

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**(ФГБОУ ВО «АмГУ»)**

Инженерно-физический факультет  
Кафедра химии и химической технологии  
Направление подготовки 18.03.01 – Химическая технология  
Направленность (профиль) образовательной программы Химическая  
технология природных энергоносителей и углеродных материалов

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_ Ю.А. Гужель  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему: Расчет установки полиэтилена на ООО «ЗапСибНефтехим» с  
увеличением производительности на 15 %

Исполнитель

студент группы 618-об

 20.06.20 Д.Ю. Потапчук  
(подпись, дата)

Руководитель

канд. техн. наук

 Ю.А. Гужель  
(подпись, дата)

Консультант:

по безопасности жизнедеятельности

доцент, канд. техн. наук

 А.В. Козырь  
(подпись, дата)

Нормоконтроль

доцент, доктор хим. наук

 24.06.20 Т.А. Родина  
(подпись, дата)

Благовещенск 2020

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет Инженерно-физический  
Кафедра Химии и химической технологии

УТВЕРЖДАЮ  
Зав. кафедрой  
\_\_\_\_\_ Ю.А. Гужель  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**З А Д А Н И Е**

К выпускной квалификационной работе студента Потапчука Дениса Юрьевича

1. Тема выпускной квалификационной работы: «Расчет установки полиэтилена на ООО «ЗапСибНефтехим» с увеличением производительности на 15 %» утверждена Приказом от 30.04.2020 г № 810-уч

2. Срок сдачи студентом законченной работы 04.07.2020 г.

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: Производительность установки полиэтилена – 350 тыс. т/год. Годовое время работы установки – 8000 часов. Технологическая документация, нормативная документация, литературные данные

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов): Литературный обзор по производству полиэтилена. Характеристика сырья и готовой продукции установки полимеризации. Описание технологической схемы производства полиэтилена. Составление материального баланса установки. Технологический расчет оборудования – петлевого реактора, теплообменника, сепаратора, продувочной колонны. Механический расчет реактора

5. Перечень материалов приложения: Технологическая схема установки полиэтилена

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе Козырь А. В., канд. техн. наук, доцент; раздел «Безопасность и экологичность производства»

7. Дата выдачи задания 13.05.2020 г.

Руководитель выпускной квалификационной работы: Гужель Юлия Александровна, канд. техн. наук

Задание принял к исполнению 13.05.2020 г.

\_\_\_\_\_ 

## РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа содержит 75 с., 8 таблиц, 3 рисунка, 24 источника.

ЭТИЛЕН, ПОЛИЭТИЛЕН, ПРОЦЕСС, ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ, КАТАЛИЗАТОР, ОБОРУДОВАНИЕ, УСТАНОВКА, РЕАКТОР, НАСОС, СЕПАРАТОР, ДЕГАЗАТОР, ПОДОГРЕВАТЕЛЬ, БАЛАНС, РАСЧЕТ

В работе изучена технологическая схема производства полиэтилена высокой плотности, выполнен расчет основного оборудования производства полиэтилена с увеличением производительности на 15 % путем увеличения подачи сокатализатора.

В ходе работы были изучены поточные схемы ООО «ЗапСибНефтехим», регламент, спецификация оборудования, схемы технологических установок, основных аппаратов и оборудования, их назначение, устройство, рабочие параметры, особенности эксплуатации. Выполнен расчет и обоснование выбора основных аппаратов и оборудования, произведен расчета технологических параметров для заданного процесса и определены параметры оптимальной организации процесса, а также изучена научно-техническая информация по тематике работы.

					<i>ВКР.161868.180301.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Д.Ю. Потапчук</i>			Расчет установки полиэтилена на ООО «ЗапСибНефтехим» с увеличением производительности на 15 %	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Ю.А. Гцжель</i>				У	З	75
<i>Н. Контр.</i>		<i>Т.А. Родина</i>		24.06.20	АмГУ ИФФ 618-об зр.			
<i>Утверд.</i>		<i>Ю.А. Гцжель</i>						

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1. Литературный обзор	7
1.1 Общие характеристики полиэтилена	7
1.2 Сравнение разновидностей процессов получения полиэтилена	10
1.3 Применение полиэтилена	12
1.4 Физико-химические основы процесса	14
2 Технологическая часть	24
2.1 Анализ и обоснование модернизации установки	24
2.2 Характеристика сырья и готовой продукции	25
2.3 Описание технологической схемы	27
2.4 Материальный баланс установки	32
2.5 Тепловой баланс	35
3 Технологический расчёт оборудования	37
3.1 Расчёт реактора	40
3.2 Расчёт подогревателей суспензии	44
3.3 Расчёт сепаратора высокого давления	46
3.4 Расчёт дегазатора	48
3.5 Расчёт насоса	50
4 Механический расчет реактора	53
5 Безопасность и экологичность производства	67
Заключение	72
Библиографический список	73

					<i>ВКР.161868.180301.ПЗ</i>			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Д.Ю. Потапчук			Расчет установки полиэтилена на ООО «ЗапсибНефтехим» с увеличением производительности на 15 %	Лит.	Лист	Листов
Провер.		Ю.А. Гцжель				У	4	75
Н. Контр.		Т.А. Родина		24.06.20		АМГУ ИФФ 618-об зр.		
Утверд.		Ю.А. Гцжель						

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

В настоящей бакалаврской работе применяют следующие термины с соответствующими определениями.

ОЗХ – общезаводское хозяйство

ОНД – очень низкое давление

ПЭ – полиэтилен

ПЭВД – полиэтилен высокого давления

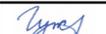
ПЭВП – полиэтилен высокой плотности

ПЭНД – полиэтилен низкого давления

ПЭНП – полиэтилен низкой плотности

ТЭАЛ – триэтилалюминий

ТЭБ – триэтилборан

					<i>ВКР.161868.180301.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Д.Ю. Потапчук</i>			Расчет установки полиэтилена на ООО «ЗапсибНефтехим» с увеличением производительности на 15 %	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Ю.А. Гцжель</i>				У	5	75
<i>Н. Контр.</i>		<i>Т.А. Родина</i>		24.06.20		АмГУ ИФФ 618-оф зр.		
<i>Утверд.</i>		<i>Ю.А. Гцжель</i>						

## ВВЕДЕНИЕ

Целью выпускной квалификационной работы является расчет установки полиэтилена на ООО «ЗапСибНефтехим» с увеличением производительности на 15 %.

Имеются следующие исходные данные: производительность установки полиэтилена – 350 тыс. т/год. Годовое время работы установки – 8000 часов.

Для достижения цели был выдвинут ряд задач:

1. Провести расчет оборудования действующей установки
2. Составить материальный и тепловой балансы
3. Рассчитать модернизацию установки на 15 %
4. Выполнить механический расчет оборудования

Актуальность работы заключается в увеличении производительности установки без модернизации оборудования действующей установки. Повышение производительности установки достигается путем увеличения подачи сокатализатора в реактор, тем самым увеличивая его активность и, как следствие, увеличивая соотношение кг полиэтилена/кг катализатора.

С 2010 г. рынок полиэтилена в РФ снизил темпы роста: производство выросло на 16 %, а потребление – на 23 %. В 2019 г. суммарное производство полиэтилена сократилось прежде всего за счет снижения выпуска полиэтилена высокой плотности вследствие остановок на длительный плановый ремонт. Несмотря на существенный сырьевой потенциал, Россия занимает скромные позиции по производству базовых нефтехимических продуктов.

Предмет работы – модернизация установки по производству полиэтилена высокой плотности.

					<i>ВКР.161868.180301.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Д.Ю. Потапчук</i>			Расчет установки полиэтилена на ООО «ЗапСибНефтехим» с увеличением производительности на 15 %	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Ю.А. Гцжель</i>				У	6	75
<i>Н. Контр.</i>		<i>Т.А. Родина</i>		24.06.20		АМГУ ИФФ 618-оф зр.		
<i>Утверд.</i>		<i>Ю.А. Гцжель</i>						

# 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

## 1.1 Общие характеристики полиэтилена

Отрасль производства полимеров и полимерной продукции является одной из самых динамично развивающихся, а количество отраслей потребителей охватывает практически все сферы промышленного производства. Процесс изготовления полиэтилена является одним из самых простых процессов получения полимеров.

Полиэтилен высокого давления (низкой плотности) представляет собой высокомолекулярный парафин, в котором линейная неразветвленная структура нарушается наличием боковых алкильных групп (20 – 30 на 1000 атомов углерода).

При обычных температурных условиях полиэтилен низкой плотности примерно на 55 – 70 % кристалличен и на 30 – 45 % аморфен, по внешнему виду представляет собой твердый белый роговидный продукт, на ощупь напоминающий парафин [1].

Физические свойства полиэтилена: низкая плотность (один из самых легких полимеров), высокая прочность на разрыв, хорошая пластичность при низких температурах, высокая температура термодеструкции [2].

Химические свойства полиэтилена: устойчивость к воздействию концентрированных кислот и щелочей, бензо- и маслостойкость, пара- и влагонепроницаемость. Диэлектрические свойства полиэтилена: низкие диэлектрические потери, низкая диэлектрическая постоянная, высокая электрическая прочность, высокое удельное объемное сопротивление [2].

ПЭВД – легкий, прочный, эластичный материал с низкой газо-, паропрооницаемостью. Благодаря этому он имеет широкую область применения [3].

					<i>ВКР.161868.180301.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Д.Ю. Потапчук</i>			Расчет установки полиэтилена на ООО «ЗапсибНефтехим» с увеличением производительности на 15 %	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Ю.А. Гцжель</i>				У	7	75
<i>Н. Контр.</i>		<i>Т.А. Родина</i>		24.06.20		АМГУ ИФФ 618-об зр.		
<i>Утверд.</i>		<i>Ю.А. Гцжель</i>						

Полиэтилен используют в химической промышленности, лёгкой и пищевой промышленности, в строительстве, мелиорации и производстве товаров народного потребления. Полиэтилен устойчив к воздействию многих агрессивных сред, таких как кислоты, щелочи, масла. Он применяется для изготовления химического оборудования.

Так же есть возможность модифицировать полиэтилен путем введения в него различных добавок, что позволяет повысить его механическую прочность, морозостойкость, огнестойкость, химическую стойкость, физико-химические и конструктивные показатели. Благодаря этому открываются новые области применения [4].

Большинство крупных нефтехимических компаний мира занимаются производством полиэтилена. Внутренний рынок растет быстрыми темпами, в то время как дальнейший рост производства полиэтилена в России является невозможным без ввода новых больших производственных мощностей.

В промышленности полиэтилен получают полимеризацией этилена при высоком (ПЭВД, ПЭНП) и низком давлениях (ПЭНД, ПЭВП). Полиэтилен высокого давления (низкой плотности) получается полимеризацией этилена при высоком давлении в трубчатых реакторах или реакторах с перемешивающим устройством с применением инициаторов радикального типа. Процесс полимеризации при высоком давлении протекает по радикальному механизму, инициаторами являются кислород, пероксиды, например, лаурилы или бензоила, или их смесей [4].

Полиэтилен низкого давления (высокой плотности), получают суспензионным методом полимеризации этилена при низком давлении на комплексных металлоорганических катализаторах в суспензии или газофазным методом полимеризации этилена в газовой фазе на комплексных металлоорганических катализаторах на носителе или полимеризацией этилена в растворе [5]. Свойства ПЭВД, который получают по методу радикальной полимеризации и ПЭНД, получаемого различными методами представлены в таблице 1.

						ВКР.161868.180301.ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись				8

Таблица 1 – Сравнение свойств ПЭВД и ПЭНД

Показатель	ПЭВД	ПЭНД
Плотность, кг/ м <sup>3</sup>	910 – 935	910 – 965
Показатель текучести расплава, г/10 мин.	0,8 – 70	0,01 – 80
Среднемассовая молекулярная масса M <sub>w</sub> 10 <sup>3</sup>	10 – 80	50 – 500
Полидисперсность M <sub>w</sub> / M <sub>n</sub>	10 – 30	3 – 20
Предел текучести при растяжении, МПа	9 – 15	10 – 35
Прочность при разрыве, МПа	9 – 16	15 – 45
Относительное удлинение при разрыве, %	400 – 700	25 – 1200
Ударная вязкость (образец с надрезом), кДж/м <sup>2</sup>	Прогибается без разрушения	2 – 150
Модуль упругости при изгибе, МПа	80 – 260	100 – 1200
Теплостойкость по Вика, °С	100 – 110	110 – 130
Стойкость к растрескиванию под напряжением, ч	Более 500	Более 1000
Содержание экстрагируемых веществ, %	0,1 – 1,4	Отсутствие
Содержание золы, %	Отсутствие	0,006 – 0,035

По этим данным можно сказать, что методы производство полиэтилена низкого давления дают возможность получить полимер с большим диапазоном плотности, а также с большей возможностью регулировать молекулярное и массовое распределение благодаря подбору катализаторов.

Линейная структура ПЭНД дает ряд преимуществ перед разветвленной молекулой ПЭВД. При похожих значениях плотности и показателей текучести, молекула ПЭНД имеет большую прочность, жесткость, ударную вязкость. Однако для изготовления различных пленок в приоритете ПЭВД. Так как использование ПЭНД для этого менее рентабельно. Из-за высокой температуры плавления возрастают затраты на электроэнергию. Также высокая жесткость пленок из ПЭНД исключает возможность их применения в некоторых областях.

ПЭВД не содержит остатков катализатора, поэтому у него есть преимущество в тех областях, где необходима высокая прозрачность и чистота мате-

риала. Так же ПЭВД используется для изготовления толстостенных эластичных изделий. Кроме того, только по методу синтеза при высоком давлении есть возможность получения сополимеров этилена с полярными мономерами.

Можно сделать вывод о том, что ПЭВД может использоваться во многих областях промышленности и заменить его на ПЭНД можно только частично.

Различные мировые производители, в том числе и Россия, проводили сравнение и анализы четырех методов промышленного производства полиэтилена. В результате было показано, что для установок с одинаковой единичной мощностью капитальные вложения достаточно близки.

## **1.2 Сравнение разновидностей процессов получения полиэтилена**

Сравнивая процесс полимеризации при высоком давлении в трубчатых и автоклавных реакторах, можно выделить следующие основные особенности технологии в каждом из них [3].

1. В автоклавах реакционное давление поддерживается постоянным. В то время как в трубчатых реакторах давление более высокое и оно снижается по длине реактора.

2. В трубчатых реакторах наблюдается широкий температурный профиль по длине, при этом максимальная температура достигает 320 °С. В автоклавах температура поддерживается в узких пределах в каждой зоне в интервале 170 – 280 °С.

3. Среднее время пребывания реакционной смеси в трубчатом реакторе постоянное, определяется соотношением объема реактора и количества подаваемого в реактор этилена и составляет для промышленных реакторов 60 – 300 с; в автоклавном реакторе переменное, изменяется в пределах 10 – 120 с.

4. Характер движения в трубчатых реакторах турбулентный, поршневой, в автоклавных реакторах – практически близок к идеальному смешению.

5. В качестве инициаторов полимеризации в трубчатых реакторах можно использовать кислород, растворы пероксидов, а также смеси кислород – пе-

									Лист
									10
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись						

*ВКР.161868.180301.ПЗ.*

роксиды, тогда как полимеризация в автоклавах проводится только под влиянием перекисных инициаторов. Невозможность применения кислорода для иницирования полимеризации в автоклавных реакторах объясняется трудностями регулирования температуры в реакторе из-за запаздывания при дозировании кислорода.

6. Пуск автоклавного реактора затруднен и требует подачи избыточного количества инициатора для предотвращения падения температуры при пуске.

В процессе полимеризации этилена выделяется большое количество тепла. В связи с этим конверсию этилена ограничивают 10 – 20 %, что приводит к необходимости рециркуляции значительных количеств непрореагировавшего этилена.

Основная проблема конструкционного решения связана с эффективностью теплоотвода.

В последнее время, благодаря ступенчатому вводу этилена и увеличению диаметра труб в змеевиковом реакторе, удалось повысить конверсию этилена до 20 – 25 % и увеличить производительность реакторов.

Отвод тепла в змеевиковом реакторе осуществляется циркулирующей в рубашке горячей водой и вводом части охлажденного сырья в полимеризационную зону реактора. Отвод тепла через стенку водой в реакторе с перемешивающим устройством малоэффективен из-за большого термического сопротивления толстостенного корпуса (толщина стенки 120 мм) и малой удельной поверхности стенок. Отвод тепла производится в реакторе путем подачи (в несколько точек) охлажденного этилена (до 40 °С) или вводом в зону реакции инертных жидкостей, на нагрев и испарение которых расходуется тепло реакции.

Благодаря эффективному перемешиванию, температура в реакторе выравнивается [4]. Глубина превращения в реакторах автоклавного типа достигает 20 – 25 %. Благодаря перемешиванию теплоотвод осуществляется более гибко, и устраняются местные перегревы.

Полимеризация этилена при низком давлении впервые была осуществлена в 50-х гг. XX века на катализаторе Циглера: комплексном соединении триалкилалюминия ( $AlR_3$ ) и четыреххлористого титана ( $TiCl_4$ ).

Полиэтилен низкого давления получают суспензионной полимеризацией этилена при  $75 - 85$  °С, давлении  $2 - 5$  атм. в растворителе (бензине) в присутствии каталитического комплекса в атмосфере азота.

Процесс может быть периодическим или непрерывным. Важным фактором, влияющим на свойства полиэтилена, является чистота исходного сырья. Наличие гомологов этилена и ацетиленов приводит к снижению молекулярной массы полимера.

Вода гидролизует каталитический комплекс. В результате образуются нерастворимые соли титана и алюминия, которые остаются в полиэтилене, увеличивая его зольность и ухудшая диэлектрические свойства.

Полиэтилен, полученный этим способом, является линейным и кристаллическим. Температура плавления полимера и плотность более высокие, чем у полиэтилена, полученного при высоком давлении.

### 1.3 Применение полиэтилена

В настоящее время нет практически ни одной отрасли народного хозяйства, где бы не использовался полиэтилен. Высокие диэлектрические свойства полиэтилена, малая проницаемость для паров воды позволяют широко использовать его для изоляции электропроводов и кабелей. Изоляция кабелей полиэтиленом имеет преимущества по сравнению с каучуковой изоляцией.

Из всех типов пластмасс полиэтилен нашел наибольшее применение при изготовлении труб, которые характеризуются легкостью, коррозионной стойкостью, незначительным гидравлическим сопротивлением.

Большая часть пленки из полиэтилена низкой плотности применяется как упаковочный материал, конкурируя с другими пленками (целлофановой, поливинилхлоридной); меньшая часть используется для изготовления сумок, мешков, для облицовки ящиков.

										Лист
										12
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись							

Сравнивая свойства полиэтилена, полученного разными методами, можно отметить, что полиэтилен низкого давления обладает большей прочностью, плотностью и более высокой температурой плавления по сравнению с полиэтиленом высокого давления. Однако полиэтилен высокого давления имеет самые лучшие диэлектрические свойства, и из него получают высококачественные пленки. По химической стойкости полиэтилен низкого давления уступает полиэтилену высокого давления из-за наличия в нем примесей катализатора, обуславливающих деструкцию и старение полимера. Худшие диэлектрические свойства полиэтилена низкого давления связаны также с наличием в нем примесей металлосодержащих катализаторов, повышающих зольность полимера.

Полиэтилен перерабатывается всеми способами, известными для переработки пластмасс. В переработке полиэтилена не требуется задействования специального оборудования, которое нужно для переработки, например, ПВХ. Для окрашивания изделий из полиэтиленов, на сегодняшний день выпускается сотни марок различных красителей и пигментов, которые подходят и для остальных полиолефинов [6].

Путем применения экструзии получают полиэтиленовые кабели, полиэтиленовые трубы (PE63, PE80, PE100), листовой полиэтилен для упаковки и строительства, пленки самых разнообразных видов и марок, для потребностей абсолютно всех отраслей промышленности.

Разнообразный упаковочный материал из полиэтилена получают путем термо-вакуумного формования и литья под давлением. На сегодняшний день, это самый развивающийся сегмент рынка пластиковых изделий. Для получения различного рода сосудов, тары и емкостей, полиэтилен перерабатывается ротационным и экструзионно-выдувным способами. Достаточно крупными отечественными потребителями полиэтилена являются компании, производящие игрушки и канцелярские товары.

Для создания специальных стройматериалов используется полиэтилен специального назначения: хлорсульфированный полиэтилен, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, сшитый полиэтилен и вспененный полиэтилен. Армированный полиэтилен используется как конструкционный материал, хотя в своем «обычном» виде таковым не является. Полиэтилен отлично поддается сварке, любым из ее способов: горячим газом, трением, присадочным прутком и контактным способом.

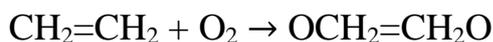
Рециклинг полиэтилена – один из емких сегментов сегодняшнего рынка. В России и во всем мире очень много компаний, специализирующихся на продаже и использовании вторичного полиэтилена, путем покупки и переработки отходов данного материала. В данном случае применяется технология прессования очищенных отходов, дробления их с последующим получением вторичного гранулированного полиэтилена, который тоже будет пригоден для изготовления различных изделий.

#### **1.4 Физико-химические основы процесса**

##### **Механизм процесса**

Полимеризация этилена под высоким давлением является типичным радикальным процессом, но со своими особенностями, связанными с природой мономера и условий реакции [7]. Полимеризация этилена состоит из трех основных стадий: инициирование, рост цепи и обрыв цепи. Помимо этих стадий проходят побочные реакции, такие как передача цепи на мономер. В качестве инициаторов применяются молекулярный кислород, органические пероксиды.

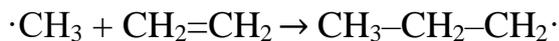
1 стадия – инициирование – состоит в образовании активных радикалов:



При температуре выше 150 °С пероксидные соединения распадаются, образуя радикалы, к которым присоединяются молекулы мономеров.

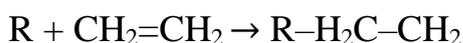
В зависимости от давления, температуры и состава смеси скорости каждой реакции могут различаться. Инициаторы разлагаются при соответствующих температурах и образуют два радикала.

Присоединение этилена к новообразованному радикалу является началом реакции, в результате которой образуется новый радикал.

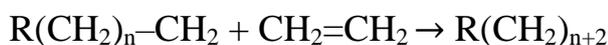


Скорость общей реакции определяется скоростью распада инициатора, так как скорость последней реакции значительно выше скорости распада пероксида.

2 стадия – рост цепи – быстрое последовательное присоединение молекул этилена к радикалу.

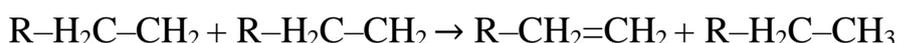
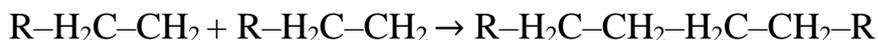


В общем виде:

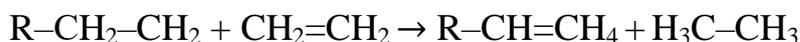
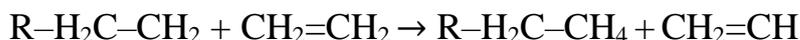


Скорость данной стадии почти равна общей скорости полимеризации из-за того, что количество образовавшегося полимера равно количеству израсходованного мономера.

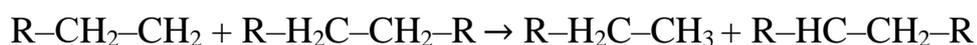
3 стадия – обрыв цепи – взаимодействие двух растущих радикалов с образованием одной или двух неактивных молекул полиэтилена рекомбинацией или диспропорционированием:



Стадия передачи цепи на мономер:

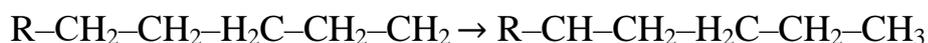


Межмолекулярная передача цепи на полимер:



Вторичный радикал может дальше участвовать в росте цепи с образованием длинноцепных ответвлений.

Внутримолекулярная передача цепи на полимер:



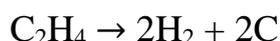
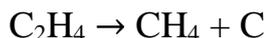
При такой реакции образуются короткие цепные ответвления.

										Лист
										15
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись							

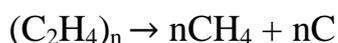
Помимо этих реакций в процессе производства происходят реакции разложения в реакторах, реакции деструкции, то есть сшивание полиэтилена. Эти реакции плохо влияют на весь процесс производства, снижая качество полиэтилена, а также приводят к нарушениям производственным работ.

### **Реакция разложения**

Компримированный этилен при высокой температуре разлагается на углерод, водород и метан.



Такие же реакции протекают при разложении полиэтилена:



Эти реакции экзотермичны. При разложении всегда образуется смесь метана, водорода и углерода, причем доля водорода тем выше, чем более интенсивно разложение, так как с ростом температуры изменение энергии Гиббса для реакции [7]. Опыт эксплуатации установок полимеризации этилена показывает, что разложению всегда предшествует повышение температуры в результате ускорения процесса полимеризации и превышения тепловыделения над теплоотводом.

### **Реакция деструкции (сшивание полиэтилена)**

Деструкция полимеров – разрушение молекул полимеров под действием тепла, кислорода, света, механических напряжений, биологических факторов. В процессе деструкции происходит разрыв химических связей в макромолекулах, уменьшается степень полимеризации и молекулярная масса полимера. Изменение строения полимера приводит к изменению его физических и химических свойств, то есть к старению полимеров. Помимо разрыва химических связей, происходят сшивание, образование двойных связей и свободных радикалов. Сшитый полимер в виде отложения остается на стенках реактора, отделителя высокого давления и особенно низкого давления.

									Лист
									16
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись						

## Термодинамика процесса полимеризации

Основными термодинамическими характеристиками химической реакции являются изменение энергии Гиббса  $\Delta G$  и тепловой эффект реакции  $\Delta H$ , которые связаны соотношением:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (1)$$

где  $\Delta H$  – изменение энтальпии системы;

$T$  – абсолютная температура;

$\Delta S$  – изменение энтропии системы.

Предельная температура поляризации этилена значительно выше таковой для других мономеров [8]. Эта термодинамическая особенность позволяет проводить промышленный синтез ПЭ при температурах выше 300 °С.

Термодинамические характеристики элементарных реакций полимеризации этилена представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Термодинамические характеристики

Показатель	$\Delta G$ , кДж/моль	$\Delta H$ , кДж/моль
Рост цепи	- 51,2	- 93,6
Обрыв цепи рекомбинацией	- 248	- 302
Обрыв цепи диспропорционированием	- 215	- 221
Передача цепи на мономер	54,6	53,6
Внутримолекулярная передача цепи	- 16,4	- 17,7
Передача цепи на мономер	- 40,8	- 43,2

Тепловые эффекты и изменения энергий Гиббса согласуются с механизмом и кинетикой элементарных реакций полимеризации этилена. Так же благодаря термодинамике можно объяснить почти отсутствие передачи цепи на мономер и интенсивную передачу цепи на полимер, в том числе и образование третичных полимерных радикалов.

## Кинетика полимеризации

Полимеризация этилена при высоком давлении протекает по обычным закономерностям реакции полимеризации винильных соединений, протекающей по свободно-радикальному механизму. Особенностью полимеризации этилена, инициированной свободными радикалами, заключается в том, что полиэтилен с высоким молекулярным весом получается лишь при высоких концентрациях мономера. При малых концентрациях этилен присоединяется к свободным радикалам, но с реакцией их роста конкурируют реакции дезактивации свободных радикалов, и образующийся полимер имеет невысокий молекулярный вес [9].

Скорость реакции зависит от количества кислорода в газе, который является инициатором полимеризации. Но помимо этого влияние оказывает температура и давление, что приводит к сложной зависимости. Так каждому значению температуры и давления будет соответствовать определенное количество кислорода в газе, при котором выход полимера будет максимальным [10].

В таблице 3 представлена зависимость содержания кислорода от температуры и давления.

Таблица 3 – Зависимость содержания кислорода от температуры и давления

Температура, °С	Давление, атм.	Содержание кислорода, %
160	1000	0,023
160	1150	0,026
160	1350	0,021
170	1150	0,022

Если концентрация кислорода слишком высока, то этилен будет разлагаться с взрывом на углерод, водород и метан [11].

Процесс полимеризации этилена можно описать следующими кинетическими зависимостями:

1. Скорость разложения инициатора:

$$V_{\text{рас}} = k_{\text{рас}}[I] \quad (2)$$

где  $k_{\text{рас}}$  – константа скорости распада инициатора;

$[I]$  – концентрация.

Так как при распаде одной молекулы инициатора возникают два радикала, их скорость с учетом эффективности инициирования уравнение скорости инициирования можно представить, как:

$$V_{\text{рас}} = 2fk_{\text{рас}}[I] \quad (3)$$

где  $f$  – эффективность инициирования.

2. Скорость роста цепи описывается уравнением:

$$V_p = k_p [M'] [M] \quad (4)$$

где  $V_p$  – скорость роста цепи;

$k_p$  – константа роста цепи;

$[M]$  – концентрация мономера;

$[M']$  – концентрация растущих радикалов.

3. Скорость обрыва цепи:

$$V_0 = k_0 [M']^2 \quad (5)$$

где  $V_0$  – скорость обрыва цепи;

$k_0$  – константа скорости обрыва цепи.

4. Скорость передачи цепи на мономер:

$$V_{\text{пм}} = k_{\text{пм}} [M'] [M] \quad (6)$$

где  $V_{\text{пм}}$  – скорость передачи цепи;

$k_{\text{пм}}$  – константа скорости передачи цепи.

В ходе полимеризации скорость изменения концентрации радикалов быстро приближается к нулю, а это равносильно тому, что скорость инициирования и скорость обрыва цепи равны между собой [12]. Следовательно, уравнение скорости полимеризации:

$$V_n = k_p \sqrt{\left(\frac{f \cdot k_{рас}}{k_0}\right)} \cdot \sqrt{[I]} \cdot [M] \quad (7)$$

Длину кинетической цепи можно выразить уравнением, она пропорциональна квадрату концентрации мономера и обратно пропорциональна скорости полимеризации:

$$V = \frac{k_p^2}{2k_0} \cdot \frac{[M]^2}{V_p} \quad (8)$$

В реакторах полимеризации в условиях быстрого распада инициатора, высокого давления и при непрерывной работе устанавливается стационарный режим.

Основываясь на материальный баланс, концентрацию инициатора можно вычислить, используя уравнение:

$$I_p = \frac{Q}{Q + K_g V} I_0 \quad (9)$$

где  $Q$  – количество подаваемого газа, м<sup>3</sup>/ч;

$I_p$  – концентрация инициатора в реакторе, моль/л;

$I_0$  – концентрация инициатора во входящем потоке (начальная), моль/л;

$V$  – объем реактора;

$t$  – время, ч.

Общую энергию активации описывается как:

$$E_{общ} = \frac{1}{2} E_{расп} + E_{р.ц.} - \frac{1}{2} E_{о.ц.} \quad (10)$$

Для большинства пероксидов энергия активации распада составляет 125 кДж/моль, энергия активации роста 25 кДж/моль, энергия активации обрыва 8 кДж/моль.

Отсюда следует, что общая энергия активации реакции полимеризации этилена будет равна:

$$E_{\text{общ}} = 125/2 + 25 - 8/2 = 83,5 \text{ кДж/моль.}$$

### **Влияние основных параметров на процесс полимеризации**

Можно выделить несколько отличительных особенностей полимеризации ПЭВД [13]:

- 1) Высокое давление 100 – 350 МПа (1000 – 3500 кгс/см<sup>2</sup>) и температура 423 – 573 К (150 – 300 °С);
- 2) Большая скорость полимеризации и выделение в зоне реакции большого количества тепла (тепловой эффект 3,55 кДж/кг);
- 3) При некоторых условиях в реакторе происходит разделение двух фаз: этилена и полиэтилена;
- 4) При недостаточно быстром отводе тепла из зоны реакции температура в реакторе быстро повышается и происходит разложение этилена со скоростью взрыва, с образованием метана, водорода и сажи.

#### **Влияние давления**

Концентрация этилена повышается с увеличением давления. При большом давлении его плотность может достигать в среднем 450 кг/м<sup>3</sup>. Концентрация этилена не является линейной функцией давления, поэтому ее необходимо определять, основываясь на его плотности при нужном давлении и температуре [14].

С повышением давления снижаются все скорости реакции передачи цепи. Так же это хорошо влияет на образование полиэтилена большой плотности и благодаря этому растет молекулярная масса. Кроме того, этот фактор

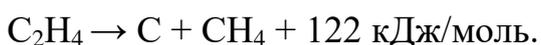
										Лист
										21
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись							

влияет на строение полимера. Чем больше давление, тем меньше становится разветвленность и содержание непредельных групп.

### **Влияние температуры**

С повышением температуры скорость роста цепи увеличивается меньше, чем скорость реакций передачи цепи и распада инициатора, что приводит соответственно к увеличению степени разветвленности (того и другого типа) и уменьшению молекулярной массы.

Эффективность применяемых инициаторов колеблется в пределах от 0,5 до 1,0. в связи с тем, что реакция полимеризации этилена экзотермична, возможны случаи, когда процесс выходит из-под управления и повышение температуры может превысить критическое значение – произойдет термическое разложение:



Из-за экзотермичности реакции происходит резкое повышение температуры в реакторе, что приводит к резкому подъему давления. Скорость реакции полимеризации возрастает, причем скорость передачи цепи растет быстрее, чем скорость роста. Масса полимера снижается, так же падает плотность продукта.

Для регулирования температуры необходимо следить за количеством подаваемого инициатора и давлением этилена.

### **Влияние фазового состояния реакционной системы**

В процессе полимеризации этилен и полиэтилен могут составлять как одну, так и две фазы. Этот фактор зависит от давления, температуры, а также количества полимера.

Когда реакционная смесь расслаивается, то кинетика реакции меняется. Так как концентрации мономеров, инициатора, регулятора и полимера зависят от взаимной растворимости обеих фаз. Так же это приводит к отложению полимера на стенках реактора, а это плохо влияет на передачу тепла.

									Лист
									22
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись						

Кроме того, фазовое состояние оказывает влияние на свойства продукта полимеризации.

Если в гомофазной системе в процессе роста цепи образуются молекулы с малым количеством коротких боковых ответвлений, то в гетерофазной системе преобладают молекулы с длинными боковыми ветвями. Так же может образоваться частично сшитый полимер с большой молекулярной массой, что снижает качество продукта.

Скорость реакции при гомофазной полимеризации значительно выше, чем при гетерофазной.

### **Влияние инициатора**

Инициатор должен хорошо растворяться в растворителях, обладать стабильностью при хранении и безопасностью при работе. Инициаторы подразделяются на низкотемпературные (140 – 180 °С), среднетемпературные (180 – 260 °С) и высокотемпературные (200 – 280 °С). Его расход зависит от давления, скорости подачи исходного сырья и скорости перемешивания.

### **Влияние модификаторов**

Для того, что получить полиэтилен с заданными свойствами, необходимо подбирать агенты передачи цепи, которые будут влиять на молекулярную массу и структуру полимера должным образом.

## 2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 2.1 Анализ и обоснование модернизации установки

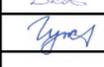
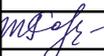
Установка предназначена для получения ПЭВП методом жидкофазной полимеризации этилена по технологии Innovene™ S компании INEOS (Великобритания).

Полимеризация осуществляется в суспензионном петлевом реакторе, в котором образование и рост частиц полимера осуществляется в среде инертного легкого углеводородсодержащего разбавителя (изобутана) при поступлении смеси мономера – этилена и сомономеров (гексена-1 или бутена-1), водорода, а также катализаторов и сокатализаторов процесса полимеризации. Полимеризация осуществляется в мономодальном и бимодальном режиме [15].

ПЭВП получают полимеризацией этилена или смеси этилена/сомономера суспензионным методом в среде изобутанового разбавителя в присутствии катализатора Циглера Innovene™ МТ или хромового катализатора с выходом полимера от 1500 до 15000 кг ПЭВП/кг катализатора и выше.

Дегазированный порошок ПЭВП через систему пневмотранспорта направляется для дальнейшего получения на стадии экструзии гранулированного полиэтилена черного, желтого и естественного цвета различных марок [16].

В данный момент соотношение ПЭВП к катализатору варьируется на уровне 12000 – 13000 кг ПЭВП/кг катализатора, повысив это значение, станет возможным увеличение производительности установки. Достичь необходимого соотношения можно повысив активность катализатора путем увеличения подаваемого триэтилалюминия (ТЭАЛ) и триэтилборана (ТЭБ).

					<i>ВКР.161868.180301.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Д.Ю. Потапчук</i>			Расчет установки полиэтилена на ООО «ЗапсибНефтехим» с увеличением производительности на 15 %	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Ю.А. Гцжель</i>				У	24	75
<i>Н. Контр.</i>		<i>Т.А. Родина</i>		24.06.20		АМГУ ИФФ 618-об зр.		
<i>Утверд.</i>		<i>Ю.А. Гцжель</i>						

Цель выпускной квалификационной работы – увеличение производительности установки полимеризации этилена ООО «ЗапСибНефтехим» на 15 %.

## 2.2 Характеристика сырья и готовой продукции

Сырьем является смесь углеводородов с водородом, дополнительно в реактор подается катализатор в смеси с сокатализатором.

Характеристика сырья представлена в таблице 4 [17].

Характеристика готовой продукции представлена в таблице 5 [17].

Таблица 4 – Характеристика сырья

Наименование сырья	Агрегатное состояние при н.у.	Плотность паров (газа) по воздуху	Растворимость в воде, мл/л	Температура, °С	
				кипения	плавления
Этилен не менее 99,95 % масс.	Газ	1,268 кг/м <sup>3</sup>	0,256 (0 °С)	- 103,7	- 169,2
Водород не менее 99,99 % об.	Газ	0,089 кг/м <sup>3</sup>	0,188 (0 °С)	- 252,8	- 259
Бутен-1 не менее 99,00 % масс.	Газ	2,503 кг/м <sup>3</sup>	0,022 (25°С)	- 6,6	- 185,3
Гексен-1 не менее 99,00 % масс.	Жид	673 кг/м <sup>3</sup>	0,005 (25°С)	63,35	- 139,82
Изобутан не менее 98,50 %	Газ	2,870 кг/м <sup>3</sup>	0,00489 (25°С)	- 11,7	- 159,6
Триэтилалюминий (ТЭАЛ), сокатализатор, более 94 % масс.	Жид (ЛВЖ)	837 кг/м <sup>3</sup>	взрыв	185,6	- 52
Триэтилборан (ТЭБ) в гексане, сокатализатор, не менее 25 % масс.	Жид	696,1 кг/м <sup>3</sup>	взрыв	95	- 92,9

Таблица 5 – Характеристика готовой продукции

Характеристика	Порошок Тип 1	Порошок Тип 2А	Порошок Тип 2В	Порошок Тип 3	Ед. изм.
	Мономодальный (хромовый катализатор)	Бимодальный (катализатор Циглера тип А)	Бимодальный (катализатор Циглера тип В)	Мономодальный (катализатор Циглера)	
1	2	3	4	5	6
Размер средней частицы $d_{50}$ (ситовой анализ по методу SL-QC004)	Мин. 570 Ном. 610 – 660 Макс. 770	Мин. 190 Ном. 215 – 295 Макс. 325	Мин. 100 Ном. 110 – 160 Макс. 190	Мин. 230 Ном. 235 – 290 Макс. 560	мкм
Насыпная плотность свободно оседающего порошка (измеряется по SL-QC003)	Мин. 340 Ном. 360 – 440 Макс. 560	Мин. 340 Ном. 380 – 440 Макс. 560	Мин. 340 Ном. 370 – 440 Макс. 560	Мин. 340 Ном. 440 – 520 Макс. 560	кг/м <sup>3</sup>
Насыпная плотность уплотненного порошка	Может быть на 17 % выше, чем насыпная плотность свободно оседающего порошка с макс. 610 кг/м <sup>3</sup>				кг/м <sup>3</sup>
Плотность полимера (по SL-QC002)	936 - 963	941 - 955	941 – 955	936 – 963	кг/м <sup>3</sup>
Температура	Мин. Т окруж. среды; Ном. 60 – 90; Макс. 95				°С
Угол естественного откоса	25 – 45 от горизонтали				
Эффективный угол внутреннего трения	25 – 50				

Продолжение таблицы 5

1	2	3	4	5	6
Угол трения о стенку	10 – 25 (среднеквадратичное отклонение шероховатости поверхности материала стенки CS 125)				
Текучесть	От отличной до хорошей				
Абразивность	Не абразивен к металлу Может быть абразивным к неметаллам.				
Остаточные углеводороды C <sub>2</sub> -C <sub>6</sub> (общее содержание летучих веществ при 100 °С) по SL-QC202	мин. 10 – макс. 500 (на выходе дегазатора порошка)				ppm в весовом соотношении
Температура размягчения по Вика (1 кг)	110 – 132				°С
Температура размягчения по Вика (5 кг)	64 – 80				°С
Стандартная удельная теплоемкость при комнатной температуре	2,5 – 2,6				кДж/кг·К

Допустимое содержание кислорода, для предотвращения ухудшения свойств полимера:  $\leq 500$  ppm об.

Полиэтилен в виде порошка и пыли классифицируется как порошок ST1 согласно стандарту NFPA 68 Изд. 2007 [18].

Порошок полиэтилена высокой плотности из силосов порошка поступает на производство готовой продукции для получения гранулированного полиэтилена.

### 2.3 Описание технологической схемы

На рисунке 1 представлена технологическая схема производства полиэтилена высокой плотности на ООО «ЗапСибНефтехим».



Блок подготовки:

- Общая установка активации хромового катализатора,
- Общий узел разгрузки и подачи сокатализаторов;

Основное производство:

- подготовка сырья,
- полимеризация,
- промежуточная обработка реакционной смеси,
- отделение и дегазация порошка ПЭВП,
- выделение и регенерация разбавителя,
- система пневмотранспорта порошка ПЭВП;

Вспомогательные системы:

- обеспечение энергоресурсами,
- факельная система.

### **Блок подготовки**

#### **Установка активации катализатора**

Активатор хромового катализатора предназначен для перевода исходного хромового катализатора Cr(III) в активную форму Cr(VI). Установка активации работает в периодическом режиме на основе алгоритмов, разработанных для различных вариантов технологического процесса по получению различных марок ПЭВП.

Активация хромового катализатора осуществляется в псевдоожиженном слое посредством окисления трехвалентного хрома кислородом воздуха при давлении, близком к атмосферному, в диапазоне от температуры окружающей среды до 900 °С.

#### **Ввод катализатора**

В составе производства ПЭВП предусмотрена запатентованная система подачи катализатора, с помощью которой возможно осуществлять подачу строго определенного количества катализатора в реакторы полимеризации в широком диапазоне физических форм катализатора.

									<i>Лист</i>
									29
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>						

*ВКР.161868.180301.ПЗ.*

Полученная суспензия катализатора подаётся в реакторы полимеризации дозировочным насосом Н-3.

#### **Подача сокатализатора**

В качестве сокатализатора может выступать либо ТЭАЛ (чистый), либо ТЭБ (25 % в гексане), в зависимости от марки ПЭВП, подающиеся в реактор насосом Н-4.

#### **Основное производство**

##### **Подготовка сырья**

Подача мономера – этилена, сомономеров – бутена-1 и гексена-1, разбавителя – изобутана, водорода на производство ПЭВП осуществляется по трубопроводам от производств и сетей ОЗХ Комплекса.

Качество водорода, поступающего на производство ПЭВП, удовлетворяет требованиям по содержанию примесей для реакции полимеризации и не требует дополнительной очистки.

Этилен перед поступлением на производство ПЭВП подвергается очистке в многоступенчатой адсорбционной системе производства ЛПЭНП/ПЭВП. В случае несоответствия качественных показателей этилена требованиям технологии Innovene™ S, а также в период пуска предусмотрена возможность дополнительной очистки этилена в адсорбере, заполненном активированным алюминием AxSorb 537.

Узлы подготовки сырья предназначены для очистки изобутана и сомономеров (бутена-1, гексена-1) с целью обеспечения требуемого качества для реакции полимеризации. Очистка сырья производится в адсорберах.

##### **Полимеризация**

ПЭВП получают полимеризацией этилена или смеси этилена/сомономера суспензионным методом в среде изобутанового разбавителя в присутствии катализатора Циглера Innovene™ MT или хромового катализатора.

Выход полимера от 1500 до 15000 кг ПЭВП/кг катализатора и выше.

Полимеризация осуществляется в трех режимах:

										Лист
										30
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись							

ВКР.161868.180301.ПЗ.

- в мономодальном режиме с использованием хромового катализатора;
- в мономодальном режиме с использованием катализатора Циглера;
- в бимодальном режиме с использованием катализатора Циглера.

Для реакторов полимеризации предусмотрены емкости аварийной выгрузки, которые принимают реакцию массу при неконтролируемом росте температуры и в других аварийных ситуациях, а также сбросы реакционной массы при срабатывании предохранительных клапанов.

#### **Промежуточная обработка реакционной смеси**

Система промежуточной обработки применяется только для производства бимодальной продукции. Использование промежуточной обработки служит для изменения условий реакции в каждом реакторе в отдельности. Система промежуточной обработки предназначена для удаления определенных компонентов реакции, поступающих из первого реактора, которые могут снизить качество продукции во втором реакторе.

#### **Выделение и дегазация порошка полиэтилена**

Данный узел предназначен для отделения продукта реакции полимеризации – порошка полиэтилена от разбавителя и для дегазации порошка от остатков разбавителя. Порошкообразный полиэтилен и разбавитель из реакторов полимеризации поступают в нагреватели суспензии, где происходит испарение разбавителя. Далее пары разбавителя и порошкообразный полиэтилен разделяются в сепараторе высокого давления. Порошок полиэтилена, содержащий остатки разбавителя, из сепаратора высокого давления поступает в дегазатор, где удаляются остатки разбавителя с помощью продувки азотом низкого давления.

#### **Регенерация разбавителя**

Система выделения разбавителя предназначена для приема паров разбавителя из секции дегазации для последующих конденсации и регенерации разбавителя, удаления неконденсируемых газов и возвращения регенерированного разбавителя в технологический цикл.

Введение свежего изобутана осуществляется для компенсации потерь в ходе технологического процесса.

### **Система пневмотранспорта порошка полиэтилена**

Системой пневмотранспорта осуществляется транспортировка с помощью замкнутого контура азота порошка полиэтилена из дегазатора в силосы порошка, установленные на здании экструзии, для последующего введения добавок и гранулирования. Азот после фильтрации с помощью циркуляционной газодувки возвращается в систему пневмотранспорта.

### **2.4 Материальный баланс установки**

На данный момент до проведения модернизации годовая производительность линии составляет 350 тыс. тонн. Годовая мощность обеспечивается с учетом расчетного цикла времени – 8000 часов.

Составим материальный баланс в таблице 6.

Таблица 6 – Материальный баланс установки до модернизации

Приход	% масс.	кг/ч	т/год	Расход	% масс.	кг/ч	т/год
1	2	3	4	5	6	7	8
Этилен:	99,56	46282,74	370261,89	Полимер:	94,3	43837,51	350700,14
Этилен	99,95	46259,59	370076,76	Товарный	99,78	43741,06	350000,00
Метан	0,05	23,14	185,13	Потери экструзии	0,1	43,84	350,70
Водород	0,02	9,30	74,38	Потери дегазации	0,1	43,84	350,70
Катализатор:	0,004	1,86	14,88	Отходы	0,02	8,77	70,14
Хромовый	75	1,39	11,16	Отход. газ реактора:	4,25	1975,71	15805,68
Циглера	25	0,46	3,72	Водород	0,53	10,47	83,77
Сомономеры:	0,4117	191,39	1531,11	Метан	6,28	124,07	992,60
Бутен-1	50	95,69	765,55	Этилен	93,19	1841,16	14729,31

1	2	3	4	5	6	7	8
Гексен-1	50	95,69	765,55	Отход. газ колонны:	1,45	674,07	5392,52
Изобутан	0,0003	0,14	1,12	Этилен	19,7	132,79	1062,33
ТЭАЛ	0,003	1,39	11,16	Метан	0,1	0,67	5,39
ТЭБ	0,001	0,46	3,72	Водород	80,2	540,60	4324,80
ИТОГО	100	46487,28	371898,24	ИТОГО	100	46487,28	371898,24

Произведем расчет после увеличения производительности установки.

Предполагаемая годовая производительность установки после модернизации: 402,5 тыс. тонн;

- Годовой фонд рабочего времени: 8000 ч/год;

- Степень конверсии этилена – 0,96;

Часовая производительность установки:

$$\frac{402500 \cdot 1000}{8000} = 50312,5 \text{ кг/ч}$$

С учётом потерь мелкодисперсного порошка на стадии дегазации (0,1 %) необходимо получить порошка сополимера:

$$50312,5 \cdot 1,001 = 50362,81 \text{ кг/ч}$$

Из производственных данных известно, что получается около 0,1 % некондиционного полимера на стадии экструзии, так как имеет место получение очень мелких гранул. Некондиционная пыль отсеивается на стадии вибросит после экструзии.

С учётом получения некондиционного статсополимера необходимо получить порошка:

$$50362,81 \cdot 1,001 = 50413,17 \text{ кг/ч}$$

Содержание водорода, в результате его участия в обрывах, цепи носит эмпирический характер и зависит от необходимого ПТР. В данном случае прием расход водорода на целевую реакцию 5,5 кг/ч, основываясь на экспериментальных данных компании INEOS.

Таким образом на получение необходимого количества порошка необходимо:

С учётом конверсии необходимо:

$$\frac{50413,17}{0,96} = 53513,72 \text{ кг/ч}$$

С учётом чистоты сырья получаем:

$$\frac{53513,72}{0,96} = 55743,46 \text{ кг/ч}$$

При использовании каталитической системы на производстве после модернизации (увеличении подачи ТЭАЛ и ТЭБ целью повышения активности катализатора) на производительности 402,5 тыс. тонн в год рекомендуется следующий расход компонентов катализатора:

Катализатор:	1,86 кг/ч
Хромовый (75 % масс.):	1,39 кг/ч
Циглера (25 % масс.):	0,46 кг/ч
Изобутан:	0,16 кг/ч
ТЭАЛ:	1,60 кг/ч
ТЭБ:	0,53 кг/ч

Количество потерь полимера на стадии дегазации:

$$50362,81 - 50312,5 = 50,31 \text{ кг/ч}$$

									Лист
									34
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись						

Количество потерь при грануляции на стадии экструзии:

$$50413,17 - 50362,81 = 50,36 \text{ кг/ч}$$

Полученные расчёты сводим в таблицу 7.

Таблица 7 – Материальный баланс установки после модернизации

Приход	% масс.	кг/ч	т/год	Расход	% масс.	кг/ч	т/год
Этилен:	99,56	53225,15	425801,17	Полимер:	94,30	50413,17	403305,36
Этилен	99,95	53198,53	425588,27	Товарный	99,78	50312,50	402500,00
Метан	0,05	26,61	212,90	Потери экструзии	0,10	50,36	402,88
Водород	0,02	10,69	85,54	Потери де- газации	0,10	50,31	402,48
Катализатор:	0,004	1,86	14,88	Отходы	0,02	10,01	80,08
Хромовый	75	1,39	11,16	Отход. газ реактора:	4,25	2262,06	18096,45
Циглера	25	0,46	3,72	Водород	0,53	12,04	96,34
Сомомеры:	0,4117	220,10	1760,77	Метан	6,28	142,69	1141,49
Бутен-1	50	110,05	880,39	Этилен	93,19	2117,34	16938,71
Гексен-1	50	110,05	880,39	Отход. газ колонны:	1,45	774,86	6198,86
Изобутан	0,0003	0,16	1,28	Этилен	19,7	152,65	1221,18
ТЭАЛ	0,003	1,60	12,83	Метан	0,10	0,77	6,20
ТЭБ	0,001	0,53	4,28	Водород	80,20	621,44	4971,48
ИТОГО	100	53460,09	427680,74	ИТОГО	100	53460,09	427680,74

## 2.5 Тепловой баланс

Полученный материальный баланс реактора не учитывает поток этилена, подаваемого в качестве охлаждения. Для определения количества необходимого этилена рассчитаем тепловые потоки ректора.

Для определения необходимого количества квенча нужно знать количество теплоты, которую надо отвести от реактора ( $Q_{исп}$ ).

						ВКР.161868.180301/ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись				35

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_{xp} = Q_{соп} + Q_{исп} + Q_{пот} + Q_5 \quad (11)$$

где  $Q_1$  – тепловой поток этилена на реакцию;

$Q_2$  – тепловой поток водорода;

$Q_3$  – тепловой поток этилена в низ реактора;

$Q_5$  – тепловой поток уходящего газа;

$Q_{xp}$  – тепловой эффект сополимеризации;

$Q_{сопп}$  – тепловой поток порошка;

$Q_{исп}$  – тепловой поток испарившегося квенча;

$Q_{пот}$  – теплопотери.

Находим тепловой поток, который поступает с этиленом:

$$Q_1 = G_1 \cdot c_1 \cdot T_1 + G_{п} \cdot c_{п} \cdot T_1 \quad (12)$$

где  $G_1$  – поток этилена на полимеризацию с учётом конверсии, кг/с;

$G_{п}$  – поток метана в составе этилена, кг/с;

$c_1$  – удельная теплоёмкость этилена, равная 4290 Дж/(кг·К);

$c_{п}$  – удельная теплоёмкость метана, равная 4050 Дж/(кг·К);

$T_1$  – температура этилена, примем равной 50 °С (323 К).

$$Q_1 = \frac{53513,72}{3600} \cdot 4290 \cdot 323 + \frac{26,61}{3600} \cdot 4050 \cdot 323 = 20607,5 \text{ кВт}$$

Находим тепловой поток, который поступает с водородом:

$$Q_2 = G_2 \cdot c_2 \cdot T_2 \quad (13)$$

где  $G_2$  – поток водорода, кг/с;

$c_2$  – удельная теплоёмкость водорода при 313 К и 2,2 МПа, равная 14310 Дж/(кг·К);

$T_2$  – температура водорода, примем равной 40 °С (313 К).

$$Q_2 = \frac{10,69}{3600} \cdot 14310 \cdot 313 = 13,3 \text{ кВт}$$

Тепловой поток этилена:

$$Q_3 = G_3 \cdot c_3 \cdot T_1 + G_{\text{п}} \cdot c_{\text{п}} \cdot T_1 \quad (14)$$

где  $G_3$  – поток этилена на полимеризацию с учётом конверсии, кг/с;

$c_3$  – удельная теплоёмкость этилена при 323 К и 2,2 МПа, равная 4290 Дж/(кг·К);

$G_{\text{п}}$  – поток этана в составе этилена, кг/с;

$c_{\text{п}}$  – удельная теплоёмкость метана при 323 К и 2,2 МПа, равная 4050 Дж/(кг·К).

$$Q_3 = \frac{35000}{3600} \cdot 4290 \cdot 337,5 + \frac{165}{3600} \cdot 4050 \cdot 337,5 = 14139,2 \text{ кВт}$$

Тепловой поток, выделившийся в результате химической реакции:

$$Q_{\text{хр}} = (G_1 + G_{\text{вод}}) \cdot q \quad (15)$$

где  $G_{\text{вод}}$  – материальный поток водорода, участвующего в реакциях обрыва цепи, кг/с.

$q$  – тепловой эффект полимеризации равен 1385 кДж/кг.

$$Q_{\text{хр}} = \frac{(53513,72 + 5,5)}{3600} \cdot 1385000 = 20590,03 \text{ кВт}$$

									Лист
									37
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись						

Порошок полимера выходит из реактора с температурой равной 66 °С (339 К).

Удельную теплоёмкость полиэтилена примем равной 2900 Дж/(кг·К).

$$Q_{\text{пол}} = G_{\text{пол}} \cdot c_{\text{пол}} \cdot T_{\text{пол}} \quad (16)$$

$$Q_{\text{пол}} = \frac{50413,17}{3600} \cdot 2900 \cdot 339 = 13766,99 \text{ кВт}$$

где  $G_{\text{пол}}$  – поток полимера, кг/с;

$c_{\text{пол}}$  – удельная теплоёмкость полимера, Дж/(кг·К);

$T_{\text{пол}}$  – температура полимера на выходе из реактора, °С.

Теплопотери в окружающую среду принимаются 1 % от общего расхода:

$$Q_{\text{пот}} = 0,01 \cdot (20607,5 + 13,3 + 14139,2 + 20590,03) = 553,5 \text{ кВт}$$

В зависимости от количества квенча из реактора будет выходить поток газа ( $T = 66 \text{ °С} = 339 \text{ К}$ ) со следующим тепловым потоком:

$$\begin{aligned} Q_5 &= G_{\text{кв}} \cdot (0,995 \cdot 4290 + 0,005 \cdot 4050) \cdot 339 + (10,69 - \\ &- 9,30) \cdot 339 \cdot 14310 + 4050 \cdot 339 \cdot 4290 + 4290 \cdot 339 \cdot 4050 = \\ &= 1453903,2 \cdot G_{\text{кв}} + 11786654 \text{ Вт} \end{aligned}$$

Теплота, затрачиваемая на испарение, находится по следующему уравнению:

$$Q_{\text{исп}} = G_{\text{кв}} \cdot r \quad (17)$$

$$Q_{\text{исп}} = 276 \cdot G_{\text{кв}} \text{ кВт}$$

где  $r$  – удельная теплота парообразования, равная 276 кДж/кг.

									Лист
									38
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись						

Подставляем получившиеся значение в уравнение теплового потока и выражаем  $G_{\text{КВ}}$ :

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_{\text{хр}} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{исп}} + Q_{\text{пот}} + Q_5 \quad (18)$$

$$20607,5 + 13,3 + 14139,2 + 20590,03 = 13766,99 + 276 \cdot G_{\text{КВ}} + 553,5 + 730,16 \cdot G_{\text{КВ}} + 11786$$

$$G_{\text{КВ}} = \frac{29243,54}{(276+730,16)} = 29,064 \frac{\text{кг}}{\text{с}} = 104632,2 \text{ кг/ч}$$

Все данные сводим в таблицу 8.

Таблица 8 – Тепловой баланс установки

Приход	кВт	% масс.	Расход	кВт	% масс.
$Q_1$	20607,5	37,23	$Q_{\text{пол}}$	13766,99	27,08
$Q_2$	13,3	0,02	$Q_{\text{исп}}$	28878,49	56,80
$Q_3$	14139,2	25,55	$Q_{\text{пот}}$	553,5	1,09
$Q_{\text{хр}}$	20590,03	37,20	$Q_5$	12151,05	15,03
ИТОГО	48237,95	100,00	ИТОГО	48237,95	100,00

### 3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОБОРУДОВАНИЯ

#### 3.1 Расчёт реактора

К установке будет приниматься суспензионный петлевой реактор, используемый на предприятии.

Основные характеристики реактора:

- Вместимость: 113 м<sup>3</sup>;
- Длина реакторной зоны: 70150 мм;
- Диаметр: 711 мм;
- Расчётная температура среды: 80 °С.

Для нормальной работы данного вида реактора необходимо, чтобы объём порошка заполнял 70...90 % объёма реактора. Это необходимо, чтобы обеспечивать хорошее перемешивание порошка. Примем для расчёта значение 80 %. Тогда определим объём, занимаемый порошком:

$$0,8 \cdot 113 = 90,4 \text{ м}^3$$

Время пребывания порошка в ректорах данного типа варьируется от 100 до 140 минут. Произведём расчёт при 110 мин, так как после модернизации установки количество производимого полимера увеличится. Объём, который будет занимать порошок при данном времени пребывания и заданной производительности по полимеру 50423,18 кг/ч рассчитывается по формуле:

$$V = \frac{G \cdot \tau}{\rho} \tag{19}$$

где  $G$  – массовый расход сополимера, кг/ч;

					<i>ВКР.161868.180301.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Д.Ю. Потапчук</i>			Расчет установки полиэтилена на ООО «ЗапсибНефтехим» с увеличением производительности на 15 %	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Ю.А. Гцжель</i>				У	40	75
<i>Н. Контр.</i>		<i>Т.А. Родина</i>		24.06.20		АМГУ ИФФ 618-об зр.		
<i>Утверд.</i>		<i>Ю.А. Гцжель</i>						

$\rho$  – плотность порошка в реакторе;

$\tau$  – время пребывания порошка в реакторе, ч.

Насыпная плотность полимера составляет 340-560 кг/м<sup>3</sup>. В реакторе в силу вспенивания порошка рециркулирующим газом и мешалкой плотность выше. Примем значение 550 кг/м<sup>3</sup>;

$$V = \frac{50423,18 \cdot 110}{550 \cdot 60} = 168,04 \text{ м}^3$$

Таким образом объёма одного реактора не хватит, чтобы обеспечить требуемого времени пребывания порошка для получения полимера нужной характеристики.

Зная объём, который может занимать порошок для нормальной работы реактора, определим количество необходимых реакторов:

$$N = \frac{168,04}{90,4} = 1,86$$

Принимаем два реактора. Тогда реактор будет заполнен порошком на следующий объём:

$$V = \frac{168,04}{2} = 84,02 \text{ м}^3$$

Что соответствует следующей загрузке реактора:

$$A = \frac{84,02}{113} \cdot 100 = 74,35 \%$$

Данное значение соответствует оптимальной работе реактора.

Диаметры штуцеров определяются из уравнения расхода по допустимой скорости потока:

					ВКР.161868.180301.ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись			41

$$d_{ш} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{G}{\rho \cdot w}} \quad (20)$$

где  $G$  – массовый расход, кг/с;

$\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;

$w$  – скорость потока, м/с.

Для подачи квенча сверху реактора используется 2 форсунки по длине реактора, также необходимо часть полиэтилена подавать через 2 форсунки подачи сокатализатора с донором и 2 форсунки подачи катализатора. Итого: 6 форсунок для распределения массового потока квенча, катализатора и сокатализатора с донором.

Массовый поток квенча для одного реактора составляет:

$$\frac{104632,2}{2} = 52316,1 \frac{\text{кг}}{\text{ч}} = 14,53 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Тогда массовый поток квенча в одну форсунку составляет:

$$G_{\text{кв1}} = \frac{14,53}{6} = 2,42 \text{ кг/с}$$

Также в форсунки подачи катализатора необходимо добавить поток катализатора:

$$G_{\text{кат1}} = 2,42 + \frac{1,86}{3600} = 2,42 \text{ кг/с}$$

Расход практически не увеличивается, поэтому можно принять форсунки одинакового диаметра. Также поступаем и с форсунками сокатализатора с донором, т.к. расход каталитической системы незначителен.

						ВКР.161868.180301.ПЗ.	Лист
							42
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись				

Плотность смеси при данных условиях составляет 378,44 кг/м<sup>3</sup>, плотностью каталитической системы ввиду её малого расхода можно пренебречь. Скорость потока примем, 4 м/с. Тогда диаметр штуцеров:

$$d_{\text{шт}} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{2,42}{378,44 \cdot 4}} = 0,045 \text{ м}$$

По рассчитанному значению диаметра принимаем нормализованный диаметр по ГОСТ 16045-70 «Штуцера приварные для соединений трубопроводов по внутреннему конусу» [19].

Оставляем  $d_{\text{шт}} = 50 \text{ мм}$ .

Подача газа рецикла осуществляется равномерно через 2 форсунки в реактор. Расход газа рецикла для одного реактора составляет 3024 кг/ч или 0,84 кг/с. Массовый расход газа в одну форсунку:

$$G_{\text{рец1}} = \frac{0,84}{2} = 0,42 \text{ кг/с}$$

Массовый расход отходящих газов реактора составляет 159935,33 кг/ч. Для одного реактора:

$$\frac{159935,33}{2} = 79967,67 \text{ кг/ч} = 22,21 \text{ кг/с}$$

Можно считать, что газ состоит полностью из этилена, так как малое содержание других газов не повлияет на размер штуцера.

Скорость газа принимаем 10 м/с. Отходящие газы выходят из двух штуцеров, тогда массовый расход газа для одного штуцера будет составлять:

$$\frac{22,21}{2} = 11,105 \text{ кг/с}$$

									Лист
									43
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись						

ВКР.161868.180301.ПЗ.

Определяем диаметр штуцера:

$$d_{\text{шт}} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{11,105}{32,80 \cdot 10}} = 0,208 \text{ м}$$

Оставляем стандартизованное значение  $d_{\text{шт}} = 250 \text{ мм}$ .

Порошок выгружается из реактора, поддерживая необходимый уровень заполнения. Из-за разницы давления в реакторе порошок транспортируется с мгновенной скоростью. Выдерживается определённое время открытого клапана, чтобы обеспечить необходимую подачу. Расход порошка составляет 50423,18 кг/ч или 14 кг/с. Примем скорость 20 м/с. Насыпную плотность примем  $440 \text{ кг/м}^3$ , тогда:

$$d_{\text{шт}} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{14}{440 \cdot 20}} = 0,052 \text{ м}$$

На случай аварийной выгрузки порошка примем диаметр 100 мм. На выгрузку устанавливается два трубопровода – один на случай неисправности основного коллектора.

### 3.2 Расчёт подогревателей суспензии

Расчет нагревателя включает в себя определение необходимой поверхности теплообмена и основные размеры аппарата.

Подогреватель представляет из себя вертикальный теплообменный аппарат типа «труба в трубе». Во внутренней трубе суспензия полиэтилена (ПЭ), в наружной пар очень низкого давления.

Примем в качестве агента пар очень низкого давления (ОНД). Начальную температуру примем равной  $125 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , а конечную равной  $86 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

По расчетам необходимо подать в наружную трубу 3600 кг/ч пара ОНД, а во внутреннюю трубу 60375 кг/ч суспензии ПЭ. Таким образом, необходимо сконденсировать следующую часть:

						ВКР.161868.180301.ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись				44

$$\frac{3600}{60375} \cdot 100 = 5,96 \%$$

Массовый поток, который перейдет в конденсированное состояние:

$$\frac{60375 \cdot 5,96}{100} = 3598,35 \text{ кг/ч}$$

Теплота, которую нужно подвести:

$$Q = G \cdot q \tag{21}$$

$$Q = \frac{3598,35}{3600} \cdot 2300 = 2298,95 \text{ кВт}$$

где  $q_{\text{проп}}$  – удельная теплота конденсации пара ОНД, равная 2300 кДж/кг.

При работе двух параллельных реакторов целесообразно организовать две технологические линии. Поэтому необходимая площадь теплообмена для одной линии будет рассчитываться исходя из следующего количества тепла на отвод:

$$Q = \frac{2298,95}{2} = 1149,47 \text{ кВт}$$

Подогреватели предназначены для испарения всего разбавителя из суспензии перед поступлением порошка в сепаратор высокого давления. Одновременно они также нагревают порошок, что играет важную роль для эффективности работы системы дегазации, расположенной далее по процессу.

Для упрощения будем считать, что разбавитель состоит на 100 % из изобутана, так как содержание других компонентов незначительно и никак не влияет на итоговый выбор теплообменника с нужной площадью теплообмена.

									Лист
									45
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись						

$$\Delta t_6 = T_1 - t_2 \quad (22)$$

$$\Delta t_6 = 125 - 84,6 = 40,4 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_M = T_2 - t_1 \quad (23)$$

$$\Delta t_M = 120 - 78,7 = 40,3 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{cp} = \frac{40,4 - 39,3}{\ln \frac{26}{25}} = 11,54 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$K = 1095 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$$

Тогда рассчитаем ориентировочную площадь теплообмена:

$$F = \frac{1149470}{1095 \cdot 11,54} = 71,40 \text{ м}^2$$

По полученному числовому значению поверхности теплообмена оставляем действующие конденсаторы (с площадью теплообмена 80,7 м<sup>2</sup>), так как они справляются с увеличенной производительностью.

### 3.3 Расчёт сепаратора высокого давления

Суспензия полиэтилена после нагрева в подогревателях суспензии поступает в сепаратор высокого давления, где происходит основное отделение порошка от паров разбавителя при высоком давлении.

Можно считать, что в сепаратор поступает двухкомпонентная фаза, состоящая из порошка ПЭ и разбавителя.

Материальный поток линии составляет:

$$60375 - 3598,35 = 56776,65 \text{ кг/ч}$$

										Лист
										46
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись							

В сепараторе происходит разделение потока порошка и разбавителя, идущих из подогревателей. После отделения паров разбавителя порошок из сепаратора ВД направляется в дегазатор, где отделение паров разбавителя осуществляется при низком давлении.

Определим требуемую производительность сепаратора по пару и по порошку.

Объёмный расход определяется следующим образом:

$$V = \frac{G}{\rho}, \text{ м}^3/\text{ч} \quad (24)$$

где  $G$  – массовый расход, кг/ч;

$\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>.

В сепараторе отделяется порядка 10 % разбавителя.

Плотность газообразного изобутана при 1,35 МПа и 87 °С составляет 2,503 кг/м<sup>3</sup>.

Плотность порошка ПЭ при этих же условия составляет 600 кг/м<sup>3</sup>.

Требуемая производительность по газу составит:

$$V_{\Gamma} = \frac{56\,776,65 \cdot 0,1}{2,503} = 2\,268,34 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Требуемая производительность по жидкости:

$$V_{\text{ж}} = \frac{56\,776,65 \cdot 0,9}{613} = 83,36 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Оставляем действующий сепаратор, так как он справляется с требуемой производительностью.

										Лист
										47
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись							

### 3.4 Расчёт дегазатора

В дегазаторе происходит отдувка из порошка остаточного количества углеводородов продувочным газом. Первый продувочный газ вводится в верхнюю часть дегазатора и представляет собой смесь азота с газообразными легкими углеводородами. В нижнюю часть дегазатора подается чистый азот, при этом образуется высокоэффективная продувочная среда, в которой создается противоток и градиент продувки.

Колонна не имеет внутренних частей, за исключением газораспределителя внизу колонны. Поэтому высота колонны зависит от времени пребывания порошка в ней.

Основываясь на ряде исследований, проведенных INEOS по оптимизации промышленных продувочных колонн, расход продувочного газа в объеме от 7 до 44 кг N<sub>2</sub>/т полимера, изменение времени пребывания от 1 до 3 часов не оказывает существенного влияния на количество летучих соединений, остающихся в порошке. Вместе с тем, количество летучих соединений увеличивается, если время пребывания составляет менее 1 часа.

Для данной установки расчетное время пребывания составляет два часа и начинается на расстоянии 875 мм от основания газораспределителя (или на расстоянии 1925 мм от нижней касательной линии дегазатора). Эта линия известна как линия отсчета достаточной дегазации.

Необходимо поддерживать такой уровень в колонне, чтобы время пребывания составляло 2 часов. Последствием снижения уровня порошка является недостаточная дегазация.

Соотношение времени пребывания и производительности в цилиндрической части продувочной колонны определяется по следующей формуле:

$$t = \frac{S \cdot L}{V_{II}} \quad (25)$$

где  $S$  – площадь сечения колонны, м;

									Лист
									48
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись						

$L$  – высота колонны, м;

$V_{\text{п}}$  – объёмная производительность, м<sup>3</sup>/ч.

Для обеспечения безопасности в случае аварийных ситуаций, а также для гибкости технологического процесса при производстве разных сортов полимеров, проведем расчёт высоты при времени пребывания порошка – 2,5 часа:

$$L = \frac{t \cdot V_{\text{п}}}{S} = \frac{4 \cdot t \cdot G_{\text{п}}}{\pi \cdot D^2 \cdot \rho} \quad (26)$$

$$L = \frac{4 \cdot 2,5 \cdot 51\,098,985}{3,14 \cdot 4^2 \cdot 600} = 16,95 \text{ м}$$

Действующая продувочная колонна (18,9 м) справляется с увеличенной производительностью.

Основываясь на измерениях, проведённых компанией INEOS, минимальная скорость псевдооживления составляет 40 мм/с для гомополимера этилена. При такой скорости начинается псевдооживление верхних слоёв порошка и унос полимера с отходящими газами колонны.

На предприятии используется продувочная колонна, состоящая из двух частей. Диаметр нижней части 3500 мм, длина 5 800 мм, диаметр верхней части 5000 мм, длина 13100 мм, что является оптимальным с учётом расхода азота. При принятом расходе продувочного газа 4608 кг/ч или 1,28 кг/с и плотности азота 1,25 кг/м<sup>3</sup> найдём скорость азота в продувочной колонне.

Объём колонны:

$$V = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L}{4} \quad (27)$$

$$V = \frac{3,14 \cdot (3,5^2 \cdot 5,8 + 5^2 \cdot 13,1)}{4} = 312,86 \text{ м}^3$$

									Лист
									49
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись					ВКР.161868.180301.ПЗ.	

Объёмный расход азота:

$$V_{\text{азот}} = \frac{G_{\text{азот}}}{\rho} \quad (28)$$

$$V_{\text{азот}} = \frac{0,87}{1,25} = 0,696 \text{ м}^3/\text{с}$$

Время, за которое азот производит вытеснение газа:

$$t = \frac{V}{V_{\text{азот}}} \quad (29)$$

$$t = \frac{312,86}{0,696} = 449,5 \text{ с}$$

Скорость азота:

$$W = \frac{L}{t} \quad (30)$$

$$W = \frac{18,9 \cdot 10^3}{449,5} = 42,05 \text{ мм/с}$$

Данное значение соответствует желательной скорости псевдооживления.

### 3.5 Расчёт насоса

Рассчитаем насос, предназначенный для циркуляции реакционной смеси и подачи в реактор.

Полный напор насоса находится по следующей формуле:

$$H = \frac{P_{\text{ВЫХ}} - P_{\text{ВХ}}}{\rho \cdot g} + H_{\Gamma} + h_{\Pi} \quad (31)$$

						ВКР.161868.180301.ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись				50

где  $P_{\text{ВЫХ}}$  и  $P_{\text{ВХ}}$  – давления на нагнетающем и всасывающем патрубках соответственно, Па;

$\rho$  – плотность смеси при 2,2 МПа и 80 °С, равная 378,44 кг/м<sup>3</sup>;

$H_{\Gamma}$  – геометрическая высота или высота нагнетания. Зависит от того, на какую высоту необходимо перекачивать жидкость, то есть от расположения реактора относительно насоса. На предприятии насос и реактор находятся на одном уровне;

$h_{\text{п}}$  – потерянный напор на всасывающем и нагнетающем патрубках. Зависит от количества отводов, вентилях, задвижек и других фитингов, и арматуры. Точно рассчитать эту величину можно зная расположение обвязки и количество арматуры на трубопроводах. Для расчётов примем значение 3 м.

Тогда необходимый напор насоса будет следующим:

$$H = \frac{2200000 - 2150000}{378,44 \cdot 9,81} + 0 + 3 = 16,46 \text{ м}$$

Полезная мощность насоса:

$$N_{\text{пол}} = V \cdot \rho \cdot g \cdot H \quad (32)$$

$$N_{\text{пол}} = 6,57 \cdot 378,44 \cdot 9,81 \cdot 16,46 = 401,48 \text{ кВт}$$

где  $V$  – объёмный расход смеси, равный 6,57 м<sup>3</sup>/с.

Мощность насоса на валу:

$$N_L = \frac{N_{\text{пол}}}{\eta_{\text{н}}} \quad (33)$$

$$N_L = \frac{401,48}{0,7} = 573,5 \text{ кВт}$$

									Лист
									51
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись						

где  $\eta_n = 0,7$  - к.п.д. насоса.

Мощность, потребляемая электродвигателем насоса:

$$N_{дв} = \frac{N_L}{\eta_{пер} \cdot \eta_{дв}} \quad (34)$$

$$N_{дв} = \frac{573,5}{0,9} = 637,29 \text{ кВт}$$

где  $\eta_{пер}$  - к.п.д. передачи от электродвигателя;

$\eta_{дв}$  - к.п.д. двигателя.

Примем  $\eta_{пер} \cdot \eta_{дв} = 0,9$ .

Установочная мощность двигателя:

$$N_{уст} = \beta \cdot N_{дв} \quad (35)$$

Коэффициент запаса мощности  $\beta$  для  $N_{дв}$  более 50 кВт равен 1,1.

$$N_{уст} = 1,1 \cdot 637,29 = 700 \text{ кВт}$$

Оставляем действующий центробежный насос, так как он справляется с увеличенной производительностью.

					ВКР.161868.180301.ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись			52

## 4 МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РЕАКТОРА

Реактор - основная часть установки полимеризации, в которой проходит процесс роста макромолекул под действием ионно-координационной каталитической системы. В итоге получается порошок полимера, который выгружается через два выходных штуцера. Эскиз реактора представлен на рисунке 2.

### Описание конструкции аппарата

Суспензионный петлевой реактор – горизонтальный аппарат, выполненный в виде трубы, диаметром 711 мм с несколькими изгибами под прямым углом по длине реактора. В реакторе предусмотрены штуцеры для ввода сырья, катализатора, сокатализаторов, газа рецикла и вывода суспензии ПЭ.

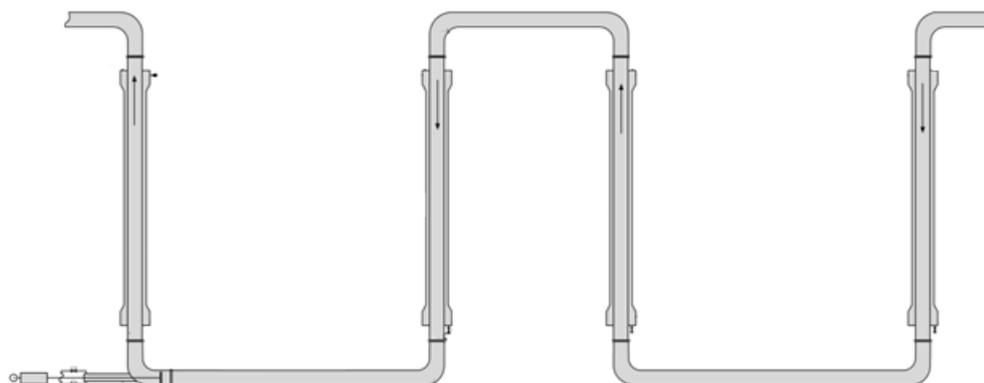


Рисунок 2 – Эскиз реактора

### Конструктивный расчёт реактора

Исходные данные:

Диаметр: 711 мм; Длина: 70150 мм

Давление: 5,1 МПа; Температура: 80 °С

Среда: суспензия ПЭ

					<i>ВКР.161868.180301.ПЗ</i>			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Д.Ю. Поталчук	<i>[Signature]</i>		Расчет установки полиэтилена на ООО «ЗапсибНефтехим» с увеличением производительности на 15 %	Лит.	Лист	Листов
Провер.		Ю.А. Гцжель	<i>[Signature]</i>			У	53	75
Н. Контр.		Т.А. Родина	<i>[Signature]</i>	24.06.20	АМГУ ИФФ 618-оБ зр.			
Утверд.		Ю.А. Гцжель						

### Расчёт толщины стенки обечайки и днищ аппарата

Руководствуясь общими принципами выбора материалов, учитывая максимальную рабочую температуру 100 °С, давление 4 МПа и среднекоррозионную среду, по ГОСТ 14249-89 «Сосуды и аппараты» выбираем 09Г2С сталь [20]. Допускаемое напряжение  $[\sigma]$  для стали 09Г2С составляет 168,6 МПа.

Гидростатическое давление в аппарате при полном заполнении его водой:

$$P_{\Gamma} = g \cdot \rho_{\text{в}} \cdot L \quad (36)$$

где  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воды при 20 °С;

$L = 70,15$  м – усреднённая длина аппарата.

$$P_{\Gamma} = 9,81 \cdot 1000 \cdot 70,15 = 688171,5 \text{ Па} = 0,69 \text{ МПа}$$

где  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воды при 20 °С;

$L = 70,15$  м – усреднённая длина аппарата.

Расчётное давление определяется по формуле:

$$P_{\text{расч}} = P_{\text{раб}} + 0,1 \cdot P_{\text{раб}} \quad (37)$$

где  $P_{\text{раб}}$  – рабочее давление.

$$P_{\text{раб}} = 4 + 0,4 = 4,4 \text{ МПа}$$

$$P_{\text{расч}} = 4,4 + 0,1 \cdot 4,4 = 4,84 \text{ МПа}$$

Но расчётное давление должно быть не меньше:

										Лист
										54
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись							



$$S = \frac{4,84 \cdot 0,7}{2 \cdot [168,6] \cdot 1 - 0,5 \cdot 4,84} + 0,003 = 0,0131 \text{ м}$$

Принимаем толщину стенки 14 мм.

### Расчёт обечайки на устойчивость

Аппарат рассматриваем, как балку, установленную на двух опорах и нагруженную равномерно распределённой нагрузкой от веса полностью заполненного водой аппарата.

Реакция одной опоры:

$$Q = \frac{G}{z} \quad (41)$$

где  $z$  – количество опор;

$G$  – сила тяжести, заполненного водой аппарата, равная сумме пустого аппарата ( $m_{\text{ап}}$ ) и массы воды, при полном заполнении аппарата:

$$G = m \cdot g + m_{\text{ап}} \quad (42)$$

где  $m_{\text{ап}} = 261000$  кг;

$\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$V$  – объём аппарата, м<sup>3</sup>.

$$G = 1000 \cdot 113 \cdot 9,81 + 261000 = 1369530 \text{ кг}$$

$$Q = \frac{G}{z} \quad (43)$$

$$Q = \frac{1369530}{2} = 684765 \text{ Н}$$

Изгибающий момент в середине аппарата:

										Лист
										56
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись							



где  $K_1$  – коэффициент, учитывающий наличие в аппарате колец жёсткости, принимаем равным 1.

$$\sigma_2 = \frac{2,62 \cdot 0,7}{4 \cdot (0,0132 - 0,003)} + 1,25 \cdot \frac{0,26}{1 \cdot 0,7^2 \cdot (0,0132 - 0,003)} = 109,98 \text{ МПа} \leq 168,6 \text{ МПа}$$

Коэффициент, показывающий необходимость наличия колец жёсткости, рассчитывается по формуле:

$$K_2 = \frac{P_p \cdot (D + S_o - \Sigma C)}{2[\sigma] \varphi \cdot (S_o - \Sigma C)} - 1 \quad (48)$$

$$K_2 = \frac{2,62 \cdot (0,7 + 0,0132 - 0,003)}{2 \cdot 168,6 \cdot 1 \cdot (0,0132 - 0,003)} - 1 = -0,46$$

Так как  $K_2 < 0$ , то укрепление ёмкости аппарата кольцами жёсткости обязательно.

### Штуцера подачи квенча и газа рецикла

Штуцера подачи квенча и газа рецикла имеют одинаковый диаметр, поэтому расчёты фланцевых соединений будут одинаковыми.

Руководствуясь общими принципами выбора материалов и учитывая максимальную рабочую температуру 70 °С, давление 4 МПа, среднюю коррозионность среды, выбираем материал 09Г2С, который при 70 °С имеет допускаемое напряжение 168,6 МПа.

Рассчитаем фланцевое соединение для подачи квенча. Диаметр штуцера составляет 50 мм. Принимаем к установке фланец цельного типа со следующими характеристиками:

$D_\phi = 0,16 \text{ м}$  – диаметр фланца;

$D_6 = 0,125 \text{ м}$  – диаметр болтовой окружности;

					ВКР.161868.180301.ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись			58

$D_1 = 0,102 \text{ м};$

$D_s = 0,076 \text{ м}$  – диаметр втулки фланца;

$h = 0,017 \text{ м}$  – толщина тарелки фланца;

$H = 0,045 \text{ м};$

$h_1 = 0,003 \text{ м};$

Болты М 16.

Условное давление 2,5 МПа.

Схема фланца представлена на рисунке 3.

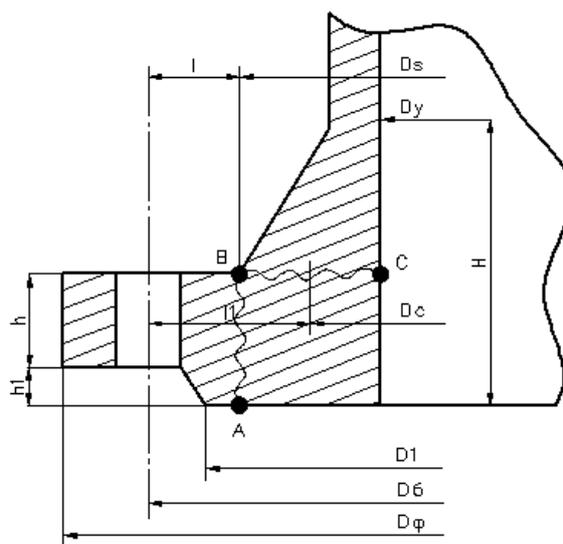


Рисунок 3 – Схема фланца цельного типа

Нагрузку на болты фланцевого соединения, находящегося под давлением среды, определяют по формуле:

$$Q_6 = \frac{P \cdot \pi \cdot D_6^2}{4} + P \cdot m \cdot D_n \cdot 2 \cdot b \quad (49)$$

где  $P$  – рабочее давление среды, МПа;

$m$  – коэффициент удельного давления на прокладку, показывающий во сколько раз удельное давление должно быть больше внутреннего, чтобы условие герметичности было выполнено, равное 2,75;

$b$  - расчётная ширина прокладки, которую принимают в зависимости от конструкции прокладки и уплотнительных поверхностей, принимаем 0,0055 м.

$D_n$  – средний диаметр прокладки, определяемый по формуле:

$$D_n = 0,5 \cdot (D_1 + D_y) \quad (50)$$

$$D_n = 0,5 \cdot (0,102 + 0,16) = 0,076 \text{ м}$$

$$Q_6 = \frac{2,2 \cdot 3,14 \cdot 0,125^2}{4} + 2,62 \cdot 2,75 \cdot 0,076 \cdot 2 \cdot 0,0055 = 0,027 \text{ МН}$$

Фланцы рассчитывают на условную нагрузку:

$$Q_{6\phi} = \frac{Q_{6p} + Q_{6m}}{2} \quad (51)$$

$$Q_{6\phi} = \frac{0,044 + 0,069}{2} = 0,056 \text{ МН}$$

Примем к установке фланец цельного типа. Их рассчитывают под действием силы  $Q_{6\phi}$  на изгиб как консольную балку по опасным сечениям АВ и ВС. При поверочных расчётах определяют напряжения изгиба  $\sigma_{AC}$  и  $\sigma_{BC}$  в указанных сечениях. Эти напряжения не должны превышать допускаемых напряжений, т.е.:

$$\sigma_{AB} \leq [\sigma] \text{ и } \sigma_{BC} \leq [\sigma] \quad (52)$$

Выполнение условий говорит о том, что размеры и материал фланца выбраны верно.

Напряжение изгиба в сечении АВ равно:

										Лист
										60
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись							

$$\sigma_{AB} = \frac{6 \cdot Q_{6\phi} \cdot l}{\pi \cdot D_s \cdot h_0^2} \quad (53)$$

$$\sigma_{AB} = \frac{6 \cdot 0,056 \cdot 0,0245}{3,14 \cdot 0,076 \cdot 0,02^2} = 86,72 \text{ МПа}$$

где  $l$  – плечо силы  $Q_{6\phi}$ .

$$l = 0,5 \cdot (D_6 - D_s) \quad (54)$$

$$l = 0,5 \cdot (0,125 - 0,076) = 0,0245 \text{ м}$$

$$h_0 = h + h_1 \quad (55)$$

$$h_0 = 0,017 + 0,003 = 0,02 \text{ м.}$$

Напряжение изгиба в сечении ВС равно:

$$\sigma_{BC} = \frac{2,4 \cdot Q_{6\phi} \cdot l_1}{\pi \cdot D_c \cdot S_1^2} \quad (56)$$

где  $D_c$  для штуцера  $D_y = 50$  мм составляет 0,0565 м.

$$\sigma_{BC} = \frac{2,4 \cdot 0,0565 \cdot 0,031}{3,14 \cdot 0,063 \cdot 0,02^2} = 125,32 \text{ МПа}$$

$$l_1 = 0,5 \cdot (D_6 - D_c) \quad (57)$$

$$l_1 = 0,5 \cdot (0,125 - 0,063) = 0,031 \text{ м}$$

$$S_1 = 0,5 \cdot (D_s - D_y) \quad (58)$$

									Лист
									61
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись						

$$S_1 = 0,5 \cdot (0,076 - 0,05) = 0,013 \text{ м.}$$

Напряжения в сечениях меньше допустимого 168,6 МПа, следовательно, материал и размеры фланцевого соединения выбраны верно.

### **Штуцера отходящего газа**

09Г2С при 70 °С имеет допускаемое напряжение 168,6 МПа.

Рассчитаем фланцевое соединение для отходящего газа. Диаметр штуцера составляет 250 мм. Принимаем к установке фланец цельного типа со следующими характеристиками:

$D_\phi = 0,425$  м – диаметр фланца;

$D_6 = 0,37$  м – диаметр болтовой окружности;

$D_1 = 0,335$  м;

$D_s = 0,3$  м – диаметр втулки фланца;

$h = 0,029$  м – толщина тарелки фланца;

$H = 0,075$  м;

$h_1 = 0,003$  м;

Болты М 27;

Условное давление 2,5 МПа.

Нагрузка на болты фланцевого соединения, находящегося под давлением среды:

$$Q_6 = \frac{P \cdot \pi \cdot D_6^2}{4} + P \cdot m \cdot D_n \cdot 2 \cdot b \quad (59)$$

$$D_n = 0,5 \cdot (D_1 + D_y) \quad (60)$$

$$D_n = 0,5 \cdot (0,335 + 0,25) = 0,2925 \text{ м}$$

									Лист
									62
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись					ВКР.161868.180301.ПЗ.	

$$Q_6 = \frac{2,2 \cdot 3,14 \cdot 0,37^2}{4} + 2,2 \cdot 2,75 \cdot 0,2925 \cdot 2 \cdot 0,007 = 0,239 \text{ МН}$$

Нагрузка на болты фланцевого соединения, не находящегося под давлением среды, обеспечивающую начальное смятие прокладки для надёжной герметичности:

$$Q'_6 = \pi \cdot D_n \cdot b \cdot q_n \quad (61)$$

$$Q'_6 = 3,14 \cdot 0,295 \cdot 0,007 \cdot 30 = 0,193 \text{ МН}$$

где  $q_n = 30$  МПа – удельное давление, которое нужно создать на поверхности прокладки.

Поскольку  $Q_6 > Q'_6$  для дальнейших расчётов примем нагрузку  $Q_6$ . Температура среды в рассматриваемом случае меньше  $250^\circ\text{C}$ , следовательно, принимаем болты.

Фланцы рассчитывают на условную нагрузку:

$$Q_{6\phi} = \frac{Q_{6p} + Q_{6м}}{2} \quad (62)$$

$$Q_{6\phi} = \frac{0,252 + 0,354}{2} = 0,303 \text{ МН}$$

Напряжение изгиба в сечении АВ равно:

$$\sigma_{AB} = \frac{6 \cdot Q_{6\phi} \cdot l}{\pi \cdot D_s \cdot h_0^2} \quad (63)$$

$$\sigma_{AB} = \frac{6 \cdot 0,303 \cdot 0,035}{3,14 \cdot 0,3 \cdot 0,032^2} = 65,93 \text{ МПа}$$

						ВКР.161868.180301.ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись				63

$$l = 0,5 \cdot (D_6 - D_s) \quad (64)$$

$$l = 0,5 \cdot (0,37 - 0,3) = 0,035 \text{ м}$$

$$h_0 = h + h_1 \quad (65)$$

$$h_0 = 0,029 + 0,003 = 0,032 \text{ м}$$

Напряжение изгиба в сечении ВС равно:

$$\sigma_{BC} = \frac{2,4 \cdot Q_{6\phi} \cdot l_1}{\pi \cdot D_c \cdot S_1^2} \quad (66)$$

$$\sigma_{BC} = \frac{2,4 \cdot 0,303 \cdot 0,0475}{3,14 \cdot 0,275 \cdot 0,025^2} = 63,97 \text{ МПа}$$

где  $D_c$  для штуцера  $D_y = 250$  мм составляет 0,275 м.

$$l_1 = 0,5 \cdot (D_6 - D_c) \quad (67)$$

$$l_1 = 0,5 \cdot (0,37 - 0,275) = 0,0475 \text{ м}$$

$$S_1 = 0,5 \cdot (D_s - D_y) \quad (68)$$

$$S_1 = 0,5 \cdot (0,3 - 0,25) = 0,025 \text{ м}$$

Напряжения в сечениях меньше допустимого 168,6 МПа, следовательно, материал и размеры фланцевого соединения выбраны верно.

### **Штуцера вывода порошка**

09Г2С при 70 °С имеет допускаемое напряжение 168,6 МПа.

										Лист
										64
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись							

Рассчитаем фланцевое соединение для вывода порошка. Диаметр штуцера составляет 100 мм. Принимаем к установке фланец цельного типа со следующими характеристиками:

$D_{\phi} = 0,23$  м – диаметр фланца;

$D_6 = 0,19$  м – диаметр болтовой окружности;

$D_1 = 0,162$  м;

$D_s = 0,132$  м – диаметр втулки фланца;

$h = 0,021$  м – толщина тарелки фланца;

$H = 0,058$  м;

$h_1 = 0,003$  м;

Болты М 20;

Условное давление 2,5 МПа.

Нагрузка на болты фланцевого соединения, находящегося под давлением среды:

$$Q_6 = \frac{P \cdot \pi \cdot D_6^2}{4} + P \cdot m \cdot D_n \cdot 2 \cdot b \quad (69)$$

$$D_n = 0,5 \cdot (D_1 + D_y) \quad (70)$$

$$D_n = 0,5 \cdot (0,162 + 0,1) = 0,131 \text{ м}$$

$$Q_6 = \frac{2,2 \cdot 3,14 \cdot 0,19^2}{4} + 2,2 \cdot 2,75 \cdot 0,131 \cdot 2 \cdot 0,006 = 0,0633 \text{ МН}$$

Фланцы рассчитывают на условную нагрузку:

$$Q_{6\phi} = \frac{Q_{6p} + Q_{6m}}{2} \quad (71)$$

$$Q_{6\phi} = \frac{0,084 + 0,115}{2} = 0,099 \text{ МН}$$

Напряжение изгиба в сечении АВ равно:

$$\sigma_{AB} = \frac{6 \cdot Q_{6\phi} \cdot l}{\pi \cdot D_s \cdot h_0^2} \quad (72)$$

$$\sigma_{AB} = \frac{6 \cdot 0,099 \cdot 0,029}{3,14 \cdot 0,132 \cdot 0,024^2} = 72,45 \text{ МПа}$$

$$l = 0,5 \cdot (D_6 - D_s) \quad (73)$$

$$l = 0,5 \cdot (0,19 - 0,132) = 0,029 \text{ м}$$

$$h_0 = h + h_1 \quad (74)$$

$$h_0 = 0,021 + 0,003 = 0,024 \text{ м}$$

Напряжение изгиба в сечении ВС равно:

$$\sigma_{BC} = \frac{2,4 \cdot Q_{6\phi} \cdot l_1}{\pi \cdot D_c \cdot S_1^2} \quad (75)$$

$$\sigma_{BC} = \frac{2,4 \cdot 0,099 \cdot 0,037}{3,14 \cdot 0,116 \cdot 0,016^2} = 94,67 \text{ МПа}$$

$$l_1 = 0,5 \cdot (0,19 - 0,116) = 0,037 \text{ м}$$

$$S_1 = 0,5 \cdot (0,132 - 0,1) = 0,016 \text{ м}$$

Напряжения в сечениях меньше допустимого 168,6 МПа, следовательно, материал и размеры фланцевого соединения выбраны верно.

									Лист
									66
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись						

## 5 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА

### Требования безопасности при эксплуатации установки полиэтилена

Основные опасности производства обусловлены особенностями технологического процесса или выполнения отдельных производственных операций, особенностями используемого оборудования и условиями его эксплуатации, вызванные нарушениями правил безопасности работниками.

Потенциальная опасность используемого на производстве оборудования и трубопроводов заключается в возможности нарушении герметичности с выходом взрывопожароопасных и токсичных продуктов из рабочего объема в окружающую среду, что может привести к образованию и взрыву топливно-воздушной смеси, возникновению пожара и отравлениям обслуживающего персонала.

Наиболее опасными местами на производстве являются конструкции реакторов полимеризации и сепараторов паров реакции, а также колодцы, прямки и др. низкие места, где могут скапливаться взрывоопасные пары и газы.

Опасность взрыва связана также с обращением большого количества порошка полиэтилена и добавок экструзии, мельчайшие частицы которых могут образовать взрывоопасную пылевоздушную смесь.

Особую опасность представляет участок хранения и дозирования ТЭАЛ и ТЭБ, чрезвычайно реакционноспособных веществ. ТЭАЛ является пиррофорным, т.е. спонтанно воспламеняется при контакте с воздухом в условиях окружающей среды, с водой ТЭАЛ реагирует со взрывом.

Установка спроектирована так, чтобы свести к минимуму воздействия выброса опасного материала или энергии.

					<i>ВКР.161868.180301.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Д.Ю. Потапчук</i>			Расчет установки полиэтилена на ООО «ЗапсибНефтехим» с увеличением производительности на 15 %	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Ю.А. Гцжель</i>				У	67	75
<i>Н. Контр.</i>		<i>Т.А. Родина</i>		24.06.20		АМГУ ИФФ 618-об зр.		
<i>Утверд.</i>		<i>Ю.А. Гцжель</i>						

Количества опасных веществ, перерабатываемых на установке, сведены к минимуму.

Пропускная способность, расчетные параметры и материальное исполнение оборудования обеспечивают запланированное ведение технологического процесса с минимизацией возможности отклонения от нормы.

Технологическое оборудование по надежности и конструктивным особенностям выбрано с учетом физико-химических свойств продуктов, параметров технологического процесса, производительности и климатических условий.

В оборудовании, где возможно превышение технологического давления выше расчетного давления аппарата, предусмотрено регулирование давления клапанами и защита оборудования предохранительными клапанами со сбросом в факельную систему, каждая единица оборудования обладает запасом мощности на случай нарушения технологического режима.

#### **Средства и системы защиты при эксплуатации установки полиэтилена**

Использование СИЗ должно обеспечивать максимальную безопасность, а неудобства, связанные с их применением, должны быть сведены к минимуму.

В пределах установки полимеризации применяются пожарные системы:

- пожарные гидранты;
- пожарные лафеты;
- пожарные шланговые бухты;
- сплинклерная установка сухого типа;
- сплинклерная установка мокрого типа;
- дренажная система;
- сплинклерная система пенотушения;
- система распыления водяного тумана;
- углекислотная система пожаротушения.

										Лист
										68
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись							

ВКР.161868.180301.ПЗ.





Химическая активность водорода увеличивается при повышении температуры, под действием ультрафиолетового и радиоактивного излучений. С воздухом и кислородом образует взрывоопасную смесь. Пределы взрываемости: с воздухом 4 – 75 об. %, с кислородом 4,1 – 96 об. %. Температура самовоспламенения водорода 510 °С. Газообразный чистый водород не оказывает вредного воздействия на окружающую среду [23].

Бутен-1 – бесцветный газ с характерным запахом. Класс опасности – 4 [24]. Раздражает верхние дыхательные пути. Смесь с воздухом взрывоопасна.

Изобутан – бесцветный горючий газ без запаха. Класс опасности – 4. При высоких концентрациях вызывает удушье.

ТЭАЛ – легковоспламеняющаяся жидкость 3-го класса опасности. В контакте с водой и воздухом возможно воспламенение или взрыв. ПДК – 2 мг/м<sup>3</sup>. Причиняет ожоги, вызывает повреждения роговицы и век. Раздражает дыхательные пути, может в дальнейшем вызвать отек легких.

										Лист
										71
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись							

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В технологической части представлен анализ и обоснование модернизации действующей установки полимеризации ООО «ЗапСибНефтехим». Приведена характеристика сырья и готовой продукции. Сырьем на данной установке является этилен, продукцией – широкий марочный ассортимент полиэтилена высокой плотности.

Приведена технологическая схема установки получения полиэтилена с описанием. Представлена кинетика процесса, где объясняется зависимость выхода полиэтилена от соотношения сокатализатор/катализатор. Процесс протекает в системе суспензионного контурного реактора при температуре 70 °С – 110 °С и давлении 2,5 – 4,0 МПа.

Приведен материальный баланс действующей установки производительностью 350 тыс. тонн в год и расчет установки после модернизации. Также произведен расчет теплового баланса реактора. Для отвода теплоты дополнительно подают 104632,2 кг/ч этилена.

Механический расчет основного аппарата показал, что для сохранения прочности аппарат должен иметь толщину корпуса не менее 14 мм. Представлен механический чертеж реактора.

Увеличение соотношения кг ПЭВП/кг катализатора путем повышения подачи сокатализатора приводит к увеличению выхода на 15 %.

Данный проект имеет все предпосылки быть реализованным на ООО «ЗапСибНефтехим», не требует дополнительного аппаратурного оформления и является экономически выгодным.

					<i>ВКР.161868.180301.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>	<i>Д.Ю. Потапчук</i>	<i>Ю.А. Гцжель</i>	<i>[Подпись]</i>		Расчет установки полиэтилена на ООО «ЗапСибНефтехим» с увеличением производительности на 15 %	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>	<i>Т.А. Родина</i>	<i>Ю.А. Гцжель</i>	<i>[Подпись]</i>			У	72	75
<i>Н. Контр.</i>	<i>Т.А. Родина</i>	<i>Ю.А. Гцжель</i>	<i>[Подпись]</i>	24.06.20	АМГУ ИФФ 618-об зр.			
<i>Утверд.</i>	<i>Ю.А. Гцжель</i>							

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Осипова, Г.В. Химия и физика полимеров : учебное пособие / Г.В. Осипова, Г.Н. Беспалова. – Ч. 1. – Иваново : Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2012. – 98 с.

2 Думский, Ю.В. Химия и технология нефтеполимерных смол / Ю.В. Думский, Б.И. Но, Г.М. Бутов. – М. : Химия, 1999. – 302 с.

3 Особенности производства ПЭВД в трубчатых реакторах при смешанном инициировании / И.Г. Климов [и др.] // Химическая промышленность. – 2009. – Т. 86 – № 8. – С. 17–24.

4 Коваль, Е.О. Исследование влияния технологических факторов на качество базовых марок ПЭВД / Е.О. Коваль [и др.] // Химическая промышленность. – 2009. – Т. 86 – № 6. – С. 35–48.

5 Зуев, В.В. Физика и химия полимеров / В.В. Зуев, М.В. Успенская, А.О. Олехнович. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2010. – 45 с.

6 Технология пластических масс / под ред. В.В. Коршака. – М. : Химия, 1985. – 560 с.

7 Осипова, Г.В. Химия и физика полимеров : учебное пособие / Г.В. Осипова, Г.Н. Беспалова. – Ч. 2. – Иваново : Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2012. – 92 с.

8 Бесков, В.С. Физико-химические закономерности химических процессов : учебное пособие / В.С. Бесков, Е.В. Сучкова. – М. : РХТУ им. Д.И. Менделеева, 1999. – 39 с.

9 Цибровский, Я. Основы процессов химической технологии / Я. Цибровский. – Л. : Химия, 1967. – 207 с.

					<i>ВКР.161868.180301.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Д.Ю. Потапчук</i>			Расчет установки полиэтилена на ООО «ЗапсибНефтехим» с увеличением производительности на 15 %	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Ю.А. Гужель</i>				У	73	75
<i>Н. Контр.</i>		<i>Т.А. Родина</i>		24.06.20		АМГУ ИФФ 618-об зр.		
<i>Утверд.</i>		<i>Ю.А. Гужель</i>						

10 Николаев, А.Ф. Технология пластических масс / А.Ф. Николаев. – Л. : Химия 1977. – 560 с.

11 Капустин, В.М. Технология переработки нефти. В 4-х частях. Часть вторая. Физико-химические процессы / Капустин В.М., Гуреев А.А. – М. : Химия, 2015. – 400 с.

12 Капустин, В.М. Технология переработки нефти. В 4-х частях. Часть третья. Физико-химические процессы / Капустин В.М., Гуреев А.А. – М. : Химия, 2015. – 400 с.

13 Николаев, А.Ф. Синтетические полимеры и пластические массы на их основе / А.Ф. Николаев. – Л. : Химия, 1966. – 768 с.

14 Голосов, А.П. Технология производства полиэтилена и полипропилена / А.П. Голосов, А.И. Динцес. – М. : Химия, 1978. – 216 с.

15 Скобло, А.И. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии : учебник / А.И. Скобло. – М. : ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. – 677 с.

16 Белокурова, А.П. Химия и технология получения полиолефинов : учебное пособие / А.П. Белокурова, Т.А. Агеева ; под ред. О.И. Койфмана. – Иваново : Гос. хим-технол. ун-т, 2011. – 328 с.

17 Временный технологический регламент Производства полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) № ТР-ЗСНХ-11-18 ООО «ЗапСибНефтехим»

18 Стандарт NFPA 68 Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting

19 ГОСТ 16045-70 Штуцера приварные для соединений трубопроводов по внутреннему конусу

20 ГОСТ 14249-89 Сосуды и аппараты

21 ГОСТ 12.4.011-89 Система стандартов безопасности труда. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация

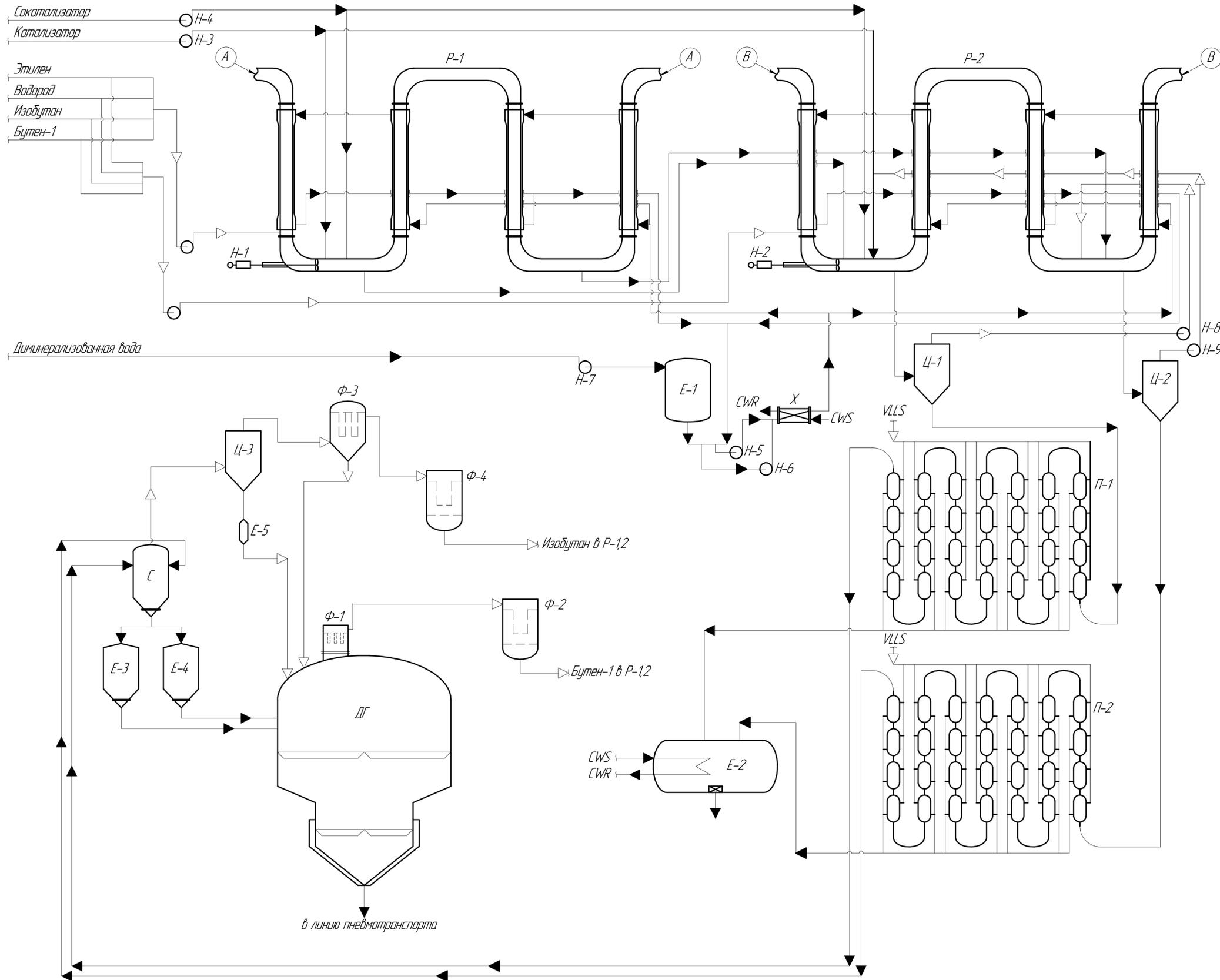
22 ГОСТ 25070-2013 Этилен. Технические условия

23 ГОСТ Р 51673-2000 Водород газообразный чистый. Технические условия

						ВКР.161868.180301/ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись				74

24 ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны

					ВКР.161868.180301.ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись			75



Условное обозначение	Наименование среды в трубопроводе
CWR	Горячая обратная вода
CWS	Холодная обратная вода
VLLS	Пар крайне низкого давления

Обозначение	Наименование	Кол.	Характеристики
P-12	Реактор	2	Длина реактора 120 м, диаметр 1000 мм, рабочее давление 10-15 МПа, температура 70-80 °С
Ц-12	Гидроциклон	2	Длина реактора 12 м, диаметр 1000 мм, рабочее давление 10-15 МПа, температура 70-80 °С
Ц-3	Верхний циклон сепаратора высокого давления	1	Длина реактора 12 м, диаметр 1000 мм, рабочее давление 10-15 МПа, температура 70-80 °С
Ц	Сепаратор высокого давления	1	Длина реактора 12 м, диаметр 1000 мм, рабочее давление 10-15 МПа, температура 70-80 °С
ДГ	Дегазатор	1	Длина реактора 12 м, диаметр 1000 мм, рабочее давление 10-15 МПа, температура 70-80 °С
П-12	Нагреватели суспензии	2	Длина реактора 12 м, диаметр 1000 мм, рабочее давление 10-15 МПа, температура 70-80 °С
X	Охладитель охлаждающей жидкости реактора	1	Длина реактора 12 м, диаметр 1000 мм, рабочее давление 10-15 МПа, температура 70-80 °С
Ф-1	Фильтр дегазатора	1	Длина реактора 12 м, диаметр 1000 мм, рабочее давление 10-15 МПа, температура 70-80 °С
Ф-2	Верхние защитные фильтры узла регенерации растворителя низкого давления	2	Длина реактора 12 м, диаметр 1000 мм, рабочее давление 10-15 МПа, температура 70-80 °С
Ф-3	Верхние фильтры сепаратора высокого давления	2	Длина реактора 12 м, диаметр 1000 мм, рабочее давление 10-15 МПа, температура 70-80 °С
Ф-4	Защитные фильтры узла регенерации растворителя высокого давления	2	Длина реактора 12 м, диаметр 1000 мм, рабочее давление 10-15 МПа, температура 70-80 °С
E-1	Буферная емкость охлаждающей жидкости реактора	1	Длина реактора 12 м, диаметр 1000 мм, рабочее давление 10-15 МПа, температура 70-80 °С
E-2	Емкость конденсата нагревателя суспензии	2	Длина реактора 12 м, диаметр 1000 мм, рабочее давление 10-15 МПа, температура 70-80 °С
E-3,4	Разгрузочные емкости сепаратора высокого давления	2	Длина реактора 12 м, диаметр 1000 мм, рабочее давление 10-15 МПа, температура 70-80 °С
E-5	Выход мелкой части верхнего циклона сепаратора высокого давления	1	Длина реактора 12 м, диаметр 1000 мм, рабочее давление 10-15 МПа, температура 70-80 °С
Н-12	Циркуляционные насосы 1-го и 2-го реакторов	2	Производительность 100 м³/ч, давление 10-15 МПа
Н-3	Насос загрузки катализатора	2	Производительность 10 м³/ч, давление 10-15 МПа
Н-4	Насос подачи сокатализатора	1	Производительность 10 м³/ч, давление 10-15 МПа
Н-5,6	Циркуляционные насосы охлаждающей жидкости реактора	2	Производительность 10 м³/ч, давление 10-15 МПа
Н-7	Насос подпитки хладагента	2	Производительность 10 м³/ч, давление 10-15 МПа
Н-8,9	Насосы гидроциклонов	2	Производительность 10 м³/ч, давление 10-15 МПа

ВКР.16.1868.180301.ТС

Узел полимеризации  
Технологическая схема

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Разраб.	Литвинчук Д.В.			
Проб.	Гужель Ю.А.			
Т.контр.				
Исполн.	Родина Т.А.			24.06.20
Удп.				

Лист	Листов	1
АМГУ ИФФ	гр. 618-ад	
Формат	А1	

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**(ФГБОУ ВО «АмГУ»)**

**ОТЗЫВ**

на бакалаврскую работу студента инженерно-физического факультета

Фамилия: Потапчука

Имя: Дениса

Отчество: Юрьевича

Направление подготовки: 18.03.01 «Химическая технология»

Тема бакалаврской работы: Расчет установки полиэтилена на ООО «ЗапСибНефтеХим» с увеличением производительности на 15 %

**1. Объем работы:**

- количество листов дипломной работы – 75 стр.;
- количество рисунков и таблиц – 3 рисунка, 8 таблиц;
- число приложений – нет.

**2. Соответствия содержания работы заданию (полное или неполное):**  
содержание бакалаврской работы в полной мере соответствует заданию.

**Вопросы задания, не нашедшие отражения в работе:**

вопросы задания в бакалаврской работе отражены в достаточном объеме.

**Материалы, представленные в работе, непосредственно не связанные с темой и направленностью:**

материалов, представленных в бакалаврской работе, непосредственно не связанных с темой нет.

**3. Достоинства бакалаврской работы:**

Предложен способ модернизации установки производства полиэтилена на ООО «ЗапСибНефтеХим» с увеличением выхода готового продукта на 15 % посредством повышения подачи сокатализатора. Выполнен расчет основного и вспомогательного оборудования установки. Обосновано сохранение имеющихся единиц аппаратов для ведения процесса.

**4. Недостатки бакалаврской работы:**

серьезные недостатки в бакалаврской работе отсутствуют. Можно рекомендовать проработать экономическое обоснование предложенной модернизации.

**5. Степень самостоятельности, проявленная выпускником и характер ее проявления:**

бакалаврская работа выполнена самостоятельно. Студент самостоятельно изучил технологический регламент предприятия «ЗапСибНефтеХим». Предложил и обосновал способ увеличения производительности. Выполнил необходимые технологические расчеты оборудования. Выполнил чертежи графической части работы.

**6. Масштабы и характер использования специальной литературы:**

нормативная документация, технологические инструкции и специальная литература для решения поставленных задач использованы в достаточном объеме.

**7. Достоинства и недостатки оформления текстовой части и графического материала:**

текстовая часть и графический материал оформлены в соответствии с правилами оформления бакалаврских работ.

**8. Особенности общепрофессиональной и специальной подготовки выпускников:**

при выполнении выпускной квалификационной работы Потапчук Д.Ю. показал определенный уровень профессиональной компетентности.

**9. Практическая значимость (внедрение) результатов бакалаврской работы:**

предложения, представленные в бакалаврской работе, могут быть внедрены и использованы в деятельности предприятия.

**10. Общее заключение и предлагаемая оценка работы:**

бакалаврская работа соответствует требованиям государственного образовательного стандарта и заслуживает оценки «отлично», а Потапчук Денис Юрьевич – присвоения квалификации бакалавр по направлению подготовки 18.03.01 «Химическая технология».

«01» июля 2020 г.

Руководитель  Ю.А. Гужель



# СПРАВКА

## о результатах проверки текстового документа на наличие заимствований

### Проверка выполнена в системе Антиплагиат.ВУЗ

Автор работы	Потапчук Денис Юрьевич
Подразделение	
Тип работы	Выпускная квалификационная работа
Название работы	Диплом Потапчук
Название файла	Диплом Потапчук.pdf
Процент заимствования	<b>32.02 %</b>
Процент самоцитирования	<b>0.00 %</b>
Процент цитирования	<b>4.20 %</b>
Процент оригинальности	<b>63.77 %</b>
Дата проверки	<b>08:05:48 23 июня 2020г.</b>
Модули поиска	Модуль поиска "АмГУ"; Модуль выделения библиографических записей; Сводная коллекция ЭБС; Модуль поиска "Интернет Плюс"; Коллекция РГБ; Цитирование; Модуль поиска переводных заимствований; Модуль поиска переводных заимствований по elibrary (EnRu); Модуль поиска переводных заимствований по интернет (EnRu); Коллекция eLIBRARY.RU; Коллекция Медицина; Модуль поиска перефразирований eLIBRARY.RU; Модуль поиска перефразирований Интернет; Коллекция Патенты; Модуль поиска общепотребительных выражений; Кольцо вузов
Работу проверил	Гужель Юлия Александровна ФИО проверяющего
Дата подписи	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"><div style="width: 60%;"></div><div style="width: 35%; text-align: right;">Подпись проверяющего</div></div>

Чтобы убедиться в подлинности справки, используйте QR-код, который содержит ссылку на отчет.



Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего. Предоставленная информация не подлежит использованию в коммерческих целях.