

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

---

Институт \_\_\_\_ Природных ресурсов \_\_\_\_\_  
Направление подготовки \_\_\_\_\_ Химическая технология \_\_\_\_\_  
Кафедра \_\_ ТОВПМ \_\_\_\_\_

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>«Проект узла полимеризации этилена»</b>

УДК 66.095.26.023:678.742.2

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2Д3А	Егошина Анастасия Владимировна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ротарь Ольга Васильевна	Кандидат химических наук		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Рыжакина Татьяна Гавриловна	Кандидат экономических наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Раденков Тимофей Александрович			

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ТОВПМ	Юсубов Мехман Сулейман-оглы	Профессор, доктор химических наук		

Томск 2017

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код Результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<b><i>Профессиональные компетенции</i></b>	
P1	Применять базовые и специальные, математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания в профессиональной деятельности
P2	Применять знания в области современных химических технологий для решения производственных задач
P3	Ставить и решать задачи производственного анализа, связанные с созданием и переработкой материалов с использованием моделирования объектов и процессов химической технологии
P4	Разрабатывать новые технологические процессы, проектировать и использовать новое оборудование химической технологии, проектировать объекты химической технологии в контексте предприятия, общества и окружающей среды
P5	Проводить теоретические и экспериментальные исследования в области современных химических технологий
P6	Внедрять, эксплуатировать и обслуживать современное высокотехнологичное оборудование, обеспечивать его высокую эффективность, <i>выводить на рынок новые материалы</i> , соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на химико-технологическом производстве, выполнять требования по защите окружающей среды.
<b><i>Универсальные компетенции</i></b>	
P7	Демонстрировать знания социальных, этических и культурных аспектов профессиональной деятельности.
P8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.
P9	<i>Активно</i> владеть <i>иностраннным языком</i> на уровне, позволяющем разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.
P10	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, <i>демонстрировать лидерство в инженерной деятельности и инженерном предпринимательстве</i> , ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.

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

---

Институт Природных ресурсов  
Направление подготовки (специальность) Химическая технология  
Кафедра ТОВПМ

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_  
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Бакалаврской работы
---------------------

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

Студенту:

Группа	ФИО
2Д3А	Егошина Анастасия Владимировна

Тема работы:

Проект узла полимеризации этилена
-----------------------------------

Утверждена приказом директора (дата, номер)	27.01.2017, 417/с
---	-------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	<i>Объектом исследования является технология получения СВМПЭ методом суспензионной полимеризации этилена в среде гептана с использованием металлоорганического катализатора (<math>nMgCl_2(mTiCl_4)</math>) и сокатализатора (<math>Al(C_2H_5)_3</math>) в реакторе оснащенном механической лопастной мешалкой и тепловой рубашкой. Процесс является непрерывным. Производительность составляет 1500 тонн/год.</i>
---------------------------------	--

<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	<i>Произведен обзор имеющихся способов получения полиэтилена, а так же технико-экономические предпосылки создания производства. Рассмотрены физико-химические основы процесса полимеризации этилена. Выполнены инженерные расчеты основного реактора полимеризации, предложены конструктивные решения. Проведен финансовый анализ проекта и выявлены опасные факторы и пути их устранения.</i>
<b>Перечень графического материала</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Технологическая схема</li> <li>2. Установка полимеризации этилена</li> <li>3. Детализованные изображения</li> </ol>
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Рыжакина Татьяна Гавриловна
Социальная ответственность	Раденков Тимофей Александрович

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ротарь Ольга Васильевна	Кандидат химических наук		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2Д3А	Егошина Анастасия Владимировна		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 82 страниц, 13 источников, 2 рисунка, 31 таблицу, 3 листа графических материалов.

Ключевые слова: СВМПЭ, суспензионная полимеризация, титаномагниевого катализатор, триэтилалюминий.

Объектом исследования является (ются) процесс суспензионной полимеризации этилена

Цель работы – расчет и проектирование установки получения сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) суспензионным способом с производительностью 1500 т/год.

В процессе исследования проводились расчет материально, теплового баланса и инженерные расчеты.

В результате исследования технико-экономических показателей, физико-химических основ, финансового менеджмента, ресурсоэффективности и ресурсосбережения, социальная ответственность.

В результате исследования была выбрана общая технологическая схема производства полиэтилена суспензионным способом, произведены материальные и тепловые и технологические расчеты основного аппарата, подобрано вспомогательное оборудование.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: полимеризация проводится суспензионным способом в ёмкостном реакторе диаметром 1400 мм, оснащённом тепловой рубашкой, турбинной мешалкой, сальниковым уплотнением

Сокращения сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), титаномагниевого катализатор (ТМК), триэтилалюминий (ТЭА)

## Содержание

Введение.....	8
1 Теоретическая часть.....	10
1.1 Физико-химические основы процесса .....	10
1.1.1 Выбор катализатора .....	10
1.1.2 Механизм ионно-координационной полимеризации этилена.....	14
1.1.3 Выбор растворителя.....	17
1.1.4 Роль температуры и давления.....	18
1.1.5 Кинетика закономерности катионной полимеризации .....	19
1.1.6 Термодинамика.....	20
1.2 Выбор способа производства полиэтилена .....	22
1.2.1 Полиэтилен высокого давления (ПЭВД) .....	22
1.2.2 Полиэтилен среднего давления (ПЭСД).....	24
1.2.3 Полиэтилен низкого давления (ПЭНД) .....	25
2 Объект и методы исследования .....	27
2.1 Характеристика производимой продукции .....	27
2.2 Описание технологической схемы .....	28
2.3 Характеристика используемого сырья.....	29
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение... 53	
4.1 Анализ конкурентных технических решений .....	53
4.2 SWOT-анализ.....	54
4.3 Планирование научно-исследовательских работ.....	55
4.3.1 Структура работ в рамках научного исследования.....	55
4.3.2 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований .....	56
4.3.3 Определение трудоемкости выполнения работ.....	56
4.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ) .....	63
4.4.1 Расчет материальных затрат НТИ.....	63
4.4.2 Расчет затрат на оборудование для научно-экспериментальных работ .....	65
4.4.3 Заработная плата исполнителей темы .....	65
4.4.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	68

4.4.5 Накладные расходы .....	69
4.4.6 Формирование бюджета затрат научно исследовательского проекта .....	69
4.5 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования .	70

## **Введение**

Мировой опыт свидетельствует, что степень химизации промышленности – это один из факторов развития экономики государства и показатель уровня научно – технического прогресса. За прошедший век были синтезированы сотни полимеров, и уже не один десяток полимерных материалов сменились другими. Но благодаря совокупности весьма ценных свойств и возможности расширения областей применения, полиолефины по объему выпускаемой продукции, на сегодняшний день, занимают первое место.

Наиболее распространёнными среди полиолефинов являются полиэтилен и полипропилен. Полиэтилен является лидером на мировом рынке полимерных материалов. Он занимает долю в 35% мирового производства.

Изделия из полиэтилена обладают высокой стойкостью, прочностью, нетоксичны и безвредны, эластичны и морозостойки, обладают высокими диэлектрическими показателями. Перерабатывается полиэтилен всеми известными для термопластами методами, и при этом не требует больших энергозатрат. Низкая себестоимость и широкий спрос обеспечиваются за счет доступности сырья и высокой эффективности процесса получения полиэтилена.

Последним достижением в области производства полиэтилена стало создание новой марки полиэтилена. Она характеризуется высокими показателями, что позволяет заменять более дорогие материалы и использовать полиэтилен для совершенно новых назначений. Из-за очень высокой молекулярной массы, новая марка получила название свехвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ).

Полимер имеет молекулярную массу от 1,5 млн. и выше. Такая высокая молекулярная масса придает комплекс специфических и технологических свойств. По сравнению со стандартными марками ПЭНД, он обладает более

высокими химическими и физико – механическими свойствами, стойкостью к ударным нагрузкам и растрескиванию, износостойкостью, способностью в широком интервале температур сохранять свои свойства.

Свойства полимера обуславливают и его особые области применения там, где другие термопласты не выдерживают жестких условий эксплуатации. Во многих случаях СВМПЭ заменяет металл (бронзу и сталь) и ряд других материалов. В некоторых областях потребления он используется как единственный пригодный материал, а не как заменитель. Сочетание превосходных свойств и низкой стоимости полимера непрерывно расширяют область применения СВМПЭ и потребность в нем.

Высокая механическая прочность с низким коэффициентом трения позволяют использовать СВМПЭ для изготовления кузовов автомобилей, бесшумных не смазываемых шестерен.

Химическая стойкость полимера позволяет применять его для изготовления аккумуляторов и сепараторов, деталей насосов в химической промышленности, прокладок для агрессивных сред.

Особая высокая прочность ориентированных волокон позволяет использовать его для изготовления бронежилетов, рыболовных тралов, парашютных строп.

Свойства материала и биологическая инертность позволяют применять его в виде эндопротезов крупных суставов в медицине и пищевой промышленности.

В настоящее время промышленный выпуск СВМПЭ отсутствует. Рост выпуска этого бесспорного ценного полимера сдерживается рядом трудностей. Прежде всего, в нашей стране не были отработаны производства эффективного катализатора. Другим сдерживающим фактором является некоторые трудности, связанные с переработкой СВМПЭ; невысокая текучесть этого полимера при переработке требует специального оборудования и некоторого опыта.

## **1 Теоретическая часть**

### **1.1 Физико-химические основы процесса**

#### **1.1.1 Выбор катализатора**

В основе производства СВМПЭ лежит ионно-координационный процесс полимеризации при низком давлении в присутствии металлоорганических комплексных катализаторов. Одним из компонентов является соединение переходного металла 4-8 групп Периодической системы, вторым - органическое соединение металла главных 1 – 3 групп. В процессе полимеризации различие каталитических систем проявляется как в получении полимеров с различными молекулярно – массовыми характеристиками, так и в их активности. Несмотря на большое разнообразие каталитических систем, общим для них является наличие химической связи между атомами переходного металла и углерода, образующейся при взаимодействии компонентов системы.

Промышленное применение нашли алкилы алюминия и галогениды титана. Образование активного центра (далее – АЦ) со связью металл – углерод происходит в результате взаимодействия титанового соединения с алкилом алюминия. Прочность металл – углеродной связи, имеющая существенное значение для процесса полимеризации полиэтилена, зависит от природы лигандов, лигандного окружения центрального атома, природы и валентности переходного металла, а так же ряда других факторов. Из металлов переменной валентности наиболее устойчивые органические соединения образует титан. Четырехвалентный титан дает более стабильные органические соединения органические соединения по сравнению с менее окисленным титаном. Степень окисления титана меняется в зависимости от времени, продолжительности взаимодействия с алюминийорганическим соединением, их мольного соотношения, времени и температуры. Более высокая степень окисления способствует переносу  $\beta$  – атома водорода. Поэтому при одинаковых условиях проведения процесса классический

катализатор Циглера–Натта, содержащий четырехвалентный титан, приводит к образованию полимера с меньшей молекулярной массой, чем катализатор содержащий  $Ti^{3+}$ .

Раньше для полимеризации этилена и получения линейного, высококристаллического полимера стали применять каталитические системы, которые состояли из  $TiCl_4$ , нанесенного на твердую поверхность одного из соединения магния (катализатор третьего поколения). Наиболее подходящим оказался  $MgCl_2$ , так как он имел соразмеряемую кристаллическую решетку с  $TiCl_4$ . Главным достоинством нанесенного катализатора является его высокая производительность (200-250 кг полимера на 1 г. катализатора), что позволяет производить процесс при низких концентрациях катализатора. Это выгодно, т. к. отпадает необходимость в операции разложения катализатора, нет стадии отмывки полимера от продуктов разложения, облегчается сушка полиэтилена. Активность нанесенных катализаторов обусловлена как химическим взаимодействием титана с носителем, выступающим в роли сложного лиганда при АЦ, так и большой поверхностью пористых носителей, покрытых катализатором.

С другой стороны, недостатком катализатора третьего поколения является неоднородность гранулометрического состава. Поэтому были разработаны катализаторы четвертого поколения, в которых в дисперсию  $TiCl_4$  в растворителе вначале добавляли алюминийорганическое соединение (далее – АОС), затем эта дисперсия наносилась на твердую поверхность  $MgCl_2$ , и после этого добавляют раствор АОС в растворителе. Это дает возможность получения полимера с удовлетворенным гранулометрическим составом и с высокой стереоспецифичностью.

Основной причиной высоких молекулярных масс СВМПЭ, полученного на нанесенных катализаторах, является малое значение константы скорости и большое значение константы скорости полимерных цепей в этом процессе. Активные центры на твердой поверхности носителя долго живут и в процессе полимеризации этилена на нанесенных

катализаторах маловероятно ограничение растущих цепей за счет бимолекулярного обрыва. Поэтому в отсутствие специально добавляемых агентов обрыва цепей катализаторы на носителях позволяют получать СВМПЭ с молекулярной массой до 4 000 000 и более.

Для полимеризации этилена в присутствии каталитической системы на основе  $TiCl_4$  важную роль играет сокатализатор – алкил алюминия. Он вступает в качестве алкилирующего агента для титана, в роли переносчика цепи восстанавливает активные центры и перехватывает случайные примеси в реакционной среде. Природа используемого сокатализатора влияет на ММР и молекулярную массу. При использовании заместителя у атома алюминия в АОС активность каталитического комплекса меняется в следующем порядке:



где R – алкильный радикал.

В той же последовательности изменяется восстановительная способность алкилов алюминия, и исходя из этого, их влияние на влияние повышение молекулярной массы полимера, образующегося при одинаковых условиях полимеризации.

В настоящее время установлено, что наиболее эффективным сокатализатором является ТЭА, т. к. при реакции с четыреххлористым титаном образуется в основном треххлористый титан и незначительное количество двуххлористого титана. А поскольку полимеризация этилена в присутствии катализатора на носителе не требует предварительного комплексообразования, катализатор и сокатализатор смешивают непосредственно в реакторе, то доля двуххлористого титана будет очень мала. При этом наблюдается не только достижение максимальной активности катализатора, но и большая стабилизация его активности с ростом давления мономера, высокий выход полимера с узким молекулярно-массовым распределением.

Помимо природы компонентов каталитического комплекса на кинетику полимеризации влияет и их соотношение. Выбор мольного соотношения

компонентов катализатора определяется требованиями, предъявляемыми к физико – механическим свойствам полимера. Для получения полиэтилена с молекулярной массой 100 000 – 850 000, соотношение триэтилалюминий и четыреххлористого титана должно соответствовать 1:0,8. Избыток металлоорганического соединения способствует восстановлению титана с малой скоростью, и гетерогенные каталитические системы к на носителе обладают очень высокой активностью. Увеличение  $TiCl_4$  приводит к уменьшению молекулярной массы до 20 000. При соотношении 1:1 получается полиэтилен, с трудом поддающийся экструзии, а при отношениях ниже 1:2 полиэтилен становится низкомолекулярным.

Вероятность переноса  $\delta$  – атома водорода при спонтанном обрыве или при обрыве цепи на мономер определяется природой металла и связанных с ним лигандов, а также степенью окисления металла. Так,  $\delta$  – перенос осуществляется легче, если в состав АЦ входит четырехвалентный, а не трехвалентный титан; соответственно и ограничение растущих макроцепей за счет  $\delta$  – гидридного переноса в большой степени происходит в первом случае.

Вследствие этого, что вероятность всех актов ограничения растущих цепей при полимеризации олефинов по координационно-анионному механизму невелика, в принципе может быть синтезирован полимер с очень высокой молекулярной массой. Обычно применяют специально добавляемые регуляторы молекулярной массы, в первую очередь водород

Водород, взаимодействуя с АЦ на конце растущей полимерной цепи, образует гидрид металла переменной валентности; отделившаяся при этом от АЦ макромолекула будет иметь на конце метильную группу. Естественно, что чем выше концентрация водорода в смеси с этиленом, тем ниже степень полимеризации полимера. При ограничении растущих цепей водородом скорость полимеризации несколько снижается, во-первых, из-за лимитирования ее медленной реакцией взаимодействия металлгидрида с олефином, а во-вторых, в результате снижения концентрации олефина при

добавлении в зону реакции водорода. Скорость обрыва цепи водородом примерно на два порядка выше, чем скорость всех других реакция обрыва цепи.

### 1.1.2 Механизм ионно-координационной полимеризации этилена

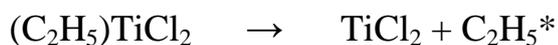
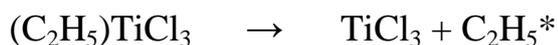
Механизм действия катализатора Циглера-Натта до сих пор является спорным, но сделано три обобщения, которые экспериментально обоснованы и общеприняты [1]:

1. Взаимодействие компонентов катализатора происходит с образование алкильных производных переходных металлов способных координировать молекулы мономера.

2. Координация молекул мономера происходит около атома переходного металла катализатора с образованием координационной связи между ними.

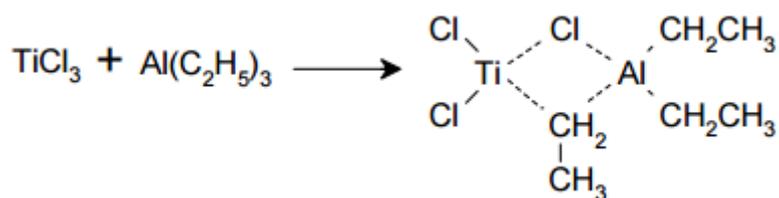
3. Процесс полимеризации протекает путем внедрения координированной молекулы мономера по связи металл – углерод между переходным металлом и последним звеном растущей полимерной молекулы.

В промышленности для полимеризации этилена используют преимущественно  $TiCl_4$  и триэтилалюминия. При взаимодействии  $TiCl_4$  и  $Al(C_2H_5)_3$  происходит восстановление  $Ti$  до 3-х и 2-х валентного через образование алкил-титан-хлоридов распадающихся с образованием этиловых радикалов.

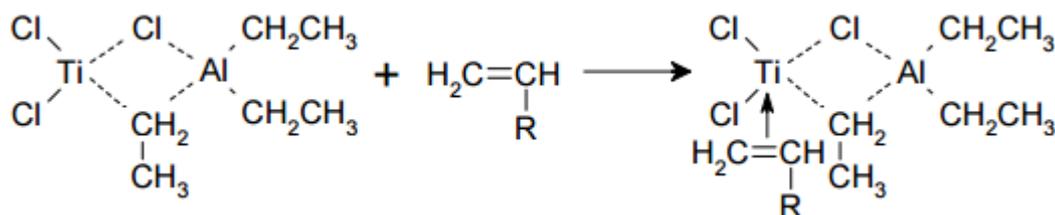




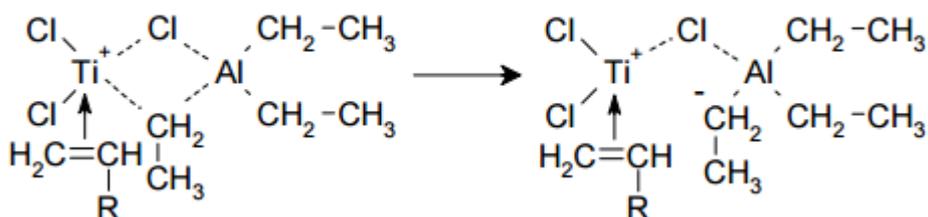
Этилен расходуется, участвуя в активации катализаторного комплекса. Переход  $\text{TiCl}_4$  в  $\text{TiCl}_3$  и  $\text{TiCl}_2$  облегчает хемосорбцию органических соединений сильно электроотрицательных металлов, обладающих малыми ионными радиусами (Al, Mg). Хемосорбция приводит к образованию электроно недостаточных комплексов титана и других металлов. Такие комплексы содержат алкильные мостики подобные мостикам в димерных алюминийалкилах по Циглеру.



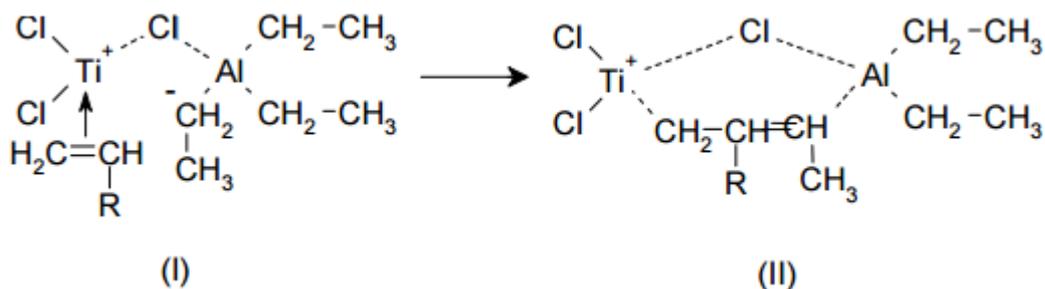
Молекула мономера образует с катализаторным комплексом неустойчивый  $\pi$  – комплекс:



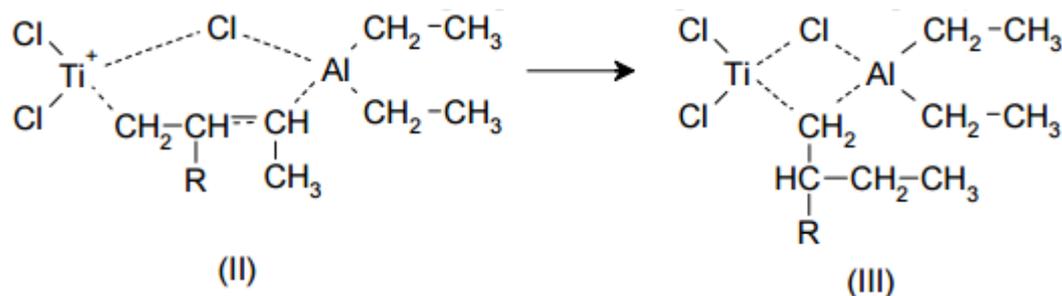
$\pi$  – комплекс диссоциирует по связи титан – углерод с образованием промежуточного соединения (A):



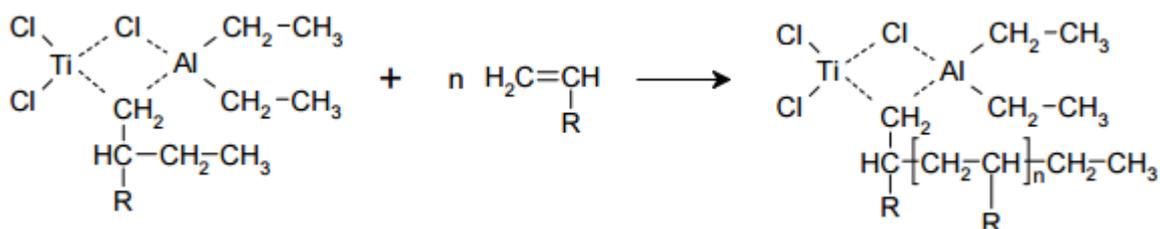
Происходит втягивание мономера в комплекс:



Комплекс (В) термодинамически не устойчив, поэтому стабилизируется переходя в форму (С), способную к образованию π – комплекса с новой молекулой и повторению описанного выше цикла превращений приводящих к росту цепи:

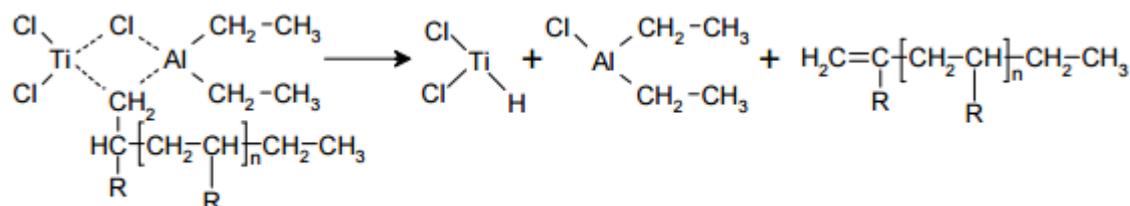


Полимерная цепь растет в результате присоединения мономера к полимерной цепи с конца, которая связана с катализатором ( в отличие от ионной и радикальной полимеризации).



Молекулы мономера, прежде чем вступить в реакцию полимеризации, должны занимать определенное пространственное положение под влиянием катиона Ti в комплексе. Это положение фиксируется после раскрытия двойной связи поэтому образующийся полимер имеет стереорегулярную структуру.

Обрыв цепи происходит в результате миграции атомов водорода от δ – атома углерода к металлу с образованием гидрида переходного металла и «мертвой» полимерной молекулы. Такой механизм называется δ – гидридный перенос:



Образующиеся в результате  $\delta$  – гидридного перехода металл-гидриды обладают пониженной полимеризационной активностью. Однако при взаимодействии с олефинами или алкилалюминием связь металл-углерод регенерируется.

Также имеет место обрыва на алкиле металла или на мономере. При всех указанных реакциях обрыва происходит обрыв лишь материальной цепи, так как ограничение цепи сопровождается ее переносом. Кинетическая цепь при этом продолжает существовать.

### **1.1.3 Выбор растворителя**

В качестве среды для полимеризации этилена пригодны предельные или ароматические углеводороды, удовлетворяющие следующим требованиям:

- не должны взаимодействовать с катализатором и участвовать в полимеризации (должны быть инертны);
- содержание вредных примесей не должно превышать допустимых пределов;
- иметь упругость паров, достаточную при температуре полимеризации для осуществления теплосъема (должны быть жидкими), но не должны кипеть в условиях полимеризации, так как приводит к уменьшению растворимости этилена в растворителе;
- сохранять свои свойства в процессе повторного использования;
- быть дешевым, доступным, малотоксичным.

Наиболее предпочтительны алифатические углеводороды, которые сорбируются на катализаторе в меньшей степени, чем ароматические. Исходя из температурных параметров полимеризации пригодны следующие представители алифатических растворителей: гексановая фракция с температурой кипения – 67-86°C, экстракционный бензин прямой перегонки с температурой кипения – 70-95 °C, но наиболее пригодна гептановая фракция соответствующая ТУ 38.101677-91 – нефрас «С», так как она имеет

температуру начала кипения не ниже 94 °С, поэтому дольше сохраняется в жидком состоянии.

#### **1.1.4 Роль температуры и давления**

Параметры процесса полимеризации этилена выбираются в зависимости от типа используемой каталитической системы. При проведении полимеризации в присутствии классического катализатора на основе четыреххлористого титана основными параметрами, влияющими на ход процесса, является температура реакционной среды и давление. Скорость полимеризации и выход СВМПЭ увеличивается с ростом температуры до определенного значения. При дальнейшем повышении температуры скорость полимеризации снижается, т.к. каталитический комплекс очень чувствителен к температуре. При повышении температуры выше 70-80°C происходит уменьшение активности катализатора, а при более высокой температуре катализатор может разлагаться. Кроме того, при температуре, близкой к температуре кипения растворителя, поглощение этилена резко падает и при температуре кипения растворителя практически становится равным нулю. Природа алюминийорганического соединения не влияет на зависимость выхода полиэтилена от температуры.

Повышение допустимой температурной границы полимеризации этилена может быть достигнуто за счет повышения давления. При постоянной температуре скорость полимеризации этилена увеличивается с ростом давления по линейной зависимости до значений давления порядка 4,0 Мпа. В дальнейшем повышение скорости процесса с ростом давления замедляется. Повышение давления выше 7,0 Мпа не целесообразно, так как происходит увеличение растворимости мономера и, следовательно, его концентрация в растворителе, с чем связан рост скорости полимеризации, но при этом затрудняется отвод тепла и поддержание заданного режима. Также, при высокой растворимости этилена в растворителе, на стадии дегазации возникают трудности при отделении мономера от полимера.

### 1.1.5 Кинетика закономерности катионной полимеризации

Скорость возникновения активных центров, дающих начало росту цепей в результате взаимодействия ионов карбония с молекулами мономера



будет описываться уравнением:

$$w_{\text{акт}} = k_{\text{акт}} [\text{М}][\text{Кат}^+] \quad (2)$$

где  $[\text{Кат}^+]$  – концентрация ионов карбония или протонов, образовавшихся из катализатора или из продуктов взаимодействия катализатора с сокатализатором;

$\text{М}$  – концентрация мономера;

$k_{\text{акт}}$  – константа скорости реакции.

Скорость роста цепи:



будет описываться уравнением:

$$w_{\text{акт}} = k_p [\text{М}][\text{Кат ММ}^+], \quad (4)$$

где  $[\text{Кат М}^+]$  – концентрация растущих ионов карбония.

Мономолекулярный обрыв:



будет происходить со скоростью:

$$w_{\text{обр}} = k_{\text{обр}} [\text{Кат ММ}^+] \quad (6)$$

В стационарном состоянии средний коэффициент полимеризации образующегося полимера будет равен:

$$P = \frac{w_p}{w_{\text{обр}}} = \frac{w_p}{w_{\text{акт}}} \quad (7)$$

После подстановки значений  $w_p$  и  $w_{\text{обр}}$  получим:

$$P = \frac{k_p \cdot [\text{М}][\text{Кат ММ}^+]}{k_{\text{обр}} [\text{Кат ММ}^+]} = \frac{k_p}{k_{\text{обр}}} [\text{М}] \quad (8)$$

Приняв  $k_p/k_{\text{обр}} = k'$ , получим:

$$\bar{P} = k' [\text{М}] \quad (9)$$

Следовательно, средний коэффициент полимеризации образующегося полимера прямо пропорционален концентрации мономера и не зависит от концентрации катализатора. Суммарную скорость полимеризации можно приравнять к скорости роста, тогда

$$w_p = w = \bar{P} \cdot w_{\text{обр}} \quad (10)$$

Подставив значения  $w_{\text{акт}}$  и  $\bar{P}$  получим:

$$w = k_{\text{акт}}[M][\text{Кат}^+]k'[M] \quad (11)$$

Заменим  $k_{\text{акт}} \cdot k' = k$  и получим:

$$w = k[\text{Кат}^+][M]^2 \quad (12)$$

Так как концентрация ионов карбония или протонов прямо пропорциональна концентрации катализатора, то из уравнения следует, что скорость катионной полимеризации прямо пропорциональна концентрации катализатора и квадрату концентрации мономера.

### 1.1.6 Термодинамика

Согласно законам термодинамики, самопроизвольное протекание реакции возможно, если изменение энергии Гиббса  $\Delta G$  отрицательно. Энергия Гиббса при температуре  $T$  равна:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S, \quad (13)$$

где  $\Delta H$  – энтальпия;  $\Delta S$  – энтропия системы.

При  $\Delta G = 0$  в системе устанавливается равновесие:



При этом скорости прямой и обратной реакции равны:

$$k_2[M_n^*][M] = k_{-2}[M_{n+1}^*] \quad (15)$$

Константу равновесия можно представить соотношением:

$$K_p = \frac{k_2}{k_{-2}} = \frac{[M_{n+1}^*]}{[M_n^*][M]} \quad (16)$$

При достаточно высоких степенях полимеризации  $M_n^* = M_{n+1}^*$  и иногда  $K_p = [M]^{-1}$ .

Таким образом, условием установления равновесия полимеризация – деполимеризация является наличие определенной равновесной концентрации мономера, абсолютное значение которого зависит от температуры процесса. Установление равновесия означает, что  $\Delta H = T\Delta S$ , температура, соответствующая этому условию, называется предельной температурой полимеризации и равна 240 °С:

$$T_{\text{пр}} = \Delta H / \Delta S = \Delta H / (\Delta S^\circ + R \ln[M]), \quad (17)$$

где  $S$  – энтропия полимеризации в стандартном состоянии при единичной концентрации мономера.

Температура, при которой скорость полимеризации максимальна:

$$\frac{1}{T_{\text{макс}}} - \frac{1}{T_{\text{пр}}} = - \frac{R \ln(1 - \Delta H / E_p)}{\Delta H} \quad (18)$$

где  $E_p$  – энергия активации реакции роста цепи.

Неравновесная полимеризация протекает при  $\Delta G < 0$ . Это условие может выполняться при различных соотношениях  $\Delta H$  и  $\Delta S$ . Абсолютные значения изменения энтальпии (или теплоты полимеризации  $Q_p$  с обратным знаком) зависят от строения мономера. Поскольку  $\Delta H = \Delta U - p\Delta V$ , можно считать, если пренебречь изменением объема при полимеризации, что тепловой эффект полимеризации связан с изменением внутренней энергии системы  $\Delta U$ .

## **1.2 Выбор способа производства полиэтилена**

В настоящее время существует несколько вариантов промышленного производства полиэтилена, различающихся способом активации процесса полимеризации.

Наиболее востребованными в промышленной практике способами проведения полимеризации этилена, с образованием высокомолекулярного продукта, являются процессы, протекающие по ионно – координационному, радикальному и ионно – радикальному механизмам.

### **1.2.1 Полиэтилен высокого давления (ПЭВД)**

В промышленности ПЭВД получают полимеризацией этилена при высоком давлении ( $150 \div 350$  Мпа) и температуре  $200 \div 300^\circ\text{C}$  в конденсированной газовой фазе в присутствии инициаторов (кислорода или органических пероксидов). Органические перекиси в чистом виде взрывоопасны, но растворы их в органических растворителях достаточно стабильны. В реакционную систему органические перекиси дозируют в виде растворов: керосиновый контакт, вазелиновое масло.

Наряду с органическими перекисями использование в качестве инициатора – кислорода тоже является эффективным, и имеет ряд достоинств. Кислород – самый дешевый инициатор, не требует использования растворителя (нет необходимости использования вазелинового масла, как с пероксидными инициаторами), поэтому полученный полиэтилен имеет максимальную химическую чистоту. Также кислород легко дозировать в газовый поток этилена. Наряду с достоинствами у кислородного инициирования есть и недостатки. Так, иницирует процесс полимеризации не сам кислород, а радикалы, образующие из продуктов взаимодействия кислорода с этиленом, и при иницировании кислородом имеет место индуктивный период, что приводит к необходимости дозировать кислород в отдаленный от реактора трубопровод, перед компрессией. При

высоком давлении и слишком высокой концентрации кислорода этилен может разлагаться с взрывом на углерод, водород и метан.

Процесс полимеризации протекает по радикально – цепному механизму, который включает в себя три основных стадии: инициирование, рост и обрыв цепи. Но также имеет место и передача цепи на мономер, растворитель, полимер.

Полученный ПЭ обладает сравнительно невысокой плотностью  $916\div 930$  кг/м<sup>3</sup>, имеет разветвлённое строение.

Молекулярная масса такого ПЭ 80000–500000 и степень кристалличности 50–65%. Изменяя температуру, давление, концентрацию инициатора, время пребывания мономера в реакторе, можно изменять количество и тип разветвлений и получать различный марочный ассортимент. Но при этом всегда ПЭВД, полученный по радикально–цепному механизму, будет иметь разветвленное строение и, как следствие, самую низкую плотность.

Для эффективного осуществления радикально–цепных механизмов, требуются жесткие параметры проведения полимеризации.

К достоинствам метода относится высокая химическая чистота полимера, безвредность и нетоксичность, высокие диэлектрические показатели, стойкость к агрессивным средам, дешевизна и доступность сырья, гибкость, эластичность, легкость переработки. Наряду с достоинствами, данный метод не лишен трудностей, которые обусловлены жесткостью технологических параметров, высокой экзотермичностью процесса, а также трудностями отвода тепла. Из-за давления и температуры, необходимых для эффективного проведения процесса полимеризации, требования к аппаратному оформлению существенно ужесточаются, в том числе и возрастает металлоемкость аппаратов, энергозатраты, опасность ведения процесса, необходимость высокой степени оснащения средствами КИПиА.

## 1.2.2 Полиэтилен среднего давления (ПЭСД)

ПЭСД получают полимеризацией этилена при среднем давлении  $3 \div 4$  Мпа и температуре  $150^\circ\text{C}$  в растворе в присутствии оксидов металлов переменной валентности (оксида хрома, оксида молибдена). Важную роль играет состав катализатора, в качестве которого пригодны оксиды многих металлов, нанесенных на алюмосиликатные носители. Для каждого из оксидных катализаторов предполагается наиболее эффективная среда и режим. Наибольшую плотность и лучшие механические свойства имеет полиэтилен, получаемый на оксидно-хромовом катализаторе, содержащем 5%  $\text{CrO}_3$ , нанесенном на тонкоизмельченный алюмосиликатный катализатор крекинга. Достоинством производства полиэтилена на оксидно-хромовом катализаторе является малая токсичность катализатора и большая безопасность по сравнению с металлоорганическими. Кроме того существует возможность их многократной регенерации катализатора и ведение процесса в более мягких технологических условиях в сравнении с процессом полимеризации этилена при высоком давлении.

Процесс протекает по ионно-радикальному механизму и сопровождается образованием полимера сравнительно регулярной неразветвленной структуры и высокой плотности. Получаемый при среднем давлении полиэтилен имеет плотность  $960 \div 970 \text{ кг/м}^3$ . Полимеризацию проводят в среде того же растворителя, в котором готовится суспензия катализатора. Наличие растворителя облегчает съём тепла и поддержание температурного режима в реакторе полимеризации. Также тепло реакции снимается рециркуляцией парогазовой смеси растворителя и части этилена через теплообменник.

По сравнению с ПЭВД, процесс протекает при умеренных давлениях 30 атм. и температуре  $130 \div 150^\circ\text{C}$ , поэтому начальная стоимость аппаратуры заметно меньше. Наиболее удобным фактором регулирования процесса является изменение температуры. Так, с увеличением температуры скорость

процесса растет. Но температура обратным образом влияет на молекулярную массу. Увеличение давления увеличивает концентрацию мономера в единице реакционного объема и способствует растворению образующегося полимера. Давление выше 70 атм. нецелесообразно, т.к. не оказывает влияния на молекулярную массу, ни на скорость процесса. Регулировать время полимеризации можно за счет скорости подачи растворителя.

Конверсия этилена за один цикл высокая, но концентрация полиэтилена в растворе не должна превышать 18-20%, иначе раствор становится вязким и плохо транспортируется по трубопроводам. Концентрация этилена в реакционной системе меньше или равна 5%, а поскольку концентрация полимера в реакторе регулируется концентрацией катализатора, то она не должна превышать 0,5% от массы. Из-за невысоких допустимых концентраций мономера и полимера производительность установки резко снижается.

К недостаткам способа можно отнести необходимость проведения дополнительных операций, таких как большой расход растворителя и его регенерацией, с выделение и очистка полимера, что усложняет производственный процесс.

Наиболее перспективными методами получения полиэтилена являются методы полимеризации этилена при низких давлениях. Наиболее отработанным методом является полимеризация этилена при низком давлении в жидкой фазе.

### **1.2.3 Полиэтилен низкого давления (ПЭНД)**

Увеличение цен на сырье и электроэнергию увеличивает конкуренцию между различными материалами и технологиями, и главным критерием при этом стали энергозатраты и энергоемкость производства.

Главной задачей стало найти пути улучшения качества продукции с минимальными энерго – и ресурсозатратами. В результате таких поисков в 1978 году один из крупнейших американских концернов производителей

ПЭНП объявил о пуске новой промышленной установки, получившей название «Юнипол».

В основу процесса положен процесс газофазной полимеризации этилена в кипящем слое частиц твердого катализатора, нанесенного на силикагель, при давлении 2,2 Мпа и температуре 1000-105°C.

В процессе полимеризации активность катализатора определяется удельной поверхностью носителя и чистотой катализатора.

Такой процесс обладает массой достоинств:

- отсутствие растворителя и снижение затрат на его регенерацию;
- высокая активность катализатора исключает стадию разложения катализатора и отмывки полимера от продуктов разложения катализатора, следовательно, исключает стадию сушки полимера;
- полимер образуется в виде крупных частиц, что исключает стадию грануляции, следовательно, снижаются энергозатраты;
- на установке можно получать не только гомо - , но и сополимеры этилена, а кроме того легко регулировать число и длину разветвлений в полимерной цепи;
- более мягкие условия работы, то есть снижение давления и температуры, следовательно, повышение безопасности работы и простота аппаратуры;
- образующийся полимер перерабатывается всеми существующими методами;

Несмотря на массу достоинств, возникают также и трудности:

- газофазный процесс неустойчив, трубопроводы забиваются порошком полимера, происходит унос катализатора;
- для газофазного процесса нужны реакторы с объемом 600-800 м<sup>3</sup>
- сложный катализатор, который готовится вручную;
- полиэтилен содержит остатки катализатора и по химической чистоте уступает ПЭВД.

## 2 Объект и методы исследования

### 2.1 Характеристика производимой продукции

Полиэтилен сверхвысокомолекулярный (СВМПЭ) низкого давления высокой плотности, получаемый полимеризацией этилена в присутствии металлоорганических катализаторов типа Циглера–Натта, удовлетворяет требованиям ТУ 2211–068–70353562–2006.

СВМПЭ – термопластичный линейный полимер. Структурная формула которого:  $-(CH_2 - CH_2)_n-$ , со степенью полимеризации  $n=(3 \div 10) \cdot 10^5$ .

Высокомолекулярный полиэтилен – белый подвижный порошок с температурой плавления  $137 \div 147^\circ C$ . Он проявляет высокую химическую стойкость к агрессивным средам и органическим растворителям. При температуре выше  $120^\circ C$  СВМПЭ растворяется в среде ароматических и предельных углеводородов и высаживается при охлаждении раствора. При температуре выше  $140^\circ C$ , в присутствии кислорода, происходит заметное окисление СВМПЭ, что снижает уровень механических и диэлектрических свойств материала.

В таблице №1 приведены показатели качества базовых марок СВМПЭ, нормируемые в технических условиях ТУ 2211–068–70353562–2006.

Таблица 1 – Показатели качества СВМПЭ [2]

Показатель	Нормы для марки 21606	
	1 сорт	2 сорт
Плотность, г/см <sup>3</sup> , не менее	0,936	0,936
Массовая доля золы, %, не более	0,05	0,1
Массовая доля летучих, %, не более	0,25	0,5
Разрушающее напряжение при растяжении, Мпа, не менее	30,0	30,0
Относительное удлинение при разрыве, % ,не менее	250	250

## 2.2 Описание технологической схемы

Основным сырьем для СВМПЭ служит этилен. Полимер получают суспензионной полимеризацией этилена низкого давления.

По этому методы СВМПЭ получают полимеризацией этилена при давлении  $0,2 \div 0,5$  Мпа и температуре около  $80^\circ\text{C}$  в среде органического растворителя (гептана). Следует учитывать то, что катализаторный комплекс чувствителен к высоким температурам, поэтому полимеризацию проводят при  $70\text{-}80^\circ\text{C}$ , при более высоких температурах катализатор может разлагаться.

Полимеризация проводится в присутствии катализатора Циглера–Натта ( $(n\text{MgCl}_2) \cdot (m\text{TiCl}_4)$ ) и сокатализатора – триэтилалюминий ( $\text{Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$ ).

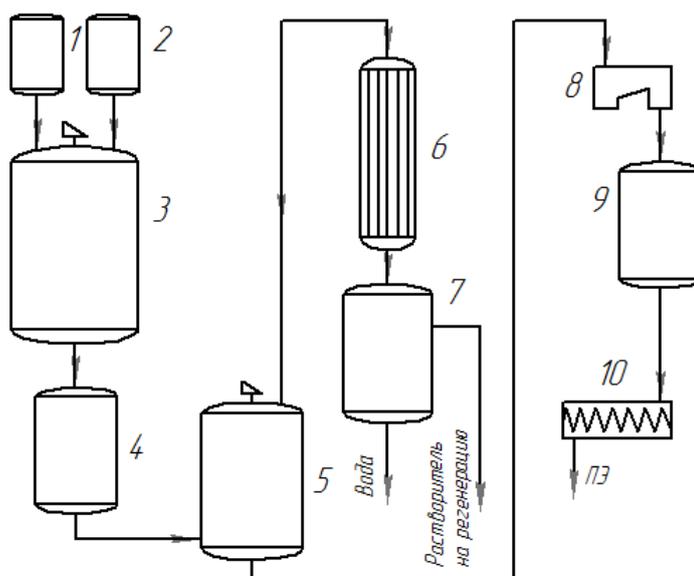


Рис. 1 Технологическая схема получения ПЭ суспензионной полимеризацией на высокоактивных катализаторах

1,2–мерники, 3–реактор, 4–дегазатор, 5–отпарной аппарат, 6–теплообменник, 7–отстойник, 8–центрифуга, 9–сушилка, 10–сборник порошка СВМПЭ

В реактор из мерников подается суспензия катализатора и раствор активатора. Катализаторный комплекс является высокоэффективным, поэтому его концентрация в реакционной массе мала, а, следовательно, образующийся полимер нет необходимости отмывать от соединений,

входящих в состав катализатора. Конверсия этилена в полиэтилене высокая, но не полная. В товарном СВМПЭ может содержаться остаточный этилен, ухудшающий его свойства. Из реактора суспензия полимера поступает в дегазатор. В дегазаторе происходит разбавление суспензии до необходимой концентрации. Затем суспензия полимера поступает в отпарной аппарат, где окончательно удаляется растворитель при определенном значении рН среды. Растворитель (гептан) и вода конденсируются в теплообменнике и расслаиваются в отстойнике. Для отделения полимера от растворителя суспензия СВМПЭ направляется на центрифугу, и под действием центробежных сил разделяется на две фазы: жидкая фаза - фугат и твердая фаза – влажный порошок. Остаточную влагу из полимера удаляют в роторно-вакуумной сушилке, из которой пневмотранспортом передается на грануляцию. Перед грануляцией вводятся необходимые добавки, стабилизаторы и красители. После этого готовая продукция отправляется на склад для хранения и отправки потребителю.

### **2.3 Характеристика используемого сырья**

Характеристика используемого сырья представлена в таблице 2[12].

Таблица 2 - Характеристика сырья, материалов и энергоресурсов, применяемых в процессе полимеризации этилена

Наименование сырья	Государственный или отраслевой стандарт, технические условия, регламент	Показатели по стандарту, обязательные для проверки	Регламентируемые показатели
Этилен	ГОСТ 25070-87, изм.1	Объемная доля этилена, %, не менее Объемная доля пропилена, %, не более Объемная доля метана и этана, %, не более Объемная доля ацетилена, %, не более Объемная доля диеновых углеводородов (пропадиена и бутадиена), %, не более Объемная доля двуокиси углерода, %, не более Объемная доля окиси углерода, %, не более Объемная доля метанола, %, не более Объемная доля кислорода в продукте, поставляемом по трубопроводу, %, не более Массовая доля воды в продукте, поставляемом по трубопроводу, %, не более	99,9 0,005 0,1 0,001 0,0005 0,001 0,0005 0,001 0,0002 0,001
Азот газообразный, сорт 2	Технологический регламент производства азота и кислорода	Объемная доля азота, %, не менее Объемная доля водяного пара в газообразном азоте, %, не более Объемная доля кислорода в азоте, %, не более Содержание масла в газообразном азоте	99,996 0,007 0,002 не определяется

Гептан регенерированный	Технологический регламент № 101-2-96 получения регенерированного растворителя	Массовая доля воды, %, не более Массовая доля бутанола, %, не более Температура начала кипения, °С Температура конца кипения, °С Массовая доля серы, %, не более Массовая доля ароматических углеводородов, %, не более Бромное число, гВг в 100 см <sup>3</sup> пробы, не более	0,002 0,005 94 ± 2 99 ± 2 0,0001 5,0 0,06
Триэтилалюминий (ТЭА) из контейнера	ТУ 6-02-1-371-86	Массовая доля механических примесей (мелкодисперсного алюминия), % Массовая доля общего алюминия, %, не менее Массовая доля гидрида алюминия, %, не более Массовая доля три-н-бутилалюминия, %, не более Массовая доля триэтоксиалюминия, %, не более Массовая доля триэтилалюминия, %, не менее	отсутствие 22 1,0 2,0 2,0 93
Катализатор (активный компонент на носителе) из контейнера	ТУ 6-68-213-2004	Удельная активность катализатора, г полиэтилена / г катализатора ч атм., при 70°С, не менее Массовая доля титана, %, не более Гранулометрический состав порошка СВМПЭ при выходе, мкм Насыпной вес порошка СВМПЭ, г/см <sup>3</sup> Характеристическая вязкость СВМПЭ, определяемая в декалине при 135°С, дл/г, не менее	5000 1,5 20 - 500 0,32 - 0,42 9,0

## 4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

### 4.1 Анализ конкурентных технических решений

При организации собственного производства СВМПЭ необходим систематический анализ конкурирующих разработок во избежание потери занимаемой ниши рынка. Периодический анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности позволяет оценить эффективность научной разработки по сравнению с конкурирующими предприятиями. Стоит отметить, что в России СВМПЭ производится только одним заводом ПАО «Казаньоргсинтез». Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты, которая приведена в таблице.

Таблица 17 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
Повышение производительности труда пользователя	0,10	4	4	3	0,40	0,40	0,30
Удобство в эксплуатации	0,20	5	4	4	1	0,80	0,80
Качество продукта	0,10	5	5	3	0,50	0,50	0,30
Длительность производственного цикла	0,10	4	4	3	0,40	0,40	0,30
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
Конкурентоспособность продукта	0,10	5	4	3	0,50	0,40	0,30
Уровень проникновения на рынок	0,05	5	4	2	0,25	0,20	0,10
Цена	0,15	4	4	3	0,60	0,60	0,45
Предполагаемый срок эксплуатации	0,2	5	5	4	1	1	0,80

Итого	1				4,65	4,30	3,35
-------	---	--	--	--	------	------	------

К конкурентным преимуществам производимого продукта, можно отнести: высокое качество продукта, удобство в эксплуатации, высокую конкурентоспособность продукта и уровень проникновения на рынок. Эти качества помогут завоевать доверие покупателей путем предложения товара высокого качества со стандартным набором определяющих его параметров.

#### 4.2 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Таблица 18 – Матрица SWOT

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Возможность анализа сложных систем С2. Более дешевый единичный акт химического анализа	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Нет некоторых данных для достоверности методики Сл2. Большие первоначальные вложения
Возможности: В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ В2. Ожидание подобной методики	1. Постоянный поиск путей снижения себестоимости продукции 2. Продолжение научных исследований с целью усовершенствования имеющейся технологии	1. Поиск заинтересованных лиц 2. Разработка научного исследования 3. Приобретение необходимого оборудования опытного образца
Угрозы: У1. Введение дополнительных государственных требований к сертификации продукции	1. Постоянное отслеживание изменений в российском законодательстве. 2. Сертификация продукции	1. Повышение квалификации кадров. 2. Приобретение необходимого оборудования опытного образца

У2. Изменение законодательства.		
---------------------------------	--	--

### 4.3 Планирование научно-исследовательских работ

#### 4.3.1 Структура работ в рамках научного исследования

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

Порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в табл. 19.

Таблица 19 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Дипломник, руководитель
	3	Выбор направления исследований	Руководитель
Теоретические исследования	4	Проведение инженерных расчетов	Дипломник
Обобщение и оценка результатов	5	Оценка эффективности полученных результатов	Дипломник, руководитель
	6	Определение целесообразности проведения ОКР	Дипломник
<i>Проведение ОКР</i>			
Разработка технической документации и проектирование	7	Разработка технологии производства СВМПЭ	Дипломник
	8	Оформление результатов по охране труда	Дипломник, консультант по охране труда

	9	Оформление экономической части	Дипломник, консультант по экономической части
--	---	--------------------------------	---

Продолжение таблицы 19

Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ОКР)	10	Составление пояснительной записки	Дипломник, руководитель
	11	Подготовка к защите дипломной работы	Дипломник
	12	Защита дипломной работы	Дипломник, руководитель

#### 4.3.2 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований

В таблице 20 представлена морфологическая матрица для методов получения СВМПЭ.

Таблица 20 – Морфологическая матрица

	1	2	3
А. Мономер	Этилен	Этилен	Этилен
Б. Катализатор	Титаномагниевоый	Титаномагниевоый	Титаномагниевоый
В. Сокатализатор	Триэтилалюминий	Триалкилалюминий	Триэтилалюминий
Г. Среда	Гептан	Гексан	Гексан

#### 4.3.3 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения

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

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (42)$$

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 %.

$$T_{p_i} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (43)$$

где  $T_{p_i}$  – 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.

Таблица 21 – Временные показатели проведения научного исследования

№	Название работ	Трудоёмкость работ									Исполни- тели	Т <sub>р</sub> , раб. дн.			Т <sub>р</sub> , кал. дн.		
		t <sub>min</sub> , чел-дн.			t <sub>max</sub> , чел-дн.			t <sub>ож</sub> , чел-дн.				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	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2	Р	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
2	Подборка и изучение материалов по теме	6	6	6	9	9	9	7,2	7,2	7,2	Р	3,6	3,6	3,6	5,3	5,3	5,3
		6	6	6	9	9	9	7,2	7,2	7,2	Б	3,6	3,6	3,6	5,3	5,3	5,3
3	Выбор направления исследования	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	Р	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5
4	Проведение инженерных расчетов	10	10	10	15	15	15	12	12	12	Б	12	12	12	18	18	18
5	Оценка эффективности полученных результатов	1	1	1	2	2	2	1,4	1,4	1,4	Р	0,7	0,7	0,7	1	1	1
		1	1	1	2	2	2	1,4	1,4	1,4	Б	0,7	0,7	0,7	1	1	1
6	Определение целесообразнос- ти проведения ОКР	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	Б	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6

Продолжение таблицы 21

7	Разработка технологии производства СВМПЭ	5	5	5	10	10	10	7	7	7	Р	7	7	7	10,3	10,3	10,3
8	Оформление результатов по охране труда	1	1	1	2	2	2	1,4	1,4	1,4	К <sup>1</sup>	0,7	0,7	0,7	1	1	1
		8	8	8	13	13	13	10	10	10	Б	5	5	5	7,4	7,4	7,4
9	Оформление экономической части	1	1	1	3	3	3	2	2	2	К <sup>2</sup>	1	1	1	1,5	1,5	1,5
		8	8	8	13	13	13	10	10	10	Б	5	5	5	7,4	7,4	7,4
10	Оформление пояснительной записки	5	5	5	8	8	8	6	6	6	Б	3	3	3	4,4	4,4	4,4
		3	3	3	5	5	5	4	4	4	Р	2	2	2	3	3	3
11	Подготовка к защите дипломной работы	7	7	7	10	10	10	8,2	8,2	8,2	Б	8,2	8,2	8,2	12	12	12
12	Защита дипломной работы	1	1	1	2	2	2	1,4	1,4	1,4	Р	0,7	0,7	0,7	1	1	1
		1	1	1	2	2	2	1,4	1,4	1,4	Б	0,7	0,7	0,7	1	1	1

Р – руководитель

Б – бакалавр

К<sup>1</sup> – консультант по экономической части

К<sup>2</sup> – консультант по социальной ответственности

При выполнении дипломных работ студенты становятся участниками сравнительно небольших по объему научных тем, поэтому наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – это горизонтальный ленточный график, представленный в таблице 11, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Данный график строится на основе таблицы 10.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни.

Коэффициент календарности определяется по формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} \quad (43)$$

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

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

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

Таким образом:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{120}{120 - 30 - 8} = 1,47.$$

Таблица 22 – Календарный план график проведения НИОКР

Вид работ	Исполнители	Тк, кал.дн	Продолжительность выполнения работ													
			02.17			03.17			04.17			05.17				
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
Разработка технического задания	Руководитель	0,3	■													
Подборка и изучение материалов по теме	Руководитель, дипломник	5,3	■	■												
Выбор направления исследования	Руководитель	5,3		■												
Проведение инженерных расчетов	Дипломник	18		■	■	■	■									
Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, дипломник	1					■									
Определение целесообразности проведения ОКР	Дипломник	0,6					■									
Разработка технологии производства СВМПЭ	Дипломник	10,3						■	■							
Оформление результатов по охране труда	Дипломник, консультант по охране труда	7,4 1							■	■						
Оформление экономической части	Дипломник, консультант по экономической части	10,3 1									■	■				



#### **4.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)**

В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- Затраты на специальное оборудование
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

##### **4.4.1 Расчет материальных затрат НТИ**

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. Многие из материалов уже находились в лаборатории, поэтому в статьях отражены малые расходы. Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам. Результаты расчета приведены в таблице

Таблица 23 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество			Цена за кг руб.			Затраты на материалы, руб		
		Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Мономер (этилен)	кг	1541,8	1541,8	154,8	55	55	55	59357	59357	59375
Гептан	кг	2581,5	0	0	495	0	0	1264935	0	0
Гексан	кг	0	2672	2672	0	520	520	0	1389440	1389440
Титаномагниевого катализатор	кг	3,5	3,5	3,5	211200	211200	211200	850080	850080	850080
Триэтилалюминий	кг	3,2	0	3,2	254000	0	254000	810280	0	810280
Триалкилалюминий	кг	0	3,8	0	0	244000	0	0	927200	0
Итого								2984652	3226077	3109157

#### 4.4.2 Расчет затрат на оборудование для научно-экспериментальных работ

Все расчеты по приобретению спецоборудования и оборудования, имеющегося в организации, но используемого для каждого исполнения конкретной темы, сводятся в табл. 24.

Таблица 24 – Расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, руб.	Сумма амортизационных отчислений, руб.
1	Емкостной реактор 3,2 м <sup>3</sup> с мешалкой лопастного типа	1	360000	24000
2	Дегазатор	1	250000	16670
3	Центрифуга	1	210000	14000
4	Сушилка кипящего слоя	1	165000	11000
Итого				65670

Для оборудования нужно рассчитать величину годовой амортизации по следующей формуле:

$$A_{\text{год}} = \frac{C_{\text{перв}}}{T_{\text{пи}}}, \quad (45)$$

где  $C_{\text{перв}}$  – первоначальная стоимость, руб;  $T_{\text{пи}}$  – время полезного использования, год.

#### 4.4.3 Заработная плата исполнителей темы

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, (включая премии и доплаты) и дополнительную заработную плату. Также включается премия,

выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 – 30 % от тарифа или оклада:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} \quad (46)$$

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

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

Основная заработная плата ( $Z_{осн}$ ) руководителя от предприятия рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p \quad (47)$$

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

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

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно – техническим работником, раб.дн. (таблица 22).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} \quad (48)$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года;  $F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно – технического персонала, раб. дн.

В таблице 24 приведен баланс рабочего времени каждого работника НТИ.

В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 10 % от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы сводится в табл. .

Таблица 24 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Бакалавр	Консультант ЭЧ	Консультант СО
Календарное число дней	120	120	120	120

Количество нерабочих дней выходные дни: праздничные дни	30 8	30 8	30 8	30 8
--	---------	---------	---------	---------

Продолжение таблицы 24

Потери рабочего времени отпуск: невыходы по болезни:	0 0	0 0	0 0	0 0
Действительный годовой фонд рабочего времени	88	88	88	88

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p, \quad (49)$$

где  $Z_{тс}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.; 2145

$k_{пр}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от  $Z_{мс}$ );

$k_d$  – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5;

$k_p$  – районный коэффициент, для Томска равный 1,3.

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 25.

Таблица 25 – Расчет основной заработной платы

Категория	$Z_{тс}$ ,руб.	$k_d$	$k_p$	$Z_m$ ,руб	$Z_{дн}$ ,руб.	$T_p$ ,раб. дн.	$Z_{осн}$ ,руб.
Руководитель							
ППСЗ	27344	0,35	1,3	58652,9	1939	11,1	21522,9
Бакалавр							
ППС1	13550	0,35	1,3	29064,8	960,8	67,4	64758
Консультант ЭЧ							
ППСЗ	22870	0,35	1,3	49056,2	1621,7	1	1621,7
Консультант СО							
ППСЗ	24500	0,35	1,3	52522,5	1737,3	1,5	2605,9

Общая заработная исполнителей работы представлена в таблице 26.

Таблица 26 – Общая заработная плата исполнителей

Исполнитель	$Z_{осн}$ , руб.	$Z_{доп}$ , руб.	$Z_{зн}$ , руб.
Руководитель	21522,9	3228,4	24751,3
Бакалавр	64758	9713,7	74471,7
Консультант ЭЧ	1621,7	243,2	1864,9
Консультант СО	2605,9	390,8	2996,7

#### 4.4.4 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 этих отчислений определяется по формуле:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) \quad (50)$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 № 212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. Однако 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 27.

Таблица 27 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
-------------	---------------------------------	---------------------------------------

Руководитель проекта	21552,9	3228,4
Бакалавр	64758	9713,7
Консультант ЭЧ	1621,7	243,2

Продолжение таблицы 27

Консультант СО	2605,9	390,8
Коэффициент отчислений внебюджетные фонды	во	0,305
Итого:	31745,8	

#### 4.4.5 Накладные расходы

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

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{\text{нр}} \quad (51)$$

где  $k_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%. Таким образом, накладные расходы на данные НТИ составляют 402365,6 руб.

#### 4.4.6 Формирование бюджета затрат научно исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в табл. 28.

Таблица 28 – Расчет бюджета затрат НТИ. Статьи расходов

Наименование статьи	Сумма, руб.	Примеча-
---------------------	-------------	----------

				ние
1. Материальные затраты НТИ	2984652	3226072	3109157	Табл. 23

Продолжение таблицы 28

2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	65670			Табл. 24
3. Затраты на основной заработной плате исполнителей темы	90508,5			Табл. 25
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	13576,1			Табл. 26
5. Отчисления во внебюджетные фонды	31745,8			-
6. Накладные расходы	499277	537904	519197	16 % от суммы ст. 1-5
7. Бюджет затрат НТИ	3619759	3899806	376418 5	Сумма ст. 1-6

Как видно из таблицы основные затраты НТИ приходится на материальные затраты.

#### **4.5 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.

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).

Таблица 29 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерий	Весовой коэффициент параметра	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1. Способствует росту производительности труда	0,1	3	5	4
2. Удобство в эксплуатации	0,15	5	4	4
3. Энергосбережение	0,15	4	4	5
4. Надежность	0,20	5	4	5
5. Воспроизводимость	0,25	5	5	4
6. Материалоемкость	0,15	5	3	4
Итого	1	4,65	4,5	4,35

Таблица 30 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,9986	0,9995	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,65	4,5	4,35
3	Интегральный показатель эффективности	4,657	4,502	4,35
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,967	0,934

Вывод: Сравнительный анализ интегральных показателей эффективности показывает, что наиболее предпочтительным является способ производства СВМПЭ при использовании в качестве сокатализатора ТЭА, а в качестве среды гептан.