

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт природных ресурсов
Направление подготовки химическая технология
Кафедра технологии органических веществ и полимерных материалов

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

| Тема работы |
|---|
| Проект узла синтеза уксусной кислоты |

УДК 661.741.124-93

Студент

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|--------------------------------|---------|------|
| 2Д2А | Анисимова Марина Александровна | | |

Руководитель

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-------------------------|-------------|--------------------------------|---------|------|
| Доцент кафедры ТОВМП | Сорока Л.С. | кандидат химических наук | | |

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|--------------------|----------------|-----------------------------------|---------|------|
| Доцент кафедры МЕН | Рыжакина Т. Г. | Кандидат экономических наук | | |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|--------------------------|----------------|---------------------------|---------|------|
| Ассистент кафедры ЭБЖ | Раденков Т. А. | | | |

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

| Зав. кафедрой | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------|--------------|-------------------------------|---------|------|
| ТОВПМ | Юсубов М. С. | Доктор химических наук. | | |

Томск – 2016 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт природных ресурсов
 Направление подготовки: Химическая технология
 Кафедра технологии органических веществ и полимерных материалов

УТВЕРЖДАЮ:
 Зав. кафедрой
Юсубов М. С.
 (Ф.И.О)

 (Подпись)

 (Дата)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

| |
|----------------------------|
| Бакалаврской работы |
|----------------------------|

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

| Группа | ФИО |
|--------|---------------------------------|
| 2Д2А | Анисимовой Марине Александровне |

Тема работы:

| |
|---|
| Проект узла синтеза уксусной кислоты |
|---|

| | |
|---|------------------------|
| Утверждена приказом директора (дата, номер) | от 28.01.2016 № 2235/С |
|---|------------------------|

| | |
|--|------------|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: | 17.06.2016 |
|--|------------|

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

| | |
|---|--|
| Исходные данные к работе | 1. Годовая производительность в расчете на 100%–ую уксусную кислоту – 170000 т 2. Годовой фонд рабочего времени – 8000 ч 3. Состав технического оксида углерода (об.%): водород – 1, азот – 2, оксид углерода – 97. 4. Состав метанола технического (об. %): метанол – 99,9; вода – 0,1 5. Дистиллят колонны отгонки легких фракций (масс.%): метилиодид – 47,9; уксусная кислота – 23,4; метилацетат – 4; вода – 24,7. 6. Кубовые остатки колонны отгонки легких фракций (масс. %): уксусная кислота – 89,3, пропионовая кислота – 0,1; вода – 8,7; иодоводород – 1,9 7. Отдувочные газы реактора (об. %): водород – 5,2; азот – 4,2; оксид углерода – 30,1, углекислый газ – 2,7; метилиодид – 26,0; уксусная кислота – 11,2; метилацетат – 1,1; вода – 19,5 8. Жидкая фаза реактора (масс. %) : метилиодид – 9,7; уксусная кислота – 70, метилацетат – 0,9; пропионовая кислота – 0,14; вода – 16,3; иодоводород – 3 |
| Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов | 1. Литературный обзор. 2. Объекты и методы проектирования. 3. Инженерные расчеты. 4. Результаты разработки. 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность, ресурсосбережение. 6. Социальная ответственность. |

| | |
|---|--|
| Перечень графического материала | 1. Технологическая схема процесса 2. Реактор дегидрирования. Вид общий. 3. Реактор дегидрирования. Сборочные единицы |
| Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы | |
| Раздел | Консультант |
| Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение | Рыжакина Татьяна Гавриловна |
| Социальная ответственность | Раденков Тимофей Александрович |
| Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках: | |
| Реферат (Abstract) | |

| | |
|---|--------------|
| Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику | 09.09.2015г. |
|---|--------------|

Задание выдал руководитель:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|----------------------|-------------|--------------------------|---------|--------------|
| доцент кафедры ТОВПМ | Сорока Л.С. | кандидат химических наук | | 09.09.2015г. |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|--------------------------------|---------|--------------|
| 2Д2А | Анисимова Марина Александровна | | 09.09.2015г. |

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 115 страниц, 7 рисунков, 57 таблиц, 12 литературных источников, 3 листа графического материала.

Ключевые слова: уксусная кислота, карбонилирование, метанол, общая характеристика производства, схема технологическая, инженерные расчеты, подбор оборудования, ресурсоэффективность, ресурсосбережение, охрана труда.

Объектом разработки является производство уксусной кислоты карбонилированием метанола. Целью проектирования является разработка комплекса взаимосвязанных процессов, обеспечивающих выработку продукта нужного качества.

Синтетическая уксусная кислота – важнейший продукт химической промышленности, применяется в химической, фармацевтической и легкой промышленности и других областях народного хозяйства.

Карбонилированием метанола получают около 60 % всей уксусной кислоты в мире. Данное производство становится экономически выгодным по мере роста цен на нефть.

Эффективность разработанной технологии определяется тем, что выход целевого продукта составляет 99%, а степень чистоты получаемой уксусной кислоты составляет 99,9%.

Abstract

Final qualifying work consists of 121 page, 7 figures, 57 tables, 12 references, 3 pages of graphic material.

Key words: acetic acid, carbonylation, methanol, General description of production, technical, engineering calculations, equipment selection, resource efficiency, resource saving, labor protection.

The object of development is the production of acetic acid by carbonylation of methanol. A design objective is to develop a set of interrelated processes that enable the production of product quality.

Synthetic acetic acid is the major product of the chemical industry, used in chemical, pharmaceutical and light industry and other fields of national economy.

The carbonylation of methanol receive about 60% of the acetic acid in the world. This production is economically beneficial for the growth of oil prices.

The effectiveness of the developed technology is determined by the fact that the yield of the target product is 99% and the degree of purity of the acetic acid of 99.9%.

Оглавление

| | |
|---|--|
| РЕФЕРАТ..... | 4 |
| Abstract | 5 |
| Введение..... | 7 |
| 1. Теоретическая часть..... | 8 |
| 1.1. Технологии получения уксусной кислоты | 8 |
| 1.2 Физико–химические основы процесса карбонилирования метанола | 36 |
| 1.3 Физические характеристики сырья и готовой продукции | 38 |
| 2. Инженерные расчеты | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.1 Описание технологической схемы..... | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.2 Материальные расчеты | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.3 Технологический расчет основного аппарата..... | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.4. Тепловой расчет | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.5. Механический расчет основного аппарата | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.6. Контроль производства. | Ошибка! Закладка не определена. |
| 3. Финансовый менеджмент | 41 |
| 4. Социальная ответственность | Ошибка! Закладка не определена. |
| Заключение | Ошибка! Закладка не определена. |
| Список используемой литературы..... | Ошибка! Закладка не определена. |

Введение

В настоящее время карбонилирование является одним из важных направлений гомогенного металлокомплексного катализа в химической промышленности. Путем введения карбонильной группы в молекулу можно получить различные классы органических соединений: альдегиды, кетоны, карбоновые кислоты и их производные, карбонаты и другие. Достоинством оксида углерода, как реагента в реакциях карбонилирования, является его высокая реакционная способность, вызванная наличием свободной пары электронов у атома углерода, дешевизна и доступность. Также особенностью реакций карбонилирования оксидом углерода является отсутствие побочных продуктов, образование воды.

Карбонилирование олефинов и спиртов является общим методом синтеза карбоновых кислот и их производных. Карбонилированием спиртов можно синтезировать насыщенные кислоты с числом атомов углерода на один больше, чем в исходном спирте.

Наибольший интерес представляет получение уксусной кислоты. Уксусная кислота имеет большое практическое значение. Уксусная кислота, ее эфиры и ангидрид – важнейшие химические продукты, которые широко используются для производства винилацетата, ацетата целлюлозы, монохлоруксусной кислоты, лекарственных средств и как растворители.

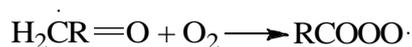
1. Теоретическая часть

1.1. Технологии получения уксусной кислоты

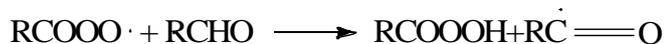
1.1.1 Производство уксусной кислоты окислением ацетальдегида

Основы процесса. Синтез на основе ацетальдегида доминировал в промышленности вплоть до 90-х годов XX в. Это связано с достаточно простым технологическим оформлением процесса, доступностью исходного сырья[2].

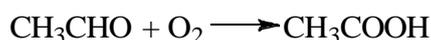
Альдегиды – легко окисляемые соединения. При радикально-цепном окислении происходит промежуточное образование из ацильного пероксиацильного радикала



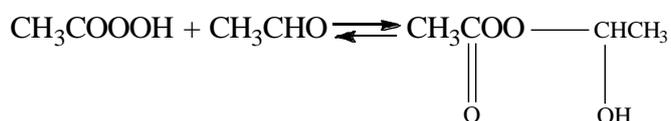
а затем пероксикислоты



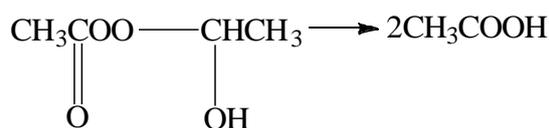
В целом, окисление ацетальдегида приводит к перуксусной (надуксусной) кислоте:



Пероксикислоты (например, перуксусная или надуксусная) способны присоединяться к альдегидам с образованием пероксидного соединения. В случае перуксусной кислоты и ацетальдегида образуется ацетальдегидперацетат:

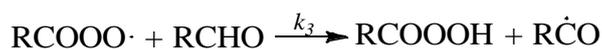
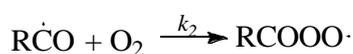


Равновесие этой реакции при низких температурах смещено вправо. При этих условиях ацетальдегидперацетат является основным продуктом реакции. С повышением температуры и в присутствии солей металлов переменной валентности его устойчивость снижается. Он быстро разлагается с образованием двух молекул уксусной кислоты:



При жидкофазном окислении ацетальдегида в уксусную кислоту в качестве катализаторов используют ацетаты марганца или кобальта в количестве 0,05–0,10 % (мас.) по отношению к ацетальдегиду. Использование солей железа нецелесообразно, так как эти соли катализируют только образование гидропероксидов, но не их распад.

При каталитическом окислении ацетальдегида кинетику процесса определяют следующие элементарные стадии:

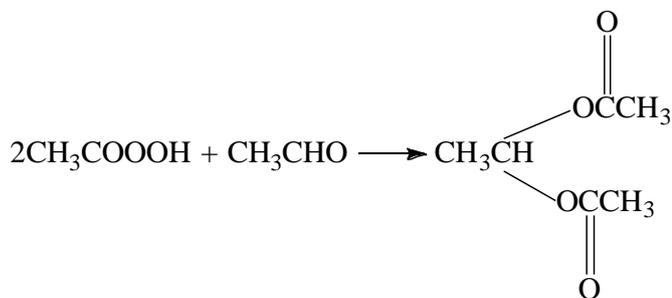
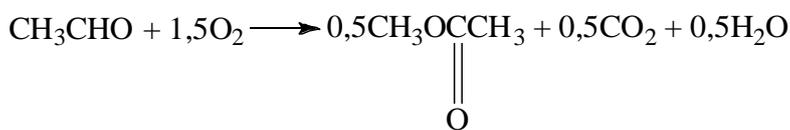


При стационарных концентрациях различных форм катализатора должно выполняться условие равенства скоростей реакций (1) и (4). Поскольку $r_7 \ll r_8, \dots, r_{12}$ и катализатор находится в основном в виде Mn^{3+} , то суммарная скорость реакции выражается уравнением

$$r = k_3 [\text{RCOOO}\cdot][\text{RCHO}] = k_3 \sqrt{k_1/k_5} [\text{Mn}^{3+}]^{0.5} [\text{RCHO}]^{1.5}$$

При этом особенно при пониженной температуре происходит накопление в реакционной массе взрывоопасных гидроперекисных соединений, что может привести к взрыву. Температуру в реакторе поддерживают на уровне 50–70 °С, давление 0,30–0,70 МПа. Из-за высокой летучести ацетальдегида окисление проводят в среде растворителя, в качестве которого используют целевой продукт реакции – уксусную кислоту, поскольку она устойчива к нагреванию и к окислению в условиях проведения реакции. Верхние пределы температуры и давления ограничены летучестью

ацетальдегида и развитием побочных реакций. Побочными продуктами являются метил ацетат, этилидендиацетат, муравьиная кислота и диоксид углерода:



В качестве окислителя используют технический (98 %) кислород или воздух. Использование воздуха в качестве окислителя приводит к необходимости отведения из реактора значительного газового потока – инертнов воздуха. Соответственно требуется очистка газовых выбросов от органических продуктов. Поэтому использование технического кислорода предпочтительнее. Нормы расхода: 0,80–0,81 т ацетальдегида, 215–240 нм³ технического кислорода и 9 кг перманганата калия на 1 т уксусной кислоты.

Для жидкофазного окисления могут использоваться различные типы реакционной аппаратуры. Их конструкция определяется требованиями отвода тепла для создания близких к изотермическим условий проведения процесса и интенсивного массообмена между жидкой и паровой (газовой) фазами. Поскольку уксусная кислота является продуктом, стойким к дальнейшему окислению, и процесс протекает в среде продукта реакции, то используют наиболее простое аппаратное оформление реактора в виде пустотелой барботажной колонны с отводом тепла встроенными теплообменными устройствами (рис. 1). Его изготавливают из нержавеющей стали и футеруют листами металлического алюминия для предотвращения коррозии. Реактор 1 заполнен уксусной кислотой. В нижнюю часть реактора подается свежий ацетальдегид. Уровни подачи технического кислорода

(воздуха) разнесены по высоте реактора. Обычно таких вводов три. В верхней части реактора 1 имеется расширение с каплеотбойными устройствами, обеспечивающее отделение паровой фазы от жидкой. Инерты технического кислорода (воздуха) не поглощаются в ходе реакции, кроме того, образуются побочные продукты: диоксид углерода, вода, низкомолекулярные продукты деструктивного окисления. Для удаления непрореагировавшего ацетальдегида и паров органических соединений из отходящего парогазового потока реактор снабжен холодильниками–конденсаторами 2. В них происходит конденсация паров ацетальдегида и кислот. Конденсат поступает в сборник 3. Из него смесь возвращается на вход реактора 1. Газы и несконденсированные пары направляют на санитарную очистку. Жидкие продукты направляют на ректификацию.

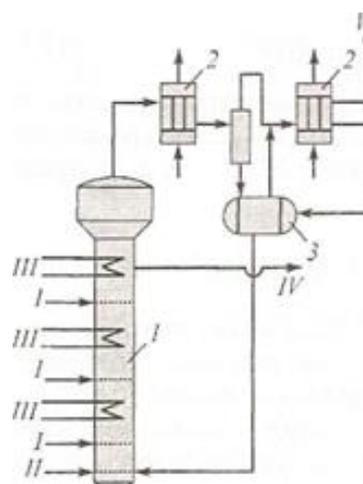


Рис. 1. Реакторная подсистема жидкофазного окисления ацетальдегида в уксусную кислоту: 1– реактор; 2 – холодильники–конденсаторы; 3– сборник конденсата; I–воздух или технический кислород; II–ацетальдегид; III–водяной конденсат для охлаждения реактора; IV– продукты реакции; V– газы на санитарную очистку

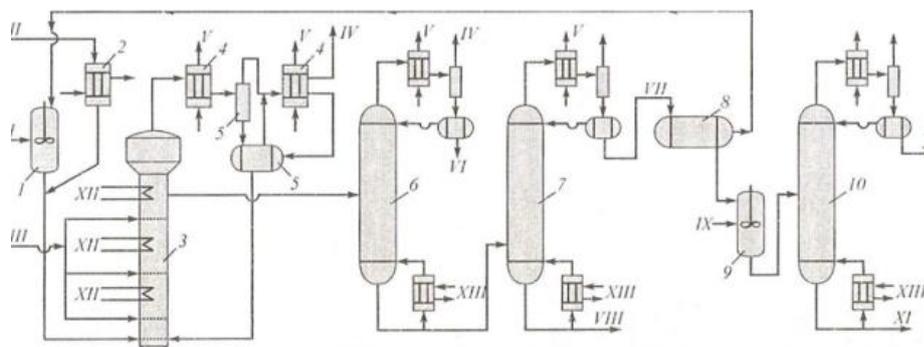


Рис. 2. Технологическая схема процесса жидкофазного окисления ацетальдегида в

уксусную кислоту: 1– реактор приготовления катал изагорного раствора; 2–холодильник; 3– реактор окисления; 4 – холодильник–конденсатор; 5 – сепаратор; 6, 7, 10 – ректификационные колонны; 8– сборник; 9 – реактор перманганатного окисления; I – ацетат марганца; II– ацетальдегид; III – технический кислород; IV– газы на санитарную очистку; V– вода; VI – легкокипящие примеси; VII – уксусная кислота–сырец; VIII – фракция катализатора и тяжелокипящих продуктов; IX– KMnO_4 ; X– товарная уксусная кислота; XI – тяжелокипящая фракция; XII – водный конденсат; XIII – водяной пар

Традиционная технологическая схема получения уксусной кислоты жидко–фазным окислением ацетальдегида представлена на рис. 3. Реактор 1 служит для приготовления каталитического раствора смешением рециркулирующей уксусной кислоты и ацетата марганца (II).

Предварительно охлажденный в холодильнике 2 ацетальдегид смешивается с каталитическим раствором и подается в реактор окисления 3. В реактор 3 также подается технический (98%) кислород. Используется разноуровневая подача (2–3 ввода). Нижний ввод кислорода располагается несколько выше ввода ацетальдегида (1–1,5 м) так, чтобы в этом сечении отсутствовали пары ацетальдегида.

Для улучшения массообмена реактор 3 может быть снабжен тарельчатыми устройствами. Тепло реакции отводят за счет встроенных змеевиковых устройств. Часть тепла отводится также с парогазовым потоком из верха реактора. При этом в реакторе поддерживаются следующие условия: давление – 0,30 МПа, температура – до 75 °С; в нижней части реактора давление – 0,38–0,40 МПа, температура – 60 °С.

Выбор температурных условий определяется необходимостью обеспечения равенства скоростей образования и расходования надуксусной кислоты. При температуре ниже 70 °С снижается скорость ее разложения и происходит ее накопление в реакционной массе. Поскольку надуксусная кислота представляет собой перекисное соединение, повышение ее концентрации в реакционной массе опасно, так как может привести к взрыву. При повышенных температурах с большей, нежели для основной реакции, растет скорость побочных процессов полного окисления.

Из верхней части реактора 3 отбирается парогазовая смесь, состоящая из продуктов полного и деструктивного окисления (муравьиная кислота), непро–реагировавшего ацетальдегида, паров уксусной и надуксусной кислот, инертных технического кислорода. Парогазовая смесь охлаждается и конденсируется в холодильниках–конденсаторах 4, паровую фазу после конденсации подают на следующую ступень охлаждения, а жидкость (ацетальдегид, кислоты) возвращают в реактор 3. Очищенный газовый поток IV направляют на санитарную очистку каталитическим дожиганием.

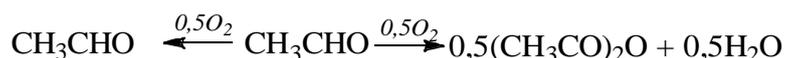
Продуктовый поток отбирают из реактора 3 в жидкой фазе и направляют на ректификацию в колонну 6. В ней от уксусной кислоты отделяют легкие продукты и растворенные газы. Кубовый продукт колонны 6 направляют в нижнюю часть колонны 7. В ней от уксусной кислоты, выделяемой в качестве дистиллята, отделяют тяжелые продукты: этилидендиацетат, смолы, параформ. Дистиллят колонны 7 поступает в сборник 8. Из него большая часть уксусной кислоты–сырца направляется в реактор перманганатной очистки 9, а меньшая часть используется для приготовления каталитического раствора в реакторе 1. В реактор 9 дозируют перманганат калия для доокисления, содержащихся в уксусной кислоте–сырце органических соединений. Оксидат из реактора 9 направляют в ректификационную колонну 10, где получают товарную уксусную кислоту, отгоняя ее от тяжелокипящих продуктов, содержащих ацетат марганца.

В целом технология характеризуется удовлетворительным выходом уксусной кислоты (92 % на ацетальдегид) и достаточно высокой конверсией за один проход (95 % по ацетальдегиду). К недостаткам технологии следует отнести: сложную конструкцию реактора окисления из стойких к коррозии материалов; низкую степень использования тепла реакции из–за невысокого его потенциала (охлаждающий реактор конденсат с температурой около 60 °С пригоден только для питания котлов утилизаторов других производств); использование на стадии очистки химических реагентов; однократное без регенерации и утилизации использование катализатора.

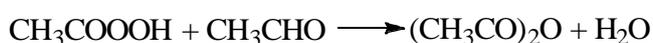
Технология окисления ацетальдегида в уксусную кислоту относится к непрерывным и имеет одну стадию по химической составляющей. В качестве исходного сырья используют доступные вещества: ацетальдегид и технический кислород. Процесс относится к высокоэффективным, обладая высокой конверсией за один проход, удовлетворительной для радикально-цепных процессов селективностью и производительностью. Высокие конверсии реагентов за один проход делают применение рециркуляции нецелесообразным. Из реакционной смеси полностью выделяют уксусную кислоту, легко- и тяжелокипящие фракции, как правило, не утилизируют, а подвергают огневому обезвреживанию. Поэтому технология не обладает полнотой использования жидких и твердых отходов. С точки зрения реализации принципов разработки технологии с низким энергопотреблением и полноты использования энергии системы технология требует дополнительного совершенствования, поскольку низкий потенциал тепла, вырабатываемого реактором окисления, не дает возможности использовать его для технологических нужд. Окисление ацетальдегида в уксусную кислоту можно отнести к технологиям с низким расходом воды, поскольку она используется как энергоноситель и хладагент, но не как реагент[6].

1.1.2 Современное производство уксусной кислоты и уксусного ангидрида окислением ацетальдегида.

Основы процесса. В определенных условиях наряду с уксусной кислотой при окислении ацетальдегида происходит образование уксусного ангидрида



Возможные механизмы образования уксусного ангидрида следующие: реакция перуксусной (надуксусной) кислоты с ацетальдегидом



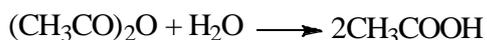
превращение ацильного радикала в координационной сфере атома меди



Полученная соль одновалентной меди вновь окисляется пероксикислотой в высшее валентное соединение.

Вторая последовательность реакций имеет большее право на существование, поскольку реакция перуксусной кислоты с ацетальдегидом может протекать в присутствии любой каталитической системы, а образование уксусного ангидрида наблюдается только в присутствии смешанных катализаторов, содержащих соли Co, Mn, Cu. Образованию ангидрида также благоприятствует пониженная концентрация (парциальное давление) кислорода в газе–окислителе.

Поскольку одновременно с уксусным ангидридом образуется вода, важнейшим условием реализации такого процесса является быстрый отвод воды из реакционной зоны. В противном случае получим только уксусную кислоту:



Для торможения этой реакции часто используют различные гетероазеотроп–образующие добавки. Они не должны подвергаться любым превращениям в условиях протекания основной реакции, а должны обеспечивать расслаивание в жидкой фазе, иметь температуру кипения несколько ниже температуры кипения воды, быть дешевыми и доступными. В качестве таких добавок могут использоваться этилацетат ($T_{\text{кип}} = 77,1 \text{ }^\circ\text{C}$), диизопропиловый эфир ($T_{\text{кип}} = 68,5 \text{ }^\circ\text{C}$) и т.п. Использование этилацетата предпочтительнее, поскольку состав гете–роазеотропа в данном случае более обогащен водой. Следовательно, при применении этилацетата потребуется меньший рециркуляционный поток.

Наличие гетероазеотропа способствует интенсивному удалению воды из реакционной массы. Однако исследования показали, что основными факторами, определяющими возможность получения уксусного ангидрида, кроме указанного выше, являются:

- высокая концентрация в реакционной массе катализатора (кобальт–медного или марганец–медного) с мольным соотношением солей 1:(1 – 3);
- использование разбавленного до содержания 7–9 % (об.) кислорода газа–окислителя;
- проведение процесса в диффузионной или близкой к ней области, что позволяет еще больше снизить концентрацию кислорода и повысить концентрацию ацильных радикалов в жидкой фазе.

При обеспечении этих условий мольное соотношение кислота/ангидрид в продуктах реакции может достигать (3–5):(7–5).

Процесс совместного получения уксусной кислоты и уксусного ангидрида может быть осуществлен двумя способами: в среде гетероазеотропного агента; в среде продуктов реакции.

В первом случае окисление проводят в реакторе, заполненном этилацетатом и представляющем собой барботажную колонну, которая снабжена встроенными холодильниками–змеевиками (рис. 4). В качестве окислителя используют воздух, катализатор представляет собой смесь ацетата марганца или кобальта и меди. Конструкцию реактора можно упростить. Поскольку для интенсивного отвода воды с гетероазеотропом в реакторе должен поддерживаться режим кипения, то все тепло реакции можно отводить за счет испарения воды и этилацетата и части ацетальдегида из реакционной массы. Для этого при температуре в реакторе 50–70 °С необходимо поддерживать давление около 0,40 МПа.

Поскольку ацетальдегид является самым легкокипящим компонентом реакционной массы, то несмотря на быстрое окисление, некоторое его количество; будет уноситься с парами. Поэтому реакционная подсистема должна включать в себя устройства для выделения ацетальдегида и возвращения его в реактор окисления. Продукты реакции отводят в жидкой фазе, и при этом возникает необходимость отделения их как от этилацетата, так и от катализатора[8].

Свежий ацетальдегид и воздух подают в нижнюю часть барботажного реактора окисления ацетальдегида 1 на разные уровни. Отходящий парогазовый поток из верхней части реактора содержит инерты воздуха, диоксид углерода, пары ацетальдегида, этилацетата, воды и проходит охлаждение и парциальную конденсацию в аппарате 2. Затем он поступает в сепаратор пар–жидкость 3. Из него паровая фаза направляется на улавливание ацетальдегида и очистку газовых выбросов в абсорбер 4. Он орошается водой. Очищенные газы сбрасываются в атмосферу. Поскольку давление в системе выше атмосферного, на выходе из абсорбера можно установить турбодетандер и использовать энергию газов для выработки электроэнергии.

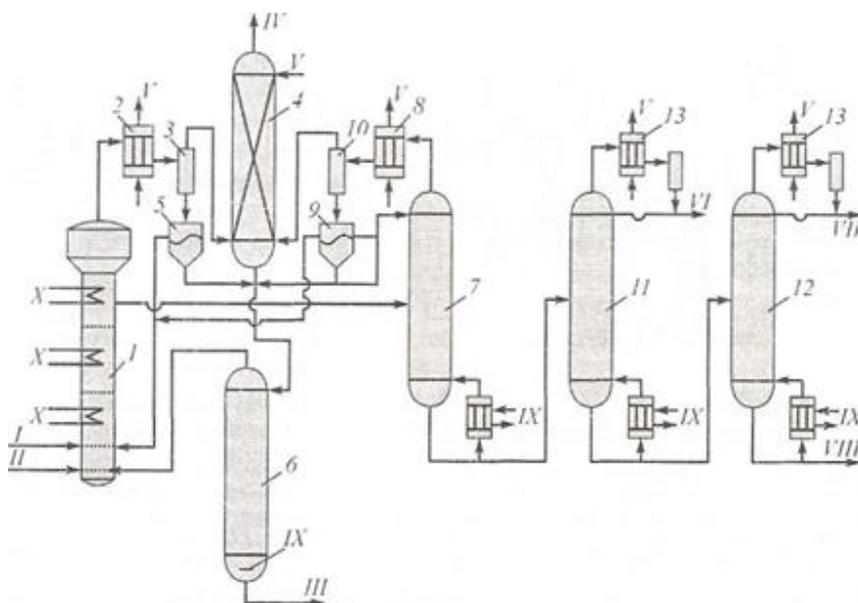


Рис. 3. Технологическая схема совместного производства уксусной кислоты и уксусного ангидрида окислением ацетальдегида с использованием гетероазеотропного агента: 1 – реактор окисления; 2, 8,13 – конденсаторы; 3,10 – сепараторы пар–жидкость; 4 – абсорбер; 5,9 – сепараторы жидкость–жидкость (декантаторы); 6– отпарная колонна; 7, II, 12 – ректификационные колонны; I– воздух; II – ацетальдегид; III– водные стоки; IV– газы; V– вода; VI – уксусная кислота; VII– уксусный ангидрид; VIII– раствор катализатора; IX– водяной пар; X–водный конденсат

Сорбат из абсорбера 4 направляют в отпарную колонну 6 для извлечения ацетальдегида. Жидкость из сепаратора 3 расслаивается в деkantаторе 5 на этил– ацетатную и водную фазы. Органический слой

возвращают в реактор 1. Водный слой для извлечения ацетальдегида направляют в отпарную колонну 6. Дистиллят колонны 6 состоит в основном из ацетальдегида и его возвращают в реактор 1.

Продуктовый поток, содержащий уксусную кислоту, уксусный ангидрид, этилацетат, непрореагировавший ацетальдегид, катализатор, отбирают в жидкой фазе из верхней части реактора 7 и направляют на разделение в ректификационную колонну 7. В ней от смеси уксусной кислоты, уксусного ангидрида и катализатора отгоняют ацетальдегид, этилацетат и воду. После парциальной конденсации в аппарате 8 образуется трехфазная система (две жидкие и одна паровая фаза). Они разделяются в сепараторах 9, 10. Паровую фазу, содержащую ацетальдегид, растворенные в реакционной смеси газы, диоксид углерода, направляют в абсорбер 4. Жидкие фазы сепаратора 9 используют для обеспечения флегмы в колонне 7, органический слой направляют в реактор 1, а водный в колонну 6. Кубовый продукт колонны 7 представляет собой смесь уксусной кислоты, уксусного ангидрида и катализатора. Эту смесь разделяют в колоннах 11,12. При необходимости доочистки уксусной кислоты ее можно подвергнуть перманганатной очистке. Раствор катализатора возвращают в реактор 1.

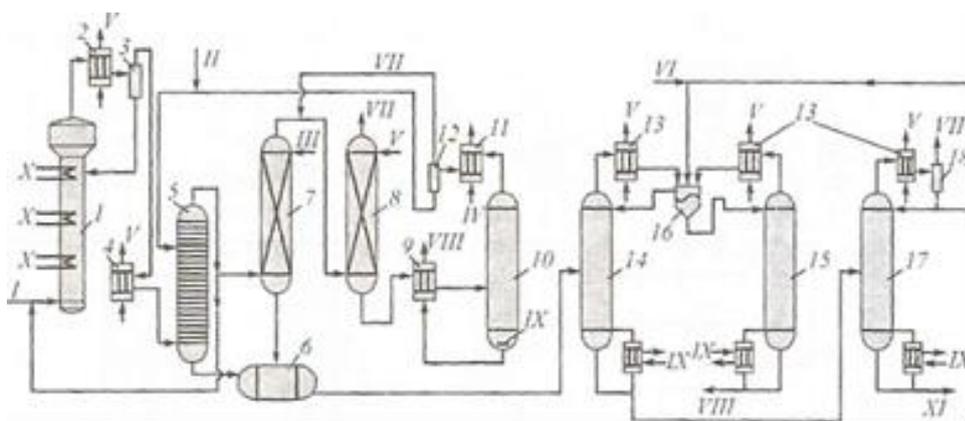


Рис.4. Технологическая схема совместного производства уксусной кислоты и уксусного ангидрида окислением ацетальдегида в среде продуктов реакции: 1 – реактор; 2,13 – водяные конденсаторы; 3,12,18 – сепараторы пар – жидкость; 4– холодильник; 5– сатуратор; 6– емкость; 7,8– абсорберы; 9– подогреватель; 10– отпарная колонна; 11 – рассольный конденсатор; 14, 15, 17–ректификационные колонны; 16 – сепаратор жидкость–жидкость; I–воздух; II– ацетальдегид, III– уксусная кислота; IV – рассол; V– вода; VI– подпитка этилацетатом; VII– газы;

VIII– вода на санитарную очистку; IX– водяной пар; X– водный конденсат; XI– продукты на разделение ректификацией

Таким образом, применение растворителя – гетероазеотропного агента – приводит к необходимости организовать его рецикл, а отвод продуктов в жидкой фазе требует дополнительных стадий отделения продуктов от катализатора.

Более предпочтителен вариант организации процесса окисления в среде продуктов реакции. В качестве катализаторов используют ацетаты кобальта или марганца и меди в соотношении 3:1, окислителя – обедненный до 7–9 % по кислороду воздух. В реакторе поддерживают режим кипения при 55–60 °С. Продукты отводят в паровой фазе. Основное тепло реакции снимается за счет испарения реакционной массы и только некоторая часть встроенными в барбо– тажную колонну–реактор охлаждающими змеевиками (рис. 5).

Окисление проводят в пустотелом барботажном реакторе 1. В его нижнюю часть подают воздух и парогазовую рециркулирующую смесь, содержащую ацетальдегид и инертные газы с примесью кислорода. На входе в реактор находятся концентрации (мас. %): кислорода на уровне 7–9; ацетальдегида 25–30; уксусной кислоты 1. Парогазовая смесь из верхней части реактора 1 проходит частичную конденсацию в конденсаторе 2. Жидкую фазу из сепаратора 16 возвращают в реактор. Количество конденсата должно обеспечивать постоянный уровень жидкости в реакторе 1. Паровую фазу из сепаратора дополнительно охлаждают в холодильнике 4, где в основном конденсируется большая часть воды, уксусной кислоты и уксусного ангидрида. Смесь жидкости, паров и газов поступает в сатуратор 5. Он одновременно выполняет две функции:

- холодильника смешения, в котором за счет поглощения скрытой теплоты парообразования при испарении ацетальдегида проходит дополнительная конденсация и отделение от газовой фазы продуктов реакции;

- сатуратора, обеспечивающего насыщение циркулирующих газов ацетальдегидом.

Большую часть рециркулирующих газов из сатуратора 5 направляют в реактор 1. Некоторое их количество отводят из системы для поддержания постоянства концентраций инертных. Для очистки от органических компонентов этот поток проходит через абсорберы 7 (орошается уксусной кислотой) и 8 (орошается водой). Сорбат абсорбера 7 и продукт из нижней части сатуратора 5 собирают в емкость 6. Эта жидкость содержит (% мас.): уксусного ангидрида 58–60, уксусной кислоты 28–30.

Сорбат абсорбера 8, представляющий собой водный раствор ацетальдегида, подогревают в теплообменнике 9 горячей фузельной водой и направляют в отпарную колонну 10. После дополнительного охлаждения эту воду можно использовать в абсорбере 8. При этом появляется возможность организации замкнутого водооборота. Поскольку содержание ацетальдегида не превышает 10 %, колонна обогревается острым паром, подаваемым непосредственно в куб. В колонне 10 происходит отпарка от воды ацетальдегида и растворенных газов. Парогазовая смесь проходит парциальную конденсацию в рассольном конденсаторе 11. Жидкий ацетальдегид направляют в сатуратор 5, а неконденсированную парогазовую фазу – в абсорбер 8.

Смесь продуктов реакции из емкости 6 проходит осушку в комплексе гетероазеотропной ректификации 13–16. Для образования гетероазеотропа используют добавку к смеси этилацетата. Его вводят непосредственно во флорентийский сосуд 16. Предварительная осушка связана с необходимостью предотвращения гидролиза уксусного ангидрида на стадии ректификации (сравнить с проведением реакции в среде гетероазеотропного агента). Воду из куба колонны 15 направляют на санитарную очистку. Безводные продукты реакции отделяют от этилацетата в колонне 17. Казалось бы, использования этой колонны можно избежать, если обеспечить точное дозирование этилацетата в количестве, определяемом составом

гетероазеотропа. Однако продукты реакции выступают как гомогенизаторы смеси, и требуется избыток этилацетата для образования двух жидких фаз.

Введенный в комплекс колонн 14,15, 17 этилацетат практически не расходуется, а его незначительные потери с кубовыми продуктами колонн 15 и 17 компенсируются подпиткой во флорентийский сосуд 16.

Таким образом, в качестве исходного сырья используют доступные вещества: ацетальдегид и воздух. Процесс относится к высокоэффективным, обладая высокой конверсией за один проход, удовлетворительной для радикально-цепных процессов селективностью и производительностью. К сожалению, технология не обладает полнотой использования жидких и твердых отходов. Окисление ацетальдегида в уксусную кислоту можно отнести к технологиям с низким расходом воды, поскольку она используется как энергоноситель и хладагент, но не как реагент[6].

1.1.3 Производство уксусной кислоты жидкофазным окислением н-бутана

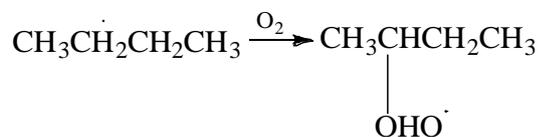
Использование в качестве сырья для производства уксусной кислоты н-бутана привлекательно за счет низкой цены этого продукта и малой степени его использования в химической промышленности. н-Бутан является многотоннажным продуктом, получаемым при газофракционировании смесей легких углеводородных газов. Практически его использование ограничено применением в качестве компонента бытового газа (пропан-бутановые смеси), заменителя фреонов в наполнителях аэрозольных баллонов, сырья для дегидрирования и получения изобутана изомеризацией. Таким образом, н-бутан является доступным и дешевым сырьем для производства уксусной кислоты.

Основы процесса.

Окисление н-бутана это классический пример автокаталитической реакции с вырожденным разветвлением цепи. Как и все радикально-цепные процессы, он включает в себя стадии зарождения, продолжения и обрыва

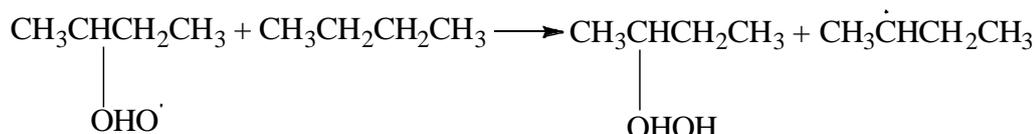
цепи.

Первая стадия связана с образованием пероксивторбутильного радикала:

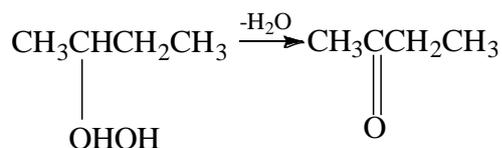


Процесс продолжения цепи может протекать в двух направлениях.

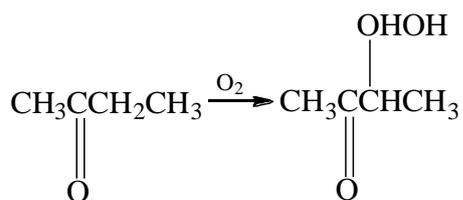
Первое связано с образованием и распадом гидроперекисных соединений.



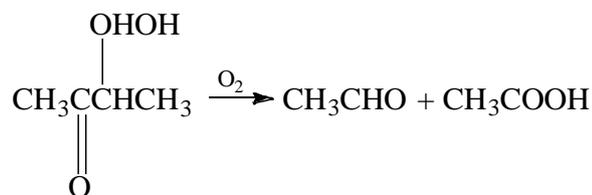
Вторбутильный радикал продолжает цепь, превращаясь в пероксивторбутил, а гидроперекись распадается с отщеплением H_2O , образуя метил этилкетон:



Он, в свою очередь, подвергается свободнорадикальному окислению в α -положение с образованием α -кетогидроперекиси:



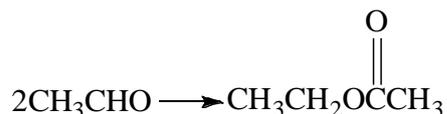
Ее распад приводит к образованию уксусной кислоты и ацетальдегида:



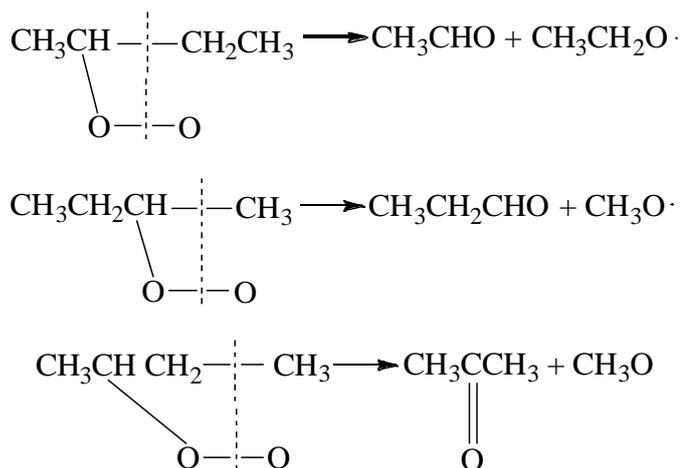
Окисление ацетальдегида в уксусную кислоту было рассмотрено нами ранее. Оно также имеет свободнорадикальный характер.

Основным побочным процессом является реакция Тищенко, приводящая к

образованию этилацетата:



Вторым направлением, ведущим к образованию уксусной кислоты из пероксидторбутила, является его деструктивный (с разрывом С–С–связи) распад:



Взаимодействие образовавшихся радикалов с исходным н-бутаном приводит к соответствующим спиртам:



Эти спирты подвергаются дальнейшему окислению и дают муравьиную и уксусную кислоты. Кроме того, они вступают в реакцию этерификации с уксусной кислотой и образуют метилацетат и этилацетат. Полученный ацетальдегид окисляется в уксусную кислоту, пропионовый альдегид – в пропионовую кислоту.

Таким образом, оксидат содержит целый ряд ценных органических соединений (кроме уксусной кислоты входят муравьиная и пропионовая кислоты, ацетон и метилэтилкетон, метил- и этилацетат, продукты полного окисления). При низких временах контакта в оксидате могут присутствовать и С₁–С₃ спирты. На 1 т исходного н-бутана получают 1,6 т кислородсодержащих соединений, в том числе 872 кг уксусной кислоты и

190 кг метилэтилкетона.

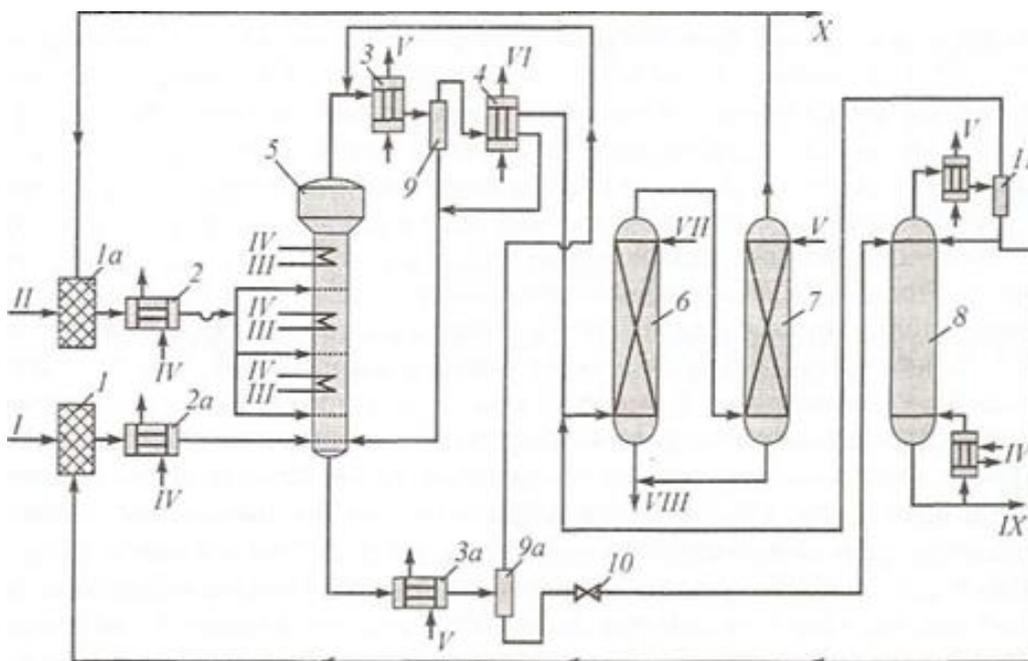


Рис.5. Реакторная подсистема технологии производства уксусной кислоты жидкофазным окислением н-бутана: 1 – смеситель; 2 – подогреватель; 3 – холодильник; 4 – рассольный холодильник–конденсатор; 5 – реактор; 6, 7–абсорберы; 8 – отпарная колонна; 9 – сепаратор пар–жидкость; 10– дроссель; 11 – сепаратор; I– н-бутан; II – воздух, III– водный конденсат; IV– пар; V– вода; VI– рассол; VII– раствор щелочи; VIII– солевой раствор на отпарку от органики; IX– продукты на ректификацию; X – газы

Технологическая схема представлена на рис. 6. Свежий и рециркулирующий н-бутан смешиваются в смесителе 7, подогреваются до 140–150 °С и подаются в нижнюю часть реактора 5. Свежий воздух смешивают с рециркулирующими газами, подогревают и направляют в реактор 5. Ввод воздуха распределен по высоте реактора. Тепло реакции отводится за счет испарения части реакционной массы и встроенными змеевиковыми теплообменниками. Продукты испарения проходят через водяные холодильники–конденсаторы 5. Конденсированная фаза возвращается в реактор для поддержания уровня жидкости. После дополнительного охлаждения и частичной конденсации в рассольном холодильнике 4 жидкая фаза возвращается в реактор, а парогазовая поступает на промывку 2–5 % щелочью и водой в абсорберы 6, 7.

Абсорбционные газы частично возвращают в смеситель 1а, а частично отводят из системы для поддержания постоянного уровня концентрации инертнов. Солевые стоки абсорберов 6, 7 направляют в отпарную колонну (на схеме не показана) для извлечения органических компонентов, сбрасываемых на факельное дожигание.

Продукты реакции отводят из нижней части реактора в жидкой фазе. В составе оксидата: до 43 % уксусной кислоты, около 10 % метилэтилкетона, 8–9 % этилацетата, метилацетат, ацетон, вода. Эту смесь охлаждают и частично конденсируют в холодильнике 3а. Затем пары из сепаратора 9а направляют в холодильники 3, 4, а жидкость через дроссель 10 (снижение давления до 0,2 МПа) в отпарную колонну 8. Колонна 8 ($t_{\text{куба}} = 120\text{--}160\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{верха}} = 35\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$) служит для удаления из продуктов реакции непрореагировавшего н-бутана и углекислого газа. Парогазовый поток сепаратора 11 направляют на щелочную очистку, а затем на факельное дожигание. Жидкость сепаратора 11 – кислый бутан – возвращают в смеситель 1. Технология разделения смеси продуктов достаточно сложна из-за азеотропного характера смеси.

К достоинствам метода относятся: доступность исходного сырья (н-бутан и воздух), удовлетворительной для радикально-цепных процессов селективностью и производительностью. Процесс обладает невысокой конверсией за один проход, что требует организации рецикла по исходному сырью.

К недостаткам технологии следует отнести образование значительного количества водно-солевых стоков при промывке рециркуляционных потоков, сложную технологию разделения компонентов реакционной смеси, необходимость выделения из нее катализатора (из-за отвода продуктов реакции в жидкой фазе[5]).

1.1.4 Технология получения карбоновых кислот окислением фракции прямогонного бензина

Использование в качестве сырья для получения уксусной и других низших карбоновых кислот прямогонного бензина долгое время считалось одним из наиболее экономичных способов производства. В настоящее время ситуация несколько изменилась. Это связано с тем, что прямогонные бензины и углеводородные фракции в основном перерабатываются процессами риформинга или изомеризации в высокооктановое топливо и на рынке нефтепродуктов имеется существенный дефицит этой нефтяной фракции как сырья для химических процессов.

Этот процесс окисления, базируется на свободнорадикальном цепном окислении в жидкой фазе. Конечными продуктами окисления являются различные карбоновые кислоты. С повышением молекулярной массы исходного сырья выход низкомолекулярных кислот снижается. Это приводит к тому, что для производства уксусной кислоты используют легкие бензиновые фракции, содержащие не более 0,06 % (мас.) серы и имеющие следующий состав: не более 0,5 % C_1 – C_3 углеводородов, не более 4 % бутанов, 78–85 % C_5 и более тяжелых углеводородов, нафтенов, ароматических углеводородов и 2,2–диметилпропана не более 15 %.

Механизм окисления аналогичен рассмотренному выше, однако образуется большее число кислородсодержащих соединений, в том числе уксусная (80–81 % мас.), муравьиная (12–15 % мас.), пропионовая (5–8 % мас.), янтарная (3–10 % мас.) кислоты, спирты, альдегиды, кетоны, сложные эфиры и другие кислородсодержащие продукты. Наличие такого комплекса различных соединений (более 20 компонентов) значительно затрудняет процесс выделения из реакционной массы индивидуальных товарных продуктов. Несколько облегчается этот процесс тем, что кислородсодержащие соединения нейтрального характера – альдегиды, кетоны, сложные эфиры – имеют ограниченную растворимость в воде и, следовательно, могут быть отделены от реакционной массы гетероазеотропной ректификацией. Более того, если расценивать в качестве целевых продуктов только кислоты, то все нейтральные соединения можно

возвращать в реактор для дальнейшего окисления.

Условия проведения окисления аналогичны применяемым при окислении *n*-бутана. Температура – 160–195 °С, давление – 5,2 МПа.

Недостатком всех способов окисления углеводородов и углеводородных фракций в уксусную кислоту является образование широкого спектра трудноразделимых кислородсодержащих соединений, в частности азеотропной смеси муравьиная кислота–уксусная кислота–вода[2].

1.1.5 Технология получения уксусной кислоты карбонилированием метанола

В 1996 г. фирмой «BP Chemicals» был предложен процесс карбонилирования метанола в уксусную кислоту на основе промотированной иридиевой каталитической системы, названный Cativa. Новый процесс обеспечивает и значительные преимущества над стандартной технологией фирмы «Монсанто», основанной на родиевом катализаторе, и значительную экономию капитальных затрат, требуемых для строительства новых заводов или для расширения существующих установок карбонилирования метанола. Лабораторное периодическое испытание нового процесса Cativa началось в 1990 г., и в ноябре 1995 г. процесс был впервые внедрен в промышленную практику в Техасе (США)[2].

Новая технология смогла значительно увеличить производительность путем устранения ограничений предыдущего процесса. Максимальная мощность установок определяется исключительно наличием местных ресурсов СО. Быстрое развертывание новой технологии на основе иридия происходит благодаря существенному снижению капитальных и эксплуатационных затрат по сравнению с процессом фирмы «Монсанто».

Процесс карбонилирования метанола в уксусную кислоту на родиевых катализаторах. При производстве уксусной кислоты используют родиевый катализатор и работают при давлении 3–6 МПа и 150–200 °С. Процесс обеспечивает селективность свыше 99 % по метанолу. Механизм реакции

является классическим примером гомогенного каталитического процесса и состоит из шести дискретных, но взаимосвязанных реакций:

Основные аппараты, входящие в промышленную схему карбонилирования метанола фирмы «Монсанто», показаны на рис. 6.

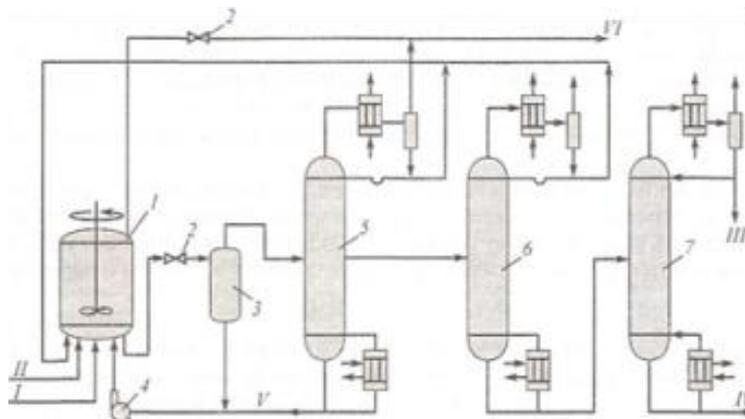


Рис. 6. Технологическая схема производства уксусной кислоты карбонилированием метанола фирмы «Монсанто»: 1 – реактор; 2 – редукционный клапан; 3 – сепаратор; 4 – насос; 5–7– ректификационные колонны; I– CO; II– метанол; III– товарная уксусная кислота; IV– тяжелокипящая фракция; V– раствор, обогащенный каталитическим комплексом; VI– газы сдувки

Реакцию карбонилирования проводят в непрерывных условиях в реакторе с мешалкой 1. Жидкость выводится из реактора через редукционный клапан 2. Затем она поступает в адиабатический сепаратор 3, где легкие компоненты: метил– ацетат, метилиодид, некоторое количество воды и продуктовая уксусная кислота, отделяются в паровой фазе. Они поступают на установку ректификации для дальнейшей очистки. Оставшаяся жидкость, которая содержит растворенный катализатор, возвращается в реактор 1. Паровой поток из сепаратора 3 поступает в ректификационную колонну 5. В ней осуществляется первичное разделение смеси на три фракции. В качестве дистиллята отводятся гетероазеотроп метилиодида с водой, метанол, III. Уксусная кислота–сырец отводится боковым погоном. Кубовый продукт колонны 5, содержащий метилацетат, уксусную кислоту и растворенный в них катализатор, объединяется с потоком жидкости из сепаратора 3 и насосом 4 возвращается в реактор 1.

Неконденсируемые продукты дистиллята колонны 5, а также некоторая часть паровой фазы из реактора 1 отводятся на сдувку для предотвращения

накопления инертнов в системе.

Основное ограничение технологии карбонилирования метанола на родиевом катализаторе связано с нестабильностью катализатора при дефиците CO, особенно в сепараторе 3. Здесь потеря CO из родиевых комплексов может привести к образованию неактивной формы, такой как $[\text{Rh}(\text{CO})_2\text{I}_4]^-$, и в конечном итоге к потере родия в виде нерастворимого RhI_3 :



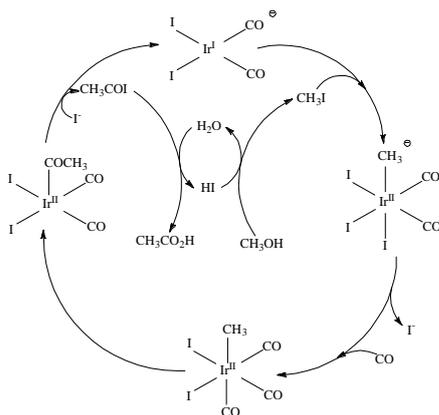
Условия протекания реакции необходимо поддерживать в определенных пределах, чтобы предотвратить осаждение катализатора. Это накладывает ограничения на концентрации воды, метилацетата, метилиодида и родия. Также требуется определенное минимальное парциальное давление CO. Для предотвращения осаждения катализатора и обеспечения высоких скоростей реакции желательны высокие концентрации воды (более 10 % вес.). Эти ограничения устанавливают предел производительности и увеличивают эксплуатационные затраты, поскольку ректификационная подсистема должна удалять всю воду из продуктовой уксусной кислоты для рециркуляции в реактор. Воду дозируют в реактор, чтобы обеспечить ее постоянную концентрацию. Для организации рецикла воды служит колонна босушки уксусной кислоты. Колонна 7 предназначена для очистки товарной уксусной кислоты от тяжелых примесных компонентов; В основном это пропионовая кислота.

Технология карбонилирования метанола на иридиевых каталитических системах. Из-за ограничений, описанных выше, а также из-за очень привлекательной разницы в цене между родием (\$ 5200 за тройскую унцию) и иридием (\$ 300 за тройскую унцию), которая существовала в 1990 г., фирма «British Petroleum» (BP) предприняла попытку создания нового каталитического процесса синтеза уксусной кислоты карбонилированием метанола.

Предварительные данные исследований говорили о высокой стабильности иридиевого катализатора при низких концентрациях воды. Это

создавало предпосылки создания процесса без точного дозирования и рециркуляции воды в реакционную массу. Кроме того, иридиевые комплексы имеют более высокую устойчивость при повышенных температурах и дефиците CO, более высокую растворимость в реакционной массе.

Иридиевый каталитический цикл подобен родиевому циклу, но имеет принципиальные различия, что и обеспечивает основные преимущества процесса «Cativa»:



В частности, исследования показали, что окислительное присоединение метилиодида к иридиевому центру происходит почти в 150 раз быстрее, чем аналогичная реакция с родием. Это определяет резкое увеличение наблюдаемой скорости реакции, поскольку стадия окислительного присоединения не является лимитирующей (как в случае с родием). Самой медленной стадией в цикле является последующее миграционное включение CO с образованием иридиево–ацильного комплекса, которое включает элиминирование иодид–иона и координацию дополнительных молекул CO. Следовательно, это предполагает совершенно иную форму уравнения скорости реакции

$$r = k \frac{[cat][CO]}{[I^-]}$$

или, принимая во внимание равновесия органических компонентов:

$$r = k[cat][CO][MeOAc]$$

Обратная зависимость от концентрации иодид–иона предполагает, что очень высокие скорости реакции достигаются при работе при низких

концентрациях иодида. Это также предполагает, что включение комплексов, способных принимать участие в удалении иодид-иона, промотирует эту новую лимитирующую стадию. Промоторы этой системы подразделяют на две различные группы: простые иодидные комплексы цинка, кадмия, ртути, галлия и иридия и карбонил-иодидные комплексы тантала, рения, рутения и осмия.

Ни один из этих металлов не является эффективным сам по себе в качестве катализатора карбонилирования, но все эффективны, когда используются в совокупности с иридием.

Карбонилирование на кобальтовых катализаторах не нашло широкого применения. Из-за высоких давлений и высоких капитальных затрат технология оказалась неконкурентоспособной по сравнению с традиционными способами производства уксусной кислоты.

Присутствие промотора приводит к значительному увеличению доли «активных анионных» комплексов $[\text{Ir}(\text{CO})_2\text{I}_3\text{Me}]^-$ и значительному уменьшению доли «неактивных» $[\text{Ir}(\text{CO})_2\text{I}_4]^-$. Еще одна принципиальная роль промотора проявляется в предупреждении и образования «неактивных» форм катализатора, таких как $[\text{Ir}(\text{CO})_2\text{I}_4]^-$ и $[\text{Ir}(\text{CO})_3\text{I}_3]$. Эти комплексы формируются в качестве промежуточных в реакции паровой конверсии оксида углерода.

Для родиевой системы скорость реакции карбонилирования зависит только от концентрации родия и метилиодида. Однако в случае промотированной иридиевой системы ситуация более сложная. Процесс «Cativa» характеризуется сложной взаимосвязью между всеми основными переменными процесса, особенно между концентрациями метилацетата, воды, метилиодида, иридия, промоторов, парциальным давлением CO и температурой.

Качество уксусной кислоты, получаемой в процессе «Cativa», исключительно высокое. В этом процессе образуется мало иодорганических примесей, которые создают проблемы при очистке уксусной кислоты в

родиевом процессе.

В процессе «Cativa» количество ацетальдегида в реакторе обычно ниже $30 \cdot 10^{-6}$ (30 ppm) по сравнению с несколькими сотнями долей на миллион в стандартном процессе «Монсанто». Поэтому уксусная кислота, получаемая по методу «Cativa», может использоваться для синтеза винилацетата без дополнительной очистки. Количество пропионовой кислоты в уксусной кислоте в процессе «Cativa» существенно меньше, чем в родиевом процессе. В стандартном родиевом процессе с высоким содержанием воды пропионовая кислота присутствует в продуктовой уксусной кислоте в количестве от $12 \cdot 10^{-4}$ до $20 \cdot 10^{-4}$ (1200 и 2000 ppm, т.е. долей на миллион) перед колонной, удаляющей тяжелые компоненты. В процессе «Cativa» эти концентрации снижаются почти в тысячу раз.

Поскольку в процессе «Cativa» образуется значительно меньшие количества пропионовой кислоты по сравнению с родиевым процессом, требуется намного меньше энергии для того, чтобы очистить продукт. Как упоминалось ранее, систему «Cativa» можно эксплуатировать при значительно более низких концентрациях воды по сравнению с родиевой технологией, снижая таким образом энергозатраты, требуемые для осушки продукта на ректификационной установке. Расходные коэффициенты пара и охлаждающей воды снижаются на 30 % по сравнению с родиевой системой. Реакция паровой конверсии оксида углерода присуща обоим процессам, но в системе «Cativa» имеет более низкую скорость, что приводит к меньшим на 70 % прямым выбросам CO_2 . В общем, включая косвенные выбросы CO_2 , процесс «Cativa» высвобождает почти на 30 % меньше CO_2 на тонну продукта, чем родиевый процесс. Относительно невысокая чувствительность системы к парциальному давлению CO делает возможной эксплуатацию с более низкими скоростями продувки реактора, чем в родиевой системе. Практически общие прямые газовые выбросы могут быть снижены больше чем на 50 %.

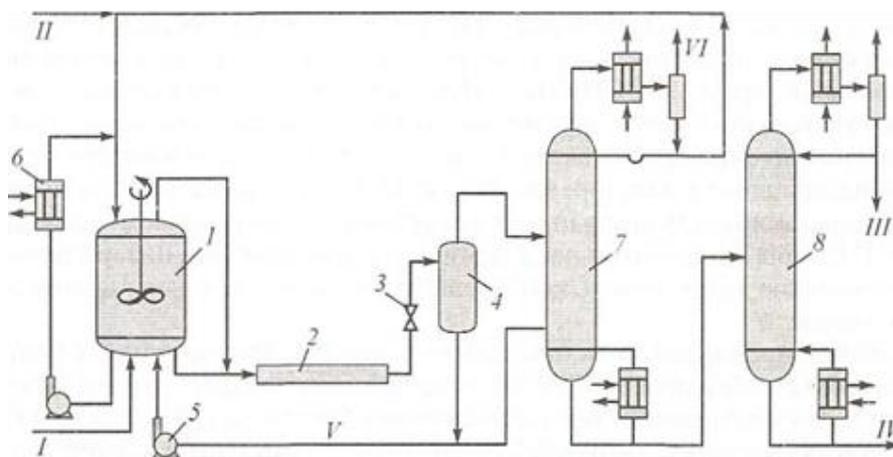


Рис. 8. Технологическая схема производства уксусной кислоты карбонилированием метанола на иридиевых катализаторах (процесс «Cativa»): 1 – реактор; 2 – дополнительный реактор; 3 – дроссельный вентиль; 4– сепаратор пар–жидкость; 5– насос; 6– циркуляционный холодильник; 7, 8– ректификационные колонны; I– CO; II – метанол; III–товарная уксусная кислота; IV – тяжелокипящая фракция; V– раствор, обогащенный каталитическим комплексом; VI – газы сдувки

Опыт перевода производств с технологии «Монсанто» на технологию «Cativa» показывает, что использование пара снижается на 30 %, в то время как утилизация CO возрастает с 85% до >94 %.

При этом также возникает возможность упрощения технологической схемы. Это сокращает стоимость нового основного оборудования на 30 %. Так как система «Cativa» остается стабильной вплоть до очень низких концентраций воды, блок очистки может быть реконструирован с полным удалением одной ректификационной колонны и объединением колонн выделения легких компонентов и осушки в одну.

Более низкие скорости образования высших кислот по сравнению с процессом «Монсанто» позволяют сократить размер и эксплуатационные затраты конечных ректификационных колонн. Технологическая схема представлена на рис. 8. В реактор 1 подаются сверху метанол, снизу CO. Перемешивание обеспечивается мешалкой. Реакционная масса из реактора 1 подается в реактор 2 трубчатого типа. Это позволяет увеличить время пребывания исходного сырья в зоне реакции и конверсию CO за один проход. Затем после снижения давления вентилем 3 парожидкостная смесь поступает в сепаратор пар–жидкость 4. Паро–газовая смесь в дальнейшем

поступает на ректификационное разделение, а жидкая фаза, обогащенная каталитическим комплексом, возвращается в реактор 1.

Выделение товарной уксусной кислоты обеспечивается ректификационными колоннами 7 и 8. В колонне 7 в качестве дистиллята отделяют легкокипящие компоненты системы (HI, CH₃OH, CH₃I, воду). В качестве кубового продукта отбирают уксусную кислоту с примесями тяжелокипящих побочных продуктов. Средним погоном отбирают раствор, обогащенный каталитическим комплексом. Его возвращают в реактор. Дистиллят колонны 7 разделяют на паровую и жидкую фазы. Жидкость возвращают в реактор а парогазовую смесь (в основном CO, HI; пары органики по насыщению) направляют на санитарную очистку и каталитическое дожигание. Окончательную очистку уксусная кислота проходит в колонне 8.

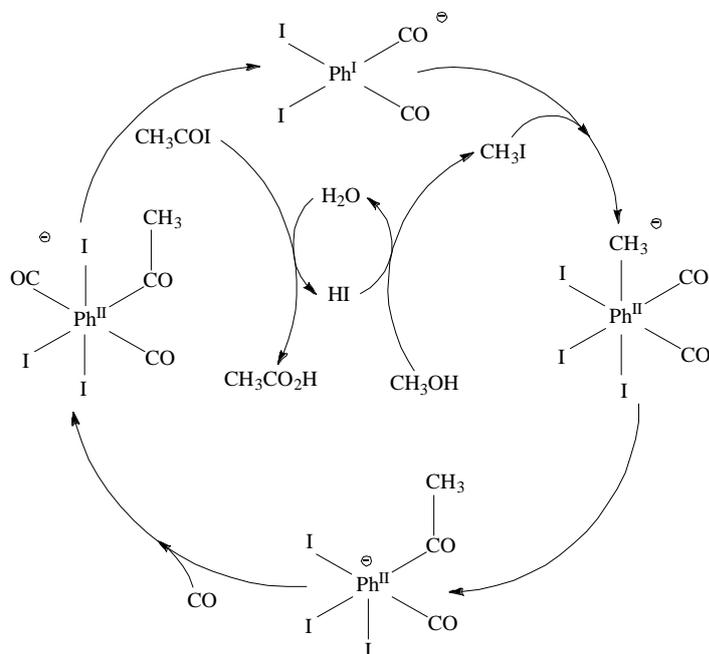
Основным преимуществом иридиевого процесса по сравнению с родиевым является снижение капитальных и эксплуатационных затрат. Это достигается за счет внедрения новой каталитической системы. Она может работать при низких концентрациях воды, что позволяет исключить из технологии ректификационную колонну осушки и рецикл по воде. Применение более низкого давления дает возможность снизить капитальные затраты.

Технология карбонилирования метанола в уксусную кислоту имеет одностадийный характер и является непрерывным процессом. Она обладает высокой эффективностью как с точки зрения селективности по целевому продукту, так и по конверсиям за один проход. Основные рециркуляционные потоки в технологии образуются из-за необходимости возвращения каталитического раствора в реактор. Дополнительный рецикл по воде при использовании родиевой каталитической системы обусловлен требованиями к составу каталитического раствора и определяется устойчивостью и реакционной способностью карбонильных комплексов. Исходное сырье, оксид углерода и метанол, является дешевым и доступным. По литературным

данным существует возможность создания установок большой единичной мощности. При этом производительность установок лимитируется не конструктивными особенностями, не кинетическими или термодинамическими ограничениями, а потребностью в продукте и наличием местных источников оксида углерода. Степень утилизации тепла относительно невелика. Однако отделение продуктов реакции от каталитического раствора в адиабатическом сепараторе за счет теплосодержания реакционной массы позволяет снизить затраты на дальнейшее ректификационное разделение. Следует также отметить, что применение новой каталитической системы на основе иридия обеспечивает значительное снижение капитальных и эксплуатационных затрат[6].

1.2 Физико-химические основы процесса карбонилирования метанола

В процессе карбонилирования метанола за счет реакции метанола с HI образуется метилиодид. Спектроскопические исследования показали, что в основном катализатор существует в виде комплекса $[\text{Rh}(\text{CO})_2\text{I}_2]^-$. Протекает



окислительное присоединение метилиодида к этому родиевому комплексу и образуем родиево-метильный комплекс. Он подвергается быстрой перестройке, при которой метил перемещается к соседней карбонильной группе. После присоединения CO образуется ацильная форма комплекса. Следующей стадией является

восстановительное элиминирование ацильного комплекса и его взаимодействие с водой с образованием исходного родиевого комплекса, уксусной кислоты и HI.

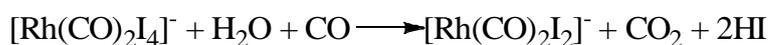
При высоком содержании воды (> 8 % вес.) лимитирующей стадией является реакция окислительного присоединения метилиодида к родиевому центру. Тогда скорость реакции имеет первые порядки и по концентрации катализатора, и по концентрации метилиодида и не зависит от других параметров:

$$r = k[\text{kat}][\text{CH}_3\text{I}]$$

Однако, если содержание воды меньше 8 % (вес.), лимитирующей стадией становится восстановительное элиминирование ацильных комплексов.

Хотя карбонилирование метанола на родиевом катализаторе является высокоселективным и эффективным, в процессе имеются некоторые побочные реакции. Например, родий катализирует реакцию паровой конверсии CO. Это связано с конкурентным окислительным присоединением

$[\text{Rh}(\text{CO})_2\text{I}_2]^-$ к HI или к H_2O и CO (водяной газ), в результате чего образуются небольшие количества диоксида углерода CO_2 и водорода H_2 из CO и воды:



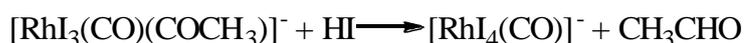
или в общем виде



Эти побочные реакции обуславливают потерю селективности по отношению к CO . К тому же газообразные побочные продукты снижают парциальное давление CO . Это приводит к снижению скорости реакции, однако выход на прореагировавший CO достаточно хороший ($>85\%$).

Пропионовая кислота является основным жидким побочным продуктом этого процесса и получается при карбонилировании этанола, присутствующего в исходном метаноле в качестве примеси. Однако на практике выход пропионо-вой кислоты оказывается больше расчетного. Это связывают с возможным образованием ацетальдегида, его последующим гидрированием в этанол, который при карбонилировании дает пропионовую кислоту.

В частности, одним из возможных путей образования ацетальдегида является распад ацильного комплекса



Кроме пропионовой кислоты также наблюдаются примеси продуктов конденсации ацетальдегида, их производные и иод производные. Однако выход побочных продуктов чрезвычайно мал и не оказывает влияния на технико-экономические показатели процесса «Монсанто» [1,6].

1.3 Физические характеристики сырья и готовой продукции

Физические и химические свойства окиси углерода по ТУ 6–02–7–10186 показаны в таблице.

Таблица 1 – Окись углерода. Основные физические и химические свойства.

| Окись углерода (по ТУ 6–02–7–101–86) | |
|---|--------------------------------|
| Техническое наименование | Окись углерода, оксид углерода |
| Химическая формула | СО |
| Физические свойства | |
| Физическое состояние | при нормальных условиях газ |
| Плотность кг/м | при нормальных условиях 1,164 |
| Температура кипения, °С при 101,3 кПа | –191,5 |
| Растворимость в воде | нерастворим |
| Состав | |
| Оксид углерода, % об., не менее | 98 |
| Примеси, % об., не более | 2 |
| В т.ч. азота % об., не более | 2 |
| Кислорода % об., не более | 0,05 |
| Водорода % об., не более | 0,3 |
| Объемная доля влаги % об., не более | 0,05 |

Физико–химические показатели технического метанола по ГОСТ 2222–95 представлены в таблице..

Таблица 2– Метанол технический. Физико–химические показатели

| Наименование показателя | Норма для марки | |
|---|---|-----------------------|
| | А ОКП 24 2111 0130 | Б ОКП 24 2111 0140 |
| Внешний вид | Бесцветная прозрачная жидкость без нерастворимых примесей | |
| Плотность при 20°C, г/см | 0,791–0,792 | |
| Смешиваемость с водой | Смешивается с водой без следов помутнения и опалесценции | |
| Температурные пределы | | |
| предел кипения °С | 64,0–65,5 | |
| 99% продукта перегоняется в пределах, °С не более | 0,8 | 1 |
| Состав | | |
| Массовая доля воды, %, не более | 0,05 | 0,08 |
| Массовая доля свободных кислот в пересчете на муравьиную кислоту, %, не более | 0,0015 | |
| Массовая доля альдегидов и кетонов в пересчете на ацетон, % не более | 0,003 | 0,008 |
| Массовая доля летучих соединений железа, в пересчете на железо, %, не более | 0,00001 | 0,0005 |
| Массовая доля аммиака и аминсоединений в пересчете на аммиак, % не более | 0,00001 | – |
| Массовая доля хлора, %, не более | 0,0001 | 0,001 |
| Массовая доля серы, %, не более | 0,0001 | 0,001 |
| Массовая доля нелетучего остатка после испарения, %, не более | 0,001 | 0,002 |
| Массовая доля этилового спирта, %, не более | 0,01 | – |

Физико–химические свойства готовой уксусной кислоты по ГОСТ

19814–74 показаны в таблице.

Таблица 3 – Уксусная кислота основные технические характеристики.

| Основные показатели | Норма для марки |
|--|--|
| Внешний вид и цвет | Бесцветная, прозрачная жидкость с резким специфическим запахом |
| Растворимость в воде | Полная, р-р прозрачный |
| Массовая доля уксусной кислоты, %, не менее | 99,5 |
| Массовая доля уксусного ангидрида, %, не более | 0,004 |
| Массовая доля муравьиной кислоты, %, не более | 0,05 |
| Массовая доля сульфатов, %, не более | 0,0003 |
| Массовая доля хлоридов, %, не более | 0,0004 |
| Массовая доля тяжелых металлов, осаждаемых сероводородом, %, не более | 0,0004 |
| Массовая доля железа, %, не более | 0,0004 |
| Массовая доля нелетучего остатка, %, не более | 0,004 |
| Устойчивость окраски раствора марганцовокислого калия, мин., не менее | 60 |
| Массовая доля веществ, окисляемых двуххромовокислым калием, см ³ р-ра тиосульфата натрия концентрация с 0,1 моль/дм ³ , не более | 5 |
| Проба с серной кислотой | Должна выдерживать испытание |

2. Финансовый менеджмент

В данной работе разрабатывается проект узла синтеза уксусной кислоты методом карбонилирования метанола.

В настоящее время большее количество уксусной кислоты вырабатывается путем окисления ацетальдегида и нефтяных фракции. Метод получения уксусной кислоты карбонилированием метанола еще недостаточно освоен в России. Однако данный метод позволяет получить более чистую кислоту по сравнению с окислительными методами, а так же является более экономичным, так как сырье для проведения синтеза можно получить из угля - более дешевого сырья, чем нефть.

1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

1.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Синтетическая уксусная кислота - важнейший продукт химической промышленности, применяется в химической, фармацевтической и легкой промышленности и других областях народного хозяйства.

Основные направления использования синтетической уксусной кислоты

Производства винилацетата

1. В качестве растворителя в производстве терефталевой кислоты
2. Получение красителей на основе уксусной кислоты
3. Производство ацетилцеллюлозы, используемой для получения волокон
4. В качестве пищевых добавок

Основные предполагаемые конкуренты, производящие уксусную кислоту в России - ОАО «Невинномысский Азот», ОАО «Дмитровский химзавод», ОАО «Ашинский пиролизно-химический завод».

ОАО «Невинномысский Азот» поставляет синтетическую уксусную кислоту предприятиям, производящим пластмассы и красители.

ОАО «Дмитровский химзавод» и ОАО «Ашинский пиролизно-химический завод» производят уксусную кислоты для пищевых потребностей..

На основании этих данных строится карта сегментирования рынка.

Сегментирование - это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга). Можно применять географический, демографический, поведенческий и иные критерии сегментирования рынка потребителей, возможно применение их комбинаций с использованием таких характеристик, как возраст, пол, национальность, образование, любимые занятия, стиль жизни, социальная принадлежность, профессия, уровень дохода.

Таблица 37– Сегментирование производителей

| Основные направления использования | Производители |
|--|---------------|
| Производства винилацетата | |
| В качестве растворителя в производстве терефталевой кислоты | |
| Получение красителей на основе уксусной кислоты | |
| Производство ацетилцеллюлозы, используемой для получения волокон | |
| В качестве пищевых добавок | |

| | |
|---|----------------------------|
|  | ОАО «Невинномысский Азот» |
|  | ОАО «Дмитровский химзавод» |

1.2. Анализ конкурентных технических решений

Проведем анализ трех конкурирующих компаний по производству уксусной кислоты: проектируемое предприятие на территории Томской области. ОАО «Невинномысский Азот» находящийся на территории Ставропольского края. ОАО «Дмитровский химзавод» - Орловская область.

Таблица 38 - Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

| Критерии оценки | Вес критерия | Баллы | | | Конкурентоспособность | | |
|--|--------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------|
| | | Б _ф | Б _{к1} | Б _{к2} | К _ф | К _{к1} | К _{к2} |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Технические критерии оценки ресурсоэффективности | | | | | | | |
| 1. Чистота производимого оксида этилена (Массовая доля уксусной кислоты) | 0,7 | 5 | 5 | 5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 |
| 2. Внешний вид и цвет | 0,05 | 5 | 5 | 5 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| 3. Устойчивость к окружающей среде | 0,03 | 5 | 5 | 5 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 4. Растворимость в воде | 0,02 | 5 | 5 | 5 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| 5. Запах | 0,02 | 5 | 5 | 5 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Экономические критерии оценки эффективности | | | | | | | |
| 1. Конкурентоспособность продукта | 0,01 | 5 | 5 | 5 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 2. Уровень проникновения на рынок | 0,01 | 5 | 5 | 5 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 3. Цена | 0,06 | 5 | 4 | 4 | 0,3 | 0,24 | 0,24 |
| 4. Предполагаемый срок эксплуатации | 0,01 | 5 | 5 | 5 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 5. Послепродажное обслуживание | 0,02 | 4 | 5 | 5 | 0,08 | 0,1 | 0,1 |
| 6. Финансирование научной разработки | 0,02 | 5 | 5 | 5 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| 7. Срок выхода на рынок | 0,05 | 5 | 5 | 5 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| 8. Наличие сертификации разработки | 1 | | | | 4,98 | 4,92 | 4,94 |
| Итого | 0,01 | 5 | 5 | 5 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |

где Б_ф - проектируемое предприятие,

Б_{к1} - ОАО «Невинномысский Азот» (г. Невинномысск, Ставропольского края)

Б_{к2} - ОАО «Дмитровский химзавод» (Орловская область).

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i,$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Уксусная кислота на всех предприятиях производится по ГОСТу, значит конкурентоспособность продукта можно оценить по коммерческим критериям эффективности. Суммарный балл конкурентоспособности для проектируемого предприятия максимален. Уязвимость нашей компании заключается в том, что для проведения научных разработок необходимо привлекать дополнительные финансы, однако более высокая цена продукции компаний конкурентов позволяет нашей компании успешно конкурировать с ними.

1.3. SWOT-анализ

Проведем комплексный анализ среды предприятия, изучим факторы внешней и внутренней среды, а так же их влияние на рентабельное функционирования производства.

Анализ микроокружения проводится в соответствие со следующими основными факторами:

- потребители;
- поставщики;

конкуренты; рынок рабочей силы

Проведем анализ внутренней среды по следующим направлениям:

- финансы
- маркетинг
- менеджмент
- кадры
- производство
- НИОКР
- корпоративная культура

Таблица 39- Анализ факторов макросреды (факторы внешней среды дальнего действия)

| Группа факторов | Факторы | Характер влияния на организацию «+», «-» | Действия организации |
|--------------------|---|---|--|
| Экономический | 1.Снижение покупательской способности потребителя | «-» уменьшение выручки от продажи | Наработка ценового конкурентного преимущества |
| | 2.Повышение уровня инфляции | «-» снижение покупательской способности потребителя | |
| | 3. Увеличение налоговых ставок | «-» снижение чистой прибыли | Проведение оптимальной налоговой политики |
| Научно-технический | 1. Появление современного оборудования | «+» увеличение чистого денежного потока (повышение стоимости предприятия) | Внедрение новых технологий (модернизация оборудования) с целью наработки конкурентных преимуществ продукта |
| | | «-» сокращение чистого денежного потока в случае внедрения НТП конкурентами | Внедрение новых технологий (модернизация оборудования) с целью наработки конкурентных преимуществ продукта |
| Социокультурные | 1.Повышение уровня образования персонала | «+» появление на рынке труда квалифицированных кадров | Прием на работу персонала высокой квалификации |
| | | | Разработка программы мотивации и стимулирования для работников |

Таблица 40– Анализ факторов микроокружения

| Группа факторов | Факторы | Характер влияния на организацию «+», «-» | Действия организации |
|------------------------|---|--|---|
| Потребители | Увеличение покупательской способности | «+» возможность увеличения объемов производимой продукции, увеличение прибыли | Модернизация производства Увеличение оборотных средств на производство ГП |
| | Снижение покупательской способности | «-» снижение объемов производимой продукции | Поиск путей дифференциации хозяйственного портфеля в целях 100% загрузки производственных мощностей |
| Поставщики | Увеличение стоимости сырья, комплектующих | «-» перебои в поставках «-» повышение цены готового продукта | Рассмотрение новых форм сотрудничества, заключение долгосрочных договоров Поиск новых, более выгодных поставщиков |
| | Несоблюдение сроков и условий поставки | «-» сбои в работе предприятия | Введение штрафных санкций за несоблюдение обязательств Смена поставщика |
| | Предоставление скидок в зависимости от объемов партии сырья | «+» возможность снижения себестоимости (цены) ГП , увеличение выручки от продаж | Разработка эффективной программы продвижения продукта Увеличение доли рынка Повышение стоимости предприятия |
| Конкуренты | Ужесточение конкуренции | «-» угроза снижения доли рынка, снижения объемов производства и реализации, уменьшение прибыли | Удержание позиций предприятия: наработка и укрепление конкурентных преимуществ, разработка программы продвижения продукта предприятия |
| | Наличие высоких входных барьеров | «+» отсутствие возможности появления новых конкурентов | Создание входных барьеров для потенциальных конкурентов |

Таблица 41 - Анализ внутренней среды предприятия

| | Сильные стороны | Слабые стороны |
|------------------------|---|---|
| Маркетинг | <ol style="list-style-type: none"> 1. Наличие эффективных каналов распределения продукта 2. Достаточная доля рынка | <ol style="list-style-type: none"> 1. Низкий уровень маркетинговых исследований 2. Наличие неэффективной программы продвижения продукта |
| Менеджмент | <ol style="list-style-type: none"> 1. Наличие высококвалифицированных управленческих кадров 2. Четко поставленные цели 3. Наличие стратегии развития предприятия | <ol style="list-style-type: none"> 1. Неэффективный менеджмент |
| Кадры | <ol style="list-style-type: none"> 1. Высокий уровень профессионализма кадров 2. Отсутствие текучести кадров 3. Высокая рентабельность персонала | <ol style="list-style-type: none"> 1. Отсутствие эффективной системы мотивации и стимулирования |
| Производство | <ol style="list-style-type: none"> 1. Наличие современной технологии 2. Наличие современного оборудования 3. Низкая стоимость готового продукта 4. НТР | <ol style="list-style-type: none"> 1. Недогрузка производственных мощностей |
| Корпоративная культура | <ol style="list-style-type: none"> 1. Высокий уровень корпоративной культуры | - |

Таблица 42– Мартица SWOT:

| | | |
|---|---|--|
| | <p>Возможности:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.Использование инновационной инфраструктуры ТПУ 2.Появление дополнительного спроса на новый продукт 3. Появление современных технологий и оборудования 4.Появление новых программ по повышению квалификации персонала | <p>Угрозы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.Отсутствие спроса 2.Развитая конкуренция технологий производства 3.Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства |
| <p>Сильные стороны:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.Экономичность и энергоэффективность технологии. 2.Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями. 3.Наличие бюджетного финансирования. 4.Высокий уровень профессионализма кадров | <ol style="list-style-type: none"> 1.Разработка технологии карбонилирования метанола с целью получения уксусной кислоты с требуемыми конкурентными преимуществами 2.Повышение рентабельности производства 3.Стажировка персонала в России и за рубежом | <ol style="list-style-type: none"> 1.Создание программы продвижения проекта. 2.Изучение конкурентов и создание конкурентных стратегий |
| <p>Слабые стороны:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство под ключ 2.Отсутствие необходимого оборудования для проведения испытания опытного образца 3.Большой срок поставок материалов и комплектующих, используемых при проведении научного исследования | <ol style="list-style-type: none"> 1.Создание инжиниринговой компании способной запустить производство 2.Закупка необходимого оборудования 3.Поиск оптимального поставщика | <ol style="list-style-type: none"> 1.Создание инжиниринговой компании способной запустить производство 2.Закупка необходимого оборудования 3.Поиск оптимального поставщика 4.Изучение конкурентов и создание конкурентных стратегий. 5.Продвижение своего проекта на уровне государства |

2. Планирование научно-исследовательских работ

2.1. Структура работ в рамках научного исследования

Для разработки проекта узла карбонилирования метанола формируется рабочая группа, в состав которой входят руководитель проекта и инженер (дипломник). Перечень этапов работ и распределение исполнителей по видам работ представлены в таблице .

Таблица 43– Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

| Основные этапы | № раб | Содержание работ | Должность исполнителя |
|--|-------|---|-----------------------|
| Разработка технического задания | 1 | Составление и утверждение технического задания | Руководитель проекта |
| Выбор направления исследований | 2 | Подбор и изучение материалов по теме | Инженер (дипломник) |
| | 3 | Выбор направления исследований | Руководитель, инженер |
| | 4 | Календарное планирование работ по теме | Руководитель |
| Теоретические исследования | 5 | Проведение теоретических расчетов и обоснований | Инженер |
| Обобщение и оценка результатов | 6 | Оценка эффективности полученных результатов | Руководитель |
| | 7 | Определение целесообразности проведения разработки проекта | Руководитель, инженер |
| Разработка технической документации и проектирование | 8 | Разработка блок-схемы, принципиальной схемы | Инженер |
| | 9 | Выбор и расчет конструкции | Инженер |
| | 10 | Оценка эффективности производства и применения проектируемого изделия | Руководитель, инженер |
| Оформление отчета по проведенным расчетам | 11 | Составление технической документации | Инженер |
| | 12 | Составление принятых к проекту чертежей основного и вспомогательного оборудования | Инженер |
| | 13 | Утверждение разрабатываемого проекта, оценка результатов | Руководитель |

2.2. Определение трудоемкости выполнения работ

Проведем оценку трудоемкости проектирования узла

карбонилирования метанола. Она оценивается экспертным путем и зависит от множества трудно учитываемых факторов, и поэтому носит вероятностный характер.

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5},$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i},$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

2.3. Разработка графика проведения научного исследования

Для разработки графика проектирования узла, построим диаграмму Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}},$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}},$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} необходимо округлить до целого числа.

Все рассчитанные значения необходимо свести в таблицу.

Таблица 44 - Временные показатели проведения научного исследования

| Название работы | Трудоёмкость работ | | | | | | | | | Исполнители | | | Длительность работ в рабочих днях T_{pi} | | | Длительность работ в календарных днях T_{ki} | | |
|---|---------------------|-------|-------|---------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|-------------|-------|-------|--|-------|-------|--|-------|-------|
| | t_{min} , чел-дни | | | t_{max} , чел-дни | | | $t_{ож}$, чел-дни | | | | | | | | | | | |
| | Исп.1 | Исп.2 | Исп.3 | Исп.1 | Исп.2 | Исп.3 | Исп.1 | Исп.2 | Исп.3 | Исп.1 | Исп.2 | Исп.3 | Исп.1 | Исп.2 | Исп.3 | Исп.1 | Исп.2 | Исп.3 |
| Разработка технического задания | 13 | 10 | 7 | 15 | 13 | 10 | 13,8 | 11,2 | 8,2 | 1 | 2 | 3 | 13,8 | 5,6 | 2,7 | 20,7 | 8,4 | 4,1 |
| Работа с литературой | 30 | 70 | 100 | 60 | 86 | 115 | 42 | 76,4 | 106 | 1 | 2 | 2 | 42 | 38,2 | 53,0 | 63 | 57,3 | 80 |
| Выполнение расчетов для проектируемого процесса и его оформление | 28 | 35 | 30 | 32 | 40 | 35 | 29,6 | 37 | 32 | 1 | 1 | 2 | 29,6 | 37 | 16,0 | 44,4 | 55,5 | 24 |
| Выполнение чертежа технологической схемы проектируемого процесса | 18 | 22 | 25 | 21 | 25 | 28 | 19,2 | 23,2 | 26,2 | 2 | 1 | 2 | 9,6 | 23,2 | 13,1 | 14,4 | 34,8 | 20 |
| Выполнение чертежа общего вида реактора и его основных узлов | 30 | 30 | 26 | 35 | 35 | 30 | 32 | 32 | 27,6 | 1 | 2 | 1 | 32 | 16 | 27,6 | 48 | 24 | 41 |
| Выполнение спецификации к технологической схеме, к аппарату и его узлам | 27 | 32 | 20 | 32 | 38 | 25 | 29 | 34,4 | 22 | 1 | 1 | 1 | 29 | 34,4 | 22,0 | 43,5 | 51,6 | 33 |
| Оформление пояснительной записки проекта | 12 | 8 | 10 | 18 | 12 | 15 | 14,4 | 9,6 | 12 | 1 | 2 | 2 | 14,4 | 4,8 | 6,0 | 21,6 | 7,2 | 9 |

На основе таблицы строится календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта на основе табл. с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 45 - Временные показатели проведения научного исследования

| № работы | Вид работ | Исполнители | Т _{кп} , кал. дн. | продолжительность работ | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|---|-------------------------------------|----------------------------|-------------------------|---|---------|---|---|------|---|---|--------|---|---|-----|---|---|------|---|
| | | | | январь | | февраль | | | март | | | апрель | | | май | | | июнь | |
| | | | | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 1 | Разработка технического задания | Руководитель | 20 | ■ | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | Работа с литературой | Инженер (дипломник) | 63 | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | |
| 3 | Выполнение расчетов для проектируемого процесса и его оформление | Руководитель Инженер (дипломник) | 44 | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | |
| 4 | Выполнение чертежа технологической схемы проектируемого процесса | Руководитель, инженер (дипломник) | 14 | | | | | | | | | | ■ | ■ | | | | | |
| 5 | Выполнение чертежа общего вида реактора и его основных узлов | Руководитель, инженер (дипломник) | 48 | | | | | | | | | | | | ■ | ■ | | | |
| 6 | Выполнение спецификации к технологической схеме, к аппарату и его узлам | Руководитель, инженер (дипломник) | 43 | | | | | | | | | | | | | ■ | ■ | | |
| 7 | Оформление пояснительной записки проекта | Инженер (дипломник) | 24 | | | | | | | | | | | | | | ■ | ■ | |

– Руководитель
 – Дипломник

3. Бюджет проектируемого узла

3.1 Расчет материальных затрат НИИ

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта:

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхi}, \quad (7)$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Из затрат на материальные ресурсы, включаемых в себестоимость продукции, исключается стоимость возвратных отходов.

Возвратные отходы производства – это остатки материалов, сырья, теплоносителей, полуфабрикатов и других видов материальных ресурсов, которые образуются в процессе производства научно-технической продукции, утратившие частично или полностью потребительские качества исходного ресурса (химические или физические свойства) и из-за этого используются с повышенными затратами (понижением выхода продукции) или совсем не используются по прямому назначению.

Таблица 46 – Материальные затраты

| Наименование | Ед. Измер | Количество | | | Цена за ед., руб. | | | Затраты на материалы, (З _м), руб. | | |
|----------------------|----------------|------------|--------|--------|-------------------|-------|-------|---|-------|----------|
| | | Исп.1 | Исп.2 | Исп.3 | Исп.1 | Исп.2 | Исп.3 | Исп.1 | Исп.2 | Исп.3 |
| Метанол | м ³ | 17264,7 | 15000 | 16000 | 5 | 4 | 4,5 | 8632,35 | 6000 | 7200 |
| Оксид углерода (II) | м ³ | 14632,0 | 15000 | 12000 | 2 | 2,3 | 2,5 | 29264 | 34500 | 30000 |
| Иодоводород | кг | 318910,6 | 300000 | 320000 | 5,7 | 5,5 | 5,0 | 15148,25 | 13750 | 13333,33 |
| Родиевый катализатор | кг | 100000 | 70000 | 80000 | 3,1 | 3,5 | 3,2 | 31000 | 24500 | 25600 |
| Итого: | | | | | | | | 84044,6 | 78750 | 76133,33 |

Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования, необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам.

Расчет затрат по данной статье заносится в таблицу.

Таблица 47 – Расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

| № п/п | Наименование оборудования | Кол-во единиц оборудования, шт | | | Цена единицы оборудования (с учетом амортизации), руб. | | | Общая стоимость оборудования, тыс. руб. | | |
|--------|---------------------------|--------------------------------|-------|-------|--|--------|--------|---|--------|--------|
| | | Исп.1 | Исп.2 | Исп.3 | Исп.1 | Исп.2 | Исп.3 | Исп.1 | Исп.2 | Исп.3 |
| 1. | Теплообменник | 1 | 2 | 3 | 14000 | 15000 | 14000 | 14000 | 30000 | 45000 |
| 2. | Сепаратор | 3 | 3 | 3 | 15000 | 18000 | 20000 | 45000 | 48000 | 60000 |
| 3. | Ректификационная колонна | 1 | 1 | 1 | 100000 | 150000 | 160000 | 10000 | 15000 | 16000 |
| 4. | Барботажный реактор | 1 | 2 | 2 | 100000 | 120000 | 110000 | 100000 | 240000 | 22000 |
| Итого: | | | | | | | | 169000 | 317000 | 341000 |

3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В часть включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ поданной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. Расчет основной заработной платы сводится в таблицу.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп},$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{осн}$).

Основная заработная плата ($Z_{осн}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p,$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (;

$Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d},$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Таблица 48 – Расчет основной заработной платы

| № п / п | Наименование этапов | | | Исполнители по категориям | | | Длительность работ в рабочих днях T_{pi} | | | Среднедневная заработная плата, руб | | | Основная заработная плата, руб | | |
|------------------|--|--------|--------|---------------------------|--------|--------|---|--------|----------|-------------------------------------|------------|-------------|--------------------------------|-------------|------------|
| | Исп. 1 | Исп. 2 | Исп. 3 | Исп. 1 | Исп. 2 | Исп. 3 | Исп. 1 | Исп. 2 | Исп. 3 | Исп. 1 | Исп. 2 | Исп. 3 | Исп. 1 | Исп. 2 | Исп. 3 |
| 1. | Разработка технического задания | | | Руководитель | | | 2,8 | 5 | 2,2 | 60 4,4 3 | 632, 57 | 547 | 1692 ,4 | 3162, 9 | 1203 ,4 |
| 2. | Работа с литературой | | | Бакалавр | | | 10, 5 | 15 | 4,5 | 30 0,8 5 | 264, 35 | 268,8 | 3158 ,9 | 3965, 3 | 1209 ,6 |
| 3. | Выполнение технологических расчетов для проектируемого процесса и его оформление | | | Руководитель | | | 25 | 14 | 11 | 60 4,4 3 | 632, 57 | 547 | 1511 0,8 | 8855, 9 | 6017 |
| | | | | Бакалавр | | | | | | 30 0,8 5 | 264, 35 | 268,8 | 7521 ,3 | 3700, 9 | 2956 ,8 |
| 4. | Выполнение чертежа технологической схемы проектируемого процесса | | | Руководитель | | | 12, 6 | 20,4 | 14 | 60 4,4 3 | 632, 57 | 547 | 7615 ,8 | 1290 4,4 | 7658 |
| | | | | Бакалавр | | | | | | 30 0,8 5 | 264, 35 | 268,8 | 3790 ,7 | 5392, 7 | 3763 ,2 |
| 5. | Выполнение чертежа общего вида реактора и его основных узлов | | | Руководитель | | | 16 | 13,8 | 16, 2 | 60 4,4 3 | 632, 57 | 547 | 9670 ,9 | 8729, 5 | 8861 ,4 |
| | | | | Бакалавр | | | | | | 30 0,8 5 | 264, 35 | 268,8 | 4813 ,6 | 3648 | 4354 ,6 |
| 6. | Выполнение спецификации к технологической схеме, к реактору и его узлам | | | Бакалавр | | | 18 | 11 | 9 | 30 0,8 5 | 264, 35 | 268,8 | 5415 ,3 | 2907, 9 | 2419 ,2 |
| 7. | Оформление пояснительной записки проекта | | | Бакалавр | | | 7 | 8 | 11 | 30 0,8 5 | 264, 35 | 268,8 | 2105 ,9 | 2114, 8 | 2956 ,8 |
| Сумма: | | | | | | | | | | | | 6089 5,6 | 5538 2,3 | 4140 0 | |

Таблица 49– Баланс рабочего времени

| Показатели рабочего времени | Руководитель | Инженер |
|--|--------------|---------|
| Календарное число дней | 365 | 365 |
| Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни | 118 | 118 |
| Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни | 24 | 24 |
| Действительный годовой фонд рабочего времени | 223 | 223 |

Тарифная заработная плата $Z_{тс}$ находится из произведения тарифной ставки работника 1-го разряда $T_{ci} = 600$ руб. на тарифный коэффициент k_t и учитывается по единой для бюджетных организации тарифной сетке. Для предприятий, не относящихся к бюджетной сфере, тарифная заработная плата (оклад) рассчитывается по тарифной сетке, принятой на данном предприятии. Расчёт основной заработной платы приведён в табл.

Таблица 50– Расчёт основной заработной платы

| Исполнители | Разряд | k_t | $Z_{тс}$, руб. | $k_{пр}$ | k_d | k_p | Z_m , руб | $Z_{дн}$, руб. | T_p , раб. дн. | $Z_{осн}$, руб. |
|-----------------|--------|-------|--------------------|----------|-------|-------|----------------|--------------------|------------------------|---------------------|
| Руководитель | 6 | 1,407 | 6092 | 0,3 | 0,4 | 1,3 | 13463,3 | 676,18 | 156 | 105484,82 |
| Инженер | 4 | 1,142 | 4945 | 0,3 | 0,4 | 1,3 | 10928,5 | 548,87 | 163 | 89466,27 |
| Итого $Z_{осн}$ | | | | | | | | | | 194951,1 |

3.4. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}),$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 30%.

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице

Таблица 52– Отчисления во внебюджетные фонды

| Исполнитель | Основная заработная плата |
|--|---------------------------|
| Руководитель | 105484,8 |
| Дипломник | 89466,3 |
| Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды | 0,305 |
| Итого | 59460,1 |

3.4 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 7) \cdot k_{\text{нр}}$$

где $k_{\text{нр}}$ - коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных принимают в размере 16%.

Величина накладных расходов по данному проекту (исполнение 1) 24115,4 руб.

3.5 Формирование бюджета затрат проекта

Рассчитанная величина затрат проектирования является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании

договора с заказчиком защищается предприятием в качестве нижнего предела затрат на разработку продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице.

Таблица 52 – Расчет бюджета затрат НИИ

| Наименование статьи | Сумма, руб. | | | Примечание |
|--|-------------|-----------|------------|----------------|
| | Исп.1 | Исп.2 | Исп.3 | |
| Материальные затраты | 815 | 1535 | 760 | Пункт |
| Затраты на специальное оборудование | 16490 | 16600 | 16200 | Пункт |
| Затраты по основной заработной плате исполнителей темы | 102426,5 | 99724,288 | 60670,369 | Пункт |
| Отчисления во внебюджетные фонды | 31240,1 | 30415,9 | 18504,5 | Пункт |
| Накладные расходы | 24155,45 | 23724,03 | 15381,57 | Пункт |
| Электроэнергия | 950,6 | 950,6 | 950,6 | Пункт |
| Бюджет затрат НИИ | 176077,7 | 172949,8 | 112467,039 | Сумма ст. 1- 6 |

4. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{\text{р}i}}{\Phi_{\text{max}}},$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i,$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i^a, b_i^p – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы.

Таблица 53– Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

| Объект исследования Критерии | Весовой коэффициент параметра | Исп.1 | Исп.2 | Исп.3 |
|--|-------------------------------|-------|-------|-------|
| 1. Удовлетворяет потребности потребителя | 0,2 | 5 | 4 | 3 |
| 2. Энергосбережение | 0,25 | 4 | 3 | 3 |
| 3. Надежность | 0,3 | 4 | 4 | 4 |

| | | | | |
|---------------------|------|-----|------|------|
| 4. Материалоемкость | 0,25 | 4 | 4 | 4 |
| ИТОГО | 1 | 4,2 | 3,75 | 3,55 |

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{исп.i}$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{финр}}, \quad I_{исп.2} = \frac{I_{p-исп2}}{I_{финр}} \text{ и т.д.}$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (см.табл.18) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта (\mathcal{E}_{cp}):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}}$$

Таблица 54– Сравнительная эффективность разработки

| | Показатели | Исп.1 | Исп.2 | Исп.3 |
|---|--|-------|-------|-------|
| 1 | Интегральный финансовый показатель | 1 | 0,98 | 0,64 |
| 2 | Интегральный показатель ресурсоэффективности | 4,2 | 3,75 | 3,55 |
| 3 | Интегральный показатель эффективности | 4,20 | 3,82 | 5,56 |
| 4 | Сравнительная эффективность вариантов исполнения | 1,0 | 0,9 | 1,3 |

Представленные расчеты показывают, что, более эффективным вариантом решения технической задачи, является исполнение 1, так как в совокупности интегральные показатели данного исполнения выше, чем у других исполнений.