет прямогонный бензин (54%) и газойль (6%), остальное – газы с НПЗ и конденсатных месторождений (этан – 29%, пропан – 6%, бутан – 5%) [1–4]. Таким образом, в связи с большими запасами природного газа, стоит вопрос о вовлечении в процесс пиролиза большого количества газов, таких как этан, пропан, бутан, а также их смесей.

Совершенствование конструктивного оформления процесса является путем, позволяющим повысить селективность процесса. При изучении литературы по данному направлению, был найден способ интенсификации процесса, позволяющий проводить процесс не в привычной печи пиролиза. В институте катализа имени Г. К. Борескова СО РАН рассматриваются способы создания экономически эффективной технологии переработки для невысоких производительностей путем управления химическими реакциями пиролиза через дополнительную генерацию радикалов в реагирующей газе посредством лазерного излучения, поглощаемого самой смесью реагентов [5–8]. Для этого используется реактор проточного типа с использованием микроволнового излучения. Микроволновое излучение позволяет проводить равномерный нагрев во всем объеме вещества, в результате проведения эксперимента в реакторе с микроволновым излучением были получены экспериментальные данные выхода целевых продуктов при различной температуре. [9–10]. Микроволновое излучение позволило повысить селективность процесса, за счет того, что процесс стал проходить при более высоких температурах.

Методика расчетов

В рамках поиска перспективного пути развития процесса, был исследован процесс пиролиза пропана. Расширенная модель составляет около 160 стадий и десятки веществ, в то время как для достаточно точного описания процесса достаточно гораздо меньшего количества стадий. За основу была взята компактная 30-стадийная модель пиролиза пропана, полученная Л. Ф. Нурисламовой методом локального анализа чувствительности [11]. 30-стадийная модель пиролиза пропана приведена в табл. 1. При исследовании механизмов сложных процессов нефтепереработки и нефтехимии на начальном этапе моделируются только химические превращения. Предполагается, что химическая реакция протекает в закрытой системе, без изменения объема. Такая система адекватно описывается законом действующих масс в виде системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений, задающихся задачей Коши.

$$\frac{dc}{dt} = f(c), c(0) = c^0,$$

где c – концентрация компонента.

Таблица 1

30-стадийная модель пиролиза пропана

№	Стадия	A , 1/с или см ³ /(моль·с)	E , кДж/моль	n
1	$C_3H_8 \rightarrow C_2H_5\cdot + CH_3\cdot$	2.78E+18	376	-1.8
2	$C_2H_5\cdot + CH_3\cdot \leftrightarrow C_3H_8$	2.83E+13	0	-0.5
3	$C_2H_5\cdot \rightarrow C_2H_4 + H\cdot$	4.31E+12	155	1.19
4	$C_2H_4 + H\cdot \rightarrow C_2H_5\cdot$	4.09E+12	4.15	1.49
5	$C_3H_8 + CH_3\cdot \rightarrow CH_4 + n-C_3H_7\cdot$	2.98E+08	29.93	3.65
6	$C_3H_8 + CH_3\cdot \rightarrow CH_4 + iso-C_3H_7\cdot$	5.48E+08	22.95	3.46
7	$C_3H_8 + H\cdot \rightarrow H_2 + n-C_3H_7\cdot$	2.55E+12	28.27	2.54
8	$C_3H_8 + H\cdot \rightarrow H_2 + iso-C_3H_7\cdot$	1.13E+12	18.71	2.4
9	$n-C_3H_7\cdot \rightarrow C_2H_4 + CH_3\cdot$	1.2E+13	126	0
10	$iso-C_3H_7\cdot \rightarrow C_3H_6 + H\cdot$	1.6E+13	150	0
11	$n-C_3H_7\cdot \rightarrow C_3H_6 + H\cdot$	1.09E+13	149	0.17
12	$C_3H_6 + H\cdot \rightarrow n-C_3H_7\cdot$	1.3E+13	13.64	0
13	$C_3H_8 + C_2H_5\cdot \rightarrow C_2H_6 + n-C_3H_7\cdot$	9.7E+08	38.25	3.65
14	$C_3H_8 + C_2H_5\cdot \rightarrow C_2H_4 + iso-C_3H_7\cdot$	4.79E+10	36.92	3.1
15	$C_3H_6 + H\cdot \rightarrow H_2 + C_3H_5\cdot$	2.61E+11	10.39	2.5
16	$H_2 + C_3H_5\cdot \rightarrow C_3H_6 + H\cdot$	8.37E+10	79.49	2.38
17	$C_3H_8 + C_3H_5\cdot \rightarrow C_3H_6 + n-C_3H_7\cdot$	3.44E+10	83.06	3.3
18	$C_2H_4 + CH_3\cdot \rightarrow CH_4 + C_2H_5\cdot$	9.45E+09	39.74	3.7
19	$CH_4 + C_2H_3\cdot \rightarrow C_2H_4 + CH_3\cdot$	1.28E+10	22.86	4.02
20	$H_2 + CH_3\cdot \rightarrow CH_4 + H\cdot$	1.52E+10	36.42	3.12
21	$C_2H_4 + C_2H_3\cdot \rightarrow C_4H_7$	9.21E+11	19	0
22	$C_3H_6 + C_2H_5\cdot \rightarrow C_2H_6 + C_3H_5\cdot$	1.02E+09	27.77	3.5
23	$C_4H_7 \rightarrow C_4H_6 + H\cdot$	6.4E+12	144.2	0
24	$C_4H_7 \rightarrow C_2H_4 + C_2H_5\cdot$	2.1E+13	149.2	0
25	$C_2H_6 + H\cdot \rightarrow H_2 + C_2H_5\cdot$	2.48E+12	35.34	1.5
26	$C_3H_5\cdot \rightarrow C_2H_2 + CH_3\cdot$	3E+13	151	0
27	$C_4H_8 \rightarrow C_3H_5\cdot + CH_3\cdot$	1E+16	305	0
28	$CH_3\cdot + CH_3\cdot \rightarrow C_2H_6$	2.64E+13	0	0
29	$C_3H_5\cdot + CH_3\cdot \rightarrow C_4H_8$	1.64E+13	-0.55	-0.32
30	$C_2H_3\cdot + CH_3\cdot \rightarrow C_3H_6$	9.56E+14	0.57	-0.54

В процессе пиролиза принимают участие 17 веществ, из которых 10 – индивидуальные компоненты, 7 – радикалы, которые приведены в табл. 2. Для удобства принята нумерация всех участвующих в реакции компонентов.

Таблица 2

Индивидуальные вещества и радикалы, участвующие в процессе пиролиза

Индивидуальные вещества	Радикалы
1 – \dot{N}_3H_8 , 2 – C_2H_4 , 3 – CH_4 , 4 – H_2 , 5 – C_3H_6 , 6 – C_2H_6 , 7 – C_4H_7 , 8 – C_4H_6 , 9 – C_2H_2 , 10 – C_4H_8	11 – $C_2H_5\cdot$, 12 – $CH_3\cdot$, 13 – $H\cdot$, 14 – $n-C_3H_7\cdot$, 15 – $i-C_3H_7\cdot$, 16 – $C_2H_3\cdot$, 17 – $C_3H_5\cdot$

На следующем этапе прописывалась система дифференциальных уравнений, которые учитывали изменение концентрации веществ во времени с учетом модифицированного уравнения Аррениуса:

$$K = A \cdot \left(\frac{T}{298}\right)^n \cdot e^{\frac{-E}{RT}},$$

где A – предэкспоненциальный множитель, $\text{см}^3/(\text{моль} \cdot \text{с})$; E – энергия активации, кДж/моль ; R – универсальная газовая постоянная, $\text{кДж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$; T – температура, К ; n – температурная экспонента, экспериментально определяемый параметр.

В результате была получена следующая система дифференциальных уравнений:

$$\frac{dc_1}{dt} = -K_1 \cdot c_1 + K_2 \cdot c_{11} \cdot c_{12} - K_5 \cdot c_1 \cdot c_{12} - K_6 \cdot c_1 \cdot c_{12} - K_7 \cdot c_1 \cdot c_{13} - K_8 \cdot c_1 \cdot c_{13} - K_{13} \cdot c_1 \cdot c_{11} - K_{14} \cdot c_1 \cdot c_{16} - K_{17} \cdot c_1 \cdot c_{17}$$

$$\frac{dc_2}{dt} = K_3 \cdot c_{11} - K_4 \cdot c_2 \cdot c_{13} + K_9 \cdot c_{14} + K_{14} \cdot c_1 \cdot c_{16} - K_7 \cdot c_1 \cdot c_{13} - K_{18} \cdot c_2 \cdot c_{12} + K_{19} \cdot c_3 \cdot c_{16} - K_{21} \cdot c_2 \cdot c_{16} + K_{24} \cdot c_7$$

–

$$\frac{dc_3}{dt} = K_5 \cdot c_1 \cdot c_{12} + K_6 \cdot c_1 \cdot c_{12} + K_{18} \cdot c_2 \cdot c_{12} - K_{19} \cdot c_3 \cdot c_{16} + K_{20} \cdot c_4 \cdot c_{12}$$

$$\frac{dc_4}{dt} = K_7 \cdot c_1 \cdot c_{13} + K_8 \cdot c_7 \cdot c_{13} + K_{15} \cdot c_5 \cdot c_{13} - K_{16} \cdot c_4 \cdot c_{17} - K_{20} \cdot c_4 \cdot c_{12} + K_{25} \cdot c_6 \cdot c_{13}$$

$$\frac{dc_5}{dt} = K_{10} \cdot c_{15} + K_{11} \cdot c_{14} - K_{12} \cdot c_5 \cdot c_{13} - K_{15} \cdot c_5 \cdot c_{13} + K_{16} \cdot c_4 \cdot c_{17} + K_{17} \cdot c_1 \cdot c_{17} - K_{22} \cdot c_5 \cdot c_{11} + K_{30} \cdot c_{16}$$

$$\frac{dc_6}{dt} = K_{13} \cdot c_1 \cdot c_{11} + K_{22} \cdot c_5 \cdot c_{11} - K_{25} \cdot c_6 \cdot c_{13} + K_{28} \cdot c_{12} \cdot c_{12}$$

$$\frac{dc_7}{dt} = K_{21} \cdot c_2 \cdot c_{16} - K_{23} \cdot c_7 - K_{24} \cdot c_7 \cdot c_{12}$$

$$\frac{dc_8}{dt} = K_{23} \cdot c_{71}$$

$$\frac{dc_9}{dt} = K_{26} \cdot c_{17}$$

$$\frac{dc_{10}}{dt} = K_{29} \cdot c_{17} \cdot c_{12} - K_{27} \cdot c_{10}$$

$$\frac{dc_{11}}{dt} = K_1 \cdot c_1 - K_2 \cdot c_{11} \cdot c_{12} - K_3 \cdot c_{11} + K_4 \cdot c_2 \cdot c_{13} - K_{13} \cdot c_1 \cdot c_{11} - K_{22} \cdot c_5 \cdot c_{11} + K_{25} \cdot c_6 \cdot c_{13}$$

$$\frac{dc_{12}}{dt} = K_1 \cdot c_1 - K_2 \cdot c_{11} \cdot c_{12} - K_5 \cdot c_1 \cdot c_{12} - K_6 \cdot c_1 \cdot c_{12} + K_9 \cdot c_{14} - K_{18} \cdot c_2 \cdot c_{12} + K_{19} \cdot c_3 \cdot c_{16}$$

$$- K_{20} \cdot c_4 \cdot c_{12} + K_{26} \cdot c_{17} + K_{27} \cdot c_{10} - K_{28} \cdot c_{12} \cdot \tilde{n}_2 - K_{29} \cdot c_{12} \cdot \tilde{n}_7 - K_{30} \cdot c_{12} \cdot \tilde{n}_6$$

$$\frac{dq_3}{dt} = K_3 \cdot c_{11} - K_4 \cdot c_2 \cdot c_{13} - K_7 \cdot c_1 \cdot \tilde{n}_3 - K_8 \cdot c_1 \cdot c_{13} + K_{10} \cdot c_{15} + K_{11} \cdot c_{14} - K_{12} \cdot c_5 \cdot c_{13} - K_{15} \cdot c_5 \cdot c_{13} + K_{16} \cdot c_4 \cdot c_{17} + K_{20} \cdot c_4 \cdot c_{12} + K_{23} \cdot c_7 - K_{25} \cdot c_6 \cdot c_{13}$$

$$\frac{dc_{14}}{dt} = K_5 \cdot \tilde{n}_1 \cdot c_{11} + K_7 \cdot c_1 \cdot c_{13} - K_9 \cdot c_{14} - K_{11} \cdot c_4 + K_{12} \cdot c_5 \cdot \tilde{n}_3 + K_{13} \cdot c_1 \cdot \tilde{n}_1 + K_{17} \cdot c_1 \cdot c_{17}$$

$$\frac{dc_{15}}{dt} = K_6 \cdot \tilde{n}_1 \cdot c_{12} + K_8 \cdot c_1 \cdot c_{13} - K_{10} \cdot c_{15} + K_{14} \cdot c_1 \cdot \tilde{n}_6$$

$$\frac{dc_{16}}{dt} = -K_{14} \cdot \tilde{n}_1 \cdot c_{16} + K_{18} \cdot c_2 \cdot c_{12} - K_{19} \cdot c_3 \cdot \tilde{n}_6 - K_{21} \cdot c_2 \cdot \tilde{n}_6 + K_{24} \cdot c_7 - K_{30} \cdot c_{12} \cdot \tilde{n}_6$$

$$\frac{dc_{17}}{dt} = K_{15} \cdot \tilde{n}_5 \cdot c_{13} - K_{16} \cdot c_4 \cdot c_{17} - K_{17} \cdot c_1 \cdot \tilde{n}_7 + K_{22} \cdot c_4 \cdot \tilde{n}_1 - K_{26} \cdot c_{17} + K_{27} \cdot c_{10} - K_{29} \cdot c_{12} \cdot c_{17}$$

На основе полученной системы дифференциальных уравнений, описывающих процесс пиролиза, была написана программа в среде MATLAB, позволяющая рассчитать изменение концентрации компонентов во времени, а также константы скорости каждой реакции по формуле 2.

Целью данной работы являлось установление оптимальной температуры ведения процесса, при которой наблюдался максимальный выход этилена. Система дифференциальных уравнений решалась с помощью метода Гира.

По заводским данным рассматривались три варианта состава исходных реагентов:

1) ППФ с большим количеством пропилена – 75% и с содержанием пропана 25%;

2) ППФ с равным содержанием пропилена и пропана;

На основе разработанной математической модели вычислительный эксперимент проводили в температурном интервале 750–900 °С с шагом 50°С. Такой интервал и шаг варьирования температуры был принят на основе технологических возможностей работы промышленных реакторов.

Результаты и обсуждение

В табл. 3 приведены значения констант скорости реакций, полученные при расчете.

Таблица 3

Вычисленные значения констант скорости реакций

Стадия	Значение, cm^3/c	Стадия	Значение, cm^3/c
1	2	3	4
1	1.2723e+010	16	8.8962e+014
2	9.4333e+008	17	1.9087e+017
3	1.3836e+013	18	8.0135e+017
4	1.0311e+014	19	9.5926e+018
5	1.8008e+016	20	2.4944e+016
6	9.1018e+015	21	9.1866e+008
7	8.1035e+016	22	2.2225e+016
8	1.3873e+016	23	6.2778e+009
9	1.1800e+010	24	2.0585e+010
10	1.5682e+010	25	6.6644e+013
11	3.3962e+010	26	2.9400e+010
12	1.2976e+010	27	9.6004e+012
13	5.8551e+016	28	2.6400e+010
14	6.8603e+016	29	1.8600e+009
15	6.3335e+015	30	2.4274e+010

На рис. 1–3 приведены зависимости выхода целевых и побочных продуктов от времени при проведении процесса пиролиза 100% пропана при различных температурах. Их анализ позволил сделать следующие выводы:

- Выход этилена при 850 °С составляет 18% масс, при 900 °С 38% масс. Повышение температуры проведения процесса позволяет повысить выход целевого продукта 20% масс.
- Выход пропилена при 850 °С составляет 13% масс., при 900°С 38% масс. Повышение температуры процесса позволяет повысить выход пропилена на 15% масс.
- Из полученных результатов видно, как при повышении температуры проведения процесса пиролиза выход метана уменьшается с 33% масс до 21% масс.
- По графику, представленному на рис. 3, видно, что пропан расходуется в первые 0.15 секунд, дальнейшее образование этилена происходит за счет свободно-радикальных реакций, протекающих в оставшееся время.

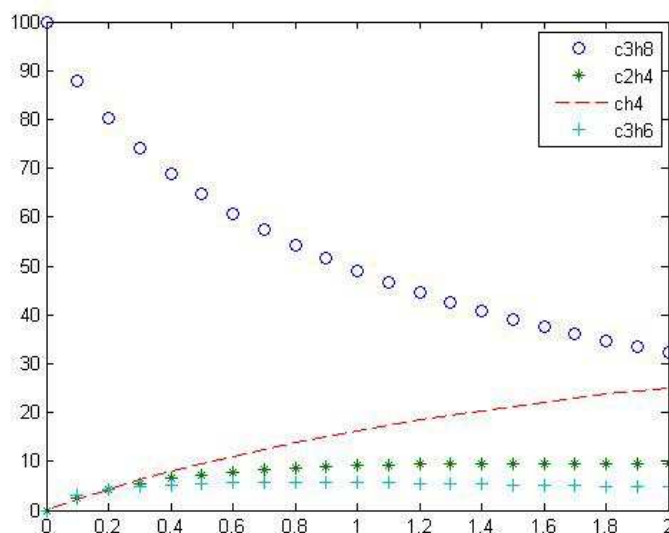


Рис. 1. График зависимости выхода продуктов при пиролизе пропана с течением времени при температуре 750°С.

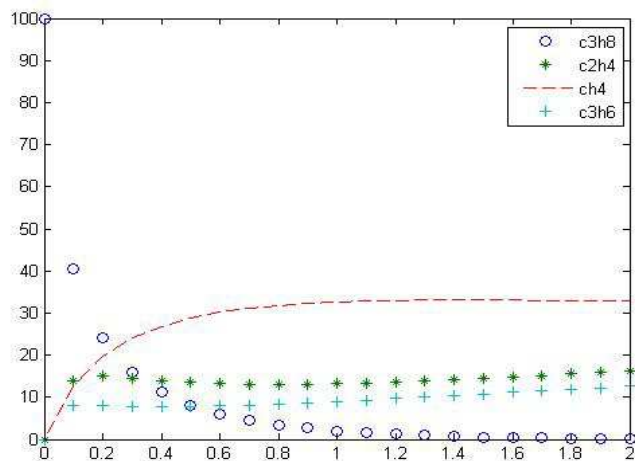


Рис. 2. График зависимости выхода продуктов при пиролизе пропана с течением времени при температуре 850°C.

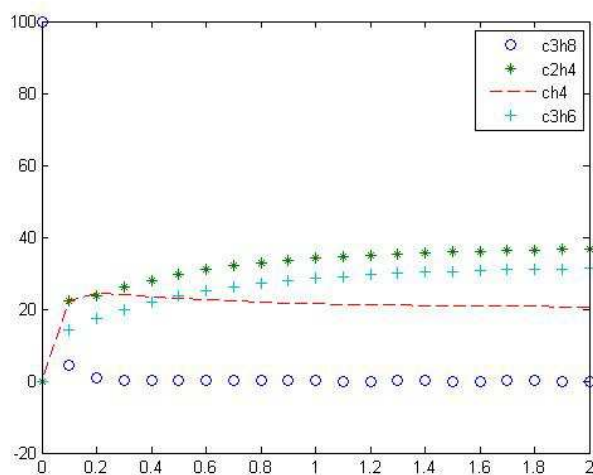


Рис. 3. График зависимости выхода продуктов при пиролизе пропана с течением времени при температуре 900°C.

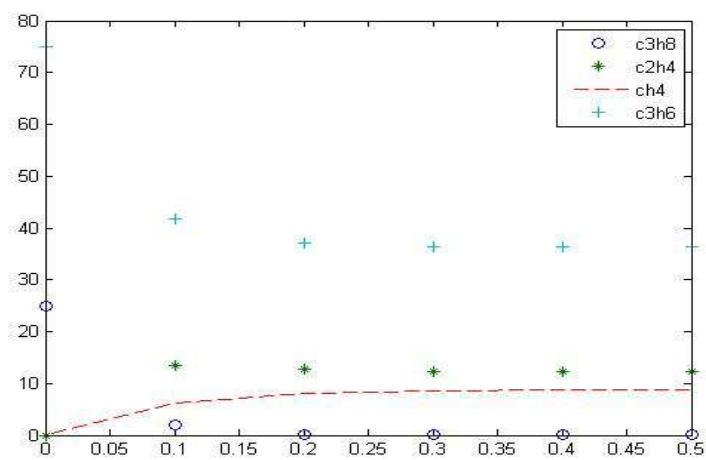


Рис. 4. График зависимости выхода целевых продуктов от времени протекания процесса для ППФ фракции с содержанием пропана 25% об.

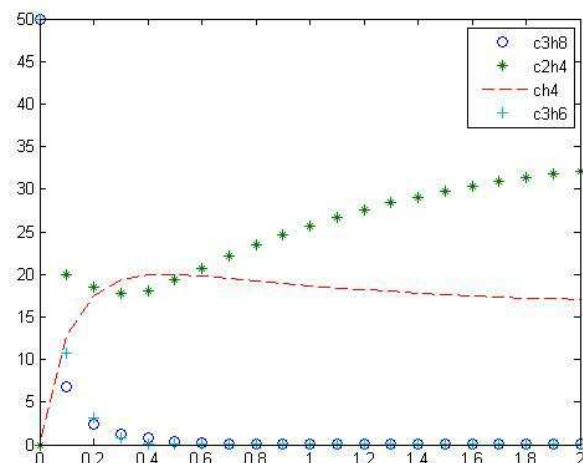


Рис. 5. График зависимости выхода целевых продуктов от времени протекания процесса для ППФ фракции с содержанием пропана 50% об.

При проведении вычислительного эксперимента с ППФ фракцией, содержащей 75% пропилена, были получены результаты, представленные на *рис. 4*. Для данного варианта процесса была так же подобрана оптимальная температура, составившая 850°C.

Затем был проведен процесс пиролиза с ППФ фракцией, в которой равное содержание пропана и пропилена. Результаты представлены на *рис. 5*. Для данного варианта процесса так же подбирались температура, позволяющая достичь наибольшего выхода этилена, которая составила 850°C.

По представленным графикам можно сделать выводы:

- Оптимальный температурный режим, при котором протекает процесс пиролиза ППФ фракции любого состава – 850 °С. При данной температуре достигается наибольший выход целевого продукта – этилена.
- При проведении процесса с фракцией с большим содержанием пропилена, выход этилена составляет 12% масс. Повышение содержания пропана в ППФ на 25% масс. и снижение содержания пропилена на 25% масс. позволило повысить выход этилена при той же самой температуре процесса до 32.5% масс.
- Из графика, изображенного на рисунке 4, видно, что процесс протекает 0,5 секунд и останавливается из-за того, что пропан полностью израсходован. Исходя из этого, можно сделать вывод, что небольших концентраций пропана не хватает для развития свободно-радикального механизма.

Таким образом, данная компактная модель позволяет судить о протекании процесса, избегая громоздких вычислений и проведения сложных экспериментов, протекающих при условиях, которые трудно достичь в лаборатории. Было установлено, что проведение процесса пиролиза чистого пропана позволяет достичь высокого выхода этилена. Однако, использование в качестве сырья ППФ с одинаковым содержанием пропилена и пропана позволяет снизить выход метана на 17%, а также оптимальная температура, которая позволяет достичь высокий выход пропилена, ниже на 50°C. Это позволяет снизить экономические затраты, связанные с нагреванием при проведении процесса.

Работа выполнена в рамках реализации программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг. (№ гос. Регистрации АААА-А17-117012610061-4) и частичной поддержки проекта РФФИ №18-07-00341_А.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хафизов И. Ф. Современные тенденции развития процесса пиролиза / И.Ф. Хафизов, Р.Р. Мусин // Вестник Казанского технологического университета. 2015. С. 231–234.
2. Морозов А. Ю. Получение непредельных углеводородов в процессе пиролиза / А. Ю. Морозов, О. Н. Каратун, А. З. Саушин // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2008. С. 161–163.
3. Беренц А. Д. Переработка жидких продуктов пиролиза / А.Д. Беренц [и др.]. М.: Химия, 1985. 216 с.
4. Приказ Минэнерго России от 01.03.2012 N 79 (с изм. от 03.12.2014) «О Плане развития газо- и нефтехимии России на период до 2030 года». СПС «КонсультантПлюс».
5. Snytnikov V. N. A reactor for the study of homogeneous processes using laser radiation energy / V.N. Snytnikov T. I. Mischenko, Vi. N. Snytnikov, I. G. Chernykh // Chemical Engineering Journal. 2009. Vol. 150. P. 231–236.
6. Снытников, В. Н. Автокаталитическое газофазное дегидрирование этана в «бесстеночном» реакторе / В. Н. Снытников, Т. И. Мищенко, Вл. Н. Снытников, О. П. Стояновская, В. Н. Пармон // Кинетика и катализ. 2010. Т. 51, №1. С. 12–20.

7. Snytnikov V. N. Autocatalytic gas-phase dehydrogenation of ethane / V. N. Snytnikov, T. I. Mishchenko, Vl. N. Snytnikov, S. E. Malykhin, V. I. Avdeev, V. N. Parmon // *Research on Chemical Intermediates*. 2012. Vol. 38. P. 1133–1147.
8. Snytnikov V. N. Autocatalytic dehydrogenation of propane / V. N. Snytnikov, T. I. Mishchenko, Vl. N. Snytnikov, I. G. Chernykh // *Research on Chemical Intermediates*. 2014. Vol. 40. P. 345–356.
9. Полищук Т. С., Череватюк Г. В., Патрушева О. В. Использование микроволнового излучения в нефтехимии // *Молодой ученый*. 2017. №2.1. С. 23–27.
10. Рахманкулов Д. Л., Шавщукова С. Ю., Даминев Р. Р. и др. Применение микроволнового излучения в нефтехимических процессах // *Российский хим. журнал об-ва им. Д. И. Менделеева*. 2008. №4. С. 136–141.
11. Нурисламова Л. Ф. Разработка компактной кинетической модели пиролиза пропана методами анализа чувствительности: дисс. канд. ... физ.-мат. наук. ФГБОУН Институт нефтехимии и катализа РАН, Уфа, 2015.

Поступила в редакцию 01.11.2018 г.

SIMULATION ON THE PYROLYSIS OF PROPANE AND PROPANE-PROPYLENE FRACTION WITHIN MATLAB INTERFACE

© I. M. Gubaydullin^{1*}, A. E. Musina², R. V. Uzyanbaev³

¹*Institute of Petrochemistry and Catalysis, Ufa Federal Research Center of RAS
141 Oktyabrskaya Avenue, 450075 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*

²*Ufa State Petroleum Technological University
1 Kosmonavtov Street, 450044 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*

³*Ogarev Mordovia State University
68 Bolshevistskaya Street, 430005 Saransk, Russia.*

Phone: +7 (347) 242 07 12.

**Email: irekmars@mail.ru*

In the present work, a computational methodology of the simulation on the pyrolysis of propane and propane-propylene fraction are described. It is based on the changes in concentrations of the chemicals in time and made up with the system of simple nonlinear differential equations. The solution of these equations enables constructing the whole picture of the process. Using the program written in the MATLAB program suite, the authors elucidated the optimal temperature regimes of the process and initial contents of the raw materials.

Keywords: pyrolysis, mathematical modelling, propane, propylene, compact model.

Published in Russian. Do not hesitate to contact us at bulletin_bsu@mail.ru if you need translation of the article.

REFERENCES

1. Khafizof I. F. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2015. Pp. 231–234.
2. Morozov A. Yu. Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2008. Pp. 161–163.
3. Berents A. D. Pererabotka zhidkikh produktov piroliza [Processing of liquid pyrolysis products] / A.D. Berents [i dr.]. Moscow: Khimiya, 1985.
4. Priказ Minenergo Rossii ot 01.03.2012 N 79 (s izm. ot 03.12.2014) «O Plane razvitiya gazo- i neftekhimii Rossii na period do 2030 goda». SPS «Konsul'tantPlyus».
5. Snytnikov V. N. Chemical Engineering Journal. 2009. Vol. 150. Pp. 231–236.
6. Snytnikov, V. N. Kinetika i kataliz. 2010. Vol. 51, No. 1. Pp. 12–20.
7. Snytnikov V. N. Research on Chemical Intermediates. 2012. Vol. 38. Pp. 1133–1147.
8. Snytnikov V. N. Research on Chemical Intermediates. 2014. Vol. 40. Pp. 345–356.
9. Polishchuk T. S., Cherevatyuk G. V., Patrusheva O. V. Molodoi uchenyi. 2017. No. 2.1. Pp. 23–27.
10. Rakhmankulov D. L., Shavshukova S. Yu., Daminev R. R. i dr. Primenenie mikrovolnovogo izlucheniya v neftekhimicheskikh protsessakh. Rossiiskii khim. zhurnal ob-va im. D. I. Mendeleeva. 2008. No. 4. Pp. 136–141.
11. Nurislamova L. F. Razrabotka kompaktnoi kineticheskoi modeli piroliza propana metodami analiza chuvstvitel'nosti: diss. kand. ... fizmat. nauk. FGBOUN Institut neftekhimii i kataliza RAN, Ufa, 2015.

Received 01.11.2018.