

АНАЛИЗ СТЕХИОМЕТРИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ, ОГРАНИЧИВАЮЩИХ СТАЦИОНАРНЫЕ СОСТОЯНИЯ РЕАКЦИОННО-РЕКТИФИКАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

М.А. Яхьяев^{1,®}, Ю.А. Писаренко¹, С. Серна-Лоанза², К.А. Кардона²

¹Московский технологический университет (Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова), Москва 119571, Россия

²Национальный университет Колумбии (Институт биотехнологии и агропромышленности), Манизалес-Кальдас, Колумбия

[®] Автор для переписки, e-mail: yakhyaev2008@mail.ru

Разработка и совершенствование промышленных технологий, основанных на использовании принципа совмещения реакционных и массообменных процессов, является актуальной задачей. Связано это с их преимуществом по сравнению с традиционным последовательным способом осуществления химического превращения и разделения образовавшейся реакционной смеси. В реакционно-ректификационных процессах благодаря непрерывному отводу из реакционной зоны образовавшихся продуктов повышаются конверсия процесса, скорость реакции и селективность. Помимо этого, капитальные и энергетические затраты в таких процессах значительно снижены из-за сокращения или даже полного отсутствия в них внешних рециклов. Современным методом разработки реакционно-ректификационных процессов является анализ статики, позволяющий выделить предельные стационарные состояния, соответствующие максимальному выходу целевого продукта. Существенным недостатком, ограничивающим возможность использования данного метода для решения практических задач, является рассмотрение в его рамках единственной химической реакции. В то же самое время, при переходе к реальным процессам это ограничение, как правило, нарушается. В статье предложен ряд оригинальных подходов, оформленных в виде алгоритма, которые позволяют распространить анализ статики на реакционно-ректификационные процессы с неограниченным числом компонентов, образующих реакционную смесь, и неограниченным множеством протекающих между ними химических реакций. На базе данного алгоритма в среде SciLab разработана программа ChIM, позволяющая выделять множества предельных стационарных состояний совмещенного процесса, характеризующихся максимальными величинами конверсии реагентов, селективностью и выходом целевого продукта. Порядок использования программы ChIM проиллюстрирован на примере промышленного процесса получения окиси мезитила из ацетона. Расчетные исследования, проведенные с помощью программного комплекса Aspen Plus, доказали возможность практической реализации предсказанного ChIM предельного стационарного состояния, обеспечивающего максимальный выход окиси мезитила.

Ключевые слова: реакционно-ректификационные процессы, анализ статики, окись мезитила, балансный многогранник, многообразие химического взаимодействия, алгоритм построения реакционного многогранника.

ANALYSIS OF STOICHIOMETRIC REGULARITIES LIMITING STATIONARY STATES OF REACTION-RECTIFICATION PROCESSES

M.A. Yakhyaev^{1,@}, Yu.A. Pisarenko¹, S. Serna-Loaiza², C.A. Cardona²¹Moscow Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow 119571, Russia²Institute of Biotechnology and Agroindustry, National University of Colombia, Manizales headquarters, Manizales-Caldas, Columbia

@ Corresponding author e-mail: yakhyaev2008@mail.ru

Development and improvement of industrial technologies based on the principle of combining reaction and mass exchange processes is an urgent task. This is due to their advantage over the traditional sequential way of performing the chemical transformation and separation of the resulting reaction mixture. In reaction-rectification processes, the conversion of the process, the rate of reaction and selectivity may be increased due to continuous withdrawal of the formed products from the reaction zone. In addition, capital and energy costs in such processes are significantly reduced due to the reduction or even complete absence of external recycling in them. The modern method of developing reaction-rectifying processes is the analysis of statics, which allows isolating the limiting stationary states corresponding to the maximum yield of the target product. An essential disadvantage limiting the possibility of using this method for solving practical problems is the consideration of a single chemical reaction in its framework. At the same time, when passing to real processes, as a rule, this restriction is violated. The article offers a number of original approaches designed in the form of an algorithm that allows the analysis of statics to be extended to reaction-rectification processes with an unlimited number of components forming the reaction mixture and an unlimited number of chemical reactions taking place between them. On the basis of this algorithm, a ChIM program was developed in the SciLab environment, which makes it possible to single out sets of limiting stationary states of a combined process characterized by maximum reagent conversion values, selectivity and yield of the target product. The procedure for using the ChIM program is illustrated by the example of the industrial process for obtaining mesityl oxide from acetone. Calculations conducted using the software package Aspen Plus proved the possibility of practical implementation of limiting stationary state providing the maximum yield of mesityl oxide, which was predicted by using of ChIM.

Keywords: reaction-rectification processes, statics analysis, mesityl oxide, balanced polyhedron, manifold of chemical interaction, algorithm for constructing a reaction polyhedron.

Введение

Стремление к созданию наиболее экономически выгодных и экологически безопасных технологий привело к внедрению в современную химическую промышленность совмещенных процессов. В то время как традиционный способ организации химико-технологических процессов предусматривает раздельное проведение химического превращения и последующее выделение образовавшихся продуктов из реакционной смеси, в совмещенном процессе реакционную зону размещают внутри разделительного аппарата. Таким образом, химическое превращение и разделение в этом случае происходит одновременно и совместно. Благодаря размещению реакционной зоны в разделительном аппарате возможно создание благоприятных условий для протекания целевой химической реакции и подавления побочных, что позволяет увеличить селективность и степень конверсии реагентов, в ряде случаев доводя

их практически до 100% [1–3]. В современной промышленности внедрен целый ряд совмещенных процессов. В качестве примеров можно привести процессы получения сложных эфиров уксусной кислоты и кислот жирного ряда, простых эфиров, используемых в качестве высокооктановых добавок к моторным топливам, процессы обессеривания нефтяных фракций и др. [2, 4].

Для процессов химического превращения характерны определенные типы статических ограничений. Ограничения первого типа определяют предельные значения выхода целевого продукта в простой проточной системе. И в простейшем случае при наличии единственной наблюдаемой химической реакции сводятся к условию, в соответствии с которым выход целевого продукта не может превышать химически равновесную величину, определяемую условиями проведения процесса. Данные ограничения можно преодолеть с помощью избирательного обмена веществом между реакционной зоной и окружающей средой в совмещенных

процессах или с применением реакционно-рециркуляционных процессов. В таком случае выход целевых продуктов может быть существенно увеличен. Второй тип ограничений определен стехиометрией химических превращений. В соответствии со стехиометрией, в случае стационарного режима состав исходного сырья и продуктового потока расположены на одном и том же многообразии химического взаимодействия. Для преодоления ограничений, связанных с текущей стехиометрией, необходимо либо изменить состав исходного сырья, либо увеличить количество реакций, протекающих в системе [5]. Оба описанных выше приема активно применяют при создании новых технологий, основанных на использовании совмещенных реакционно-ректификационных процессов.

Научной основой исследования и разработки совмещенных процессов является анализ их статики [1], который используют для выделения соответствующих им предельных стационарных состояний. Последним соответствует максимальный выход продуктов при заданном составе исходного сырья. Множество составов брутто-продуктового потока (составов псевдоисходных смесей), соответствующих стационарным состояниям, представляет собой часть линейного многообразия – стехиометрической плоскости, – расположенного в положительном ортанте концентрационного пространства [5]. В традиционном анализе статики рассматривают единственную химическую реакцию, поэтому построение многообразия химического взаимодействия не вызывает затруднений. Проблема возникает при увеличении числа протекающих в процессе химических реакций. Существуют графические методы построений многообразий для процессов с двумя химическими реакциями. В случае систем с большим числом компонентов и химических реакций графический способ представления таких многообразий является неприемлемым, поэтому данную задачу приходится решать с использованием специализированного программного комплекса. В связи с этим построение и математическое моделирование многообразия химического взаимодействия является актуальной задачей. В данной статье рассмотрены способы выделения стационарных режимов, отвечающих максимальному выходу целевого продукта в реакционных системах с неограниченным числом компонентов и неограниченным числом химических взаимодействий, на примере реакционно-ректификационного процесса получения из ацетона окиси мезитила.

Балансный и реакционный многогранники

Химические превращения, происходящие в многокомпонентных системах, подчиняются ряду условий, соответствующих законам сохранения ве-

щества, которые выражаются балансовыми соотношениями. Можно рассмотреть балансовые соотношения для количества каждого из элементов, из которых построены взаимодействующие молекулы, или соотношения, записанные для количества каждого из фрагментов молекул, которыми в процессе химического взаимодействия последние обмениваются между собой. Подобного рода балансовые соотношения можно записать для закрытой системы или для стационарного состояния открытой системы, где количество отдельных элементов или фрагментов молекул также остается неизменным во времени. Рассмотрим арифметическое пространство R^c с введенной в нем системой координат, каждой его точке отвечает набор из c упорядоченных чисел $(N_1, N_2, \dots, N_n)$, в качестве которых выступают количества молей веществ, образующих реакционную смесь. Данное пространство принято называть пространством составов. Указанные выше балансовые соотношения определяют в нем так называемый балансный многогранник $D(b^0)$, свойства которого подробно рассмотрены в монографии [6]. Вид балансного многогранника не зависит от стехиометрии протекающих в системе реакций, а определяется исключительно строением молекул реактантов и составом исходного сырья. Основным свойством балансного многогранника является то, что в смеси любого принадлежащего ему состава, характеризуемого набором переменных $N_1, N_2, \dots, N_n$, содержится то же, что и в исходном сырье, количество атомов элементов или фрагментов молекул, которыми обмениваются между собой молекулы вступающих в реакцию веществ. Размерность балансного многогранника $\dim(D(b^0))$ равна разности между размерностью пространства составов и рангом атомной матрицы $\|u_i^j\|$:

$$\dim(D(b^0)) = n - \text{rank}(\|u_i^j\|). \quad (1)$$

Таким образом, если состав сырья задан, то балансный многогранник определяет полное множество возможных составов брутто-продуктового потока, отводимого из химико-технологической системы (ХТС), вне зависимости от стехиометрии протекающих в системе реакций.

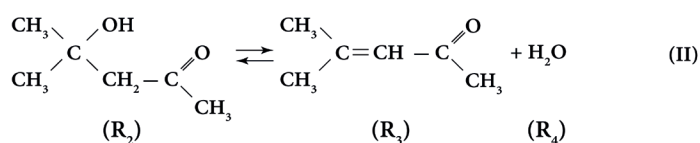
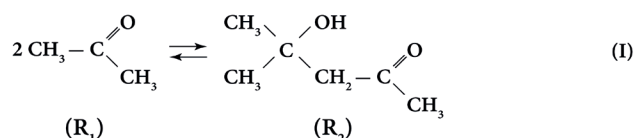
На примере процесса получения окиси мезитила из ацетона рассмотрим взаимоотношение понятий балансный многогранник и многообразие химического взаимодействия (МХВ), или реакционный многогранник, введенном в работе [5].

Окись мезитила относится к числу растворителей, получаемых из ацетона и имеющих средние температуры кипения. Это определяет возможность ее использования в качестве растворителя лаков и красок при приготовлении покрытий, а

также целого ряда смол – нитроцеллюлозы, винилхлоридных и винилацетатных сополимеров. Применяют окись мезитила также в качестве экстрагента элементов ряда актиноидов. Кроме того, окись мезитила – ценный промежуточный продукт, используемый для получения ряда важнейших продуктов основного органического синтеза, в частности, метилизобутилкетона и метилизобутилкарбинола.

Экспериментальная часть

В большей части патентов рассмотрен способ получения окиси мезитила из ацетона через промежуточную стадию образования диацетонового спирта с последующей его дегидратацией, осуществляемой в жидкой фазе [7–9]. Основные реакции, приводящие к образованию окиси мезитила:



Из уравнений, приведенных выше, видно, что элементами, из которых состоят молекулы реагирующих веществ, являются углерод, кислород и водород. В закрытых системах или в открытых системах с установившемся в них стационарным состоянием количество каждого из перечисленных выше элементов остается неизменным. Вследствие этого, балансовые соотношения для каждого из них имеют вид:

$$\text{Углерод: } 3N_{\text{C}_3\text{H}_6\text{O}} + 6N_{\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2} + 6N_{\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}} = \text{const}_1, \quad (2a)$$

$$\text{Кислород: } N_{\text{C}_3\text{H}_6\text{O}} + 2N_{\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2} + N_{\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}} + N_{\text{H}_2\text{O}} = \text{const}_2, \quad (2b)$$

$$\text{Водород: } 6N_{\text{C}_3\text{H}_6\text{O}} + 12N_{\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2} + 10N_{\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}} + 2N_{\text{H}_2\text{O}} = \text{const}_3, \quad (2c)$$

Для системы уравнений (2) запишем атомную матрицу U :

$$U = \begin{pmatrix} 3 & 6 & 6 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 6 & 12 & 10 & 2 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Ранг атомной матрицы U равен двум, следовательно, уравнения (2) являются линейно зависимыми и одно из них, скажем, уравнение (2a), можно исключить из дальнейшего рассмотрения. При этом каждое из оставшихся уравнений – (2b) и (2c) – задает в четырехмерном пространстве составов с системой координат, вдоль осей которой отложены количества веществ, образующих реакцию смесь, трехмерную плоскость общего вида. Обозначим данные плоскости Q_1 и Q_2 . Размерность пересечения указанных плоскостей следует из соотношения (4):

$$\dim(Q_1 \cup Q_2) = \dim(Q_1) + \dim(Q_2) - \dim(Q_1 \cap Q_2). \quad (4)$$

Поскольку Q_1 и Q_2 – плоскости общего положения, то $\dim(Q_1 \cup Q_2) = 4$, и учитывая, что $\dim(Q_1) = \dim(Q_2) = 3$, имеем: $\dim(Q_1 \cap Q_2) = 2$. Таким образом, система уравнений (2) задает в пространстве составов двумерную плоскость, часть которой, расположенная в положительном ортанте системы координат, представляет собой балансный многогранник.

При разработке химико-технологических процессов для выражения состава материальных потоков вместо количеств каждого из присутствующих в них веществ гораздо удобнее использовать концентрации последних, выраженные в массовых или мольных долях. Таким образом, набор переменных $N_1, N_2, \dots, N_n$ заменяют набором $x_1, x_2, \dots, x_n$. В этом случае переход от одного способа выражения состава к другому соответствует переходу от пространства составов R^n , точки которого определены упорядоченным набором переменных $\{N_1, N_2, \dots, N_n\}$, к концентрационному пространству, точки в котором заданы упорядоченным набором $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Отметим, что концентрационное пространство имеет размерность на единицу меньше, чем пространство составов, поскольку концентрации, выраженные в массовых или мольных долях, в сумме дают единицу:

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1. \quad (5)$$

Для рассматриваемой реакционной смеси, включающей четыре реактанта R_1, R_2, R_3, R_4 , взаимосвязь между четырехмерным пространством составов и отвечающим ему трехмерным концентрационным пространством показана на рис. 1. Условие (5) определяет в пространстве составов трехмерную плоскость, часть которой, заключенная в положительный ортант координатного пространства, представляет собой концентрационный симплекс, в данном случае, – тетраэдр K^3 .

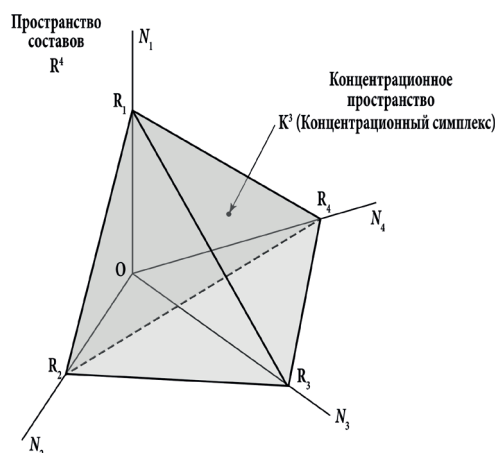


Рис. 1. Расположение концентрационного симплекса $R_1R_2R_3R_4$ (K^3) в пространстве составов R^4 реакционной смеси процесса получения окиси мезитила.

Расположение балансного многогранника, определяемого, системой уравнений (2), в концентрационном симплексе в зависимости от состава исходного сырья x^F показано на рис. 2. В данном случае, как это следует из рис. 2, балансные многогранники представляют собой плоские треугольники.

Взаимное расположение балансных и реакционных многогранников (многообразий химического взаимодействия [5]) для химических реакций (I) и (II) показано на рис. 3а,б. Балансному многограннику, изображенному на этом рисунке, соответствуют составы исходного сырья, в которых концентрации компонентов R_3 (окси мезитила) и R_4 (воды) одинаковы. Как следует из рис. 3а,б, реакционные многогранники

(МХВ) для каждой из рассматриваемых реакций в отдельности представляют собою отрезки прямых – стехиометрических линий, проходящих через точки, обозначающие составы исходного сырья. Поскольку обе реакции протекают с изменением общего количества молей, стехиометрические линии пересекаются в точках, расположенных за пределами концентрационного симплекса, – в полюсах S_1 и S_2 соответственно.

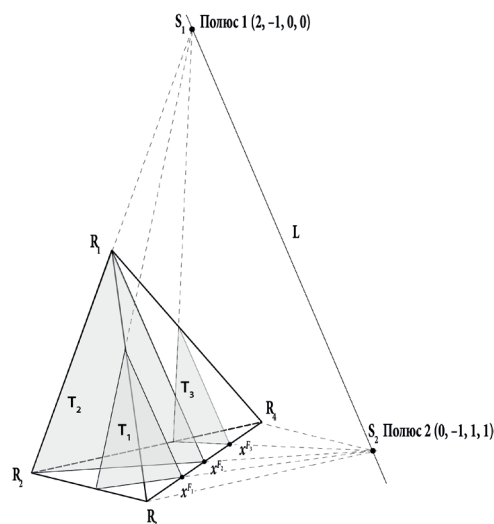


Рис. 2. Расположение балансных многогранников в концентрационном симплексе K^3 в зависимости от состава исходного сырья: T_1, T_2, T_3 – балансные многогранники; $x^{F_1}, x^{F_2}, x^{F_3}$ – составы исходного сырья; S_1, S_2 – полюса химических реакций (в скобках указаны координаты полюсов); L – инвариант исходного состава – линия, вдоль которой пересекаются стехиометрические плоскости [5]; концентрации выражены в мольных долях.

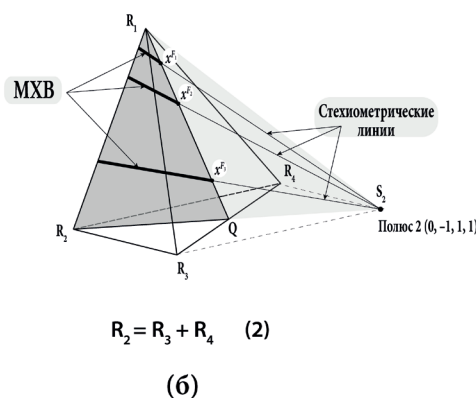
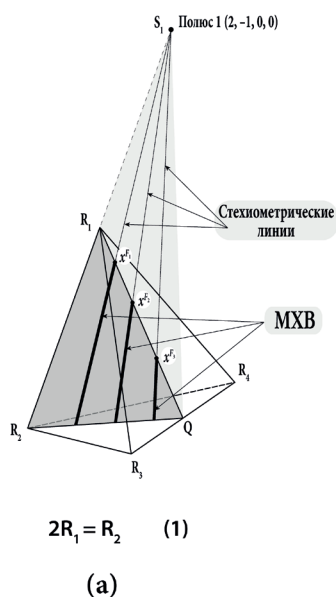


Рис. 3. Взаимное расположение балансного многогранника и реакционных многогранников, соответствующих различным составам исходного сырья $x^{F_1}, x^{F_2}, x^{F_3}$; S_1, S_2 – полюса химических реакций (в скобках указаны координаты полюсов); МХВ – реакционные многогранники (в данном случае это реакционные отрезки); R_1R_2Q – балансный многогранник. В представленных на рисунке составах исходного сырья концентрации окиси мезитила (R_3) и воды (R_4), выраженные в мольных долях, одинаковы.

И, как было отмечено ранее, реакционные многогранники полностью расположены в балансном многограннике R_1R_2Q , поскольку при протекании каждой из химических реакций количество элементов, из которых построены молекулы взаимодействующих веществ, остается неизменным.

Если же реакции (I) и (II) протекают одновременно, то размерность реакционного многогранника, определяемая числом линейно-независимых реакций, становится равной двум, при этом он совпадает с балансным многогранником.

Следует отметить, что балансный многогранник представляет наиболее общие фундаментальные закономерности реакционной системы, не зависящие от конкретной стехиометрии; в отличие от этого реакционный многогранник ограничивает указанные закономерности, исходя из конкретной стехиометрии, присущей рассматриваемой системе реакций.

Балансный многогранник – прекрасный инструмент для поиска наиболее общих свойств реакционных систем, не ограниченных конкретной стехиометрией. В то же время, реакционный многогранник позволяет наиболее полно учесть свойства рассматриваемой реакционной системы, в частности, с учетом стехиометрических ограничений, определить возможные составы отводимого из нее брутто-продуктового потока. Поэтому данное понятие является особенно ценным для инженеров-разработчиков конкретных химико-технологических процессов.

Алгоритм построения реакционного многогранника

Ниже на рис. 4 приведен алгоритм построения реакционного многогранника, представленный в виде блок-схемы.

Приведенный алгоритм реализован в виде компьютерной программы ChIM в среде SciLab, которая использована для анализа стехиометрических закономерностей ряда промышленных процессов.

Результаты и их обсуждение

Процесс получения окиси мезитила из ацетона

Получение окиси мезитила из ацетона через промежуточную реакцию образования диацетонового спирта с последующей его дегидратацией можно осуществлять в реакционно-ректификационном аппарате, разместив в верхней части колонны анионит. В присутствии последнего протекает реакция конденсации ацетона с образованием диацетонового спирта, который вследствие высокой температуры кипения концентрируется в нижней части колонны. В дальнейшем, разместив в нижней ее части катионообменный катализатор, создаем условия для осуществления реакции разложения диацетонового спирта на окись



Рис. 4. Алгоритм работы программы ChIM для построения реакционного многогранника.

мезитила и воду. Продуктовый поток, содержащий окись мезитила и воду, отбираем в паровой фазе из средней части реакционно-ректификационного аппарата. Для выделения предельных стационарных режимов проведения данного процесса воспользуемся программным продуктом ChIM. Отметим, что данный пример является относительно простым и позволяет визуальнее наиболее наглядно проиллю-

стрировать результаты, полученные с помощью программы. При переходе к более сложным реакционным системам возможность графически наглядного представления результатов ее работы значительно сокращается. Выделим предельные стационарные режимы (стационарные состояния реакционно-ректификационного процесса) для трех различных составов исходного сырья: F_1 (чистый ацетон), F_2 (бинарная смесь ацетон–окись мезитила) и F_3 (бинарная смесь ацетон–вода). Результаты расчета для указанных составов исходного сырья приведены в таблице, а их графическая интерпретация показана на рис. 5.

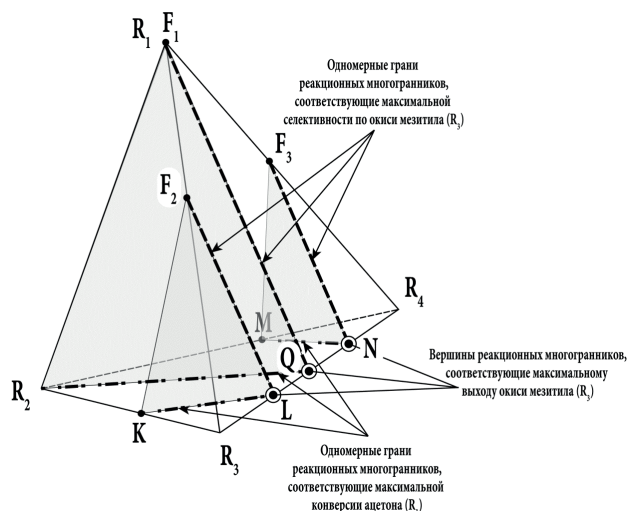


Рис. 5. Грани реакционных многогранников, отвечающие предельным стационарным режимам: F_1R_2Q , F_2KL , F_3MN – реакционные многогранники, соответствующие исходным смесям F_1 , F_2 и F_3 .

Из таблицы следует, что максимальной конверсии исходного реагента (ацетона) соответствуют вершины R_2 , Q , K , L , M , N реакционных многогранников, расположенные на нижней треугольной грани тетраэдра, а также одномерные грани (ребра), соединяющие эти вершины. В данном случае в качестве побочного продукта выступает диацетоновый спирт. Поэтому предельными стационарными состояниями, с точки зрения селективности по окиси мезитила, будут те из них, в которых концентрация диацетонового спирта минимальна. Данному условию соответствуют вершины F_1 , F_2 , F_3 , Q , L , N , а также одномерные грани (ребра) реакционных многогранников, соединяющих указанные вершины. И, наконец, максимальному выходу целевого продукта, то есть, предельным стационарным состояниям по отношению к выходу целевого продукта, соответствуют вершины Q , L , N . Как следует из рис. 5, данные стационарные состояния (вершины) являются пересечениями множества предельных стационарных состояний, характеризующихся максимальной конверсией, и множества предельных стационарных состояний, которым

Координаты вершин реакционных многогранников

Составы, соответствующие вершинам реакционного многогранника, мол. доли			
Исходная смесь F_1 : $x_{Ac}^{F_1} = 1$; $x_{DAS}^{F_1} = 0$; $x_{OM}^{F_1} = 0$; $x_B^{F_1} = 0$			
Вершины	Q	R_2	$F_1 \equiv R_1$
Ацетон (Ац)	0.0	0.0	1.0
Диацетоновый спирт (ДАС)	0.0	1.0	0.0
Окись мезитила (ОМ)	0.5	0.0	0.0
Вода (В)	0.5	0.0	0.0
Исходная смесь F_2 : $x_{Ac}^{F_2} = 0.5$; $x_{DAS}^{F_2} = 0$; $x_{OM}^{F_2} = 0.5$; $x_B^{F_2} = 0$			
Вершины	L	K	F_2
Ацетон (Ац)	0	0	0.5
Диацетоновый спирт (ДАС)	0	0.3333	0
Окись мезитила (ОМ)	0.75	0.6667	0.5
Вода (В)	0.25	0	0
Исходная смесь F_3 : $x_{Ac}^{F_3} = 0.5$; $x_{DAS}^{F_3} = 0$; $x_{OM}^{F_3} = 0$; $x_B^{F_3} = 0.5$			
Вершины	N	M	F_3
Ацетон (Ац)	0	0	0.5
Диацетоновый спирт (ДАС)	0	0.3333	0
Окись мезитила (ОМ)	0.25	0	0
Вода (В)	0.75	0.6667	0.5

отвечает максимальная селективность. Именно эти стационарные состояния реакционно-ректификационного процесса представляют наибольший интерес с точки зрения их практической реализации.

Заключение

С помощью созданного программного продукта ChIM выделено предельное стационарное состояние реакционно-ректификационного процесса получения окиси мезитила, характеризующиеся практически 100%-ным выходом окиси мезитила. Посредством вычислительного эксперимента показана возможность практической реализации предсказанного стационарного состояния. Отметим, что созданный программный продукт ChIM позволяет выделять предельные стационарные состояния процесса в случае реакционных систем, как с произвольным числом составляющих их компонентов, так и с произвольным количеством протекающих между ними химических реакций, что дает возможность распространить анализ статистики на совмещенные процессы с множественными химическими взаимодействиями.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 16-19-10632.

Список литературы:

References:

1. Серафимов Л.А., Тимофеев В.С., Писаренко Ю.А., Солохин А.В. Технология основного органического синтеза. Совмещенные процессы. М.: Химия, 1993. 416 с.
2. Harmsen J. Reactive distillation: The front-runner of industrial process intensification. A full review of commercial applications, research, scale-up, design and operation // Chem. Eng. & Proc. 2007. V. 7. № 46. P. 774–780.
3. Sundmacher K., Kienle A. Reactive Distillation. Status and Future Directions. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2002. 287 p.
4. Rameshwar H.S., Nitin V.B., Yogesh M.S., Sanjay M.M. Industrial applications of reactive distillation: Recent trends // Int. J. Chem. Reactor Eng. 2004. V. 52. № 2. P. 1–52.
5. Писаренко Ю.А., Серафимов Л.А. К статике систем с химическими превращениями // Теор. основы хим. технол. 1991. Т. 25. № 5. 627–637.
6. Горбань А.Н. Обход равновесия. Новосибирск: Наука, 1984. 224 с.
7. Верховская З.Н., Клименко М.Я., Залеская Е.М., Бычкова И.Н. Синтез диацетонного спирта и окиси мезитила на ионообменных смолах // Хим. пром. 1967. № 7. С. 20–23.
8. Thotla S., Agarwal V., Mahajani S.M. Simultaneous production of diacetone alcohol and mesityl oxide from acetone using reactive distillation // Chem. Eng. Sci. 2007. V. 8. № 62. P. 5567–5574.
9. Huang C., Ng F.T.T., Rempel G.L. Application of catalytic distillation for the aldol condensation of acetone: The effect of the mass transfer and kinetic rates on the yield and selectivity // Chem. Eng. Sci. 2000. V. 13. № 55. P. 5919–5931.

1. Serafimov L.A., Timofeev V.S., Pisarenko Yu.A., Solokhin A.V. Technology of basic organic synthesis. Combined processes. Moscow: Khimiya Publ., 1993. 416 p. (in Russ.).
2. Harmsen J. Reactive distillation: The front-runner of industrial process intensification. A full review of commercial applications, research, scale-up, design and operation // Chem. Eng. & Proc. 2007. V. 7. № 46. P. 774–780.
3. Sundmacher K., Kienle A. Reactive Distillation. Status and Future Directions. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2002. 287 p.
4. Rameshwar H.S., Nitin V.B., Yogesh M.S., Sanjay M.M. Industrial applications of reactive distillation: Recent trends // Int. J. Chem. Reactor Eng. 2004. V. 52. № 2. P. 1–52.
5. Pisarenko Yu.A., Serafimov L.A. To the statics of systems with chemical transformations // Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii (Theoretical Foundations of Chemical Technology). 1991. V. 25. № 5. P. 627–637. (in Russ.).
6. Gorban' A.N. Bypassing the equilibrium. Novosibirsk: Nauka Publ., 1984. 224 p. (in Russ.).
7. Verkhovskaya Z.N., Klimenko M.Ya., Zalesskaya E.M., Bychkova I.N. Synthesis of diacetone alcohol and mesityl oxide on ion-exchange resins // Khimicheskaya promyshlennost' (Chemical Industry). 1967. № 7. P. 20–23. (in Russ.).
8. Thotla S., Agarwal V., Mahajani S.M. Simultaneous production of diacetone alcohol and mesityl oxide from acetone using reactive distillation // Chem. Eng. Sci. 2007. V. 8. № 62. P. 5567–5574.
9. Huang C., Ng F.T.T., Rempel G.L. Application of catalytic distillation for the aldol condensation of acetone: The effect of the mass transfer and kinetic rates on the yield and selectivity // Chem. Eng. Sci. 2000. V. 13. № 55. P. 5919–5931.

Об авторах:

Яхьяев Магомед Абдуллаевич, аспирант кафедры основного органического синтеза Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

Писаренко Юрий Андрианович, доктор технических наук, профессор кафедры основного органического синтеза Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). E-mail: pisarenko_yu@mail.ru

Серна-Лоанза Себастьян, магистр кафедры химической инженерии Института биотехнологии и агропромышленности «Национальный университет Колумбии» (штаб-квартира Манисалес, Манисалес-Кальдас, Колумбия). E-mail: ssernal@unal.edu.co

Кардона Карлос Ариэль, доктор философии, профессор кафедры химической инженерии Института биотехнологии и агропромышленности «Национальный университет Колумбии» (штаб-квартира Манисалес, Манисалес-Кальдас, Колумбия). E-mail: ccardonaal@unal.edu.co

About the authors:

Magomed A. Yakhyayev, Post-Graduate Student, Chair of Basic Organic Synthesis, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia). E-mail: yakhyayev2008@mail.ru

Yuri A. Pisarenko, Dr.Sc. (Engineering) Professor of Chair of Basic Organic Synthesis, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia). E-mail: pisarenko_yu@mail.ru

Sebastian Serna-Loaiza, Magister, Chair of Chemical Engineering, Institute of Biotechnology and Agroindustry, National University of Colombia (headquarters Manizales, Manizales-Caldas, Colombia). E-mail: ssernal@unal.edu.co

Carlos A. Cardona, Ph.D. (Engineering), Professor of Chair of Chemical Engineering, Institute of Biotechnology and Agroindustry, National University of Colombia (headquarters Manizales, Manizales-Caldas, Colombia). E-mail: ccardonaal@unal.edu.co