

РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫЕ СХЕМЫ – КЛАССИФИКАЦИЯ И ПОДХОД ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ БАЛАНСОВЫХ СВЯЗЕЙ ПРИ УСЛОВИЯХ СТАЦИОНАРНОСТИ*

Д. И. ДИМИТРОВ

Кафедра Основ химической технологии
Высшего химико-технологического института, София, Болгария

Поступило: 8 августа 1980 г.

Представлено: проф. д-р. И. Себени

Рециркуляционные схемы в химической промышленности, как осознанный подход для интенсификации технологических процессов, появились вместе с промышленным аммиачным синтезом. В качестве их предшественников можно указать на периодические процессы с возвратом — псевдоциркуляционные схемы, как это было при переработке стасфуртской калиевой руды. В настоящее время рециркуляционные схемы так широко распространены, что в области тяжелой химической промышленности, даже трудно назвать производство, где эти схемы не нашли применения. Важно, что рециркуляционные схемы находят место в самых разных областях промышленности, народного хозяйства и природных процессов. Замечательные перспективы открываются перед ними в связи с возможностью применить их в качестве моделей некоторых процессов с участием фиктивных потоков [2].

Несмотря на все сказанное, в учебниках и периодической литературе проблема о рециркуляционных схемах трактуется слабо, о чем можно судить по почти полному отсутствию соответствующего материала в университетских учебниках и даже в очень авторитетных руководствах по проектированию в химической промышленности. Известное руководство М. Ф. Нагиева [1], является по-настоящему уникальным явлением в мировой литературе, хотя оно далеко от системного, всеохватывающего и детального рассмотрения вопроса, так как эта пионерская книга приспособлена преимущественно к потребностям нефтеперерабатывающей промышленности.

В этой книге рециркуляционные процессы сводятся фактически до одной базовой схемы, а вопрос о рециркуляции тепла, о рециркуляции фиктивных потоков, о связи потоков с концентрацией и кинетикой, не разработаны или не доработаны.

В настоящей работе формулированы принципы классификации рециркуляционных схем с участием реальных массовых потоков. Предложен и новый подход для построения балансового описания потоков рециркуляционных схем.

* Доклад на III-ей конференции Кооредр общей химической технологии социалистических стран, 16—20 апреля 1980 г в Балатонфюреде.

Рециркуляционные схемы представляют комплекс из технологических элементов, связанных с потоками таким образом, чтобы образовался по крайней мере один замкнутый поточный круг.

Сами технологические элементы бывают обязательными и необязательными (вспомогательными). К первым принадлежат две группы элементов: элементы превращения и элементы разделения.

В некоторых случаях используются комплексные смесительно-разделительные элементы.

Технологические элементы превращения. Обыкновенно это — различные типы химических реакторов, но очень часто бывают и элементы физических превращений: растворители, экстракторы, аб- и адсорберы, кристаллизаторы, измельчители и др. п. В этих элементах осуществляется получение нового соединения, новой фазы, новой гранулометрической фракции, или переход соединения из одной в другую фазу. В дальнейшем будем обозначать эти превращения превращениями первого рода (продукционными превращениями).

Технологические элементы разделения. Это — элементы дистилляционного и ректификационного разделения, фильтрования, гранулометрического сортирования, десорбции и др. Они могут производить под формой потоков одну и больше продуктивных и одну, а иногда и больше рециркуляционных фракций. Все эти элементы будем обозначать фракционными делителями, так как составы разделяемого, продукционного и рециркуляционного потоков, неидентичные. Однако в рециркуляционных схемах применяются и делители смесительного типа, где составы трех упомянутых потоков идентичные.

Роль элементов разделения состоит в получении конечного или промежуточного продукционного потока. Соответствующие превращения обозначим термином превращения второго рода.

Смесительно-разделительные технологические элементы. Характерно для них параллельность двух потоков — каждый из них является носителем одновременно продукционного и рециркуляционного технологических потоков. Типичный пример такого элемента, это — одна изолированная тарелка ректификационной колонны. В сущности смесительно-разделительные элементы объединяют в себе одновременно функции элементов превращения с функциями элементов разделения.

Вспомогательные элементы рециркуляционных схем. Это устройство транспорта, изменения кинематики потоков и др.

Для правильного понимания рециркуляционных схем необходимо уточнение свойства неинертности и инертности входящих в состав потоков компонентов.

В связи с тем, что компоненты способны превращаться в элемент превращения и выделяться в составе продукционного потока в элементах разделения, можно разграничить следующие четыре группы (табл. 1), где знак плюс означает обладание соответствующей формы неинертности.

Таблица № 1

Деление компонентов потоков рециркуляционных схем

| группы и подгруппы | превращение I ^{го} рода | | превращение II ^{го} рода |
|-------------------------|----------------------------------|----------------|-----------------------------------|
| | получение | израсходование | |
| I группа: I подгруппа | + | + | + |
| II подгруппа | + | + | - |
| II группа: I подгруппа | - | + | + |
| II подгруппа | - | + | - |
| III группа: I подгруппа | + | - | + |
| II подгруппа | + | - | - |
| IV группа: I подгруппа | - | - | + |
| II подгруппа | - | - | - |

Данные таблицы свидетельствуют о большом разнообразии в возможном поведении компонентов и требуют крайне внимательного подхода к составлению различного рода балансовых уравнений.

Не меньшего интереса представляет деление участвующих в рециркуляционных схемах потоков. На примере одной из схем покажем перечень этого поперечного деления (рис. 2) потоков (структурные потоки), одновременно приводя буквенные и цифровые символы, которые мы применим при исследовании различных схем.

| | | |
|------------------------------|---|---|
| 1. Питающий поток | E | 1 |
| 2. Брутто поток | B | 2 |
| 3. Промежуточный поток | P | 3 |
| 4. Поток рециркуляции | C | 4 |
| 5. Продукционный поток | P | 5 |
| 6. Сточный поток | T | 6 |
| 7. Поток реакционной массы | R | 7 |
| 8. Поток разделительной зоны | D | 8 |

Саму классификацию рециркуляционных схем можно произвести на основе следующих признаков: а) Число, вид и взаимное расположение рециркуляционных кругов, б) Число взаимодействующих технологических потоков в одном рециркуляционном круге, в) Число и типы реакционных систем и систем разделения, г) Конфигурация потоков в и к рециркуляционного круга.

По первому рециркуляционному признаку систему рециркуляции можно разделить на следующие две группы: а) Простые или элементарные, б) Сложные или комбинированные.

Простые рециркуляционные схемы. Характерно для них, это — наличие только одного единственного рециркуляционного круга. Они построены при помощи двух или трех базовых аппаратов (или систем). На основе второго, третьего и четвертого классификационных признаков простые рециркуляционные схемы делятся следующим образом.

А. простые рециркуляционные схемы с одним или двумя превращающимися потоками. Эти схемы можно рассматривать как базовые во всех отношениях. Здесь причислим шесть схем, обозначаемые символами соответственно: $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$ (фиг. 1).

Схема A_1 . В рециркуляционном круге включены как обязательные: а) реакционная система и б) система фракционного разделения. Питающий

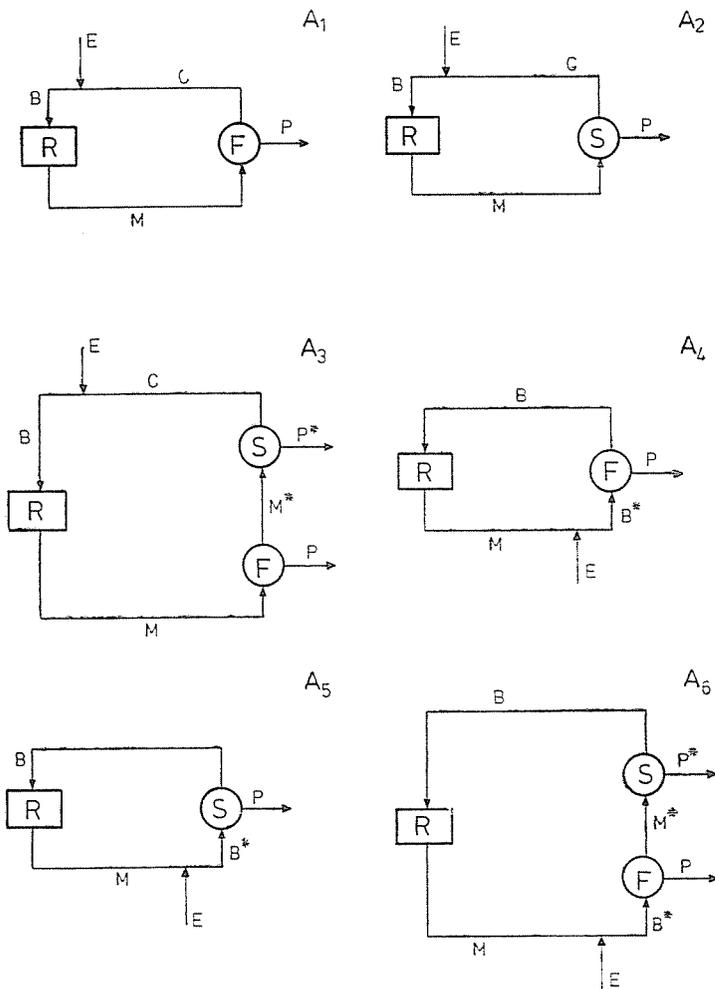


Рис. 1. Рециркуляционные схемы подгруппы А

поток присоединен непосредственно перед реакционной системой. Эта схема применима для переработки химических и физических неинертных компонентов в отсутствие физически инертных компонентов. Таковы примеры со многими производствами из области органического синтеза: пиролиз, дегидрирование, алкилирование. Схему A_1 мы будем применять в качестве методической основы для изучения рециркуляционных процессов вообще.

Схема A_2 . Формально идентична с предшествующей системой с той разницей, что система разделения не фракционного а смешительного типа. Она удобна для проведения процесса в системах с чрезвычайной реакционностью, как например хлорирование.

Схема A_3 . Она является в некотором смысле гибридом предшествующих двух систем. Питающий поток соединен перед реакционной системой. Однако различаются две разделительные системы: первая — фракционного типа и вторая — смешительного типа. Типичный представитель этой схемы, это современный промышленный синтез аммиака.

Схема A_4 . У нее нормальная реакционная система и система фракционного разделения, как у схемы A_1 . Только питающий поток присоединен не перед реакционной системой, а перед системой разделения фракционного типа. Типическим примером является пиролиз нефтяных и газовых фракций при производстве этилена.

Схема A_5 . Различается от предыдущей тем, что система разделения смешительного, и не фракционного типа.

Схема A_6 . Она подобна схеме A_3 , но различается от нее тем, что питающий поток присоединен перед системой фракционного разделения, а не перед реакционной системой.

Б. Рециркуляционные схемы типа В. Их можно обозначать еще как схемы разделения и регенерации. У них система превращения представляет собой смешитель-разделитель сорбционного или хемосорбционного типа. В каждом из аппаратов участвуют два самостоятельных массовых потоков. Только один из потоков рециркуляционного типа. Питающий поток подается в аппарат превращения и проходит через него незамкнутым потоком. Характерно для этого типа рециркуляционных схем наличие компонентного потока практически полной рециркуляцией. Мы будем различать две такие схемы (фиг. 2):

Схема B_1 . У нее система разделения фракционного типа.

Схема B_2 . Она характеризуется системой разделения смешительного типа.

Сложные рециркуляционные схемы. Эти схемы характеризуются двумя и больше рециркуляционными кругами. Их можно классифицировать пользуясь несколькими признаками. Первый — это число рециркуляционных кругов. Второй признак — это наличие или отсутствие обобществляемого элемента. Третий признак относится к характеру обобществляемого эле-

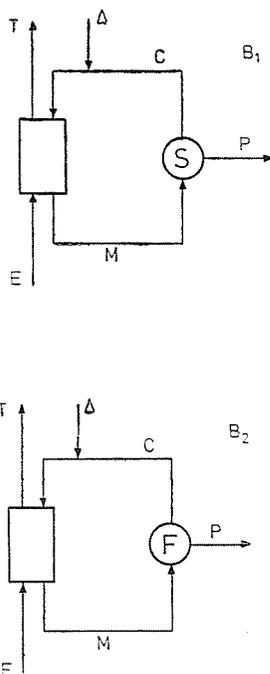


Рис. 2. Рециркуляционные схемы подгруппы В

мента — рециркуляционный круг или отдельный поток. Мы покажем некоторые типические случаи (рис. 3 и рис. 4)

Очень важен вопрос о построении балансовых уравнений общих и компонентных массовых потоков. В связи с этим необходимо учитывать следующие обстоятельства.

Во-первых, это ступенькообразный характер развития рециркуляционных процессов, который требует введения системы нумерации периодов, анало-

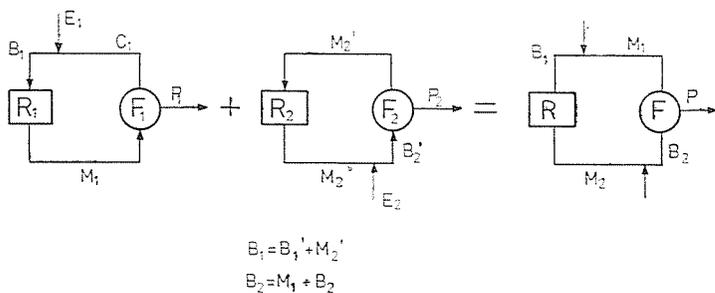


Рис. 3. Сложная рециркуляционная схема типа $A_1 \equiv A_4$ (с обобщенным рециркуляционным контуром) изображающая процесс получения этилена из нефтяных и газовых фракций

гично тем, что сделал еще М. Ф. Нагиев. Мы условимся обозначать периодом состояния системы, сформировавшимся между двумя последовательными прохождениями сигнала начала подачи питающего потока в точку «а» его смешения с рециркуляционным потоком. Начало нумерации потоков соответствует началу подачи питательного потока при пуске системы.

Во вторых, необходимо специально уточнить саму систему пуска. Мы будем различать пуск с максимальным и с оптимальным питающим потоком, когда с самого начала подается постоянный поток питания, соответствующий оптимуму системы. Это значит, что в начале система будет работать с недогрузкой и что характеристики потоков будут изменяться пока не установится стационарность.

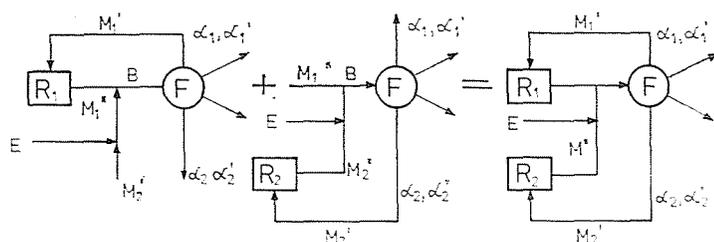


Рис. 4. Сложная схема с обобщенным брутто потоком, изображающая двупечный термический крекинг нефтяных фракций

Предложенный М. Ф. Нагиевым метод составления балансовых уравнений для условия стационарности основывается на составлении математического ряда величин брутто потока, начиная первым периодом. Вскрыв формулу баланса для n -го потока и введя условия $n = \infty$ получается формула зависимости между брутто потоком, питающим потоком и коэффициентом рециркуляции для условий стационарности. Для схемы A_1 , единственная простая схема, которой занимался Нагиев, уравнение имеет форму:

$$B = E \frac{1}{1 - \alpha}$$

Это очень длинный и трудоемкий путь выведения формул. Мы применили следующий куда более простой подход.

Он состоит в составлении баланса между брутто потоками двух случайно выбранных последовательных периодов:

$$B_i = B_{i-1} \alpha + E.$$

На основе этого уравнения нам удалось доказать:

а) Уменьшающийся характер приращения брутто потока в течении времени становления стационарности;

б) Интересный факт, что в период становления состояния стационарности, коэффициент рециркуляции тоже растет.

Таким образом, в качестве условия стационарности к вышеуказанному уравнению надо положить не только постоянство брутто потока:

$$B_i = B_{i-1} = \text{const.}$$

но и постоянство коэффициента рециркуляции

$$\alpha = \text{const.}$$

Все это приводит к уже знакомому по Нагиеву и показанному выше уравнению для схемы названной нами A_1 .

Этот подход позволил очень быстро вывести все возможные балансовые уравнения структурных потоков всех шести простых схем рециркуляции. Метод оказался применимым и к компонентным структурным потокам, что позволило сравнительно легко построить довольно сложные уравнения, осуществляющие связи между коэффициентами рециркуляции и концентрации различных типов компонентов в различных структурных потоках для состояния стационарности.

Автору удалось наметить пути для конструирования рециркуляционных схем на основе представления о самостоятельном становлении состояния стационарности со стороны каждого мыслимого компонента — действительного или условного. В самом общем случае реальную схему рециркуляции можно представить как результат суммирования компонентных рециркуляционных схем.

Исследованию подверглась и проблема опринципах конструирования сложных рециркуляционных схем. Здесь можно наметить два основных принципа. Первый принцип — это принцип связующих потоков, когда производственный поток одного круга является питающим потоком следующего круга. Второй принцип — это принцип суммирования потоков, когда в сложной схеме наблюдается наличие обобществленного круга или потока.

Резюме

Автор подверг детальному анализу элементы и структуры рециркуляционных схем в химической промышленности. Названы обязательные и необязательные технологические элементы, входящие в состав схем. Дефинированы два типа превращений — первого и второго рода. Введена символика структурных потоков. Предложена классификация компонентов, участвующих в рециркуляционных процессах на основе их отношения к двум названным типам превращений. Сформулированы классификационные признаки рециркуляционных схем. Сама классификация предусматривает две группы: а) Группа простых схем, содержащая две подгруппы — А и В. Подгруппа А содержит шесть, а подгруппа В — две типовые схемы. Сложные рециркуляционные схемы являются комплексами, построенными на основе простых схем посредством: а) связующих потоков или б) обобществленных элементов.

Введено обозначение двух способов пуска системы — с оптимальным и с максимальным питанием. Предложен простой и эффективный способ построения балансовых связей между структурными общими и компонентными потоками схем.

Автор сообщает в принципе о возможностях применить метод конструирования рециркуляционных схем: а) Простых — на основе компонентных схем и б) Сложных — на основе простых схем.

Литература

1. М. Ф. Нагиев: Теоретические основы рециркуляционных процессов в химии, Изд. АН СССР, Москва, 1962.
2. В. В. Кафаров—В. Л. Петров—В. П. Мешалкин: Принципы математического моделирования химико-технологических систем, Изд. «Химия», Москва 1974.

Д-р х. н. Димчо И. Димитров { Каф. Основ химической технологии
Высший химико-технологический институт
София 1156, Болгария