

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента Ерастов Андрей Александрович  
на диссертационную работу Михайлова М.В. «Разработка энергосберегающих  
вариантов разделения смесей путем сочетания процессов ректификации и  
фракционной кристаллизации», представленной на соискание ученой степени  
кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – «Процессы и  
аппараты химических технологий»

Актуальной задачей в химической технологии является разработка новых энергосберегающих методов разделения и очистки веществ от примесей, которые позволяли бы получать продукты высокой степени чистота при минимальных энергетических и экономических затратах. Одним из возможных решений этого вопроса является разработка комбинированных (гибридных) массообменных процессов разделения. Перспективным представляется также использование тепловых насосов, которые позволяют существенно повысить эффективность рекуперативного теплообмена между технологическими потоками. Исследованию именно таких процессов разделения посвящена диссертационная работа Михайлова М.В., направленная на разработку энергосберегающих вариантов путем сочетания процессов ректификации и фракционной кристаллизации с использованием тепловых насосов. Поэтому тема данной диссертации представляется весьма актуальной.

Здесь уместно отметить, что МИТХТ имени М.В. Ломоносова является одним из родоначальников разработки сопряженных процессов разделения. Эти исследования были начаты в 1968 году и успешно проводятся до настоящего времени. В МИТХТ в последние годы активно проводятся также исследования, направленные на использование тепловых насосов при проведении различных химико-технологических процессов. При этом диссертационная работа М.В. Михайлова является успешным продолжением этих исследований.

### **Оценка содержания работы**

Рассматриваемая диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов и результатов, списка литературы, состоящего из 180 источников, и приложений. Работа представлена на 180 страницах, включая приложения, и включает 78 рисунков и 3 таблицы.

В **введении** отражена актуальность рассматриваемой темы, поставлены цели и задачи работы, а также указана научная новизна и практическая значимость выполненных исследований.

В **первой главе** проведен обзор имеющихся литературных источников, посвященных теме диссертации. При этом рассмотрены специфические особенности комбинированных процессов разделения и их использование для разделения различных смесей. Рассмотрены также принципы работы

различных тепловых насосов (парокомпрессионных, электрических, абсорбционных (адсорбционных) и т.д.). Особое внимание в данной главе посвящено вопросам энергосбережения и способам его интенсификации, что отражено в большом объеме проанализированных зарубежных и отечественных литературных источников.

**Во второй главе** проведен анализ влияния технологически параметров на показатели процесса разделения смесей путем сочетания ректификации и одной или двух стадии фракционной кристаллизации. Автором рассмотрены семь основных вариантов организации такого комбинированного процесса. Для всех этих вариантов приведены уравнения необходимые для расчета материальных и тепловых потоков. На основании полученных расчетных зависимостей проведен анализ влияния основных технологических параметров на показатели процесса разделения. При этом произведена оценка целесообразности использования каждого из рассмотренных вариантов. Показано, что энергетическая эффективность использования комбинированного разделения существенно зависит от физико-химических свойств разделяемых смесей (температура кипения смесей, положения особых точек на диаграммах равновесия фаз и др.). Так, например, установлено, что при разделении водно-органических смесей энергетические затраты на процесс разделения существенно выше, чем на для чисто органических смесей. Это связано с различием теплоты фазовых переходов воды и органических соединений.

**Третья глава** посвящена анализу рассматриваемого процесса разделения с применением рекуперативного теплообмена. Разобраны и проанализированы основные варианты сопряженного разделения с организацией рекуперативного теплообмена между потоками исходной смеси, маточников, дистиллятов и кубовых остатков. При этом показано, что такая организации комбинированного процесса позволяет на 20-30 % снизить тепловые затраты по сравнению с обычными вариантами разделения.

**В четвертой главе** рассмотрены основные варианты разделения эвтектикообразующих смесей при сопряжении процессов ректификации и фракционной кристаллизации с применением тепловых насосов закрытого типа. Показано, что такие тепловые насосы могут быть использованы как для нагрева исходной смеси и рециркулирующих маточников перед их подачей на стадию ректификации, так и для обогрева куба колонны за счёт конденсации паров дистиллята. Для всех описанных вариантов организации выполнен анализ влияния основных технологических параметров на энергетические затраты необходимые для осуществления процесса разделения. Для оценки энергетической эффективности автор использовал относительный расход условного топлива. При этом установлено, что наиболее выгодно при

использовании рассматриваемых вариантов производить частичное испарение рециркулирующих маточников перед их подачей на стадию ректификации, используя теплоту конденсирующихся паров дистиллята.

**Пятая глава** посвящена анализу сопряженного разделения с использованием тепловых насосов открытого типа. Результаты проведенных расчетов рассмотренных вариантов с применением открытого теплового насоса сопоставлены между собой, а также сравнены с вариантами разделения, в которых используется тепловой насос закрытого типа. При этом установлено, что технологические параметры такого разделения оказывают примерно такое же влияние на энергетические затраты, как и при использовании тепловых насосов закрытого типа. Показано также, что при разделении смесей с низкими температурами кристаллизации энергетическая эффективность использования тепловых насосов открытого и закрытого типа примерно одинакова, а для разделения смесей с более высокими температурами кристаллизации выгоднее использовать тепловой насос закрытого типа.

**В заключении** диссертационной работы автором представлены результаты выполненных исследований и основные выводы.

#### **Степень достоверности диссертационной работы**

Обоснованность научных положений и выводов рассматриваемой диссертационной работы основывается на использовании автором фундаментальных положений массообменных процессов и принципов работы компрессионных тепловых насосов. Описанные в работе результаты обладают достоверностью, так как для их получения использовались известные значения физико-химических параметров разделяемых веществ и правила аддитивности для смесей, а также адекватные методы математического описания тепловых и массообменных процессов.

**Научная новизна результатов**, представленных в диссертационном исследовании, состоит в следующем:

1. Предложено 23 варианта разделения бинарных эвтектикообразующих смесей сочетанием процессов ректификации с одной или двумя стадиями кристаллизации при применении рекуперативного теплообмена, а также с использованием компрессионных тепловых насосов открытого и закрытого типа.

2. Для всех разработанных схем получены все необходимые уравнения для расчета материальных и тепловых потоков, подводимых и отводимых на соответствующих стадиях разделения, а также зависимости для оценки их энергетической эффективности.

3. Установлено влияние основных технологических параметров на энергетические показатели разделения, что позволяет установить условия

проведения сопряженного процесса с минимальными энергетическими затратами.

**Практическая значимость исследований** заключается в том, что предложенные варианты комбинированных процессов могут быть использованы для разделения смесей с различными типами диаграмм равновесия фаз. Результаты проведённых исследований могут быть успешно применены для разработки технологии разделения целого ряда промышленных смесей. При этом показано, что использование тепловых насосов при проведении комбинированных процессов разделения позволяет в 1,5-3,5 раза уменьшить затраты энергии на процесс разделения, а, следовательно, повысить его технико-экономические показатели.

**Основные результаты диссертационной работы опубликованы** в 8 печатных работах, в том числе 3 научные статьи в российских научных рецензируемых журналах и изданиях, включенных в перечень ВАК при Минобрнауки РФ; 2 статьи и 3 тезиса докладов в материалах российских и международных конференций.

Несмотря на очевидные достоинства рассматриваемой диссертационной работы можно отметить ее **некоторые недостатки**:

1. В диссертации проведены исследования разделения бинарных эвтектикообразующих смесей с полной взаимной нерастворимостью компонентов. Таких смесей действительно много. Однако, следовало бы хотя бы кратко рассмотреть особенности разделена эвтектикообразующих смесей с ограниченной взаимной растворимостью компонентов.

2. Как известно, имеется несколько методов фракционной кристаллизации. К сожалению, в диссертации нет указаний какой из этих методов следует использовать при проведении сопряженного разделения.

3. В качестве критерия энергетической эффективности применения тепловых насосов автор использовал удельные расходы условного топлива. На мой взгляд более правильно было бы использовать приведенные затраты. Это позволило бы учесть влияние капитальных затрат на общую стоимость разделения.

4. В своей диссертационной работе автор довольно подробно анализирует варианты комбинированного разделения с использованием тепловых насосов для нагрева рециркулирующих маточников. Процесс же разделения с использованием тепловых насосов для обогрева куба ректификационной колонны за счет тепла конденсации паров дистиллята рассмотрен только для одного из возможных вариантов.

Представленные замечания носят частный характер и не снижают значимость выполненных исследований.

## **Заключение**

Диссертационная работа Михайлова М.В. на тему «Разработка энергосберегающих вариантов разделения смесей путем сочетания процессов ректификации и фракционной кристаллизации», которая по тематике поставленных в ней задач, методам их решения и полученным результатам соответствует паспорту специальности 05.17.08 – «Процессы и аппараты химических технологий», а именно разделам области исследований данной специальности: «Фундаментальные разработки в изучении явлений переноса энергии и массы в технологических аппаратах», «Принципы и методы синтеза ресурсосберегающих химико-технологических систем с оптимальными удельными расходами сырья, топливно-энергетических ресурсов и конструкционных материалов».

В диссертационной работе Михайлова М.В. решена актуальная научно-техническая задача, связанная с разработкой и исследованием процессов разделения смесей путем сочетания ректификации и фракционной кристаллизации с использованием тепловых насосов закрытого и открытого типа с целью повышения их энергетической эффективности. Данная тематика является актуальной и имеет практическое применение.

Рассматриваемая диссертация соответствует требованиям п. п. 9-14 Положения ВАК РФ «О присуждении ученых степеней» (утверждено постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842). Считаю, что её автор Михайлов Михаил Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – «Процессы и аппараты химических технологий».

**Официальный оппонент**  
старший химик  
Отдела контроля качества  
ООО «Технология лекарств»,  
кандидат технических наук

Ерастов Андрей Александрович  
25.11.2019

Почтовый адрес: 141401, Московская обл., г. Химки, ул. Рабочая, д.2а/31  
Электронная почта: info@rpharm.ru,  
Телефон: +7 (495) 225-62-00

Подпись старшего химика А.А. Ерастов заверяю.

Руководитель отдела кадров  
ООО «Технология лекарств»



Е.М. Широкова