

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Химическая технология и ресурсосбережение»

(наименование)

18.03.02 «Энерго- ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии
и биотехнологии»

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Рациональное природопользование, рециклинг и утилизация отходов

(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Модернизация основного и вспомогательного оборудования при полимеризации
изопрена в ООО «Тольяттикаучук»

Обучающийся

А.А. Москвичёва

(Инициалы Фамилия)

(Личная подпись)

Руководитель

М.В. Гончаров

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

Аннотация

Выпускная квалификационная работа 52 страниц, 7 рисунков, 8 таблиц, использовано 33 источника.

Изопреновый каучук, полимеризация, реактор-полимеризатор.

Объектом исследования является производство изопрена и изопренового каучука на ООО «Тольяттикаучук».

Цель бакалаврской работы - увеличение объемов выпуска изопренового каучука, путем оптимизации технологических и конструктивных параметров процесса полимеризации.

В рамках литературного анализа были исследованы теоретические аспекты синтеза изопрена и процессов его полимеризации.

В работе представлен обзор различных методов синтеза изопренового каучука с проведением их сравнительного анализа.

Исследованы производственные процессы с последующим внесением предложений по их совершенствованию на этапах получения изопрена и формирования полимерного продукта.

Подробно изложен процесс производства изопрена и его полимеризации, включая графическое представление технологических схем.

В работе выполнены расчетные исследования материального и теплового балансов процесса полимеризации изопрена, а также проведен технологический расчет параметров реактора-полимеризатора, работающего в условиях повышенной производительности.

Abstract

Graduation qualification work 50 p., 7 figures, 8 tables, 33 sources used.

Isoprene rubber, polymerization, polymerizer reactor.

The object of research is the production of isoprene and isoprene rubber at LLC “Togliattikauchuk”.

The purpose of the bachelor's work is to increase the output of isoprene rubber, by optimizing the technological and design parameters of the polymerization process.

Theoretical aspects of isoprene synthesis and its polymerization processes were investigated within the framework of literature analysis.

The paper presents an overview of various methods of synthesis of isoprene rubber with their comparative analysis.

Production processes have been investigated with subsequent suggestions for their improvement at the stages of isoprene production and polymer product formation.

The process of isoprene production and its polymerization, including graphical representation of technological schemes, is described in detail.

The work includes the calculation studies of material and heat balances of the isoprene polymerization process, as well as the technological calculation of the parameters of the polymerizer reactor operating under conditions of increased productivity.

Содержание

Введение.....	5
1 Теоретическая часть.....	7
1.1 Синтетический изопреновый каучук и его свойства	7
1.2 Физико-химические основы получения СКИ	9
1.2.1 Полимеризация изопрена	9
1.2.2 Дезактивация каталитического комплекса.....	13
1.2.3 Стабилизация полимера	14
1.2.4 Водная отмывка полимеризата	16
1.3 Описание и принцип устройства полимеризатора	18
1.4 Факторы, влияющие на полимеризацию изопрена.....	20
2 Технологическая часть	23
2.1 Характеристика сырья и готовой продукции	24
2.2 Технологическая схема полимеризации изопрена	27
2.3 Модернизация процессов получения и полимеризации изопрена	30
3 Расчетная часть	34
3.1 Расчет материального баланса полимеризации	34
3.2 Расчет теплового баланса полимеризации	38
3.3 Технологический расчет полимеризатора	41
Заключение	49
Список используемых источников.....	50

Введение

«Изопреновый каучук - это универсальный материал, который может использоваться сам по себе или в сочетании с другими эластомерами в качестве заменителя натурального каучука при производстве практически всех резиновых изделий. В шинной промышленности его доля на рынке составляет около 56 %, в то время как на другие резиновые изделия, такие как конвейерные ленты, шланги, формованные и неформованные детали, приходится около 19 %. Кроме того, на его долю приходится 2 % в производстве резиновой обуви и 4 % в медицинском и других секторах» [9].

Полиизопрен - это высокоэластичный полимер, известный своими уникальными физическими и химическими свойствами, что делает его одним из самых востребованных материалов в современном производстве. «Он производится путем полимеризации изопрена и может быть найден как в натуральном, так и в синтетическом виде. Натуральный полиизопрен, широко известный как натуральный каучук, получают из латекса тропических деревьев и широко используют в производстве резиновых изделий, включая шины, медицинские приборы и спортивный инвентарь. С другой стороны, синтетический полиизопрен основан на цис-1,4-полиизопрене и производится из нефтехимических материалов, обладающих аналогичными, но иногда улучшенными свойствами» [9].

Полиизопрен играет решающую роль в различных отраслях промышленности, включая автомобилестроение, электронику и фармацевтику. Его исключительная эластичность, ударопрочность и прочность на растяжение делают его идеальным материалом для применений, требующих надежности и долговечности. В последние годы растущий интерес к нанотехнологиям и инновационным методам обработки открыл новые возможности для использования полиизопрена [2].

«На заводе "Тольяттикаучук" использование современных технологий и оборудования обеспечивает высокий уровень контроля над производственным

процессом, что, в свою очередь, гарантирует стабильное качество конечного продукта. Компания активно внедряет инновационные методы и разработки, направленные на повышение свойств полиизопрена, таких как эластичность, прочность и устойчивость к факторам окружающей среды. Это стремление позволяет "Тольяттикаучуку" оставаться конкурентоспособным на рынке и предоставлять своим клиентам продукцию, соответствующую самым высоким стандартам» [23].

Кроме того, "Тольяттикаучук" активно сотрудничает с научно-исследовательскими институтами и центрами разработок, способствуя внедрению новых технологий и совершенствованию производственных процессов. В результате компания не только производит полиизопрен, но и вносит свой вклад в развитие новых направлений в производстве полимерных материалов, открывая новые возможности для его применения в различных отраслях, таких как автомобилестроение, электроника и медицина.

«Целью выпускной квалификационной работы является: увеличение объемов выпуска изопренового каучука, путем оптимизации технологических и конструктивных параметров процесса полимеризации. Задачи данной работы в соответствии с целью:

- провести анализ физико-химических основ и способов получения полимеров на основе изопрена и определить их эффективность;
- провести анализ возможностей уменьшения энергозатрат в процессах, протекающих при полимеризации изопрена;
- предложить технологические и конструктивные решения направленные на повышение производительности стадии полимеризации при производстве изопренового каучука» [3].

1 Теоретическая часть

1.1 Синтетический изопреновый каучук и его свойства

«Синтез высокомолекулярного полиизопрена проводится в жидкой фазе с использованием изопентана в качестве реакционной среды, где процесс осуществляется при участии усовершенствованной каталитической композиции. Данная каталитическая система представляет собой комплексное соединение, образованное триизобутилалюминием и тетрахлоридом титана, которое обеспечивает высокую эффективность процесса полимеризации» [1].

Полимеризат, получаемый на установке полимеризации изопрена, является промежуточным продуктом получения каучука СКИ-3 и СКИ-3С.

«Основными показателями режима процесса полимеризации являются: температура, дозировка катализатора, время пребывания реакционной массы в системе.

Синтетические изопреновые каучуки хорошо совмещаются со всеми диеновыми каучуками. Важнейшее свойство диенов — их способность к полимеризации, которая используется для получения синтетических каучуков» [9].

Синтетический изопреновый каучук представляет собой преимущественно транс-1,4-полиизопрен, однако его микроструктура существенно зависит от условий синтеза. При проведении полимеризации с использованием щелочных металлов (натрия или калия) в среде малополярных органических растворителей образуется продукт со смешанной структурой, содержащий 1,2-, 3,4- и транс-1,4-звенья в различных пропорциях.

Особый интерес представляет процесс полимеризации, инициируемый литиевыми соединениями в неполярных растворителях. В этом случае образуется полимер с высоким содержанием цис-1,4-звеньев (до 94 %), что приближает его свойства к натуральному каучуку. Еще более совершенные

результаты достигаются при применении каталитических систем Циглера-Натта, позволяющих получать синтетический каучук, практически неотличимый по структуре и свойствам от природного аналога [8], [11].

Следует отметить, что в условиях отсутствия стереоспецифического контроля процесс полимеризации изопрена может приводить к образованию широкого спектра полимерных продуктов с различной пространственной организацией макромолекул. Это объясняется способностью изопрена вступать в реакции полимеризации по нескольким направлениям, что обусловлено наличием в его молекуле двух двойных связей, способных к различным типам взаимодействия с каталитическими системами.

Таким образом, конечная структура полиизопрена и, соответственно, свойства получаемого каучука в значительной степени определяются выбором каталитической системы и условиями проведения процесса полимеризации, что открывает широкие возможности для направленного синтеза материалов с заданными характеристиками. «Современная промышленность выпускает три основных типа синтетического цис-1,4-полиизопрена, которые различаются в зависимости от типа используемых катализаторов» [1]: «алкиллитиевые инициаторы и каталитические системы, разработанные Ziegler и Natta на основе соединений титана или неодима. Промышленный полиизопрен различается по содержанию цис-1,4 связей, молекулярной массе и молекулярно-массовому распределению. Производимый в Советском Союзе полиизопрен лития, содержащий не более 93 % цис-1,4-связей, активно используется на Западе в медицинских и специализированных целях. Напротив, полимеризация изопрена с использованием титановых катализаторов позволяет достичь содержания цис-1,4 связей до 98 %» [13].

«Синтетический каучук (SKI-3) и натуральный каучук (NR) широко используются в обрабатывающей промышленности, особенно при производстве шин и резинотехнических изделий. Хотя они могут быть взаимозаменяемы, SKI-3 не требует предварительной пластификации, в отличие от NR. Во многих регионах предпочтение отдается натуральному

каучуку, поскольку невулканизированные резиновые смеси на основе NR обладают высокой прочностью благодаря наличию реакционноспособных функциональных групп, что повышает их технологические возможности.

Выбор между SKI-3 и NR часто зависит от традиций. Западные страны, как правило, предпочитают использовать натуральный каучук, в то время как Россия активно развивает высокотехнологичное производство SKI-3, позволяющее не только удовлетворять внутренние потребности, но и эффективно экспортировать продукцию» [9].

«Следует отметить, что большинство производителей шин располагают необходимым оборудованием для работы с NR, что делает его использование весьма удобным, особенно в более теплом климате. Хотя свойства различных марок NR могут различаться, регулировка технологических параметров и рецептур является обычной практикой в шинной промышленности.

Оба типа резины (NR и SKI-3) обладают способностью кристаллизоваться при растяжении, что позволяет им демонстрировать схожие прочностные характеристики. В России при производстве шин предпочтение отдается стандарту SKI-3, в то время как зарубежные компании чаще выбирают NR. Натуральный каучук часто используется в более крупных конструкциях, таких как шины повышенной прочности и шины с цельнометаллическим кордным каркасом, что делает его более предпочтительным для производства крупногабаритных и тяжелых изделий» [9].

1.2 Физико-химические основы получения СКИ

1.2.1 Полимеризация изопрена

Синтез полиизопрена методом полимеризации изопрена представляет собой технологически сложный, но высокоэффективный процесс получения синтетического каучука. Данная реакция осуществляется в среде изопентана, выполняющего функцию растворителя, с применением модифицированной

каталитической системы. В качестве катализатора используется комплексное соединение, состоящее из триизобутилалюминия и тетрахлорида титана, которое обеспечивает высокую стереоспецифичность процесса полимеризации [12].

«Синтетический изопреновый каучук в основном состоит из транс-1,4-полиизопрена. Изопрен полимеризуется в неполярных растворителях под воздействием инициаторов, таких как натрий или калий, в результате чего образуются различные изомеры, включая 1,2-, 3,4- и транс-1,4-полиизопрен.

Полимеризация изопрена протекает по координатно-ионному механизму. Этот процесс включает каталитическую реакцию, в ходе которой происходит разрыв химических связей в мономере до образования координатного комплекса между мономером и активным центром. Образование комплекса мономер-катализатор имеет решающее значение для синтеза стереорегулярных полимеров. Полимеризация изопрена с использованием катализаторов $\text{Al}(\text{iso-S}_4\text{N}_9)_3$ и TiCl_4 демонстрирует кинетику первого порядка по отношению к катализатору и мономеру, при которой степень превращения мономера достигает 30-40 %. Кажущаяся энергия активации на начальной стадии реакции составляет приблизительно 59 кДж/моль, а степень превращения изопрена колеблется от 60 % до 38 кДж/моль.

В реакционный комплекс включаются связи Ti-Cl . В этом случае мономер выступает в качестве донора π -электронов, в то время как переходный металл служит акцептором из-за наличия свободных d-орбиталей. Это взаимодействие приводит к образованию π -комплекса, который ослабляет связь Ti-Cl в комплексе и облегчает включение мономеров, создавая новый шестичленный комплекс, который впоследствии перестраивается в четырехчленный комплекс» [9].

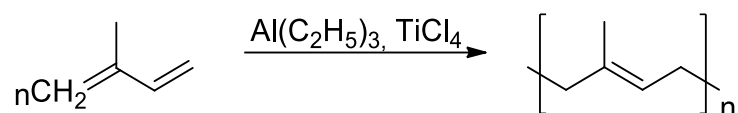


Рисунок 1 – Реакция полимеризации изопрена

«Процесс полимеризации изопрена представляет собой сложную и высокоэффективную методологию синтеза синтетического каучука, в частности полиизопрена» [1]. «Эта полимеризация происходит в растворе изопентана с использованием усовершенствованной каталитической системы на основе триизобутилалюминия и тетрахлорида титана» [9].

«Синтетический изопреновый каучук в основном характеризуется содержанием транс-1,4-полиизопрена. Во время полимеризации изопрен вступает в реакцию в неполярных растворителях с активаторами, такими как натрий или калий, что приводит к образованию нескольких изомеров, включая 1,2-, 3,4- и транс-1,4-полиизопрен.

Полимеризация изопрена протекает по координатно-ионному механизму. Этот катализируемый процесс включает разрыв связей в мономере до образования координатного комплекса между мономером и активным центром. Образование комплексов мономер-катализатор имеет решающее значение для синтеза стереорегулярных полимеров. Полимеризация изопрена с использованием катализаторов $\text{Al}(\text{iso-S}_4\text{N}_9)_3$ и TiCl_4 демонстрирует кинетику первого порядка как в отношении катализатора, так и в отношении моно %. Кажущаяся энергия активации в начале реакции составляет около 59 кДж/моль, в то время как степень превращения изопренов колеблется от 60 % до 38 кДж/моль» [9].

«В каталитическом процессе ключевую роль играют взаимодействия между атомами титана и хлора (Ti-Cl). В данной системе мономерная молекула выполняет функцию донора π -электронов, тогда как атом переходного металла (титан) действует как акцептор электронной плотности за счет наличия вакантных d-орбиталей. В ходе этого взаимодействия

формируется π -комплекс, который вызывает ослабление связи Ti-Cl и способствует более эффективному внедрению мономерных молекул. Это приводит к образованию промежуточного шестичленного комплекса, подвергающегося последующей структурной перегруппировке в четырехчленную циклическую структуру» [9].

«На следующем этапе каталитического цикла происходит разрыв одной из координационных связей в комплексе, что позволяет молекуле мономера интегрироваться в структуру каталитической системы. В результате образуется новое шестичленное циклическое соединение, которое затем трансформируется в четырехчленный цикл. В реорганизованной четырехчленной структуре присутствует углеродный атом, происходящий из мономерной молекулы, который образует связи как с атомом титана, так и с атомом алюминия. При этом изобутильный фрагмент элиминируется из циклической системы вместе с другим углеродным атомом молекулы диенового мономера» [9].

Представленный механизм демонстрирует многоэтапные координационно-химические преобразования, которые являются ключевыми для каталитического процесса полимеризации. В его основе лежит последовательное формирование и трансформация металлоорганических комплексов, что обеспечивает эффективное присоединение мономеров к растущей полимерной цепи. «Последующие молекулы мономера вступают в аналогичную реакцию, и образующиеся полимерные молекулы постепенно удаляются из структуры катализатора. При этом заместители на атомах углерода мономеров сохраняют строго определенное пространственное расположение относительно плоскости цепи, обеспечивая стереорегулярность» [9].

«Эти процессы играют жизненно важную роль в каталитической полимеризации, где стереохимические и электронные факторы существенно влияют на высокую селективность и эффективность реакций» [9]. Стереорегулярные характеристики полученных полимеров оказывают

существенное влияние на их физико-химические свойства, такие как прочность и термостойкость, что делает их особенно ценными при производстве пластмасс, волокон и эластомеров.

1.2.2 Дезактивация каталитического комплекса

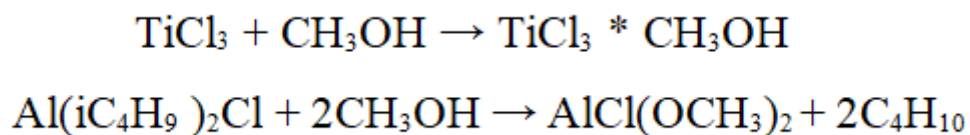
«После завершения процесса полимеризации до необходимого уровня конверсии изопрена производится дезактивация каталитического комплекса. Эта стадия технологии необходима для остановки реакции полимеризации и преобразования компонентов катализатора в такие соединения, которые не будут вызывать при последующей обработке полимеризата нежелательных процессов, таких как разрушение или изменение структуры, что может ухудшить качество изопренового каучука» [1].

«Процесс дезактивации катализатора проводят введением специальных реагентов, имеющих в своем составе реакционноспособные кислород- или азотсодержащие группы (метанол, органические кислоты, фенолы, амины) в основном двумя способами:

- Разрушение каталитического комплекса, не переводя переходной металл ($Ti3$) в неактивную форму с последующей отмывкой полимеризата.
- Дезактивация катализатора за счет его перевода в неактивную форму.

Первый способ основан на химическом взаимодействии метанола (метилового спирта) с компонентами каталитического комплекса.

Химическая реакция в этом случае проходит в соответствии с уравнением реакции» [32]:



«Рисунок 2 – Уравнение реакции метанола с компонентами каталитического

При отмывке полимера водой от продуктов разрушения каталитического комплекса, полученные алкоголяты гидролизуются:

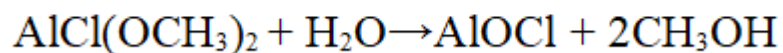
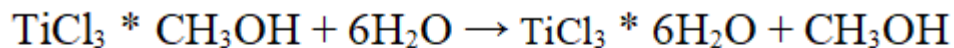


Рисунок 3 – Реакция отмывки полимеров водой

Во втором методе осуществляется комплексообразование соединений Ti^{3+} с антиоксидантами аминного типа, используемыми в производстве каучука СКИ-3. Это приводит к восстановлению титана до TiCl в присутствии HCl . В процессе последующей промывки полимеризата ионы хлора вымываются водой» [33].

1.2.3 Стабилизация полимера

«Синтетические каучуки подвержены старению под воздействием различных факторов, что приводит к необратимым изменениям и частичной или полной утрате их основных свойств. Старение полимеров может быть вызвано множеством причин и сопровождается изменениями как в микро-, так и в макроструктуре материала. Поэтому важной технологической стадией в производстве полимеров является их стабилизация с помощью специальных добавок. Стабилизация каучуков необходима для сохранения их свойств на этапе производства, а также во время длительного хранения и транспортировки» [1].

«Сложность данного механизма обусловлена тем, что синтетические каучуки обладают очень низкой температурой стеклования, что значительно ускоряет проникновение молекулярного кислорода и активирует реакцию окисления. Окисление протекает по радикально-цепному механизму, где инициаторами выступают как молекулярный кислород, так и образующиеся перекисные радикалы. Этот процесс вызывает два основных типа структурных

изменений: во-первых, приводит к образованию различных кислородсодержащих функциональных групп в составе полимерной цепи, а во-вторых, вызывает её фрагментацию за счёт разрыва макромолекул. Этот аспект особенно важен, поскольку приводит к существенному уменьшению молекулярной массы полимера, что напрямую влияет на изменение его эксплуатационных свойств при старении» [16].

Существует два основных класса ингибиторов окислительных цепных реакций, различающихся по механизму действия:

- Радикал-интерцепторы – соединения, которые подавляют окисление, связывая свободные радикалы и обрывая кинетическую цепь (линейное обрывание).
- Гидроперекисные деструкторы – вещества, взаимодействующие с гидроперекисями без генерации новых радикалов, предотвращая таким образом разветвление цепей.

«В современной технологии стабилизации полимеров наибольшее распространение в качестве первичных ингибиторов получили следующие классы соединений: вторичные аминные соединения, производные п-фенилендиамина, гидроксилламинные производные и пространственно затрудненные фенольные соединения. Вторичные ингибиторы представлены преимущественно эфирами фосфорной кислоты, соединениями на основе тиодипропионовой кислоты и разнообразными производными дитиокарбаматов» [9]. Особого внимания заслуживает технологический процесс производства светлого каучука марки СКИ-ЗС, где в качестве антиокислителя применяется фенольное соединение Агидол-1, химически представляющее собой 4-метил-2,6-ди-трет-бутилфенол.

Наиболее эффективной стратегией решения обозначенных проблем представляется применение комплексных стабилизирующих систем, обладающих выраженным синергетическим действием. Экспериментально доказано, что оптимальные результаты стабилизации светлых сортов полиизопрена достигаются при совместном использовании пространственно

затрудненных фенольных антиоксидантов и фосфорорганических стабилизаторов. В такой комбинированной системе реализуется принцип разделения функций: фенольные компоненты эффективно перехватывают и нейтрализуют пероксидные радикалы, тогда как фосфорорганические соединения катализируют разложение гидропероксидов.

«Особого внимания заслуживает механизм функционирования фосфитных стабилизаторов, который основан на их способности селективно реагировать с гидропероксидными группами, образующимися при окислении полимерной матрицы. Такое взаимодействие превращает активные гидропероксиды в устойчивые конечные соединения, благодаря чему цепные окислительные реакции обрываются, а полимер сохраняет свою молекулярную структуру» [7].

«Рабочие растворы антиоксидантов в производственных условиях готовят с учётом их растворимости в различных растворителях при низких температурах. Некоторые стабилизаторы аминного типа могут использоваться как стабилизаторы полиизопрена и как дезактиваторы каталитического комплекса, поэтому их ввод осуществляют в «живой» полимеризат после стадии полимеризации. Это позволяет объединить операции дезактивации каталитического комплекса и введения стабилизатора в каучук. При производстве светлых марок каучука антиоксидант вводится в полимеризат в виде спирто-толуольного раствора» [1].

1.2.4 Водная отмывка полимеризата

Процесс отмывки полимеризата представляет собой важнейшую стадию в технологии производства синтетического каучука, направленную на полное удаление остаточных продуктов разложения каталитической системы. Эти соединения, остающиеся в полимерной матрице даже в следовых количествах, выступают активными центрами, катализирующими процессы окислительной деструкции, что существенно ускоряет старение материала в процессе его эксплуатации и хранения.

Недостаточная эффективность отмывочных операций приводит к комплексному ухудшению характеристик как самого каучука, так и технологического оборудования. Прежде всего, снижается термическая стабильность полимера, что проявляется в уменьшении температуры начала термического разложения и повышенной склонности к деструкции при переработке. Это, в свою очередь, вызывает нестабильность работы сушильных агрегатов, выражающуюся в колебаниях температурного режима и повышенном налипании продукта на рабочие поверхности оборудования.

Образование значительного количества низкомолекулярных фракций (пластиката) является прямым следствием недостаточной очистки полимеризата от каталитических остатков. Эти фракции не только ухудшают эксплуатационные характеристики конечного продукта, но и осложняют технологический процесс, снижая общую эффективность производства. Особенно критично влияние остаточных катализаторов на механические свойства каучука - наблюдается заметное снижение прочностных характеристик и эластичности готовых изделий.

Современные технологии отмывки предполагают использование многоступенчатых систем очистки с применением специальных моющих композиций, позволяющих достичь требуемой степени чистоты полимера. Контроль эффективности отмывки осуществляется с помощью современных аналитических методов, обеспечивающих точное определение содержания металлических примесей и других нежелательных компонентов в готовом продукте.

«На этапе водной промывки из полимеризата удаляются водорастворимые продукты разрушения катализатора. Основным индикатором неэффективной промывки полимеризата является значительное (более 3 единиц) различие в значениях pH циркуляционной воды в отделении дегазации и в воде, полученной с отжимных машин установок выделения» [4].

1.3 Описание и принцип устройства полимеризатора

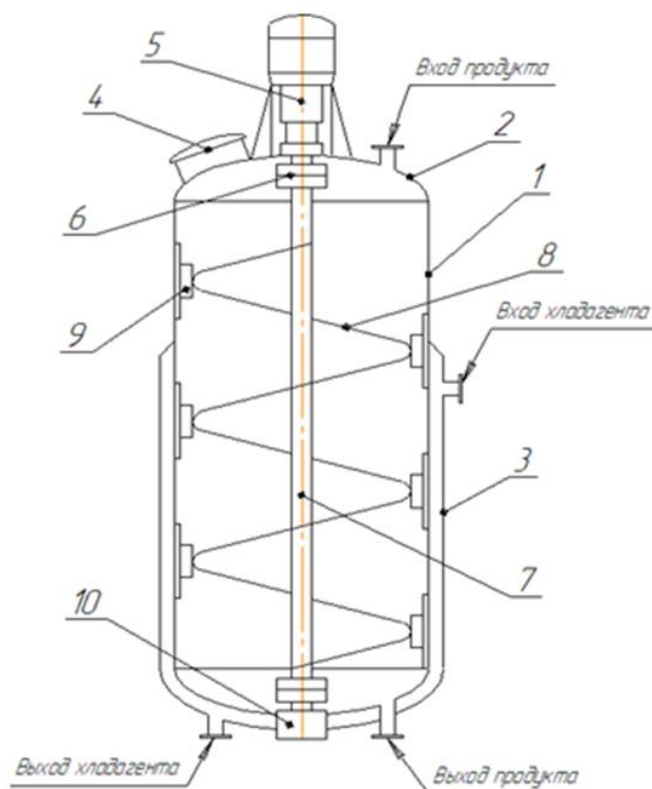
«Полимеризацию изопрена в изопентане осуществляют непрерывным методом в параллельно работающих батареях, состоящих из 3–4 последовательно соединенных полимеризаторов» [9].

«Аппаратурное оформление полимеризации в растворе более сложно и дорого по сравнению с эмульсионными полимеризаторами» [9].

«Отличительной особенностью процессов получения стереорегулярных каучуков (СКД, СКИ) полимеризацией в растворе является высокая вязкость реакционной среды, особенно к концу процесса, что вызывает большие затруднения при перемешивании рабочей массы и отводе от нее тепла.

Как показала практика и специальные исследования, мешалки обычного типа (рамные, пропеллерные, турбинные, лопастные) оказываются неэффективными, так как в этом случае на стенке аппарата остается, достаточно большой слой жидкости (раствора каучука), не перемешиваемый мешалкой, который создает основное сопротивление теплоотдаче.

В настоящее время применяются полимеризаторы со скребковыми мешалками, объемом 16 и 20 м³. Полимеризатор представляет собой вертикальный цилиндрический аппарат с охлаждающей рубашкой. Внутри аппарата на вертикальном валу закреплена мешалка, снабженная 6 скребками» [9].



1 – корпус; 2 – крышка; 3 – рубашка охлаждения; 4 – люк; 5 – редуктор с электродвигателем; 6 – муфта; 7 – вал; 8 – мешалка; 9 – скребок; 10 – опора вала

Рисунок 4 – Устройство полимеризатора

«Процесс полимеризации осуществляется при температуре в первом полимеризаторе до 60 °С и интенсивном перемешивании, для чего каждый полимеризатор снабжен мешалкой» [9].

«Повышение температуры, увеличение дозировки катализатора и времени пребывания вызывает снижение молекулярной массы полиизопрена. Предпочтительным является такой режим полимеризации, когда реакционная масса находится в системе минимальное время при дозировке катализатора, обеспечивающей заданную степень конверсии изопрена, оптимальную молекулярную массу» [9].

«Температура в зоне реакции в начальный период полимеризации изопрена» [13] «является основным фактором, с помощью которого регулируется средняя молекулярная масса полимера, пластичность и вязкость по Муни.

Процесс полимеризации протекает с выделением тепла (около 250 ккал на кг вступившего в реакцию изопрена). Температура полимеризации поддерживается предварительным охлаждением шихты и дозировкой каталитического комплекса.

Часть тепла отводится циркулирующим через рубашки полимеризаторов рассолом (раствор хлористого кальция в воде)» [9].

Недостатки данного реактора заключаются:

- Ограниченная эффективность теплоотвода. Экзотермичность полимеризации изопрена требует интенсивного охлаждения, но скребковые мешалки не всегда обеспечивают равномерное распределение температуры, что может приводить к локальным перегревам и снижению качества каучука.

- Высокий риск образования застойных зон. Вязкость реакционной массы возрастает по мере полимеризации, из-за чего возможно неравномерное перемешивание и появление зон с неоднородным составом продукта.

- Механические нагрузки и износ оборудования. Скребковые мешалки работают в условиях высоких нагрузок из-за вязкой среды, что приводит к ускоренному износу деталей (лопастей, уплотнений) и необходимости частого обслуживания.

- Энергозатратность. Высокая мощность, требуемая для работы мешалки в вязкой среде, увеличивает эксплуатационные расходы.

- Сложность очистки. Накопление полимера на стенках и элементах мешалки требует регулярной остановки реактора для механической очистки, что снижает производительность.

1.4 Факторы, влияющие на полимеризацию изопрена

Синтетический «изопреновый каучук марки СКИ-3 является продуктом стереоспецифической полимеризации изопрена в растворе в присутствии комплексных катализаторов типа Циглера – Натта» [9].

Строение СКИ-3 аналогично строению натурального каучука.

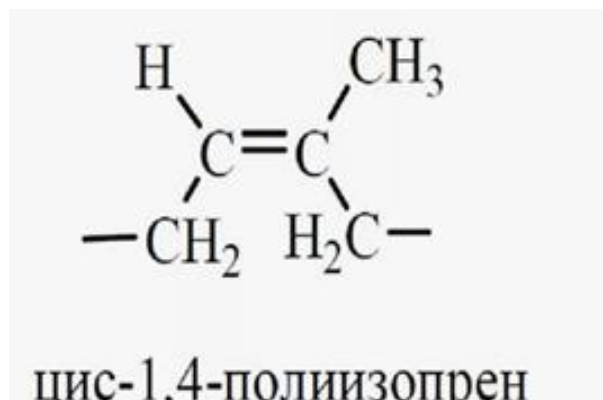


Рисунок 5 – Строение изопренового каучука

«СКИ-3 аморфен при температуре выше 10 °С. Он кристаллизуется при растяжении в условиях комнатной температуры и хранении при температурах ниже 10 °С. Скорость его кристаллизации при растяжении в 10 раз меньше, чем у НК» [9]. «СКИ-3 растворим в бензоле, толуоле, четыреххлористом углероде, циклогексане, сероуглероде; нерастворим в спиртах и кетонах; стоек к действию воды; не стоек к действию концентрированных щелочей» [4].

«Каучук должен быть однородным по пластичности и не должен содержать механических включений. СКИ-3 обладает хорошими технологическими свойствами. В отличие от НК, он не требует предварительной пластикации при изготовлении резин, легко смешивается с ингредиентами. Режимы изготовления смесей из СКИ-3 и НК аналогичны» [4].

«Строение и свойства СКИ-3 зависят от разных факторов: состава и соотношения катализатора, температуры процесса, наличия примесей в мономере, катализаторе и растворителе.

Реакция полимеризации изопрена экзотермична. Ее можно представить общим уравнением» [9]:



«Основными факторами, влияющими на полимеризацию изопрена, являются» [15]:

- «Температура. В начальный период полимеризации температура в зоне реакции — основной фактор, с помощью которого регулируется средняя молекулярная масса полимера, пластичность и вязкость.
- Дозировка катализатора. Увеличение дозировки катализатора и времени пребывания реакционной массы в системе вызывает снижение молекулярной массы полиизопрена.
- Состав катализатора. Скорость процесса зависит от состава катализатора. Например, максимальный выход полимера наблюдается при строго эквимолекулярном содержании алюминия и титана.
- Примеси. Они влияют на кинетику полимеризации изопрена, микроструктуру и физико-механические свойства полимера. Например, циклопентадиен при высоких концентрациях может снижать молекулярную массу полимера в 3–4 раза.
- Растворитель. Он должен быть инертным по отношению к катализатору и не влиять на процесс полимеризации.
- Вязкость исходного раствора каучука. От неё зависит отвод тепла, выделяющегося при полимеризации изопрена, энергия, затрачиваемая на перемешивание и транспортирование раствора полимера, скорость и полнота процессов дезактивации и стабилизации» [22, 4, 32].

«Таблица 1 – Температуры кипения растворителей» [1]

Вещество	Температура кипения, °С
Бензол	80
Гептан чистый	99
Толуол технический	110-111
Гексан технический	68 – 70
Циклогексан технический	78 – 82
Бензол	80

«Допустимое количество примесей в растворителе должно быть (в %), не более:

- карбонильных соединений0,0003;

- ацетиленистых соединений.....0,0002;
- азотистых соединений 0,0002;
- циклопентадиена 0,0002» [4];

«Образование олигомеров является крайне нежелательным, так как эти высококипящие соединения практически невозможно удалить из каучука. Они придают каучуку резкий, неприятный запах и ухудшают физико-механические свойства вулканизатов.

Оптимальная температура полимеризации, при которой образуется минимальное количество олигомеров, соответствует 20 °С. Однако при такой температуре резко снижается скорость реакции. Поэтому практически полимеризацию проводят при более высоких температурах (около 45 °С).

Для своевременного прекращения реакции полимеризации к раствору полимера добавляют стоппер (спирты, вода и другие (кислородсодержащие вещества), а для защиты от окисления вводят антиоксиданты (неозон Д, дифенил-п-фенилендиамин, ионол или их комбинации)» [28] – [31].

Выводы к 1 разделу

Высокомолекулярный полиизопрен синтезируют в среде изопентана с применением каталитической системы на основе триизобутилалюминия и титантетрахлорида. В рамках исследования рассматриваются фундаментальные аспекты производства синтетического изопренового каучука, включая:

- Конструктивные особенности полимеризационного реактора
- Принципы функционирования реакционной системы
- Ключевые технологические параметры, определяющие кинетику и селективность процесса полимеризации изопрена.

Особое внимание уделено анализу факторов, оказывающих решающее влияние на молекулярно-массовые характеристики и структуру конечного продукта.

2 Технологическая часть

2.1 Характеристика сырья и готовой продукции

Изопрен «должен соответствовать нормам и требованиям ТУ 2411-005-48158319-2010, указанным в таблице 2» [9].

«Таблица 2 – характеристика изопрена по маркам в соответствии с техническими условиями

Наименование показателя	Норма	
	Высший сорт	Первый сорт
Внешний вид	Прозрачная жидкость	
Содержание нерастворимой влаги	Отс.	Отс.
Массовая доля изопрена, %, не менее	99,0	99,0
Массовая доля суммы бутенов и пентенов, %, не более	1,0	1,0
Массовая доля метилала, %, не более	0,0008	0,001
Массовая доля метил-трет-бутилового эфира (МТБЭ), %, не более	0,0001	-
Массовая доля циклопентадиена (ЦПД), %, не более	0,0001	0,0001
Массовая доля α -ацетиленовых углеводородов, %, не более	0,0002	0,0003
Массовая доля карбонильных соединений, %, не более	0,0003	0,002
Массовая доля сернистых соединений, %, не более	0,0002	0,0003
Массовая доля ингибитора пара-трет-бутилпирокateхина, %, не менее:	0,005	0,005
Массовая доля перекисных соединений (на активный кислород), %, не более	0,0005	0,0005

Таблица 3 – характеристика СКИ-3

Характеристики	Группы	
	I	II
Вязкость по Муни ·	72-85	50-60
Пластичность	0,3-0,4	0,42-0,48
Эластическое восстановление после определения пластичности, мм, не более	2,2	1,6
Содержание антиоксидантов, % Неозона Д	0,4-0,8	0,4-0,8
Дифенил-п-фенилендиамина	0,2-0,5	0,2-0,5
Потери массы при 105 °С, %, не более	0,6	0,6
Разрушающее напряжение при растяжении, кгс/см ² (МПа), не менее		
при 22 °С	280(28)	280(28)
при 100 °С	180(18)	180(18)

Продолжение таблицы 3 » [1]

Характеристики	Группы	
	I	II
Относительное удлинение, %, не менее	700	700
Содержание золы, %, не более	0,6	0,6
Содержание металлов, %, не более		
Меди	0,0002	0,0002
Железа	0,006	0,006
Титана	0,08	0,08
Содержание стеариновой кислоты, %	0,5-1,5	0,5-1,5

Производство синтетического изопренового каучука СКИ-3 представляет собой сложный многостадийный процесс, требующий строгого соблюдения технологических параметров на всех этапах. Данный вид каучука, являясь синтетическим аналогом натурального каучука, обладает сходными физико-химическими свойствами, что делает его ценным материалом для различных отраслей промышленности.

Основным сырьем для производства СКИ-3 служит изопрен, который получают преимущественно из нефтегазового сырья. Наиболее распространенными промышленными методами получения изопрена являются пиролиз бензиновых фракций и каталитическое дегидрирование изопентана. Полученный изопрен подвергают тщательной очистке от примесей, так как даже незначительные количества посторонних веществ могут существенно повлиять на качество конечного продукта. Очистка включает в себя экстрактивную дистилляцию и гидрирование для удаления ацетиленовых соединений и других ненасыщенных углеводородов.

Важнейшим этапом технологии является процесс полимеризации изопрена. В промышленных условиях полимеризацию проводят в среде инертных углеводородных растворителей, таких как гексан или циклогексан, при температуре 50-70 °С. В качестве катализатора используют металлоорганические соединения, преимущественно литийорганические

катализаторы, в частности *n*-бутиллитий. Концентрация катализатора в реакционной смеси составляет обычно 10-15 %, при этом для повышения стереоспецифичности процесса в систему добавляют различные активаторы - эфиры или амины.

Полимеризацию осуществляют в непрерывных реакторах объемом 20-50 м³, оборудованных эффективными мешалками и системой терморегулирования. Соотношение изопрена к растворителю поддерживают на уровне 1 : 3. Процесс ведут при умеренном давлении 0,3-0,5 МПа в течение 2-4 часов до достижения степени конверсии мономера 85-90 %. Тщательный контроль температурного режима крайне важен, так как повышение температуры выше оптимального уровня приводит к снижению молекулярной массы полимера и ухудшению его эксплуатационных свойств.

После завершения стадии полимеризации полученный полимерный раствор подвергают обработке метанолом или этанолом, что приводит к осаждению каучука. Отделение полимера от жидкой фазы осуществляют методами центрифугирования или фильтрации. Затем каучук тщательно промывают для удаления остатков катализатора и других примесей, используя для этого воду или слабокислые растворы.

Особое внимание уделяется стадии стабилизации каучука. В полимерную массу вводят антиоксиданты, преимущественно фенольного или аминного типа, в количестве 0,5-1 % от массы продукта. Эти добавки предотвращают преждевременное старение каучука под действием кислорода воздуха и других факторов окружающей среды.

Процесс сушки включает два последовательных этапа: сначала механическое обезвоживание на вальцах или шнековых прессах, затем термическую сушку в барабанных сушильных аппаратах при температуре 80-100 °С. Критически важно добиться остаточной влажности продукта не более 0,5 %, так как повышенное содержание воды отрицательно сказывается на качестве каучука при последующем хранении и переработке.

Готовый каучук формуют в блоки массой 25-30 кг или гранулируют, после чего упаковывают в специальные полиэтиленовые мешки с антиадгезионной прокладкой. Каждая партия продукта подвергается тщательному контролю качества, включающему определение молекулярной массы, содержания цис-1,4-звеньев (которое должно составлять 92-95 %) и количества зольных примесей (не более 0,1 %).

Экологические аспекты производства СКИ-3 требуют особого внимания. На предприятиях предусматривают системы регенерации растворителей методом дистилляции, очистки сточных вод от остатков катализаторов и других вредных веществ, а также эффективные системы вентиляции для удаления летучих углеводородов из рабочих зон.

Перспективы развития технологии производства СКИ-3 связаны с внедрением новых каталитических систем, в частности металлоценовых катализаторов, позволяющих получать продукт с улучшенной стереорегулярностью. Также ведутся исследования по разработке энергосберегающих методов сушки и созданию "зеленых" технологий с использованием биокатализаторов.

СКИ-3 находит широкое применение в производстве особо ответственных изделий: авиационных шин, медицинских изделий, вибростойких прокладок и других продуктов, требующих сочетания высокой эластичности, износостойкости и долговечности. Совершенствование технологии его производства продолжает оставаться важной задачей современной нефтехимии.

2.2 Технологическая схема полимеризации изопрена

«Производство изопренового каучука состоит из следующих стадий:

- приготовление изопентан-изопреновой шихты и азеотропная осушка её;
- полимеризация изопрена в изопентане;

- дезактивация каталитического комплекса и заправка полимеризата антиоксидантами;
- отмывка полимеризата от продуктов разрушения каталитического комплекса умягченной воды;
- водяная дегазация полимеризата;
- выделение, сушка, упаковка каучука» [9].

«В принципиальной схеме полимеризации изопрена для получения СКИ-3, изображенной на рисунке 3, изопрен и инертный растворитель непрерывно подаются насосами в смеситель 1. В этом смесителе они интенсивно перемешиваются в течение примерно 1 минуты при температуре от -5 °С до 10 °С, чтобы избежать значительного образования полимера» [17].

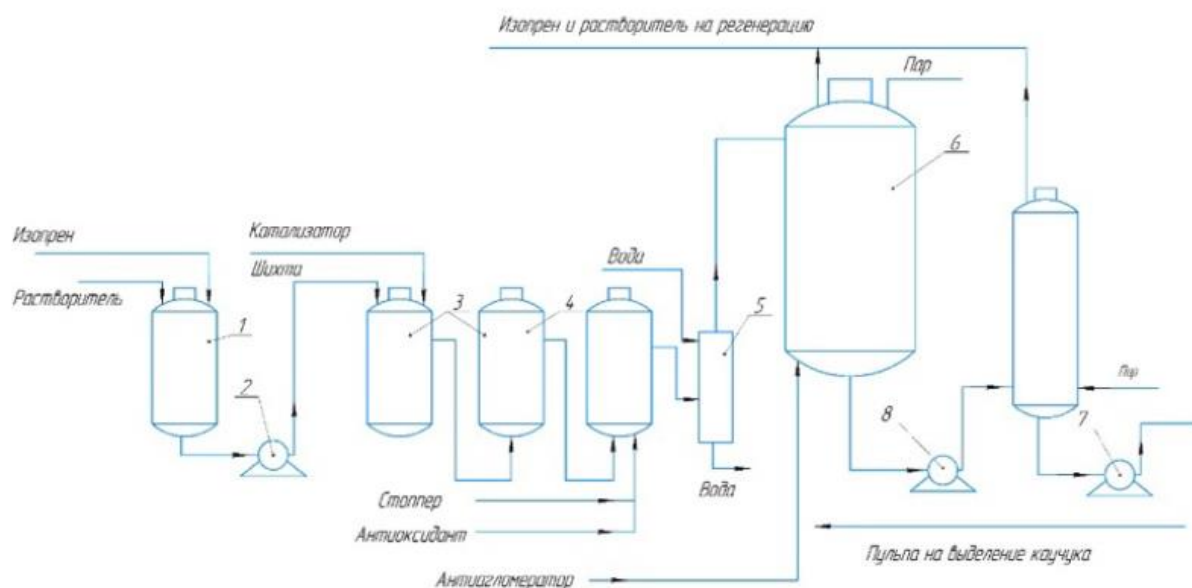


Рисунок 6 – Принципиальная схема полимеризации изопрена

«Раствор изопрена, называемый «шихтой», центробежным насосом 2, непрерывно под давлением около 5 кгс/см² (0,5 МПа) направляется в батарею полимеризаторов 3, состоящую из нескольких (четырёх – шести) последовательно включенных полимеризаторов ёмкостью 16 м³ каждый (на схеме показаны только два полимеризатора – первый и последний).

В первый полимеризатор кроме шихты с помощью дозирочного насоса (не показанного на схеме) подается раствор каталитического комплекса» [18].

«Для поддержания требуемой температуры полимеризаторы охлаждаются рассолом, поступающим в рубашку. В целях улучшения теплопередачи и поддержания одинаковой температуры полимеризационной массы, а также для очистки стенок от отложений полимера полимеризатор снабжен мешалкой со скребками.

Реакционная масса из последнего в батарее полимеризатора поступает в смеситель 4. Для прекращения процесса полимеризации изопрена туда же подается стоппер и раствор антиоксиданта.

Из смесителя 4 реакционная масса подается в промывную колонну 5, где она промывается водой при энергичном перемешивании, затем в большие емкости (не показанные на схеме) для получения однородного состава, после чего направляется на первую ступень дегазации дегазатора 6, в котором острым паром удаляется часть изопрена и растворителя» [19].

«Окончательная дегазация производится паром во второй ступени дегазатора 6, куда пульпа (взвесь крошки каучука в воде) подается насосом 8. Одновременно туда же подается антиагломератор для получения неслипающейся крошки.

При получении СКИ-3 применяется способ водной дегазации. Вследствие этого достигается коагуляция полимера и практически полное удаление растворителей. Остатки изопрена и растворителя из дегазаторов 6 поступают на конденсацию и разделение. «Пульпа» насосом 7 транспортируется на вибросита, промывку водой, обезвоживание и сушку.

Основным аппаратом в цехе полимеризации изопрена является полимеризатор. Четыре – шесть полимеризаторов, соединенных последовательно, составляют одну батарею. Переток раствора полимера из одного полимеризатора в другой происходит за счет перепада давления в заполненных полимеризаторах» [27].

«Полимеризаторы рассчитаны на давление до 5 кгс/см^2 ($0,5 \text{ МПа}$) и вязкость обрабатываемого материала 100000 сП ($10 \text{ Па} \cdot \text{с}$)» [13].

«Охлаждение полимеризата производится рассолом через рубашку. В процессе полимеризации на стенках полимеризаторов осаждается полимер, затрудняющий теплообмен. Вследствие этого внутреннюю поверхность аппарата необходимо непрерывно очищать.

Для поддержания требуемой температуры полимеризации в этих условиях полимеризатор должен быть снабжен мешалкой.

Применяемый в отечественной промышленности полимеризатор представляет собой вертикальный цилиндрический аппарат, внутри которого находится Z-образная мешалка со скребками. Поверхности корпуса крышки и мешалки, соприкасающиеся с полимеризатом, изготовлены из нержавеющей стали, а несоприкасающиеся – из углеродистой» [9].

«Диаметр полимеризатора $2,2 \text{ м}$, общая высота $6,0 \text{ м}$, объем 16 м^3 , частота вращения мешалки 30 об/мин » [1].

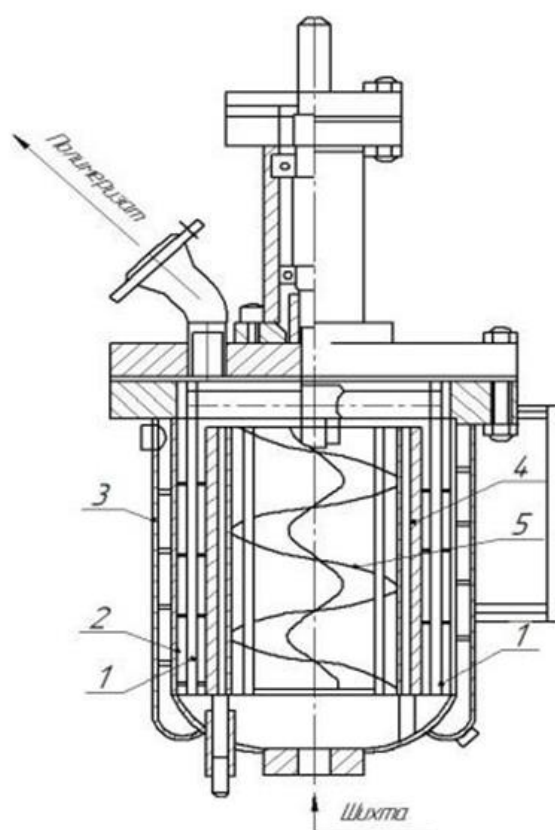
2.3 Модернизация процессов получения и полимеризации изопрена

«На стадии полимеризации изопрена предлагается заменить реактор-полимеризатор на более совершенную установку.

На предприятиях СК планируется внедрение крупногабаритных полимеризаторов (емкостью 22 м^3) типа "Крауфорд и Рассел" для переработки высоковязких растворов. Данное оборудование специально разработано для работы с растворами вязкостью до 500000 сП ($50 \text{ Па} \cdot \text{с}$) и позволяет значительно увеличить концентрацию полимера в продукте - с $8-9 \%$ до $18-20 \%$. Особое значение это имеет при производстве цис-1,4-полиизопрена, где требуется обработка особо вязких сред» [1].

«Реактор снабжен рубашкой 3 для охлаждения полимеризата, в обечайке 2 реактора помещена всасывающая труба 4, также охлаждаемая водой. Внутри

трубы 4 имеется открытый ступенчатый винт 5, обеспечивающий перемешивание и вертикальное движение полимеризата. В кольцевом пространстве между всасывающей трубой 4 и обечайкой 2 установлены два вертикальных кронштейна 1. На этих кронштейнах и между ступеньками винта во всасывающей трубе имеются скребковые лопасти для равномерной очистки всей охлаждающей поверхности от вязкого полимеризата. Кронштейны 1 и винт 5 укреплены на верхней перекладине и вращаются вместе с ней от привода. Полимеризат выходит через штуцер в верхнем днище» [9].



1 – кронштейны; 2 – обечайка, 3 - рубашка для охлаждения, 4 - всасывающая труба 5 –
винт

Рисунок 7 – Реактор - полимеризатор

«Использование данного реактора - полимеризатора способствует интенсификации массо- и теплообменных процессов, что приводит к росту

производительности при одновременном уменьшении энергетических затрат» [1].

Преимущество данного реактора:

- Эффективность перемешивания и отсутствие застойных зон. В отличие от скребковых мешалок, которые могут оставлять неперемешанные участки при высокой вязкости, реакторы "Крауфорд и Рассел" используют специальные винтовые мешалки, обеспечивающие ламинарное и равномерное перемешивание даже на поздних стадиях полимеризации.
- Лучший теплообмен и контроль температуры. Конструкция реактора оптимизирована для эффективного отвода тепла, что критически важно для экзотермической полимеризации изопрена. В некоторых модификациях используются двойные стенки, змеевики или внешние теплообменники, что позволяет точнее регулировать температуру по сравнению с реакторами, где охлаждение зависит только от скребкового перемешивания.
- Меньший износ и сниженные эксплуатационные затраты. Скребковые мешалки подвержены быстрому износу из-за трения о стенки реактора, особенно при работе с высоковязкими средами. В реакторах "Крауфорд и Рассел" применяются более долговечные мешалки, которые не требуют постоянного контакта со стенками, что увеличивает срок службы оборудования.
- Упрощенная очистка и обслуживание. В скребковых реакторах полимер часто налипает на стенки, что требует остановки производства для механической очистки. В реакторах "Крауфорд и Рассел" благодаря оптимизированной геометрии и перемешиванию налипание минимизируется, а некоторые модели допускают CIP-мойку (очистку на месте) без разборки.
- Гибкость в масштабировании. Скребковые реакторы сложно масштабировать без потери эффективности перемешивания. Реакторы

"Крауфорд и Рассел" легче адаптируются под большие объемы (свыше 20 м³) без значительного снижения КПД [6], [7].

В рамках технологического раздела данного исследования приводилась детальная характеристика используемого сырья и получаемой готовой продукции, включая их основные физико-химические свойства и методы их получения с использованием различных катализаторов комплексного типа. Особое внимание уделено соответствию продукции установленным техническим условиям (ТУ), нормативным требованиям, регламентирующим её качественные показатели и тепловым показателям процесса.

На основании анализа ключевых характеристик исходного сырья представлена принципиальная технологическая схема процесса полимеризации изопрена с использованием каталитического комплекса ТИБА и четыреххлористого титана.

3 Расчетная часть

3.1 Расчет материального баланса полимеризации

«Полимеризация протекает на активных центрах нерастворимого каталитического комплекса, образующегося при взаимодействии ТИБА и четыреххлористого титана.

Суммарное уравнение процесса полимеризации изопрен-изопентановой смеси в полимер» [25]:



«Молярные массы компонентов, входящих в реакцию приведены в таблице 4

Таблица 4 - Молярные массы компонентов, входящих в реакцию

Компонент	Молярная масса (г/моль)
Изопентан-изопентеновая смесь	68
Каталитический комплекс	330
Полимер	3217150
Треххлористый титан	154

Конверсия: $\eta = 97,0 \%$

Степень полимеризации изопрена: $n = 5000$

Материальный баланс рассчитывается на 96 620 тонн/год продукта, что составляет 11 029,68 кг/час.

$$m_{(\text{i}-\text{C}_5\text{H}_8)_n(\text{i}-\text{C}_4\text{H}_9)_2\text{AlCl}} = 11\,000 \text{ кг/час}$$

Вход реагентов [22].

Расход каталитического комплекса с учетом степени полимеризации:

$$m_{(\text{TiCl}_3)(\text{i}-\text{C}_4\text{H}_9)_2\text{AlCl}} = 330 \cdot \frac{11\,029,68}{3217150} = 1,13 \frac{\text{кг}}{\text{час}}$$

Молярный расход каталитического комплекса» [4]:

$$n_{(\text{TiCl}_3)(\text{i}-\text{C}_4\text{H}_9)_2\text{AlCl}} = 330 \cdot \frac{11\,029,68}{3217150} = 1,13 \frac{\text{кг}}{\text{час}}$$

Массовый расход изопрен-изопентановой смеси с учетом степени полимеризации:

$$m_1 = 5000 \cdot 68,119 \cdot \frac{11\,029,68}{3217150} = 1167,70 \frac{\text{кг}}{\text{час}}$$

Массовый расход изопрен-изопентановой смеси с учетом степени превращения:

$$m_{(i-C_5H_8)} = (m_1 \cdot (1 - \eta)) + m_1, \quad (3)$$

$$m_{(i-C_5H_8)} = (1167,70 \cdot (1 - 0,97)) + 1167,70 = 1202,73 \frac{\text{кг}}{\text{час}}.$$

Мольный расход изопрен-изопентановой смеси:

$$n_{(i-C_5H_8)} = \frac{m_{(i-C_5H_8)}}{n \cdot M_{(i-C_5H_8)}}, \quad (4)$$

$$n_{(i-C_5H_8)} = \frac{1202,73}{5000 \cdot 68,119} = 0,004 \frac{\text{кмоль}}{\text{час}}.$$

Общее количество реагентов:

$$m_{BX} = m_{(TiCl_3)(i-C_4H_9)_2AlCl} + m_{(i-C_5H_8)}, \quad (5)$$

$$m_{BX} = 1,13 + 1202,73 = 1203,86 \frac{\text{кг}}{\text{час}},$$

$$n_{BX} = n_{(TiCl_3)(i-C_4H_9)_2AlCl} + n_{(i-C_5H_8)}, \quad (6)$$

$$n_{BX} = 0,168 + 0,004 = 0,172 \frac{\text{кмоль}}{\text{час}}.$$

Выход реагентов

Мольный расход полимера:

$$n_{(i-C_5H_8)n(i-C_4H_9)_2AlCl} = \frac{m_{(i-C_5H_8)n(i-C_4H_9)_2AlCl}}{M_{(i-C_5H_8)n(i-C_4H_9)_2AlCl}}, \quad (7)$$

$$n_{(i-C_5H_8)n(i-C_4H_9)_2AlCl} = \frac{11\,029,68}{3217150} = 0,003 \frac{\text{кмоль}}{\text{час}}$$

Массовый расход не вступившей в реакцию изопрен-изопреновой смеси:

$$m_2 = m_{(i-C_5H_8)} - m_i, \quad (8)$$

$$m_2 = 1202,73 - 1167,70 = 35,03 \frac{\text{кг}}{\text{час}}.$$

Мольный расход не вступившей в реакцию изопрен-изопреновой смеси:

$$n_2 = \frac{m_2}{M_{(i-C_5H_8)}}, \quad (9)$$

$$n_2 = \frac{35,03}{68,119} = 0,5142 \frac{\text{кмоль}}{\text{час}}.$$

Массовый расход TiCl_3 :

$$m_{\text{TiCl}_3} = \frac{m_{(i-C_5H_8)n(i-C_4H_9)_2AlCl} + M_{\text{TiCl}_3}}{M_{(i-C_5H_8)n(i-C_4H_9)_2AlCl}}, \quad (10)$$

$$m_{\text{TiCl}_3} = \frac{11\,029,68 \cdot 154,259}{3217150} = 0,529 \frac{\text{кг}}{\text{час}}.$$

Мольный расход TiCl_3 :

$$n_{\text{TiCl}_3} = \frac{m_{\text{TiCl}_3}}{M_{\text{TiCl}_3}}, \quad (11)$$

$$n_{\text{TiCl}_3} = \frac{0,529}{154,259} = 0,003 \text{ кмоль/час}$$

Общее количество продуктов:

$$m_{\text{вых}} = 11\,029,68 + 35,03 + 0,529 = 11065,24 \text{ кг/час}$$

$$n_{\text{вых}} = 0,003 + 0,5142 + 0,003 = 0,5202 \text{ кмоль/час}$$

Процентное содержание реагентов % (вес.)

Количество каталитического комплекса:

$$n_{\text{TiCl}_3} = \frac{m_{\text{TiCl}_3}}{M_{\text{TiCl}_3}}, \quad (12)$$

$$X_{(\text{TiCl}_3)(i-C_4H_9)_2AlCl} = \frac{1,13 \cdot 100}{1203,86} = 0,09 \text{ \%}.$$

Количество изопрен-изопентановой смеси:

$$X_{(i-C_5H_8)} = \frac{m_{(i-C_5H_8)} \cdot 100}{m_{\text{BX}}}, \quad (12)$$

$$X_{(i-C_5H_8)} = \frac{1202,73 \cdot 100}{1203,86} = 99,91 \text{ \%}.$$

Процентное содержание реагентов % (вес.)

Количество $TiCl_3$:

$$X_{TiCl_3} = \frac{m_{TiCl_3} \cdot 100}{m_{ВЫХ}}, \quad (13)$$

$$X_{TiCl_3} = \frac{0,529 \cdot 100}{1203,86} = 0,439 \text{ \%}.$$

Количество изопрен-изопреновой смеси, не вступившей в реакцию:

$$X_2 = \frac{m_2}{m_{ВЫХ}}, \quad (14)$$

$$X_2 = \frac{35,03 \cdot 100}{1203,86} = 2,910 \text{ \%}.$$

Количество полимера:

$$X_{(i-C_5H_8)n(i-C_4H_9)_2AlCl} = \frac{m_{(i-C_5H_8)n(i-C_4H_9)_2AlCl} \cdot 100}{m_{ВЫХ}}, \quad (15)$$

$$X_{(i-C_5H_8)n(i-C_4H_9)_2AlCl} = \frac{11\,029,68 \cdot 100}{11065,24} = 99,68 \text{ \%}.$$

Сводные данные сведены в таблицах 5 и 6.

Таблица 5 – Материальный баланс

Приход				Расход			
Наименование компонентов	Мольная масса, г/моль	Состав, % (вес.)	Поток, кг/ч	Наименование веществ	Мольная масса, г/моль	Состав, % (вес.)	Поток, кг/ч
Каталитический комплекс, $TiCl_3(iC_4H_9)_2AlOCl$	330	0,09	1,13	Изопрен-изопентановая смесь, iC_5H_8	68,119	1,959	1099,41
Изопрен-изопентановая смесь, iC_5H_8	68,119	99,91	1203,86	Треххлористый титан, $TiCl_3$	154,259	0,046	25,934
				Полимер, $(iC_5H_8)n(iC_4H_9)_2AlCl$	3217150	97,995	56780
Суммарный расход ($Q_{ВХ}$)		100	1204,99	Суммарный расход ($Q_{ВЫХ}$)		100	56145,344

Расчет отклонения в материальном балансе полимеризации:

$$\eta = \frac{Q_{\text{ВЫХ}} - Q_{\text{ВХ}}}{Q_{\text{ВЫХ}}} \cdot 100 \% = \frac{56125,344 - 56125,341}{56125,344} \cdot 100 \% = 5,34 \cdot 10^{-6}$$

3.2 Расчет теплового баланса полимеризации

«Количество теплоты рассчитываем по формуле:

$$Q = c \cdot m \cdot T, \quad (16)$$

где Q – количество теплоты, кДж/ч;

c – удельная теплоемкость вещества,

кДж/кг·К;

T – температура вещества, К;

m – расход вещества, кг/ч.

Количество теплоты, поступающее с реагентами.

Температура входа каталитического комплекса: $T_1 = 258,15$ К;

Температура входа изопрен-изопентановой смеси: $T_2 = 233,15$ К;

Удельная теплоемкость каталитического комплекса» [9]:

$$C_{p1} = 2,4816 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

«Удельная теплоемкость изопрен-изопентановой смеси» [24], [26]:

$$C_{p2} = 2,197 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad (9)$$

Количество теплоты поступающей с каталитическим комплексом:

$$Q_1 = C_{p1} \cdot m_{(i-C_5H_8)n(i-C_4H_9)_2AlCl} \cdot T_1, \quad (18)$$

$$Q_1 = 2,4816 \cdot 55,59 \cdot 258,15 = 35615,8 \frac{\text{кДж}}{\text{час}}.$$

Количество теплоты поступающей с изопрен-изопентановой смесью:

$$Q_2 = C_{p2} \cdot m_{(i-C_5H_8)} \cdot T_2, \quad (19)$$

$$Q_2 = 2,197 \cdot 56069,75 \cdot 233,15 = 28733911,54 \frac{\text{кДж}}{\text{час}} [20].$$

«Реакция экзотермическая, т.е. протекает с выделением теплоты» [9]:

$$\Delta Q_P = 1050 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \text{изопрена}$$

«Состав изопрен-изопентановой смеси:

Изопентан $i-C_5H_{14}$ – 86,0 % масс.

Изопрен (2-метилбутадиен-1,3) $i-C_5H_8$ – 14,0 % масс.

Количество изопентана в смеси:

$$m_{1i-C_5H_{14}} = (m_{iC_5H_8} - m_2) \cdot 0,14, \quad (20)$$

$$m_{1i-C_5H_{14}} = (56069,75 - 1099,41) \cdot 0,14 = 7695,847 \frac{\text{кг}}{\text{час}}.$$

Количество тепла выделяющегося в процессе реакции:

$$Q_P = \Delta Q_P \cdot m_{1i-C_5H_{14}}, \quad (21)$$

$$Q_P = 1050 \cdot 7695,847 = 8080639,97 \frac{\text{кДж}}{\text{час}}.$$

Общее количество тепла, поступающего с реагентами:

$$Q_{\text{вх}} = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (22)$$

$$Q_{\text{вх}} = 35615,8 + 28733911,54 + 8080639,97 = 36851967,31 \frac{\text{кДж}}{\text{час}}.$$

«Количество теплоты, уходящее с продуктами реакции

Температура входа продуктов реакции: $T_3 - 318,15 \text{ К}$

Удельная теплоемкость треххлористого титана» [9]:

$$C_{p3} = 0,942 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Удельная теплоемкость полимера» [4]:

$$C_{p4} = 2,021 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

«Удельная теплоемкость изопрен-изопентановой смеси» [9]:

$$C_{p5} = 2,3439 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

«Количество теплоты, уходящее с треххлористым титаном:

$$Q_3 = C_{p3} \cdot m_{\text{TiCl}_3} \cdot T_3, \quad (23)$$

$$Q_3 = 0,942 \cdot 25,934 \cdot 318,15 = 7772,351 \frac{\text{кДж}}{\text{час}}.$$

Количество теплоты, уходящее с полимером:

$$Q_4 = C_{p3} \cdot m_{(\text{i-C}_5\text{H}_8)_n(\text{i-C}_4\text{H}_9)_2\text{AlCl}} \cdot T_3, \quad (24)$$

$$Q_4 = 2,021 \cdot 56780 \cdot 318,15 = 35363963,3 \frac{\text{кДж}}{\text{час}} \gg [20]$$

«Количество теплоты, уходящее с изопрен-изопентановой смесью» [9]:

$$Q_5 = C_{p5} \cdot m_2 \cdot T_3, \quad (25)$$

$$Q_5 = 2,3439 \cdot 1099,41 \cdot 318,15 = 819742,99 \frac{\text{кДж}}{\text{час}}.$$

Общее количество теплоты, уходящее с реагентами:

$$Q_{\text{ВЫХ}} = Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_{\text{П}}, \quad (26)$$

$$Q_{\text{ВЫХ}} = 7772,351 + 35363963,3 + 819742,99 = 361911478,641 \frac{\text{кДж}}{\text{час}}.$$

Потери теплоты в окружающую среду составляют

$$Q_{\text{П}} = Q_{\text{ВХ}} - Q_{\text{ВЫХ}}, \quad (27)$$

$$Q_{\text{П}} = 36851967,31 - 36191559,641 = 660407,696 \frac{\text{кДж}}{\text{час}}.$$

Ниже даны сводные таблицы 8 и 9 полученных в результате расчета Данных» [4].

Таблица 6 – Тепловой баланс

Приход					Расхода				
Наименование веществ	Температура, К	уд. тепл. кДж/кг·К	Поток, кг/ч	Количество теплоты, кДж	Наименование веществ	Температура, К	уд. тепл. кДж/кг·К	Поток, кг/ч	Количество теплоты, кДж
Каталитический комплекс, $TiCl_3(iC_4H_9)_2AlCl$	258,15	2,4816	55,59	35615,8	Изопренизопентановая смесь, АН·	318,15	2,3439	1099,41	819742,99
Изопренизопентановая смесь, iC_5H_8	233,15	2,197	56069,75	28733911,54	Треххлористый титан, $TiCl_3$	318,15	0,942	25,934	7772,351
Теплота реакции				8080639,97	Полимер, $(iC_5H_8)_n(iC_4H_9)_2AlCl$	318,15	2,021	56780	35363963,3
					Потери				660407,696
Сумма				36851967,31	Сумма				36851967,31

3.3 Технологический расчет полимеризатора

В данной работе рассмотрена модернизации реактора-полимеризатора, включающей увеличение его рабочего объема, модификацию конструкции перемешивающего устройства и расширение площади теплообменной поверхности. Эти изменения направлены на повышение производительности установки и улучшение контроля температурных параметров процесса полимеризации. Для технико-экономического обоснования предлагаемых изменений требуется выполнение комплекса расчетных операций. В частности, рассматривается возможность замены существующего типа мешалки на шнековый аналог [21].

Для реализации задач исследования требуется выполнить расчет ключевых технологических параметров и установить оптимальные геометрические размеры реактора идеального смешения, используемого для экзотермической реакции. Исходные параметры для проведения расчетов приведены в таблице 10.

Таблица 7 – Данные для проведения расчета

Параметр	Значение
q_v	1,35 м ³ /час
t_p	82 °С
C_{aO}	11700 моль/м ³
K_o	$3,13 \cdot 10^9$
E	60146 Дж/моль
μ_0	$0,6 \cdot 10^{-3}$ Па·с
β	$4 \cdot 10^{-4}$ К ⁻¹
q_t	$3,25 \cdot 10^{-4}$ Дж/моль
ρ	1575 кг/м ³
C_p	875 Дж/кг·м
λ	0,68 Вт/м·К
t_H	20 °С
t_{wh}	10 °С
t_{wk}	15 °С
β_w	0,0057 К ⁻¹
C_w	4190 Дж/кг·К
δC	0,012 м
rC	0,0046 м ² К/Вт
δp	0,038 м
λ_c	46,2 Вт/м К
a_2	0,36
b_2	0,67

«Найдем конечную концентрацию реагирующего компонента

$$C_{ak} = c_{a0}(1 - X_A), \quad (28)$$

$$C_{ak} = 11700(1 - 0,98) = 231,37 \text{ моль/м}^3$$

Определим константу скорости реакции:

$$k_p = k_o \exp \left\{ - \frac{E}{[R \cdot (273 + t_p)]} \right\}, \quad (29)$$

где k_o – предэкспоненциальный множитель в уравнении Аррениуса для константы скорости реакции;

E – энергия активации в уравнении Аррениуса, Дж/моль;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К;

t_p – средняя температура реакционной массы в реакторе, С.

$$k_p = 3,13 \cdot \exp \left\{ - \frac{60146}{[8,314 \cdot (273 + 82)]} \right\} = 0,212$$

Определим время пребывания в промышленном реакторе:

$$\tau = \frac{c_{a0} - c_{ak}}{k_p \cdot c_{ak}}, \quad (30)$$

$$\tau = \frac{11700 - 231,37}{0,212 \cdot 231,37} = 240 \text{ мин.}$$

Найдем объем реактора:

$$V = q_v \cdot \tau, \quad (31)$$

где q_v - расход реакционной массы, $\text{м}^3/\text{час}$;

$$V = 1,35 \cdot 4 = 5,4 \text{ м}^3.$$

Определим тепловую химической реакции:

$$q = q^t \cdot q^v \cdot (c_{a0} - c_{ac}), \quad (32)$$

$$q = 3,25 \cdot 10^4 \cdot 1,35 \cdot (11700 - 231,37) = 5 \cdot 10^8 \frac{\text{Дж}}{\text{час}}.$$

Расход хладагента воды определяется из теплового баланса» [10]:

$$G_w = \frac{1,03[q + q_v \cdot \rho \cdot c_p \cdot (t_H - t_P)]}{[c_w \cdot (t_{wk} - t_{wh})]}, \quad (33)$$

$$G_w = \frac{1,03[5 \cdot 10^8 + 1,35 \cdot 1575 \cdot 875875(20 - 82)]}{[4190 \cdot (15 - 10)]} = 0,18 \cdot 10^2 \frac{\text{кг}}{\text{час}}.$$

«Диаметр корпуса реактора вытеснения:

$$D_a = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V}{\pi}}, \quad (34)$$

где V – объём реактора вытеснения;

$$D_a = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 5,4}{3,14}} = 1,6 \text{ м.}$$

Вязкость реакционной массы при рабочей температуре» [10]:

$$\mu = 0,6\mu_0 \cdot \exp(-\beta \cdot t_p), \quad (35)$$

$$\mu = 0,6 \cdot 10^3 \cdot \exp(-4 \cdot 10^{-4} \cdot 82) = 5,8 \cdot 10^{-4} \text{Па} \cdot \text{с}.$$

«Безразмерные критерии для реакционной массы:

Рейнольдс:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot n_m \cdot D_6^2}{\mu}, \quad (36)$$

где D_6 – диаметр установки барботёров, м;

$$\text{Re} = \frac{1575 \cdot 4 \cdot 0,271^2}{5,8 \cdot 10^4} = 2,6 \cdot 10^6.$$

Прандтль:

$$\text{Pr} = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda}, \quad (37)$$

$$\text{Pr} = \frac{875 \cdot 5,8 \cdot 10^4}{0,68} = 0,75.$$

Объемный расход хладагента:

$$q_w = \frac{G_w}{3600 \cdot \rho_w}, \quad (38)$$

$$q_w = \frac{0,18 \cdot 10^2}{3600 \cdot 990} = 5 \cdot 10^5 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

Площадь сечения рубашки реактора для хладагента» [5]:

$$S_P = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot [(D_a + \delta_c + \delta_p^2) - (D_a + \delta_c)^2], \quad (39)$$

$$S_P = \left(\frac{3,14}{4}\right) \cdot [(1,6 + 0,012 + 0,038) - (1,6 + 0,012)^2] = 9,7 \cdot 10^2 \text{ м}^2.$$

Скорость хладагента в рубашке:

$$V_x = \frac{q_w}{S_P}. \quad (40)$$

Безразмерные критерии для хладагента:

Рейнольдс:

$$\text{Re}_x = \frac{V_x \cdot d_p \cdot \rho_w}{\mu_w}, \quad (41)$$
$$\text{Re}_x = \frac{5,2 \cdot 10^{-2} \cdot 0,05 \cdot 990}{0,001} = 2593.$$

Прандтль:

$$\text{Pr}_x = \frac{c_w \cdot \mu_w}{\lambda_w}, \quad (42)$$
$$\text{Pr}_x = \frac{4190 \cdot 0,001}{0,68} = 4,63.$$

«Средняя движущая сила процесса теплопередачи от реакционной массы к хладагенты» [5]:

$$\Delta t_{cp} = \frac{(t_{wk} - t_{wh})}{\ln \left[\frac{(t_p - t_{wh})}{(t_p - t_{wk})} \right]}, \quad (43)$$
$$\Delta t_{cp} = \frac{(15 - 10)}{\ln \left[\frac{(82 - 10)}{(82 - 15)} \right]} = 69,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Средняя температура хладагента:

$$t_{wc} = t_p - \Delta t_{cp} = 82 - 69,5 = 12,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Критерий Нуссельта для реакционной массы в реакторе:

$$\text{Nu} = a_2 \cdot \text{Re}^{b_2} \cdot \text{Pr}^{0,33} \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{cm}} \right)^{0,14} \cdot \left(\frac{D_6}{D_a} \right), \quad (44)$$

где отношение $(\text{Pr}/\text{Pr}_{cm})$ заменяется выражением $\exp[\beta(\chi - t_p)]$, представляющим отношение вязкостей реакционной массы при температуре средней температуре в реакторе.

$$\text{Nu} = a_2 \cdot \text{Re}^{b_2} \cdot \text{Pr}^{0,33} \cdot \exp[\beta(\chi - t_p)] \cdot \left(\frac{D_6}{D_a} \right), \quad (45)$$

$$Nu = 0,36 \cdot (2,6 \cdot 10^6)^{0,67} \cdot (7,5 \cdot 10^{-1})^{0,33} \cdot \exp[6,4 \cdot 10^{-4}(43,72 - 82)] \cdot \left(\frac{0,271}{1,6}\right) = 1625.$$

Коэффициент теплопередачи от реакционной массы к стенке

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{D_6}, \quad (46)$$

$$\alpha = \frac{1625 \cdot 0,68}{0,271} = 2762,4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Удельная тепловая мощность от реакционной массы к стенке реактора:

$$q_p = \alpha \cdot (t_p - x), \quad (47)$$

$$q_p = 2762,4 \cdot (82 - 77,7) = 11900,5 \text{ Вт/м}^2.$$

Температура стенки со стороны хладагента:

$$t_x = t_p - q_p \cdot \left(\frac{r_c + \delta_c}{\lambda_c}\right), \quad (48)$$

Критерий Нуссельта для хладагента в рубашке рассчитывается в зависимости от величины Рейнольдса:

если $Re_x < 5 \cdot 10^5$,

$$Nu_x = 0,66 \cdot Re_x^{0,5} \cdot Pr_x^{0,33} \cdot \left(\frac{Pr_x}{Pr_{cmx}}\right)^{0,25}, \quad (49)$$

если $Re_x > 5 \cdot 10^5$,

$$Nu_x = 0,037 \cdot Re_x^{0,8} \cdot Pr_x^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_x}{Pr_{cmx}}\right)^{0,25}, \quad (50)$$

где отношение (Pr_x/Pr_{cmx}) заменяется выражением $\exp[\beta_w \cdot (t_x - t_{wc})]$, представляющем собой отношение вязкостей хладагента при его средней температуре и средней температуре стенки со стороны хладагента:

если $Re_x < 5 \cdot 10^5$,

$$Nu_x = 0,66 \cdot Re_x^{0,5} \cdot Pr_x^{0,33} \cdot \exp[\beta_w \cdot (t_x - t_{wc})]^{0,25}, \quad (51)$$

если $Re_x > 5 \cdot 10^5$,

$$Nu_x = 0,037 \cdot Re_x^{0,8} \cdot Pr_x^{0,43} \cdot \exp[\beta_w \cdot (t_x - t_{wc})]^{0,25}, \quad (52)$$

где Re_x - критерий Рейнольдса для хладагента;

Pr_x - критерий Прандтля для хладагента;

β_w - температурный коэффициент вязкости хладагента (воды), $^{\circ}C^{-1}$;

t_{wc} - средняя температура хладагента, $^{\circ}C$.

$$Nu_x = 0,66 \cdot 2593^{0,5} \cdot 4,63^{0,33} \cdot \exp[0,0057 \cdot (24,2 - 15,53)]^{0,25} = 56,67.$$

Коэффициент теплоотдачи от стенки к хладагенту:

$$\alpha = \frac{Nu_x \cdot \lambda_w}{\delta_p}, \quad (53)$$

$$a_x = \frac{56,67 \cdot 0,68}{0,038} = 1014 \frac{Вт}{м^2 \cdot K}.$$

Удельная тепловая мощность от стенки к хладагенту:

$$Q_x = a_x \cdot (t_x - t_{wc}), \quad (54)$$

где t_x - температура стенки со стороны хладагента, $^{\circ}C$;

$$q_x = 1014 \cdot (24,2 - 12,53) = 11800 \frac{Вт}{м^2}.$$

Из уравнения теплового баланса определяется полная тепловая мощность реактора

$$Q_{tp} = \frac{G_w \cdot c_w \cdot (t_{wk} - t_{wh})}{3600}, \quad (55)$$

$$q_{tp} = \frac{0,18 \cdot 10^5 \cdot 4190 \cdot (15 - 10)}{3600} = 105600 \text{ Вт}.$$

и находится необходимая поверхность рубашки:

$$f_p = \frac{q_{tp}}{q_c}, \quad (56)$$

где q_c - среднее арифметическое удельных тепловых мощностей от реакционной массы к стенке от стенки к хладагенту, $Вт/м^2$;

$$f_p = \frac{105600}{12000} = 8,8 \text{ м}^2$$

Помимо поверхности теплообмена основным конструкционным параметром реакторов с перемешивающим устройством является мощность необходимая для перемешивания.

Критерий Эйлера (критерий мощности) находим

$$Eu = \frac{N}{9,8 \cdot \mu_p \cdot d^2} = \frac{3000}{9,8 \cdot 0,00024 \cdot 2,85^2} = 157034,19.$$

Мощность, расходуемая на перемешивание:

$$N_{\Pi} = Eu \cdot \rho_p \cdot n^3 \cdot d^5 = 157034,19 \cdot 850 \cdot 0,5^3 \cdot 2,85^5 = 3,139 \cdot 10^4 \text{ Вт}.$$

Выводы к 3 разделу

В представленном разделе произведен расчет материального баланса полимеризации. Составлено суммарное уравнение процесса полимеризации.

Также произведен расчет теплового баланса полимеризации.

Таблица 8 – Технологические показатели полимеризатора

Параметр	Значение
Конечная концентрация реагирующего компонента, C_{ak}	231,37 моль/м ³
l	240 мин
Объем реактора, V	5,4 м ³
Тепловой расход химической реакции, q	$5 \cdot 10^8$ Дж/час
Расход хладагента воды, G_w	$0,18 \cdot 10^2$ кг/час
Диаметр корпуса реактора вытеснения, D_a	1,6 м
Вязкость реакционной массы, μ	$5,8 \cdot 10^{-4}$ Па · с
Объемный расход хладагента, q_w	$5 \cdot 10^5$ м ³ /с
Δt_{cp}	69,5 °С
Средняя температура хладагента, t_{wc}	12,5 °С
Площадь сечения рубашки реактора для хладагента, S_p	$9,7 \cdot 10^2$ м ²
Удельная тепловая мощность от реакционной массы к стенке реактора, q_p	11900,5 Вт/м ²
Удельная тепловая мощность от стенки к хладагенту: Q_x	11800 Вт
Полная тепловая мощность реактора, Q_{tr}	105600 Вт
Необходимая поверхность рубашки, f_p	8,8 м ²
Мощность, расходуемая на перемешивание, N_{Π}	$3,139 \cdot 10^4$ Вт

Заключение

В рамках данного исследования был проведён комплексный и всесторонний анализ процесса синтеза изопренового каучука на производственной площадке ООО "Тольяттикаучук". Основное внимание было сосредоточено на детальном изучении особенностей полимеризации изопрена в растворе с использованием высокоэффективной каталитической системы $Al(i-C_3H_7)_3/TiCl_4$, где особое значение имели параметры концентрации мономера, а также влияние микропримесей на кинетику процесса полимеризации. Эти аспекты являются критически важными для достижения оптимальных условий синтеза и получения каучука с заданными свойствами.

Технологический раздел работы включал в себя детальную характеристику исходного сырья и готовой продукции, а также разработку принципиальной схемы производства, которая учитывает все этапы технологического процесса. В ходе исследования был сделан особый акцент на оптимизацию энергопотребления технологического процесса, что является важным фактором для повышения общей эффективности производства.

В качестве ключевого предложения по модернизации производственного процесса была рассмотрена замена существующего реакторного оборудования на аппарат увеличенного рабочего объёма. Это решение позволяет существенно повысить производительность установки, что, в свою очередь, может привести к значительному снижению затрат на производство и улучшению экономических показателей предприятия.

Проведённые расчёты и предложенные технические решения направлены на повышение эффективности производственного процесса при сохранении требуемых показателей качества конечного продукта. Важно отметить, что внедрение новых технологий и оборудования не только улучшит производственные показатели, но и позволит предприятию соответствовать современным требованиям рынка, обеспечивая конкурентоспособность и устойчивое развитие в будущем.

Список используемых источников

1. Агаянц И.М. Пять веков каучука и каучук // М: Модерн-А. – 2002.
2. Башкатов Т. В., Жигалин Я. Л. Технология синтетических каучуков : Учебник для техникумов. – Л. : Химия, 1987. – 360 с.
3. Большой справочник резинщика. Часть 1. Каучуки и ингредиенты/. - М.: ООО «Издательский центр «Техинформ» МАИ», 2011. - 744 с.
4. Гришин Б.С. Резиновая промышленность России – от настоящего, прошлого к будущему // Промышленное производство и применение эластомеров. - 2015.
5. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии. Ч.1,2. / Ю. П. Дытнерский. –М. : Химия, 1995. –730 с.Сидоров, Н. Н. Синтетические каучуки. Санкт-Петербург: Издательство "Политехника", 2018.
6. Елфимов, В.В. Юленец Ю.П., Марков А.В., Аветисян А.Р., Елфимов П.В. Математическая модель процесса полимеризации изопрена в массе//Каучук и Резина. 2015. № 4. С. 38-41.
7. Елфимов, В.В. Оптимальные режимы полимеризации изопрена в массе//Каучук и Резина. 2016. № 2. С. 54-57.
8. Каучук и резина. Наука и технология. Монография. Пер. с англ.: Научное издание/. -Долгопрудный: Интеллект: 2011. -768 с.
9. Кирпичников П. А., Береснев В. В., Попова Л. М. Альбом технологических схем основных производств промышленности синтетического каучука : учебное пособие для вузов. – Л. : Химия, 1986. – 224 с.
10. Курлянд, С. К. Морозостойкость эластомеров/С. К. Курлянд, М. Ф. Бухина -М.: Химия, 1999. -176 с.
11. Моисеев, В. В. Синтетические каучуки и материалы для их производства. Каталог-справочник/В. В. Моисеев, Ю. В. Перина. -М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1990. -36 с

12. Монаков, Ю.Б. Толстиков, А.Г. Каталитическая полимеризация 1,3 диенов. М.: Наука, 1991.
13. Насиров И.Ш. и др. Природный и синтетический цис- полиизопрен. Часть 1. Состояние и перспективы развития производства // Промышленное производство и применение эластомеров. - 2020.
14. Огородников С.К., Идлис Г.С. Производство изопрена, Ленинград, «Химия», 1973. – 296 с.
15. Огородников С. К. Справочник нефтехимика. В двух томах. Т. 1 / Под ред. С. К. Огородникова. –Л. : Химия, 1978. –496 с.
16. Пиотровский, К. Б. Старение и стабилизация синтетических каучуков и вулканизатов/К. Б. Пиотровский, З. Н. Тарасова. -М.: Химия, 1998. -54 с.
17. Постоянный технологический регламент производства диметилдиоксана из изобутилена и формальдегида ТР-И-6-40-11.
18. Постоянный технологический регламент производства изопрена-ректификата ТР-И-9-26-12.
19. Постоянный технологический регламент производства изопрена термическим разложением ДМД и ВПП ТР-И-8-22-14.
20. Руководство по технологическому процессу производства изопренового каучука, ООО «Тольяттикаучук», М.А. Саяпина, Н.И. Пиминова, 2018.
21. РФ Патент 2128636С1.Способ получения изопрена. Оpubл.10.04.1999.
22. Торнер Р.В. Базовая переработка полимеров: (Теория и методы расчета). – Химия, 1972.
23. Тольяттикаучук - О компании: Электронный ресурс [URL] - <https://togliatti.tatneft.ru/> (дата обращения: 15.01.2025).
24. Технический регламент ИП-5-16-16 ООО « Тольяттикаучук », характеристики готового продукта.

25. Технический регламент ИП-5-16-16 ООО «Тольяттикаучук», описание процесса полимеризации изопрена.
26. Технологический регламент ИП-5-16-16, ООО «Тольяттикаучук», Характеристика производимой продукции.
27. Технологический регламент ИП-5-16-16, ООО «Тольяттикаучук», Описание технологического процесса полимеризации изопрена.
28. Biesenberger J.A., ebastianD.H. S. Principles of polymerization engineering. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1983. 745 p.
29. Chang C.C., Halasa A.F., Miller J.W. The reaction engineering of the anionic polymerization of isoprene//J. Appl. Polym. Sci.-2003.-V. 47, N. 9.-pp. 1589-1599.
30. Mittal V., Miniemulsion Polymerization Technology. Salem, Massachusetts, US: Scrivener Publishing LLC., 2010. 311c.
31. Mingaleev V.Z., Zakharov V.P., Monakov Yu.B., Rus. J. App. Chem., 80, 7, 1130-1134 (2007).
32. Monakov Yu.B., Sigaeva N.N., Urazbaev V.N., Active site or polymerization: multiplicity: stereospecific and kinetic heterogeneity. Ed. by Zaikov G.E. Leiden. The Netherlands: Koninkligke Brill NV, 2005. 399 p.
33. Tu J., Yeoh G.H., Liu C.. Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach. Butterworth-Heinemann, 2007. 393 p.