

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКОНСТРУКЦИИ ОДНОПРОХОДНОЙ СХЕМЫ УСТАНОВКИ Л-35-11/300 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Е.О. Горда, Н.В. Чеканцев, Э.Д. Иванчина, М.С. Гынгазова

Томский политехнический университет
E-mail: gordaeo@sibmail.com

Рассмотрены варианты реконструкции однопроходной схемы установки изомеризации с использованием математической модели. Выполнена оценка экономического эффекта и срока окупаемости при реализации различных вариантов – с рециклом по непревращенным компонентам, с предварительной деизопентанизацией сырья и при использовании совмещенного вариантов.

Ключевые слова:

Изомеризация, математическое моделирование, октановое число, рециркуляция неразветвленных углеводородов.

Key words:

Isomerization, mathematical modeling, octane number, unbranched hydrocarbons recirculation.

Процесс каталитической изомеризации *n*-парафинов является одним из наиболее перспективных способов улучшения эксплуатационных характеристик бензина [1, 2]. С ужесточением требований к товарному бензину возросли требования и к технологии изомеризации. В связи с этим, актуальной задачей является повышение глубины изомеризации с применением различных схем с рециркуляцией непревращенных нормальных парафиновых углеводородов или других методов концентрирования изопарафиновых в продуктах реакции.

Октановое число (О.Ч.) изомеризата, наряду с другими факторами, определяется выбором технологической схемы процесса [3]. С целью повышения глубины изомеризации применяются различные схемы рециркуляции непревращенных нормальных парафиновых углеводородов. Целью данной работы являлся расчет различных вариантов технологического оформления действующей установки изомеризации Л-35-11/300 с применением метода математического моделирования.

В процессе изомеризации перерабатывается фракция углеводородов с началом кипения 62 °С, которая включает в себя большое количество компонентов. При построении кинетических моделей используются группировки углеводородов по их принадлежностям к определенным гомологическим рядам. В некоторых случаях эти группы можно рассматривать как псевдокомпоненты, характеризующиеся усредненными свойствами по каждой группе углеводородов. Однако, такое агрегирование компонентов смеси не позволяет учитывать влияние состава сырья на качества товарного продукта. Для решения этой проблемы были проанализированы данные хроматографического анализа сырья и изомеризата и составлен перечень реакций, протекающих в процессе изомеризации пентан-гексановой фракции, табл. 1. На основе данных реакций была предложена кинетическая модель процесса [4].

Для составления математической модели контактного аппарата кинетическая модель реакторных процессов дополняется гидродинамической моделью потоков в реакторе.

Таблица 1. Основные реакции, протекающие в процессе изомеризации пентан-гексановой фракции

Реакции	
$n-C_5H_{12} \rightarrow i-C_5H_{12}$	$2-МП + H_2 \rightarrow Г$
$n-C_6H_{14} \rightarrow 2-МП$	$3-МП + H_2 \rightarrow Г$
$n-C_6H_{14} \rightarrow 3-МП$	$2,3-ДМБ + H_2 \rightarrow Г$
$2,3-ДМБ \rightarrow 2-МП$	$2,2-ДМБ + H_2 \rightarrow Г$
$2,3-ДМБ \rightarrow 2,2-ДМБ$	$C_7H_{16} + H_2 \rightarrow Г$
$n-C_7H_{16} \rightarrow i-C_7H_{16}$	$i-C_7H_{16} + H_2 \rightarrow Г$
$МЦП \rightarrow ЦГс$	$ЦГс + H_2 \rightarrow n-C_6H_{14}$
$3-МП \rightarrow 2-МП$	$МЦП + H_2 \rightarrow 2-МП$
$C_7H_8 + H_2 \rightarrow Г$	$МЦП + H_2 \rightarrow 3-МП$
$C_3H_8 + H_2 \rightarrow Г$	$МЦП + H_2 \rightarrow 3,2-ДМБ$
$C_4H_{10} + H_2 \rightarrow Г$	$МЦП + H_2 \rightarrow 2,2-ДМБ$
$i-C_4H_{10} + H_2 \rightarrow Г$	$z-C_7H_{14} + H_2 \rightarrow C_7H_{16}$
$C_5H_{12} + H_2 \rightarrow Г$	$z-C_7H_{14} + H_2 \rightarrow i-C_7H_{16}$
$i-C_5H_{12} + H_2 \rightarrow Г$	$БЗ + 3H_2 \rightarrow ЦГс$
$C_6H_{14} + H_2 \rightarrow Г$	$БЗ + 3H_2 \rightarrow МЦП$

МЦП – метилциклопентан; МП – метилпентан; БЗ – бензол; ЦГс – циклогексан; ДМБ – диметилбутан; углеводороды: *n* – нормальные; *i* – изо-; *z* – цикло-.

Нестационарная математическая модель представляет собой систему уравнений материального и теплового балансов [4]:

$$G \left(\frac{\partial C_i}{\partial z} + \frac{\partial C_i}{\partial V} \right) = \sum_{j=1}^m W_j,$$

$$G \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial T}{\partial V} \right) = \frac{1}{\rho C_p^{см}} \sum_{j=1}^m Q_j W_j,$$

при $Z=0$, $C=C_0$, при $r=0$, $C=C_0$, при $Z=0$, $T=T_0$, при $r=0$, $T=T_{ак}$, где G – нагрузка по сырью, м³/с; C_i – концентрация *i*-го компонента, моль/м³; Z – объем переработанного сырья, м³; $i=1, \dots, n$; $j=1, \dots, m$; n – число веществ, участвующих в реакциях; m – число реакций; W_j – скорость протекания *j*-й реакции, моль/м³·с; V – объем реактора изомеризации, м³; T – температура в реакторе, °С; ρ – плотность, моль/м³; Q_j – тепловой эффект *j*-й реакции, Дж/моль; $C_p^{см}$ – удельная теплоемкость газовой смеси, Дж/(моль·град).

Данная модель была программно реализована в среде Delphi. Проверка на адекватность рассмо-

трена в работах [4–6]. Учет физико-химических особенностей процесса предоставляет возможности проводить мониторинг работы установок изомеризации, повышать эффективность их работы.

Схема процесса изомеризации с исполнением в однопроходном виде является самой простой, используемой в промышленности. Несмотря на низкие эксплуатационные затраты данная схема имеет ряд существенных недостатков, наиболее значимым из которых является неполное превращение нормальных углеводородов в разветвленные. Вследствие этого на выходе образуются продукты с невысоким по сравнению с более сложными схемами октановым числом [7]. Было предложено рассчитать возможные варианты реконструкции однопроходной схемы для установки Л-35-11/300 с использованием программно-реализованной математической модели.

Технологические условия проведения процесса изомеризации в рассматриваемой установке представлены в табл. 2.

Таблица 2. Технологические условия проведения процесса изомеризации

Загрузка по сырью блока изомеризации, м ³ /ч	90
Температура на входе в первый реактор, °С	132
Общий перепад температур по реакторам, °С	36
Объемная скорость подачи сырья, ч ⁻¹	2,2

Одним из возможных вариантов реконструкции установки является организация рецикла непревращенных компонентов. Такая схема целесообразна для предприятий с недостатком сырья и большим содержанием непрореагировавших соединений. Результаты расчета на математической модели для схемы с рециклом n-пентана представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты расчета схемы с рециклом n-пентана (расчеты с использованием модели)

Дата	Октановое число по исследовательскому методу			
	Сырье	Продукт (без рецикла)	Продукт (с рециклом)	Прирост О.Ч.
24.12.2010	64,3	81,4	84,1	2,7
28.12.2010	64,4	82,9	85,0	2,1
31.12.2010	63,5	81,1	83,7	2,6
11.01.2011	63,5	81,4	84,1	2,7
20.01.2011	64,8	81,3	83,9	2,6
01.02.2011	64,6	81,2	84,1	2,9
07.02.2011	64,8	81,2	83,6	2,4

Согласно данным табл. 3, применение рецикла по n-пентану дает увеличение октанового числа на 2,1...2,8 пункта в зависимости от состава сырья. Реализация такой технологической схемы потребует ввода дополнительного блока разделения продуктов изомеризации (ректификация, адсорбция) и организации рециркуляционной линии (технологические трубопроводы, теплообменные аппараты, компрессоры).

Повышение степени превращения при смещении равновесия в сторону образования продуктов возможно с применением схемы с предварительной деизопентанизацией сырья. Результаты расчета данной схемы представлены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты расчета схемы с предварительной деизопентанизацией сырья (расчеты с использованием модели)

Дата	Октановое число по исследовательскому методу			
	Сырье	Продукт (без деизопентанизации)	Продукт	Прирост О.Ч.
24.12.2010	64,3	81,4	83,8	2,4
28.12.2010	64,4	82,9	84,9	2,0
31.12.2010	63,5	81,1	83,1	2,0
11.01.2011	63,5	81,4	83,7	2,3
20.01.2011	64,8	81,3	83,1	1,8
01.02.2011	64,6	81,2	83,5	2,3
07.02.2011	64,8	81,2	82,9	1,7

Как видно из табл. 4, при деизопентанизации сырья октановое число увеличивается в пределах 1,7...2,4 пунктов. Это связано со смещением равновесия реакции изомеризации n-пентана в сторону образования изокомпонентов.

Также в данной работе рассмотрена схема реконструкции однопроходной установки, которая включает одновременное выделение изо-пентана из сырья и рециркуляцию нормального пентана. Результаты расчета представлены в табл. 5.

Таблица 5. Результаты расчета схемы в предварительной деизопентанизацией и рециклом n-пентана (расчеты с использованием модели)

Дата	Октановое число по исследовательскому методу			
	Сырье	Продукт (без деизопентанизации)	Продукт	Прирост О.Ч.
24.12.2010	64,3	81,4	87,7	6,3
28.12.2010	64,4	82,9	89,2	6,3
31.12.2010	63,5	81,1	87,5	6,4
11.01.2011	63,5	81,4	87,3	5,8
20.01.2011	64,8	81,3	87,9	6,7
01.02.2011	64,6	81,2	88,1	6,9
07.02.2011	64,8	81,2	88,0	6,8

Согласно проведенному анализу результатов (табл. 5), одновременное применение рецикла по пентану и предварительной деизопентанизации позволяет повысить октановое число продукта на 6,5 пунктов в среднем.

Применение схем с рециркуляцией малоразветвленных парафинов приводит с одной стороны к росту октанового числа изомеризата, а с другой – к снижению производительности установок. Критерий эффективности ΔОТ – прирост октанотонн учитывает производительность установки, октановое число продукта и сырья:

$$\Delta OT = (OC_2 - OC_1)G,$$

где $ОЧ_2$ и $ОЧ_1$ – октановое число изомеризата и сырья соответственно; G – производительность установки. С применением данного показателя представляется возможным оценить эффективность работы установок, табл. 6.

Таблица 6. Результаты расчета эффективности различных схем процесса изомеризации. Схема: 1) однопроходная; 2) с рециклом *n*-пентана; 3) с деизопентанизацией сырья; 4) с одновременной деизопентанизацией сырья и рециклом *n*-пентана

Показатель	1	2	3	4
Октановое число сырья	64,3	64,3	64,3	64,3
Октановое число изомеризата	81,5	84,1	83,6	87,9
Производительность установки, м ³ /ч	90	90	101,7	101,7
ΔОТ	1549	1778	1958	2406

Как видно из табл. 6, в данном случае наиболее эффективной является схема с одновременной деизопентанизацией сырья и рециклом *n*-пентана, т. к. для нее наблюдается наибольший прирост октанотонн.

Для выбора определенной схемы следует также учитывать капитальные затраты, необходимые для реконструкции установки, рис. 1, на основе [1].

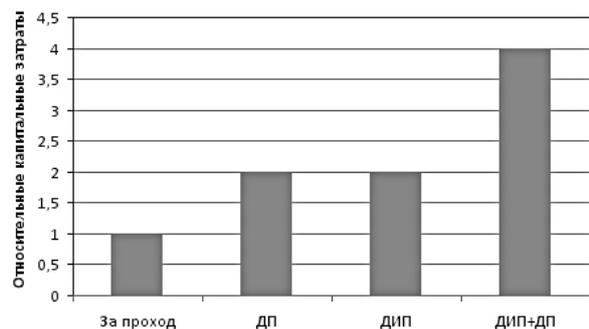


Рис. 1. Относительные капитальные затраты при реконструкции установки изомеризации

За единицу была принята стоимость однопроходной схемы изомеризации. Затраты на реконструкцию установки при организации рецикла непревращенного пентана (ДП) или предварительной деизопентанизации сырья (ДИП) в 2 раза больше, с применением одновременно ДП и ДИП – в 4 раза больше [1].

Состав сырья, подаваемого на установку, изменяется во времени, а степень его превращения зависит и от типа используемого катализатора, и технологических условий проведения процесса. Применение математической модели на физико-химической основе позволяет учесть все эти факторы и рассчитать прибыль от реконструкции установки (рис. 2).

Из результатов расчета (рис. 2) следует, что наибольшее увеличение прибыли для установки Л-35-11/300 наблюдается при организации рецикла нормального пентана и предварительной деи-

зопентанизации сырья. На основе расчетов относительной прибыли и капитальных затрат был рассчитан срок окупаемости различных вариантов реконструкции однопроходной установки.

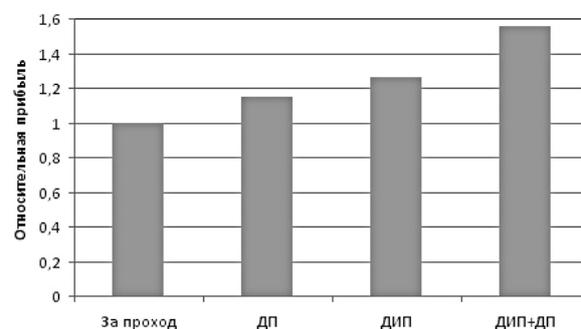


Рис. 2. Относительная прибыль при реконструкции установки изомеризации

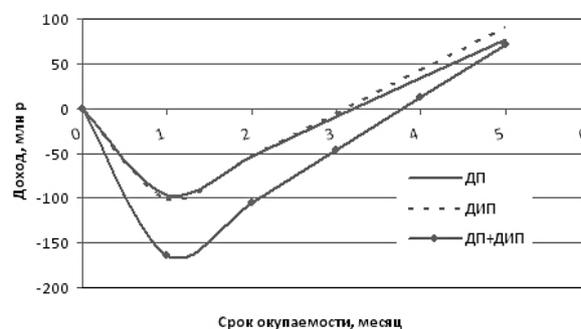


Рис. 3. Срок окупаемости при различных реконструкциях однопроходной схемы

На рис. 3 приведены результаты расчета по сроку окупаемости реконструкции установки для разных вариантов. Срок окупаемости при реконструкции однопроходной схемы в схему с деизопентанизацией и депентанизацией составляет около 3 мес., при реконструкцию в схему с применением одновременно ДП и ДИП колонн – около 4 мес. Таким образом, согласно расчетам на математической модели можно рекомендовать реконструировать исследуемую однопроходную установку Л-35-11/300 в схему с предварительной деизопентанизацией сырья и рециклом *n*-пентана.

Выводы

Реконструкция установки изомеризации Л-35-11/300 с организацией рецикла непревращенных компонентов позволяет повысить октановое число продукта в среднем на 2,6 пункта, с применением технологии с предварительной деизопентанизацией сырья – на 2 пункта. Одновременное использование этих вариантов в одной технологической схеме позволит повысить октановое число изомеризата на 6,5 пунктов. Согласно проведенным на модели расчетам реконструкция установки с применением технологий деизопентанизации сырья и рецикла непревращенных компонентов дает наибольший экономический эффект.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шакун А.Н. Низкотемпературная технология изомеризации Изомалк 2 – Оптимальное техническое решение при производстве экологически чистых автобензинов // Матер. VII Междунар. конф. и выставки по технологиям нефтепереработки России и стран СНГ. – г. Москва, 27–28 сентября 2007 г. – М., 2007. – С. 35–38.
2. Баннов П.Г. Процессы переработки нефти – СПб.: Химиздат, 2009. – 368 с.
3. Ким С.Ф., Чеканцев Н.В. Оценка эффективности различных технологических схем процесса изомеризации пентан-гексановой фракции с применением метода математического моделирования // Химия и химическая технология в XXI веке: Матер. X Юбилейной Всеросс. конф. студентов и аспирантов. – г. Томск, ТПУ, 13–15 мая 2009 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – С. 224–225.
4. Чеканцев Н.В., Кравцов А.В., Дуброва Т.В. Формализованный механизм превращений углеводородов пентан-гексановой фракции на поверхности бифункциональных Pt-катализаторов изомеризации // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 3. – С. 34–37.
5. Чеканцев Н.В. Совершенствование процесса изомеризации пентан-гексановой фракции методом математического моделирования // Наука. Технологии. Инновации: Матер. Всеросс. научная конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – г. Новосибирск, НГТУ, 6–9 декабря 2007. – Новосибирск: НГТУ, 2007. – С. 110–113.
6. Литвак Е.И., Кравцов А.В., Иванчина Э.Д., Чеканцев Н.В. Исследование влияния структуры химико-технологической системы на эффективность изомеризации пентан-гексановой фракции с использованием математической модели процесса // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 3. – С. 63–68.
7. Везиров Р.Р., Везирова Н.Р., Халиков Д.Е., Фасхутдинова М.Г. Рециркуляции пентана в процессе изомеризации // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2011. – № 10. – С. 15–16.

Поступила 05.03.2012 г.

УДК 544.23.057:621.3.048.81

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ РАСТВОРИТЕЛЕЙ И КИНЕТИКА ИХ ИСПАРЕНИЯ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПРОПИТОЧНЫХ СОСТАВОВ

С.Н. Шуликин, М.С. Шуликина, С.С. Марьин*

Томский политехнический университет

*ООО «Газпром трансгаз Томск»

E-mail: hupy@tpu.ru

Рассмотрены вопросы термодинамической совместимости растворителей с электроизоляционными пропиточными составами. Установлена взаимосвязь между растворяющей способностью органических растворителей полимерных пленок и их твердостью. Экспериментально получены кинетические кривые интенсивности испарения растворителя алкидно-меламинового лака МЛ-92 различной вязкости и при различных режимах термообработки.

Ключевые слова:

Межмолекулярные взаимодействия, пропиточные составы, растворители, интенсивность испарения, термообработка.

Key words:

Intermolecular interactions, insulating varnishes, solvents, intensity of evaporation, heat treatment.

Введение

Электроизоляционные пропиточные составы на основе модифицированных синтетических полимеров содержат в качестве растворителей и разбавителей горючие органические растворители. Для получения однородных отвержденных систем изоляции обмоток электрических машин из органорастворимых пленкообразующих композиций особое внимание необходимо уделять подбору растворителей, так как свойства данной системы зависят от термодинамической совместимости растворителей с полимерами и другими компонентами.

В то же время термодинамическая совместимость не является достаточным условием для получения оптимальных однородных структур. Процесс испарения растворителей при термообработке электротехнических изделий, пропитанных лаками,

имеет свои особенности, к которым следует отнести непрерывное нагревание изделия и пропиточного состава в процессе сушки; объемный характер испарения растворителей; неопределенность толщины лака и глубины его проникновения; сложность диффузии растворителей пропитанных лаком слоев обмоток и др. [2].

Материалы и методы исследования

Объектами исследования в работе является алкидно-меламиновый пропиточный состав МЛ-92. В качестве летучей части были использованы высококипящие органические растворители: *o*-, *m*-, *p*-ксилолы; уайт-спирит; изобутанол; ароматический растворитель АР-2, представляющий собой сольвент-нафта, толуол [3].

Для данных объектов были определены наиболее вероятные конформации, соответствующие