

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет имени  
К.И. Сатпаева

Институт химических и биологических технологий  
Кафедра «Химическая и биохимическая инженерия»

Халихов Султанхан Арманович

«Проект установки получения этилтретбутилового (ЭТБЭ) из биоспиртов в  
реакторе адиабатического типа»

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**  
к дипломному проекту


Специальность 5В072100 – Химическая технология органических веществ

Алматы 2021

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет имени  
К.И. Сатпаева

Институт химических и биологических технологий  
Кафедра «Химическая и биохимическая инженерия»

**ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ**  
Заведующий кафедрой  
«Химическая и  
биохимическая инженерия»  
Ph.D., ассоциированный профессор  
 Х.С. Рафикова  
«18» мая 2021 г.

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**  
к дипломному проекту

на тему: «Проект установки получения этилтретбутилового (ЭТБЭ) из  
биоспиртов в реакторе адиабатического типа»

по специальности 5В072100 – Химическая технология органических веществ

Выполнил



Халихов С.А.

Научный руководитель



д.х.н., профессор Селенова Б.С.

Алматы 2021

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет имени  
К.И.Сатпаева

Институт химических и биологических технологий  
Кафедра «Химическая и биохимическая инженерия»  
5B072100 – «Химическая технология органических веществ»

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой Химическая и  
биохимическая инженерия

PhD



Рафикова Х.С.

*подпись*

*Ф.И.О.*

“7” декабря 2020г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение дипломного проекта**

Обучающемуся Халихов Султанхан Арманович

*(Ф.И.О. обучающегося)*

Тема: Проект установки получения этилтретбутилового (ЭТБЭ) из биоспиртов в реакторе  
адиабатического типа

*(тема дипломной работы)*

Утверждена приказом Ректора Университета №2131-б от "24"11. 2020г.

Срок сдачи законченной работы

"16" мая 2021г.

Исходные данные к дипломной работе: анализы существующих технологий  
синтеза ЭТБЭ

Краткое содержание дипломной работы:

- а) Литературный обзор отечественных и мировых публикации по производству ЭТБЭ*
- б) Технические расчеты*
- в) Автоматизация и управление процессом*
- г) Расчет экономической эффективности проекта*
- д) Рассмотрения требования к охране труда*

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): представлены 12 слайдов презентации работы

Рекомендуемая основная литература: из 21 наименований - Рудин М.Г., Смирнов Г.Ф.  
Проектирование нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов. 1984.


## ГРАФИК


подготовки дипломной работы (проекта)

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Литературный обзор отечественных и мировых публикации по производству ЭТБЭ	29.01.2021г	Сбор и систематизация теоретического материала и статистической информации по исследуемому проекту
Технические расчеты	22.02.2021г	Основные расчеты физико-химических и топливных свойств ЭТБЭ
Автоматизация и управление процессом	06.03.2021г	Описание системы контроля и автоматизации технологического процесса синтеза ЭТБЭ
Расчет экономической эффективности проекта	29.03.2021г	Основные технико-экономические показатели, анализ конкурентных технических решений
Рассмотрения требования к охране труда	23.04.2021г	рассмотрения организации по технике безопасности на проектируемой установке

### Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу (проект) суказанием относящихся к ним разделов работы (проекта)

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Нормоконтролер	А.Т. Хабиев, PhD доктор, ассоц. профессор	15.05.21	

Научный руководитель \_\_\_\_\_  
  
Подпись

Селенова Б.С.  
Ф.И.О.

Задание принял к исполнению обучающийся



Халихов С.А.

## АННОТАЦИЯ

Работа содержит 29 страниц, 2 иллюстрации, 10 таблиц и 21 использованный литературный источник.

*Ключевые слова:* ЭТБЭ, биоэтанол, изобутилен, реактор адиабатического типа, катализатор, промышленная фракция C<sub>4</sub>.

Цель работы – провести технологические расчеты материальных и тепловых балансов и конструкционные основных размеров реактора синтеза ЭТБЭ на основе биоэтанола и обосновать экономическую целесообразность процесса.

*Методы или методология проведения работ:* проанализированы существующие технологии синтеза ЭТБЭ и на его оснований выбран технологический процесс и проведены соответствующие расчеты и чертеж основного аппарата.

*Результаты работы и их новизна:* в предложенной работе проведены технологические и конструкционные расчеты реактора. Описана системы контроля и автоматизации технологического процесса синтеза ЭТБЭ, а также рассмотрена организация по технике безопасности на проектируемой установке. Объектом исследования является «Павлодарский НефтеХимический Завод». Местоположение было выбрано в соответствии с геологическими условиями и выбором сырья и их импорта.

## АНДАТПА

Бұл тезисте 29 бет, 2 сурет, 10 кесте және 21 пайдаланылған әдеби көздер бар.

*Түйінді сөздер:* ЭТБЭ, биоэтанол, изобутилен, адиабатикалық типті реактор, катализатор, С4 өнеркәсіптік фракциясы.

Жұмыстың мақсаты - биоэтанол негізінде ЭТБЭ синтезі реакторының материалдық және жылу баланстарының технологиялық есептеулерін және негізгі құрылымдық өлшемдерін жүргізу және процестің экономикалық орындылығын негіздеу.

*Жұмыстарды жүргізу әдістері немесе әдіснамасы:* ЭТБЭ синтезінің қолданыстағы технологиялары талданды және оның негізінде технологиялық процесс таңдап алынды және негізгі аппараттың тиісті есептері мен сызбасы жүргізілді.

*Жұмыс нәтижелері және олардың жаңалығы:* ұсынылған жұмыста реактордың технологиялық және құрылымдық есептері жүргізілді. МТВЕ синтезінің технологиялық процесін бақылау және автоматтандыру жүйелері сипатталған, сонымен қатар жобаланған қондырғыдағы қауіпсіздік ұйымы қарастырылған. Зерттеу нысаны "Павлодар мұнай-химия зауыты" болып табылады. Орналасқан жері геологиялық жағдайларға және шикізат пен олардың импортын таңдауға сәйкес таңдалды.

## ANNOTATION

This diploma work contains 29 pages, 2 illustrations, 10 tables and 21 references.

*Key words:* ETBE, bioethanol, isobutylene, adiabatic reactor, catalyst, industrial C4 fraction.

The purpose of the work is to perform technological calculations of the material and thermal balances and structural dimensions of the ETBE synthesis reactor based on bioethanol and to justify the economic feasibility of the process.

*Methods or methodology of work:* the existing technologies of ETBE synthesis are analyzed and the technological process is selected on its basis, and the corresponding calculations and drawing of the main apparatus are carried out.

*The results of the work and their novelty:* in the proposed work, technological and structural calculations of the reactor were carried out. The systems of control and automation of the technological process of MTBE synthesis are described, as well as the organization of safety measures at the designed installation is considered. The object of the study is "Pavlodar Petrochemical Plant". The location was chosen according to the geological conditions and the choice of raw materials and their imports.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	9
1 Литературный обзор	10
1.1 Общие сведения об ЭТБЭ	10
1.2 Преимущества этил-трет-бутилового эфира	11
1.3 Реакция синтеза ЭТБЭ	11
1.4 Сырье	12
1.5 Катализаторы синтеза трет-бутиловых эфиров	14
2 Технологическая часть	15
2.1 Описание технологической схемы установки производства ЭТБЭ	15
2.2 Материальный баланс реактора синтеза ЭТБЭ	16
2.3 Тепловой баланс реактора	19
2.4 Расчет основных размеров реактора	22
3 Автоматизация и управление процессом	23
4 Экономическая часть	25
4.1 Анализ конкурентных технических решений	25
4.2 Расчет материальных затрат НТИ	26
4.3 Расчет затрат на специальное оборудование	26
5 Производственная и экологическая безопасность	28
5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов	28
5.2 Вредные вещества	28
Заключение	30
Список использованной литературы	31
Приложение А – Сборочный чертеж реактора	33



## ВВЕДЕНИЕ

*Актуальность темы дипломной работы:* Основным направлением развития топливного сектора стран ЕС и США является экологическая обстановка, а не повышение эксплуатационных характеристик. Например, в России с 1 января 2016 г. к изготовлению на НПЗ разрешен только бензин 5 класса, в котором для увеличения октанового числа будут использованы только лишь кислородсодержащие присадки, в частности, эфиры спиртов - метил-трет-бутиловый-эфир (МТБЭ) или *трет*-амил-метиловый эфир (ТАМЭ) и т.д. С перспективами соответствия наших топлив с экологической программой Евросоюза (Евро-5, 6, ...), в которой Казахстан принимает участие, производство этилтретбутилового эфира (ЭТБЭ) на основе биоэтанола, занимает важное промышленное значение.

*Современная оценка состояния трудности:* В нынешнее время промышленное производство оксигенатов в Казахстане отсутствует. С учетом наметившейся в мире тенденции к сокращению пользования МТБЭ, у отечественных производителей имеется перспективная возможность внедрения инновационных методов синтеза экологичных и высокоэффективных антидетонационных присадок типа ЭТБЭ на основе биоэтанола. Казахстан, с его опытом выращивания масличных культур и необходимыми посевными площадями, может успешно развивать биоэтанольную промышленность. Использование биоэтанола обеспечивает потребителей собственными источниками энергии, отвечающими стандартам качества, тем самым повышая энергетическую безопасность региона, снижая количество вредных выбросов в атмосферу.

Завод по глубокой переработке зерна и биоэтанола в Республике Казахстан (ранее "Биохим") запустил свою работу в Северо-Казахстанской области. В 2020 году был реализован этап промышленности, который включает в себя фактическое производство биоэтанола. По последним данным, завод "Биохим" будет производить биоэтанол для «Павлодарского нефтеперерабатывающего завода» и на более позднем этапе для «Шымкентского нефтеперерабатывающего завода», которые в настоящее время проходят модернизацию.

Что касается второго реагента синтеза ЭТБЭ – изобутилена, то его можно выделить из фракции C<sub>4</sub> (ББФ) каталитического крекинга. После технологической модернизации и ввода в эксплуатацию современных установок на НПЗ Казахстана установки каталитического крекинга будут функционировать в структуре каждого НПЗ.

Цель работы – провести технологические расчеты материальных и тепловых балансов и конструкционные основных размеров реактора синтеза ЭТБЭ и обосновать экономическую целесообразность процесса.

## 1 Литературный обзор

### 1.1 Общие сведения об ЭТБЭ

Присадки к топливам – это вещества, помогающие в чистке частей моторов, также в совершенствовании сгорания используемого горючего топлива. В настоящее время, после запрета свинецсодержащих присадок, оксигенаты - МТБЭ, ЭТБЭ, МТАЭ и другие кислородсодержащие соединения служат основной альтернативой октаноповышающих компонентов бензина. Кислородсодержащие присадки напрямую вводят кислород в горение топлива, снабжая подобным способом абсолютное горение, усовершенствование октанового количества и снижение выбросов жестких элементов, а также снижение эмиссию оксида углерода [1,2].

МТБЭ обладает значительную растворимость в воде (42 мг/л) и невысокую биоразлагаемость, что дает негативное влияние на окружающую сферу и здоровью населения. С 2006 г. запрещено применение МТБЭ в большинстве штатов США, поскольку его попадание в питьевую воду даже в микроколичествах делает ее непригодным для употребления [3]. Кроме того, производство МТБЭ связано с применением ядовитого метанола. Тем не менее, в странах ЕЭС и в России применение МТБЭ в качестве добавки к автомобильным бензинам разрешено.

Применение ЭТБЭ имеет существенные преимущества по причине последующих положительных сторон.

Для изготовления ЭТБЭ в качестве сырья можно использовать биоэтанол получаемый из возобновляемых источников – биомассы, мелассы, зерновых, картофеля, кукурузы, сахарной свеклы и т. п. Для производства 1000 т ЭТБЭ требуется 500 т биоэтанола.

Из-за собственной невысокой растворимости в воде, ЭТБЭ представляет наименьшую опасность для окружающей среды [3]. Помимо этого, деградация ЭТБЭ в биомассу и  $\text{CO}_2$  под воздействием бактерий являться абсолютной [4,5].

Промышленное применение ЭТБЭ было начато 1992 г во Франции. На сегодняшний день часть европейских производителей МТБЭ перешла на выпуск ЭТБЭ путем модернизации имеющихся мощностей, то есть замена метанола на этанол не требует большой реконструкции установки по производству МТБЭ, поэтому перевод установок МТБЭ на ЭТБЭ можно произвести рационально [6]. В 2009 г., компания Nippon Oil Corp. разработала технологию синтеза ЭТБЭ из биоэтанола, путем модернизации существующих мощностей по производству МТБЭ [7].

Другие производители строят новые крупнотоннажные производства. К 2011 г. объемы производства ЭТБЭ в Европе составили 2.2 млн т [3].

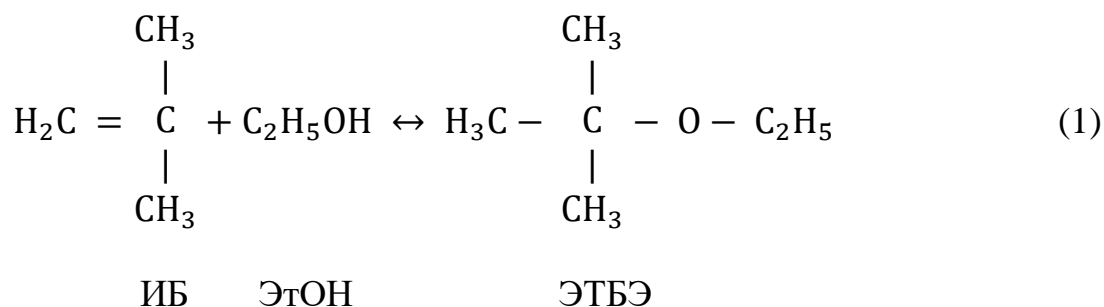
Недавний и регулярно растущий заинтересованность к ЭТБЭ стимулирует к изучению, уставленному в результате значительной производительности. Во данной сфере точное моделирование является инструментом для понимания химической кинетики, эффективности ключевых процессов и аппаратов, и исследовании стратегий оптимизации.

## 1.2 Преимущества этил-трет-бутилового эфира

ЭТБЭ по своим антидетонационным свойствам не уступает МТБЭ и может служить в качестве высокооктанового элемента бензина. [8–12]. Этил-трет-бутиловый эфир обладает более высоким октановым числом, наиболее значительной температурой кипения, более низкой температурой вспышки, более низким давлением паров, достаточно высоким содержанием кислорода. [13]. Помимо этого, он обладает низкой летучести и растворимости в воде [14,15] по сравнению с метил-трет-бутиловым эфиром. Вследствие доходным свойствам ЭТБЭ, данное объединение содействует наименьшему засорению находящейся вокруг окружающей среды, нежели каждая иная топливная примесь. Подобным способом, он демонстрирует наиболее небольшую степень выбросов оксидов азота, а также иных пребывающих в атмосфере загрязняющих веществ, подобных таких как формальдегид и окись углерода, по сравнению с МТБЭ [16].

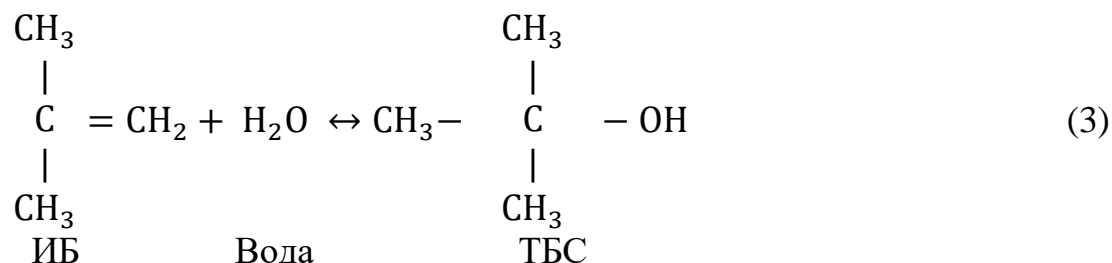
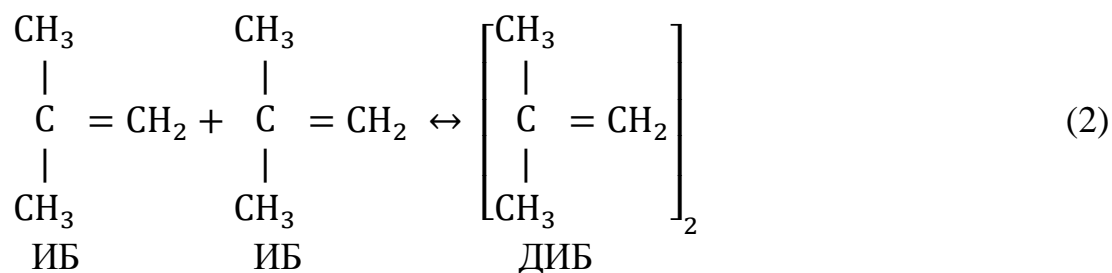
## 1.3 Реакция синтеза ЭТБЭ

Основной реакцией получения трет-бутиловых эфиров является присоединение спирта к изобутилену [8]. Так, ЭТБЭ образуется путем присоединения этанола к изобутилену в жидкой фазе в присутствии кислотного катализатора (H<sup>+</sup>):



Реакция экзотермическая (тепловой эффект составляет 7-44 кДж/моль), и обратимая, повышение температуры приводит к сдвигу равновесие в левую сторону, снижая преобразование изобутилена. При температурах ниже 60°C, реакция проходит под контролированием кинетики, а при высоких температурах, под контролем термодинамики [9].

Побочными реакциями являются димеризация изобутилена в ди-изобутилен (ДИБ) и, в случае если в реакционной среде имеется влага (то что допустимо в сырьевом этаноле), также совершается гидратация изобутилена в трет-бутиловый спирт (ТБС) [8]:



### 1.4 Сырье

В индустрии, изобутилен доступен как элемент смеси углеводородного сырья (С4), источники которого включают блоки жидкофазного каталитического крекинга (ЖКК), парового крекинга или дегидрирования изобутана [8]. Остальные углеводороды для практических целей возможно осуществить инертными и по свойствам подобными 1-бутилену. В таблице 1 представлен средний состав промышленного сырьевого потока изобутилена – фракция С4 [9].

Таблица 1 – Средний состав промышленной фракции С<sub>4</sub>

Компонент	Концентрация (% моль)	Компонент	Концентрация (% моль)
Изобутан	1,7	Бутилен-1	33,2
н-бутан	7,6	Изобутилен	<b>36,0</b>
Транс-бутен-2	16,9	Цис-бутен-2	4,6

Сырьевое течение изобутилена включает несколько видов включений, которые отрицательно оказывают большое влияние в эффективность катализатора [14]:

- нитрилы и ионы натрия из блока ЖКК;
- растворители из предыдущих действий;
- NH<sub>3</sub> в метаноле, а также углеводороды С<sub>3</sub> – С<sub>5</sub>.

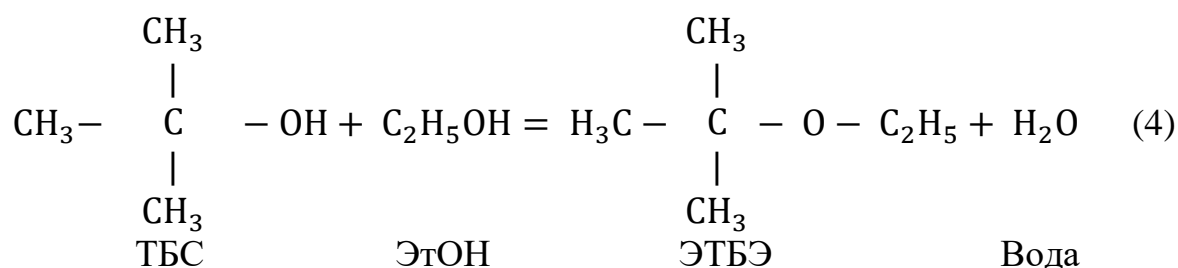
Подобные примеси невосвратимо нейтрализуют кислотные центры катализатора.

Влага, сложные эфиры и альдегиды, а также прочие кислородные соединения в спиртах негативно влияют на основную реакцию.

Диолефины, которые полимеризируются и формируют смолы, закоксовывают катализатор.

Поэтому с целью ликвидации ненужных примесей необходимо предобработка сырьевого потока изобутилена (фракционирование), которая в общем состоит из очистки водой, и для этанола, чьи примеси сдерживаются в ловушках со смолами [14].

Другой подход к синтезу ЭТБЭ является реакция ТБС и этанола в присутствии  $\beta$ -цеолитов и сульфата калия [10]. Преимуществом ТБС перед ИБ является его низкая цена, а также ресурс ИБ ограничен мощностями каталитического крекинга. Ниже приведена основная реакция данного альтернативного метода:



### 1.5 Катализаторы синтеза трет-бутиловых эфиров

В синтезе трет-бутиловых эфиров в качестве промышленных катализаторов применяется ионообменные смолы макро-сшитого, сульфонового вида (сополимер полистирола, также дивинилбензола). Среди них смола Амберлист 15 (Ром энд Хаас) более используемая; его характеристика приведена в таблице 2 [10].

Таблица 2 – Характеристика катализатора Амберлист-15

Свойство	Значение	Свойство	Значение
Матрица	Макропор	Объем пор	0,26 см <sup>3</sup> /г
Форма	Бусина	Насыпная плотность	640,26 кг/м <sup>3</sup>
Размер	475,0 мкм	Порозность	60,22 %
Средний диаметр пор	300 Å	Ионообменная способность	4,7 мэкв/г
Удельная поверхность	45,87 м <sup>2</sup> /г		

Существенным минусом ионообменных смол считается их невысокая тепловая устойчивость; их использование не рекомендовано при температурах выше 120°C [11], помимо этого они имеют все шансы акцентировать серную кислоту в присутствии значительной температуре и давлении, то что приводит к уменьшению каталитической активности.

В настоящее время в качестве катализаторов предлагаются цеолиты [11]. Продолжительные изучения по применению цеолитов обнаружили, что наиболее перспективными катализаторами с наилучшими селективностями являются ZSM- 1 и ZSM-5 однако они обладают невысокими активностями и значительными рабочими температурами по сравнению со смолами [12].

Таким образом, на данном этапе наиболее оптимальными катализаторами для синтеза ЭТБЭ являются ионообменные смолы.

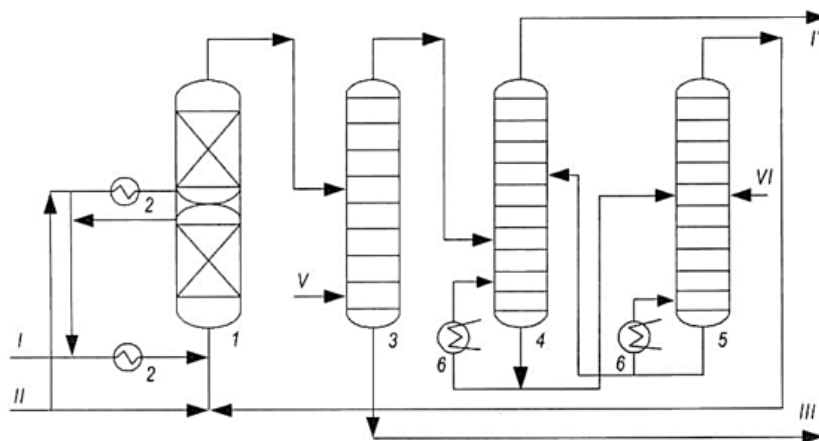
## 2 Технологическая часть

### 2.1 Описание технологической схемы установки производства ЭТБЭ

Технологическая схема получения ЭТБЭ представлена на рисунке 1. Выбранная технологическая схема получения ЭТБЭ из этанола и изобутилена дает возможность существенно уменьшить металлоемкость, а также энергозатраты благодаря высокой конверсии реагирующих веществ [17].

Синтез ЭТБЭ согласно этой схеме осуществляется взаимодействием этанола и изобутилена фракции С<sub>4</sub> в присутствии в качестве катализатора пористого сульфокатионита в Н-форме. При выбранных оптимальных параметрах температуры и давления, процесс протекает в жидкой фазе. Установка состоит из следующих блоков:

- взаимодействие этанола и изобутилена фракции С<sub>4</sub>;
- разделение реакционной смеси на ЭТБЭ и углеводородную фракцию ректификацией;
- экстракция этанола водой;
- ректификационное отделение этанола из водного экстракта.



- 1 - реактор; 2 - теплообменник; 3 - ректификационная колонна (дебутанизатор);  
4,5 - колонны для отбора водой непрореагировавшего этанола; 6 - пароподогреватель; I - изобутиленовое сырье; II - этанол; III - ЭТБЭ; IV - бутан-бутеновая фракция; V - водяной пар; VI - вода

Рисунок 1 – Принципиальная схема производства ЭТБЭ

Изобутиленовое сырье подогревают в теплообменнике 2 до температуры 50<sup>0</sup>С, смешивают со свежим и рециркулирующим этанолом и подают в реактор адиабатического типа 1. Реакционная смесь далее поступает в ректификационную колонну 3, из *нижней* части которой отбирают ЭТБЭ. С верха этой колонны выводят фракцию С<sub>4</sub> и направляют в колонны 4 и 5 для отбора из неё этанола. Избыточный этанол извлекают и возвращают в процесс. С верха колонны 4 фракция С<sub>4</sub> направляют на разгонку.

Основные параметры процесса:

- мольное соотношение этанол/изобутилен равно 1,1;
- объемная скорость подачи сырья в реактор 2 ч<sup>-1</sup>;
- температура на выходе из реактора не более 65°C;
- давление 1,0-1,5 Мпа;
- степень превращения изобутена составляет не менее 94 %.

Отработанный катализатор подвергают регенерации и повторно используют в производстве ЭТБЭ. Срок службы катализатора зависит от чистоты используемого сырья и достигает трех лет.

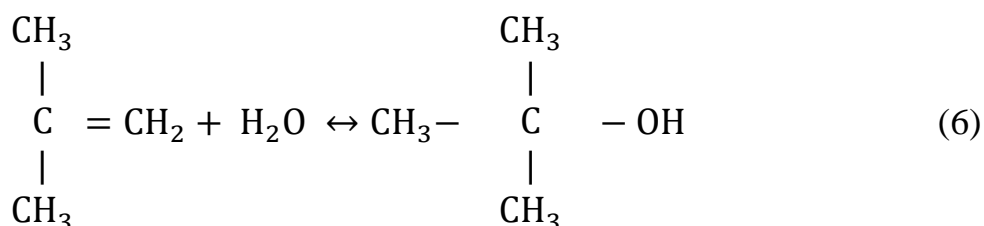
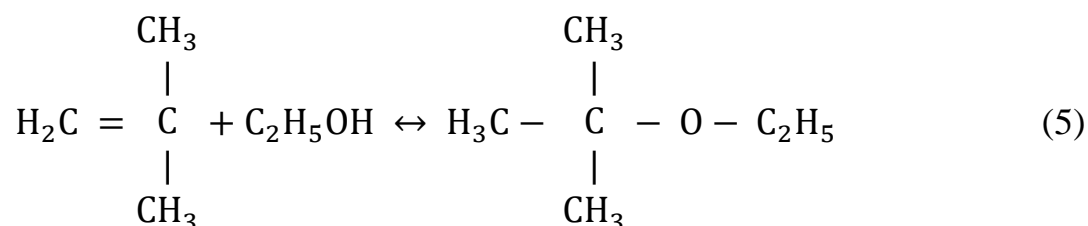
Основные физико-химические и топливные свойства ЭТБЭ приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Физико-химические и топливные характеристики ЭТБЭ

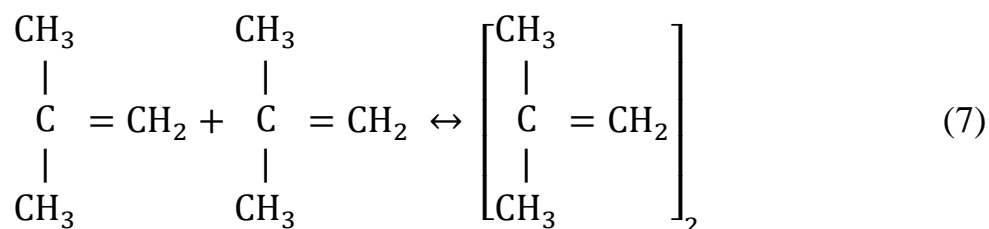
Показатели	
Молекулярная масса	102
Цвет	Бесцветная прозрачная жидкость с эфирным запахом
Температура замерзания, °С	- 97
Температура кипения, °С	73
Плотность при 20 <sup>0</sup> С, кг/м <sup>3</sup>	742
Давление насыщенных паров при 38 <sup>0</sup> С, кПа	20.7
Максимально допустимое содержание в бензине, % (мас.)	15
Растворимость в воде, % при 20 <sup>0</sup> С	0,1
ОЧИ	119
ОЧМ	105

## 2.2 Материальный баланс реактора синтеза ЭТБЭ

В ректоре происходит три реакции, в которых участвует изобутилен:







Мощность установки по ЭТБЭ 10 тысяч тонн в год.

Суточная производительность установки:

$$G_{\text{сут}} = (10\ 000)/365 = 27\text{т} / (\text{сут}) = 1125 \text{ кг/ч}$$

Количество образующегося ЭТБЭ:

$$G_{\text{ЭТБЭ}} = G_{\text{сут}} / M_{\text{ЭТБЭ}} \quad (8)$$

$$G_{\text{ЭТБЭ}} = (1125)/102 = 11 \text{ кмоль/ч}$$

Требуемое количество изобутилена по уравнению:

$$G_{(\text{и-бутилен}1)} = g_{(\text{ЭТБЭ})} = 11 \text{ кмоль/ч}$$

$$G_{(\text{и-бутилен}1)} = g_{(\text{и-бутилен}1)} \cdot M_{(\text{и-бутилен})} \quad (9)$$

$$G_{(\text{и-бутилен}1)} = 11 \cdot 56 = 616 \text{ кг/ч}$$

Конверсия изобутилена по целевой реакции составляет 98,2%.

Рассчитаем общее количество изобутилена в составе фракции C<sub>4</sub>:

$$G_{(\text{и-бутилен общ})} = 616/0,982 = 627 \text{ кг/ч}$$

$$g_{(\text{и-бутилен общ})} = 627/56 = 11,20 \text{ кмоль/ч}$$

Количество непрореагировавшего изобутилена составляет 0,4%:

$$G_{(\text{и-бутилен ост})} = 627 \cdot 0,004 = 2,5 \text{ кг/ч}$$

$$g_{(\text{и-бутилен ост})} = 2,5/56 = 0,04 \text{ кмоль/ч}$$

Количество изобутилена, пошедшего на побочные реакции:

$$G_{(\text{и-бутилен}2)} = G_{(\text{и-бутилен общ})} - G_{(\text{и-бутилен}1)} - G_{(\text{и-бутилен ост})} \quad (10)$$

$$G_{(\text{и-бутилен}2)} = 627 - 616 - 2,5 = 8,5 \text{ кг/ч}$$

$$g_{(\text{и-бутилен}2)} = 8,5/56 = 0,15 \text{ кмоль/ч}$$

Рассчитаем количество побочных продуктов:

$$g_{((\text{CH}_3)_3\text{C-OH})} = g_{(\text{и-бутилен})}$$

$$g_{((\text{CH}_3)_3\text{C-OH})} = 0,15/4 = 0,03 \text{ кмоль/ч}$$

$$G_{((\text{CH}_3)_3\text{C-OH})} = 0,03 \cdot 74 = 2,22 \text{ кг/ч}$$

$$g_{((\text{CH}_3)_2\text{C} = \text{CH}_2)_2} = g_{(\text{и-бутилен})} / 2 \quad (11)$$

$$g_{((\text{CH}_3)_2\text{C} = \text{CH}_2)_2} = 0,15/8 = 0,02 \text{ кмоль/ч}$$

$$G_{((CH_3)_2C=CH_2)}=0,02 \cdot 112=2,24 \text{ кг/ч}$$

Изобутилен приходит в составе  $C_4$ -фракции, содержащей: изобутилена 18,2%; н-бутилен 8,1%; изобутана 36,85%; н-бутана 36,85%. Рассчитаем количество углеводородов, вносимых в реактор фракцией  $C_4$ :

$$G_{(н\text{-бутилен})}=627 \cdot 0,081/0,182=279 \text{ кг/ч}$$

$$g_{(н\text{-бутилен})}=279/56=5 \text{ кмоль/ч}$$

$$G_{(н\text{-бутан})}=G_{(н\text{-бутан})}=627 \cdot 0,3685/0,182=1270 \text{ кг/ч}$$

$$g_{(н\text{-бутан})}=g_{(н\text{-бутан})}=(1270)/58=21,9 \text{ кмоль/ч}$$

Мольное соотношение этанол/изобутилен равно 1,1. Рассчитаем количество этанола, вносимого в реактор:

$$g_{CH_3CH_2OH}=1,1 \cdot g_{(н\text{-бутилен общ})} \quad (12)$$

$$g_{CH_3CH_2OH}=1,1 \cdot 11,20=12,32 \text{ кмоль/ч}$$

$$G_{CH_3CH_2OH}=12,32 \cdot 46 = 566,72 \text{ кг/ч}$$

Количество этанола, пошедшего на образование ЭТБЭ:

$$g_{CH_3CH_2OH}=g_{(н\text{-бутилен})}=11 \text{ кмоль/ч}$$

$$G_{CH_3CH_2OH}=11 \cdot 46 = 506 \text{ кг/ч}$$

Количество непрореагировавшего этанола:

$$g_{(CH_3CH_2OH_{ост})}=12,32-11=1,32$$

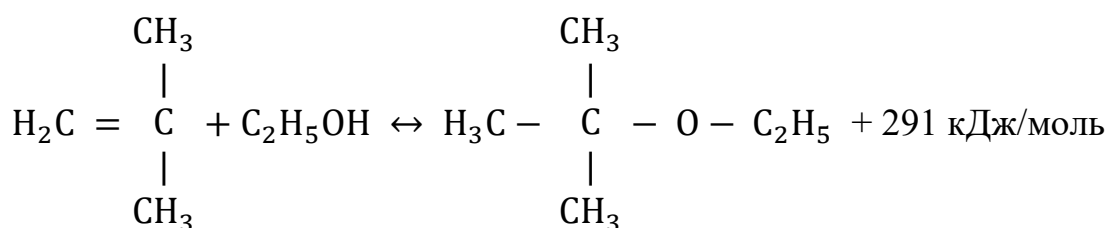
$$G_{(CH_3CH_2OH_{ост})}=1,32 \cdot 46=60,72 \text{ кг/ч}$$

Материальный баланс реактора синтеза ЭТБЭ приведен в таблице 4.

Таблица 4 - Материальный баланс реактора

Приход				Расход			
Вещество	кмоль/ч	кг/ч	%	Вещество	кмоль/ч	кг/ч	%
Этанол	12,32	566,72	10,26	ЭТБЭ	11	1125	25,21
Изобутилен	11,20	627	16,33	Этанол	1,32	60,72	1,10
н-бутилен	5	279	7,27	Изобутилен	0,04	2,5	0,06
Изобутан	21,9	1270	33,07	н-бутилен	5	279	7,26
н-бутан	21,9	1270	33,07	Изобутан	21,9	1270	33,07
				н-бутан	21,9	1270	33,07
				(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> C-OH	0,46	2,22	0,08
				[(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> C = CH <sub>2</sub> ] <sub>2</sub>	0,23	2,24	0,06
				Потери		1,04	0,09
Итого:	72,32	4012,72	100,0	Итого:	61,85	4012,72	100

### 2.3 Тепловой баланс реактора



По уравнениям найдем количество тепла, выделяемое в результате реакции:

$$\begin{aligned}
 Q_p &= g_{\text{и-бутилен1}} \cdot 291 & (13) \\
 Q_p &= 11000 \cdot 291 = 3201000 \text{ кДж/моль}
 \end{aligned}$$

Температура сырья составляет 50°C (323 К). Найдем теплоемкости отдельных компонентов при данной температуре [19]:

$$\begin{aligned}
 C_{\text{этанол}} &= 2,600 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}; & (14) \\
 C_{\text{и-бутилен}} &= 2,456 \text{ кДж/кг} \cdot \text{°C};
 \end{aligned}$$

$$C_{\text{н-бутилен}} = 2,388 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C};$$

$$C_{\text{и-бутан}} = 2,495 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C};$$

$$C_{\text{н-бутан}} = 2,441 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C};$$

Физическое тепло поступающих в реактор веществ:

$$Q = c \cdot G \cdot T \quad (15)$$

$$Q_{\text{этанол}} = 2,600 \cdot 566,72 \cdot 303 = 446462 \text{ кДж/ч};$$

$$Q_{\text{и-бутилен}} = 2,456 \cdot 627 \cdot 30 = 46197 \text{ кДж/ч};$$

$$Q_{\text{н-бутилен}} = 2,388 \cdot 279 \cdot 30 = 19987 \text{ кДж/ч};$$

$$Q_{\text{и-бутан}} = 2,495 \cdot 1270 \cdot 30 = 95059 \text{ кДж/ч};$$

$$Q_{\text{н-бутан}} = 2,441 \cdot 1270 \cdot 30 = 93002 \text{ кДж/ч}.$$

Суммарное тепло, вносимое в реактор реагентами:

$$Q_{\text{вх}} = Q_{\text{этанол}} + Q_{\text{и-бутилен}} + Q_{\text{н-бутилен}} + Q_{\text{и-бутан}} + Q_{\text{н-бутан}} \quad (16)$$

$$Q_{\text{вх}} = 446462 + 46197 + 19987 + 95059 + 93002 = 700707 \text{ кДж/ч}.$$

Общее количество теплоты, поступающей в реактор:

$$Q_{\text{пр}} = Q_{\text{р}} + Q_{\text{вх}} \quad (17)$$

$$Q_{\text{пр}} = 3201000 + 700707 = 3901707 \text{ кДж/ч}.$$

Продукты реакции уходят с температурой  $65^\circ\text{C}$  (338 K). Теплоемкости веществ, покидающих реактор с данной температурой:

$$C_{\text{ЭТБЭ}} = 2,1 \text{ кДж/кг} \cdot \text{K}; \quad (18)$$

$$C_{\text{этанол}} = 2,600 \text{ кДж/кг} \cdot \text{K};$$

$$C_{\text{и-бутилен}} = 2,463 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C};$$

$$C_{\text{н-бутилен}} = 2,395 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C};$$

$$C_{\text{и-бутан}} = 2,575 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C};$$

$$C_{\text{н-бутан}} = 2,521 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C};$$

$$C_{\text{(CH}_3\text{)}_3\text{C-OH}} = 2543 \text{ Дж/кг} \cdot \text{K};$$

$$C_{\text{[(CH}_3\text{)}_2\text{C=CH}_2\text{]}} = 2521 \text{ Дж/кг} \cdot ^\circ\text{C}.$$

Физическое тепло покидающих реактор веществ:

$$Q_{\text{ЭТБЭ}} = 2,1 \cdot 1125 \cdot 313 = 739462 \text{ кДж/ч};$$

$$Q_{\text{этанол}} = 2,600 \cdot 60,72 \cdot 40 = 6315 \text{ кДж/ч};$$

$$Q_{\text{и-бутилен}} = 2,463 \cdot 2,5 \cdot 40 = 246 \text{ кДж/ч};$$

$$Q_{\text{н-бутилен}} = 2,395 \cdot 279 \cdot 40 = 26728 \text{ кДж/ч};$$

$$Q_{\text{и-бутан}} = 2,575 \cdot 1270 \cdot 40 = 130810 \text{ кДж/ч};$$

$$Q_{\text{н-бутан}} = 2,521 \cdot 1270 \cdot 40 = 128067 \text{ кДж/ч};$$

$$Q_{\text{(CH}_3\text{)}_3\text{C-OH}} = 2,543 \cdot 2,22 \cdot 40 = 226 \text{ кДж/ч};$$

$$Q_{\text{[(CH}_3\text{)}_2\text{C=CH}_2\text{]}} = 2,521 \cdot 2,24 \cdot 40 = 226 \text{ кДж/ч}.$$

Суммарное тепло покидающих реактор веществ:

$$Q_{\text{ВЫХ}} = \sum Q_{\text{прод}} \quad (19)$$

$$Q_{\text{ВЫХ}} = 739462 + 6315 + 246 + 26728 + 130810 + 128067 + 226 + 226 = 103208$$

кДж/ч.

Потери тепла в реакторе примем равными 5% от общего:

$$Q_{\text{потерь}} = 0,05 \cdot 3901707 = 195085,35 \text{ кДж/ч.}$$

Тепло, которое необходимо уводить из реактора для поддержания  $T_{\text{ВЫХ}} = 338 \text{ К}$ :

$$Q_{\text{отв}} = Q_{\text{пр}} - Q_{\text{расх}} - Q_{\text{потерь}} \quad (20)$$

$$Q_{\text{отв}} = 3901707 - 103208 - 195085,35 = 3603413,35 \text{ кДж/ч.}$$

Избыточное тепло отводится водой. Рассчитываем количество воды необходимое для отвода теплоты. Примем, что начальная температура воды 25°C, конечная температура 65°C тогда:

$$G_{\text{H}_2\text{O}} = Q_{\text{отв. т}} / C(T_2 - T_1). \quad (21)$$

$G_{\text{H}_2\text{O}} = 3603413,35 / (4,19 \cdot (65 - 25)) = 21\,405 \text{ кг/ч.}$  Результаты приведены в таблице 5.

Таблица 5- Тепловой баланс реактора синтеза ЭТБЭ

Приход, Q кДж/ч		Расход, Q кДж/ч	
Этанол	446462	ЭТБЭ	739462
изо-бутилен	46197	этанол	6315
н-бутилен	19987	изо-бутилен	246
изо-бутан	95059	н-бутилен	26728
н-бутан	93002	изо-бутан	130810
$Q_p$	3201000	н-бутан	128067
		$(\text{CH}_3)_3\text{C-OH}$	226
		$[(\text{CH}_3)_2\text{C} = \text{CH}_2]_2$	226
		Потери	2869627
		Отводимое тепло	3603413,35
Итого:	3901707	Итого:	3901707

## 2.4 Расчет основных размеров реактора

Расчет проведен по методике [19].

Объем катализатора, находящегося в реакторе:

$V_k = V_c / \omega$ , где  $V_c$  – объемный расход сырья, м<sup>3</sup>/ч;  
 $\omega$  – объемная скорость подачи сырья, ч<sup>-1</sup>.

Объем сырья:

$$V_c = V_{\text{этанол}} + V_{\text{ББФ}} \quad (22)$$

$$V_{\text{этанол}} = G_{\text{этанол}} \cdot \rho \quad (23)$$

$$V_{\text{ББФ}} = G_{\text{ББФ}} / \rho \quad (24)$$

$$V_{\text{этанол}} = 566,72 / 781 = 0,72 \text{ м}^3/\text{ч}; V_{\text{ББФ}} = 28480 / 532 = 53,5 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$V_c = 53,5 + 0,72 = 54,22 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$V_k = 54,22 / 2 = 27,11 \text{ м}^3.$$

Общее число трубок (N) в реакторе:

$N = V_k / (0,785 \cdot l \cdot d^2)$ , где  $l$  – длина трубки, 6 м;  $d$  – внутренний диаметр трубки, 0,1 м.

$$N = 27,11 / (0,785 \cdot 6 \cdot 0,1^2) = 575 \text{ шт.}$$

Число трубок (n), расположенных по диаметру реактора:

$$n = \sqrt{((4 \cdot N - 1) / 3)} = \sqrt{((4 \cdot 575 - 1) / 3)} = 16 \text{ шт}$$

Диаметр реактора

$D = (n + 1) \cdot b$ , где  $b$  – расстояние между центрами трубок (150 мм).

$$D = (16 + 1) \cdot 0,15 = 2,55 \text{ м}$$

Высота реактора:

$$H = D \cdot 1,8 \quad (25)$$

$$H = 2,55 \cdot 1,8 \approx 5 \text{ м}$$

Геометрические размеры реактора определены.

### 3 Автоматизация и управление процессом

Политика управления действием для реакционной ректификационной колонны нацелена в поддержании наибольшего уровня переоплощения изобутилена, а также аккуратности ЭТБЭ. Модель автоматизации повергнута в рисунке 2.

Непрерывное определение сведений величин потребует существенного размера данных. Разработками [8], [21] было представлено, то что разница температур реакционной части и температура нижней части колонны имеют все шансы быть довольно четкими признаками уровня переоплощения ИБ и аккуратности ЭТБЭ, также характеризовать их прямолинейным способом во округи их наибольших смыслов (рис.2).

Данное дает возможность, невзирая в очевидно нелинейный вид хода, формировать руководство в элементарном составляющем прямолинейного прогностического контролирования (MPC).

Начальные данные к компоненту MPC 11 считается разница температур среди основанием, а также окончанием консервативной доли – тарелки 22 и 42 – и температура нижней части колонны – тарелочка 46 –. Регулируют потребление флегмы из емкости созыва дистиллята E -2 клапаном поз. 11/2, а также потребление водяного пара в кипятильник T-1 клапаном поз. 11/1.

Потребление обратной охлаждающей воды в конденсатор T -2 регулируется нажимом в емкости E-2 компонентом PRC 15. Потребление дистиллята регулируется уровнем жидкости в той же емкости элементом LRC 16. Потребление и структура флегмы в колонну K-1 фиксируется компонентами FR 14 и QR 15.

С целью ситуации большого увеличения температуры реакционной доли специализирована передачами сигналов компонентом TRSA 10 согласно верхнему требованию степени 95 °С, а также с выключениями расходов пара в кипятильнике T-1 поз. 10 согласно верхнему аварийному уровню 100 °С. Разность давления посредством реакционную часть фиксируется компонентом PDR 17 и специализирована передача сигналов согласно верхнему предупредительному уровню элементом PDA 17. Температура и давление различных пунктов фиксируется компонентами TR 12 и PR 18.

Потребление питания регулируется степенью воды в емкости созыва товаров из реактора P-1 элементом LRC 1. Фиксируют его структура и потребление компонентами QR 18, а также FR 2. Потребление повторного этанола регулируется компонентом FRC 9.

Потребление товарного ЭТБЭ регулируется степенью воды в кубе колонны K-1 компонентом LRC 3; потребление и структура фиксируют компонентами QR 5 и FR 4. Структура побочного отбора фиксируют компонентом QR 7 и его потребление регулируется компонентом FRC 8.

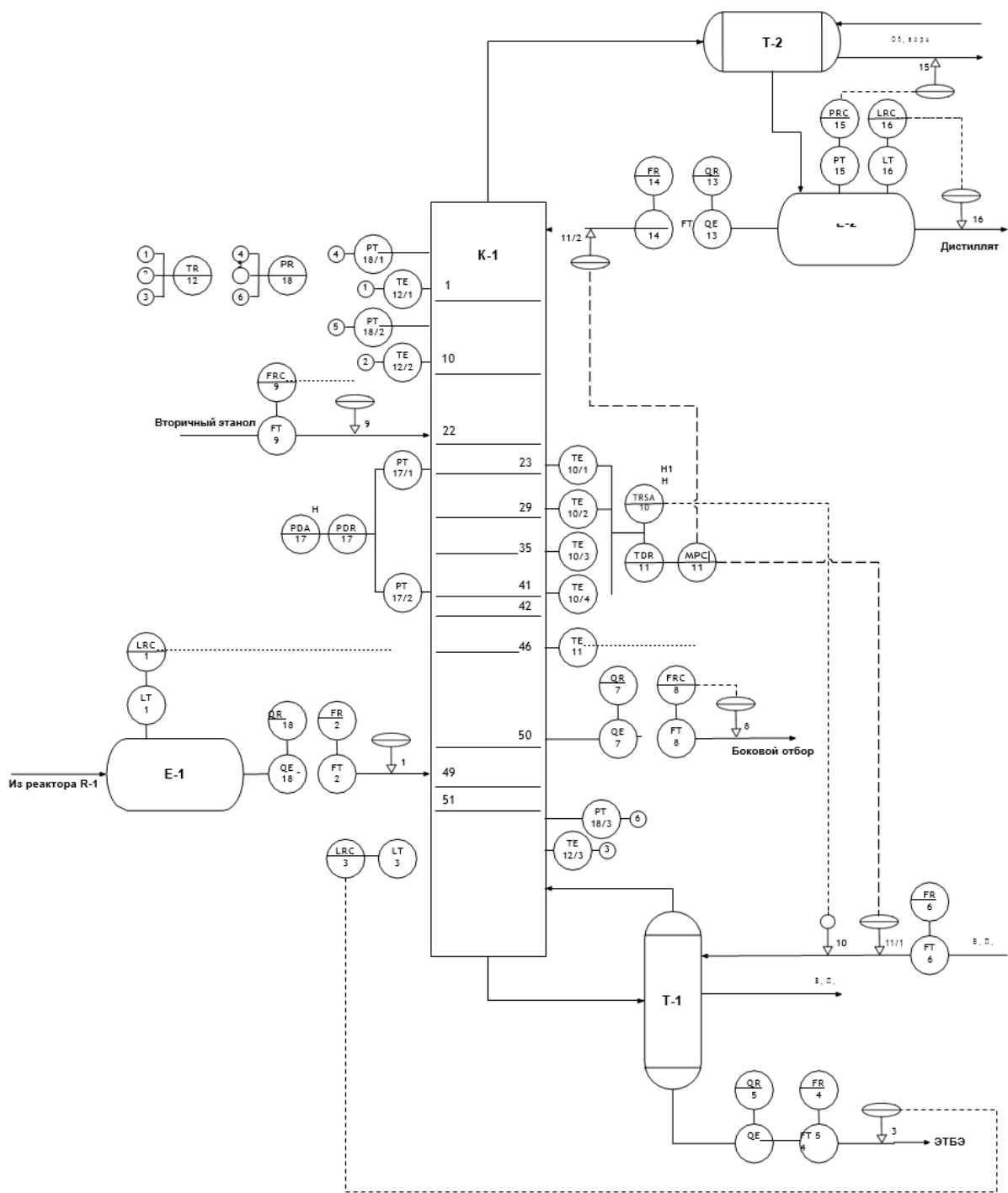


Рисунок 2 – Схема автоматизации и управления процессом



## 4 Экономическая часть

### 4.1 Анализ конкурентных технических решений

В возможности более результативным является формирование больших биохимических комплексов, содержащих целую производственную цепочку-изготовление материала с целью извлечения топливного этанола, изготовление этанола, а также изобутиленовой фракции (в базе изобутана либо н-бутана) и непосредственно синтез ЭТБЭ. Вопрос состоит в том, что в нынешнее время период в Российской Федерации не имеется потребность на ЭТБЭ из-за его значительной цены по сравнению с МТБЭ и в недостатке законодательных действий, стабилизирующих обращение этилового спирта с целью изготовления ЭТБЭ (Таблица 5).

Таблица 5 - Оценивающая схема для сравнения конкурентноспособных промышленных заключений (исследований)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Конкурентоспособность
		Б <sub>ф</sub>	К <sub>ф</sub>
1	2	3	4
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>			
1. Производительность	0,15	3	0,45
2. Энергоэкономичность	0,1	4	0,4
3. Надежность	0,1	5	0,5
4. Уровень шума	0,05	5	0,25
5. Безопасность	0,2	4	0,8
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>			
6. Конкурентоспособность продукта	0,2	5	1
7. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	3	0,3
8. Послепродажное обслуживание	0,05	3	0,15
9. Наличие сертификации разработки	0,05	2	0,1
<b>Итого</b>	1		3,96

Б<sub>ф</sub> – узел синтеза ЭТБЭ текущей исследовательской работы

## 4.2 Расчет материальных затрат НТИ

Таблица 6 – Материальные затраты

Наименование	Ед. изм.	Количество	Цена за ед. с НДС, тг	Затраты на материалы, (З <sub>м</sub> ), тг
Этанол	кг	682	108	736567
Изобутилен	кг	1194	72	859687
Катализатор	кг	3750	300	11250007
Итого				12846261

## 4.3 Расчет затрат на специальное оборудование

В этот проект входит все затраты, связанные с получением особого оборудования, требуемого с целью выполнения работ согласно определенной теме. Установление цены спецоборудования выполняется согласно функционирующим прейскурантам, а в ряде случаев по условной стоимости. Вычисление расходов по данному проекту заносится в таблицу.

При приобретении спецоборудования следует учитывать согласно его доставке, а также монтажу в объеме 20% от его стоимости.

Все вычисления представлены в таблице.

Таблица 7 – Вычисление бюджета на получение спецоборудования.

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тг	Общая стоимость оборудования, тг
1	Реактор	1	127127797	127127797
2	Ректификационная колонна	3	316624067	949872203
Итого				1077000000

Таблица 8. Общие капитальные затраты

Название	Капитальные затраты, тг
Аппараты и устройства	290000000
Здания и сооружения	770000000
АСУ ТП	150000000
Итого	1210000000

Нужное для обслуживания сервиса технологической конструкции число сотрудников для одной смены составляет 37.

Объем ежегодного получаемого очищенного этанола составляет 11 437 м<sup>3</sup>/год. Цена 1м<sup>3</sup> этанола составляет 3420 тенге. Годичный доход эквивалента 460000000. Главные технико-финансовые характеристики технологической

конструкции показаны в таблице 9. Отталкиваясь из данных сведений, возможно полагаться на эффективность изготовления, а также периоду окупаемости вложения.

Рентабельность производства:  
 $460000000 \cdot 100\% / 1620000000 = 28.3\%$

Срок окупаемости:  
 $1620000000 / 460000000 = 3 \text{ года } 5 \text{ месяцев}$

Таблица 9. Техничко-экономические показатели установки

Основные показатели, единица измерения	Значение
Мощность установки по ЭТБЭ, м <sup>3</sup> /год	10000
Количество работников, человек	27
Заработная плата, тг/человека	721000
Капитальные затраты, тг	1210000000
Затраты на проектирование, тг	770000000
Строительно-монтажные работы, тг	290000000
Стоимость продукта, тг/м <sup>3</sup>	3420
Общая прибыль, тг	460000000
Рентабельность производства, %	28.3
Срок окупаемости, лет	3.5

## 5 Производственная и экологическая безопасность

Производственная безопасность обуславливается как совокупность событий согласно обеспечиванию защищенности в случае появления небезопасных условий, также содержит в себе безопасность, не опасную эксплуатацию оснащения, не опасное течение научно-технических действий, защищенность передвижения грузов и защищенность передвижения персонала согласно местности компании [17].

Изготовление этил – трет – бутилового эфира никак не считается безотходным действием. Природоохрана данного изготовления содержит в себе трудности засорение атмосферы, гидросферы и литосферы.

### 5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Более вредоносные производственные условия – повышенная либо пониженная температура рабочей области, высокие степени гула и пульсации в трудовом участке, неудовлетворительная освещенность работников зон, взрывы, пожары и др. могут появиться при обслуживании научно-технического хода.

### 5.2 Вредные вещества

В следствии реакционной ректификации совершается отклик, но потом распределение товаров. В таблице показан список вредоносных элементов, а также группа угрозы, но кроме того оценка их токсичности в соответствии с ГОСТ 12.1.0076. Вредоносные элемента. Систематизация и единые условия защищенности [18].

Таблица 10 – Характеристика вредных веществ

Наименование вещества	Величина ПДК в воздухе рабочей зоны, мг/м <sup>3</sup>	Класс опасности	Характеристика токсичности
Двуокись азота	0,085	2	В присутствии значительных концентрациях бурый газ с удушливым ароматом. Функционирует как сильный возбудитель. Но присутствие этих концентрациях, которые содержатся в атмосфере, NO <sub>2</sub> считается точнее возможным раздражителем и только лишь вероятно ее возможно сопоставлять с хроническими легочными болезнями.
Оксид углерода (II)	20	4	Угарный газ очень опасен, так как не имеет не обладает аромата и порождает интоксикация, в том числе и гибель. Свойства кишечной инфекции: головная боль и головокружение; одышка, учащённое сердцебиение, сверканье пред очами, краснота личности, единое бессилие, рвота, в тяжких вариантах судороги, утрата рассудки.

Оксид серы (IV)	10	2	SO <sub>2</sub> весьма токсичен. Признаки присутствия отравлении сернистым газом — ринит, покашливание, сиплость, весьма значительное першение в горле и особый вкус. При вдыхании сернистого газа наиболее значительной концентрация— асфиксия, нарушение выстуления, препятствие глотания, тошнота, вероятен острый отёк лёгких. Присутствие временном При кратковременном вдыхании проявляет весьма значительно нервирующий процесс, порождает покашливание и першение в горле.
Изобутилен	100	4	изобутилен токсичен; при этом интенсивность воздействия находится в зависимости от личных отличительных черт организма, а также концентрации изобутилена. Первоначальные свойства кишечной инфекции выражаются в расстройстве желудка, но ряд позже — в головных болях и тошноте. Последующий этап характеризуется расстройством зрения и утратой рассудки. Продолжительное нахождение в загазованном помещении способен послужить причиной к летальному финалу.

В производственных помещениях необходимо содержать аптечки, оснащенные медикаментами, с целью предложения первой доврачебной поддержки.[19]

Любой сотрудник либо клиент производства гарантируется соответствующими орудиями охраны:

- головы (каска);
- органов дыхания (изолирующие респирационные устройства, противогазы, респираторы);
- лица и органов зрения (лицевые щитки, защитные очки, прозрачные экраны);
- кожи рук (защитные перчатки, рабочие рукавицы).
- с целью охраны шкурки рук используют предохранительные варежки, мази и пасты согласно ГОСТ 12.4.068.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе проведен расчет материального и теплового балансов и конструктивный расчет на основе которого выполнен чертеж основного аппарата – реактора синтеза ЭТБЭ. Исходя из цели работы выполнены следующие задачи:

1. Проведен сравнительный анализ существующих технологии производства трет-бутиловых эфиров, оборудование для осуществления процесса, катализаторы;

2. Обосновано преимущества ЭТБЭ и его применение в качестве основной октаноповышающей присадкой к моторным топливам;

3. Предложено и обосновано использование в качестве катализатора сульфокатионит Amberlyst 36, что позволит повысить конверсию изобутилена, увеличить производительность реактора, снизить рабочую температуру процесса;

4. Выбранный для синтеза ЭТБЭ способ позволяют увеличить селективность процесса и снизить количество побочных продуктов.

Применение выше предложенной технологии в Казахстанских НПЗ позволит заменить широко используемый и экологический вредный МТБЭ на биоразлагаемый в природе и получаемого из биоэтанола (растительного сырья) ЭТБЭ.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 C. J. Cleveland and C. Morris, "Dictionary of Energy (Expanded Edition)." Elsevier, 2009.
- 2 R. van Basshuysen and F. Schäfer, Internal Combustion Engine Handbook - Basics, Components, System, and Perspectives, 2nd Edition. Pennsylvania: SAE International, 2016.
- 3 K. F. Yee, A. R. Mohamed, and S. H. Tan, "A review on the evolution of ethyl tert-butyl ether (ETBE) and its future prospects," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 22, pp. 604–620, 2013.
- 4 Y. Le Digabel and S. Demanèche, "Ethyl tert-butyl ether (ETBE)-degrading microbial communities in enrichments from polluted environments," *J. Hazard. Mater.*, vol. 279, pp. 502–510, 2014.
- 5 F. Fayolle-Guichard et al., "Study of an aquifer contaminated by ethyl tert-butyl ether (ETBE): Site characterization and on-site bioremediation," *J. Hazard. Mater.*, vol. 201–202, pp. 236–243, 2012.
- 6 P. Leprince, *Petroleum Refining, Volume 3 - Conversion Processes*. Editions Technip, 2001.
- 7 Без автора, "A Japanese push for bio-ETBE over bioethanol," *Chem. Eng.*, vol. 116, no. 12, 2009.
- 8 M. G. Sneesby, M. O. Tade, R. Datta, and T. N. Smith, "ETBE synthesis via reactive distillation .1. Steady-state simulation and design aspects," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 36, no. 5, pp. 1855–1869, 1997.
- 9 E. W. de Menezes and R. Cataluña, "Optimization of the ETBE (ethyl tert-butyl ether) production process," *Fuel Process. Technol.*, vol. 89, no. 11, pp. 1148–1152, 2008.
- 10 M. Umar, D. Patel, and B. Saha, "Kinetic studies of liquid phase ethyl tert-butyl ether (ETBE) synthesis using macroporous and gelular ion exchange resin catalysts," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 64, no. 21, pp. 4424–4432, 2009.
- 11 L. Domingues, C. I. C. Pinheiro, and N. M. C. Oliveira, "Optimal design of reactive distillation systems: Application to the production of ethyl tert-butyl ether (ETBE)," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 64, pp. 81–94, 2014.
- 12 C. Marcilly, *Acido-Basic Catalysis, Volume 2 - Application to Refining and Petrochemistry*. Editions Technip, 2006.
- 13 Y. H. Jhon and T. hee Lee, "Dynamic simulation for reactive distillation with ETBE synthesis," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 31, no. 3, pp. 301–317, 2003.
- 14 C. Marcilly, "9.4.2.3 ETBE Synthesis," in *Acido-Basic Catalysis, Volume 2 - Application to Refining and Petrochemistry*, Editions Technip, 2006.
- 15 C. A. González-Rugerio, R. Fuhrmeister, D. Sudhoff, J. Pilarczyk, and A. Górak, "Optimal design of catalytic distillation columns: A case study on synthesis of TAEE," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 92, no. 3, pp. 391–404, 2014.

- 16 dC. P. Almeida-Rivera, P. L. J. Swinkels, and J. Grievink, "Designing reactive distillation processes: present and future," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 28, no. 10, pp. 1997–2020, 2004.
- 17 Патент РФ 2259992 С1. Способ получения этил-трет-бутилового эфира. ООО «Еврохим-СПб-Трейдинг». Оpubл. 24.05.2005.
- 18 Технологический регламент установки синтеза ЭТБЭ ООО «Сибур Тольятти».
- 19 Справочник химика, том 1. Под ред. Б. П. Никольского, Л: Химия, 1966г.
- 20 Рудин М.Г., Смирнов Г.Ф. Проектирование нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов. 1984.
- 21 R. Khaledi and B. R. Young, "Modeling and Model Predictive Control of Composition and Conversion in an ETBE Reactive Distillation Column," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 44, no. 9, pp. 3134–3145, 2005.



# ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Сборочный чертеж реактора

выполнено в студенческой версии программы AutoCAD

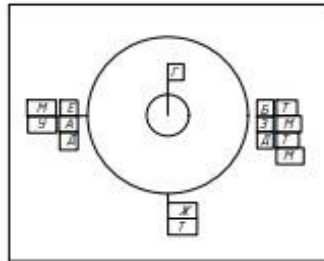
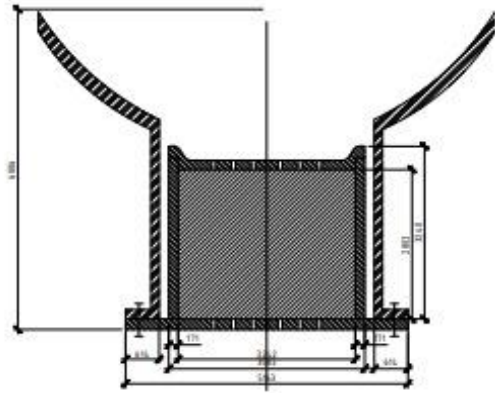
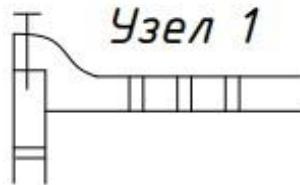
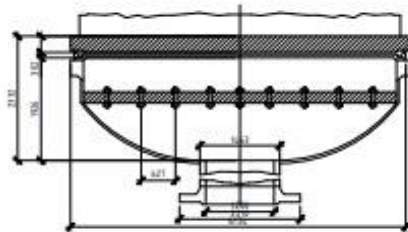


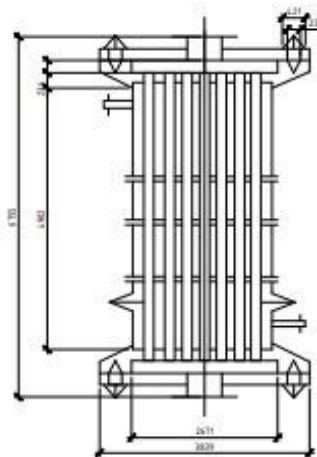
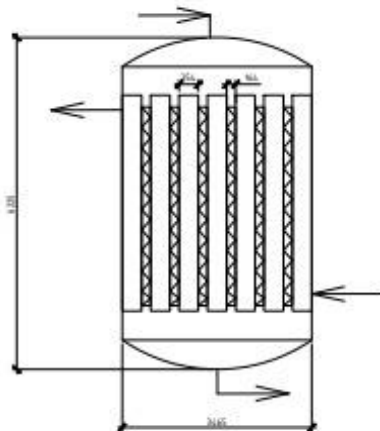
Таблица штуцеров

Об-ние	Наименование	Кол-во	Проход условный D, мм	Давление условное P, МПа
А	Вход питания	1	100	1,6
Б	Вход флегмы	1	125	1,6
В	Вход пара	1	150	1,6
Г	Выход паров дистиллята	1	150	1,6
Д	Выход кубового остатка	1	150	1,6
Е	Вход втор-ого. этанола	1	100	1,6
Ж1-4	Люк	4	600	1,6
З	Выход бокового отбора	1	100	1,6
Т1-8	Термометр	8	50	1,6
М1-5	Выход бокового отбора	5	50	1,6
У1-2	Выход бокового отбора	2	50	1,6



*Технические характеристики*

1. Аппарат предназначен для синтеза и разделения ЭТБЭ, из изобутиленовой фракции С4 и этанола, после предварительной конверсии изобутилена до степени превращения 85% мол.;
2. Среда в аппарате коррозионная;
3. Температура в кубе - 155 °С
4. Давление верха - 1,0 МПа
5. Массовый расход питательной реагирующей смеси фракции С4 и этанола - 9000 кг/ч б. Тип реактора - трубчатый



КазНИТУ им. К.И.Сатпаева						
Разраб. Халихов С. Провер. Селенова Т.контр. Н.контр.	Подп.	Дата	Трубчатый реактор синтеза ЭТБЭ	Стадия	Листы	Лист
					У	1
Сборочный чертеж				ХТОВр 5В072100		