

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)

18.03.01 Химическая технология

(код и наименование направления подготовки)

Химическая технология органических и неорганических веществ

(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Повышение энергоэффективности узла дегазации производства изопренового каучука

Обучающийся

Г.В. Кокорин

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.х.н., доцент Ю.Н. Орлов

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

Консультант

О.А. Головач

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

Тольятти 2024

Аннотация

Бакалаврская работа состоит из 61 страницы, содержит 8 рисунков, 3 таблицы, использовано 30 источников и литературы, из которых 5 иностранных. Работа содержит 3 приложения: существующая технологическая схема узла дегазации СКИ (Приложение А) и модернизированная технологическая схема узла дегазации СКИ (Приложение Б) и общий вид теплообменника-рекуператора (Приложение В).

Объектом исследования является узел усреднения и дегазации СКИ в производстве синтетического изопренового каучука на предприятии ООО «Тольяттикаучук». Цель работы - снижение энергоемкости процесса выделения СКИ за счет модернизации технологической схемы дегазации полимеризата с применением рекуперации тепла циркуляционной воды.

В теоретической части рассмотрена общая характеристика производства полимеров и проведён патентный поиск по способам рекуперации тепла в производствах растворных каучуков, по результатам которого было выбрано и обосновано техническое решение для предварительного нагрева полимеризата в теплообменнике-рекуператоре с 35 до 65 °С.

В технологической части описана существующая технологическая схема процесса дегазации СКИ, проанализированы её недостатки, выбраны пути усовершенствования и разработана модернизированная технологическая схема.

В расчетной части были произведены расчёты материального баланса дегазатора и теплового баланса теплообменника-рекуператора и конструкционный расчет теплообменника-рекуператора.

Введение в узел усреднения и дегазации СКИ теплообменника-рекуператора позволит сократить время пребывания полимеризата в крошкообразователе и дегазаторах и затраты водяного пара 5 ати и 20 ати и тепла, необходимого для их нагрева, что повысит энергоэффективность узла дегазации и количество производимого предприятием изопренового каучука.

Abstract

The title of the senior thesis is «Improvement of energy efficiency of degassing unit for isoprene rubber production». The object of the senior thesis is synthetic isoprene rubber averaging and degassing unit of polymers manufacturing facility of LLC «Togliattikauchuk» chemical factory.

The senior thesis consists of an explanatory note on 61 pages, introduction, main part, technological part, empirical study including 8 figures, 3 tables, conclusion, the list of 30 references including 5 foreign sources and 3 addendum pages including graphic part on 3 A4 sheets: current (Appendix A) and modified synthetic and modified synthetic polyisoprene degassing process flow diagram (Appendix B) and heat exchanger-recuperator general drawing (Appendix C).

The aim of the work is reduction of energy intensity of synthetic isoprene rubber separation process by modernization of technological scheme of polymerizate degassing with application of circulation water heat recovery.

In main part firstly we have examined general theory of rubber producing and special aspects of solution polymerization of rubbers. Secondly we have conducted a patent search for methods of heat recovery in solution rubber production, which resulted in the selection and justification of a technical solution for polymerizate preheating from 95 to 149 degrees Fahrenheit in a recuperative heat exchanger.

In technological part we have described current synthetic polyisoprene degassing process flow diagram of degassing unit, then we perform a gap analysis and finally have developed a modified synthetic polyisoprene degassing process flow diagram.

In the empirical study we have calculated a material balance calculations of degassing unit and a heat balance of a recuperative heat exchanger, which finally resulted in a structural calculation of the heat exchanger-recuperator.

The results of the study showed that implementation of the heat exchanger-recuperator in degassation unit will definitely increase energy efficiency and productive capacity of the unit by reducing polymerizate dwell time.

Содержание

Введение	5
1 Литературный обзор	6
1.1 Общие вопросы получения полимеров	6
1.1.1 Способы проведения полимеризации	7
1.1.2 Особенности проведения растворной полимеризации	12
1.2 Патентный поиск по способам рекуперации тепла в производствах растворных каучуков	16
1.3 Выбор и обоснование решения по рекуперации тепла циркуляционной воды со стадии дегазации для повышения температуры полимеризата СКИ, поступающего на дегазацию, с 35 до 65 °С	21
2 Технологическая часть	29
2.1 Описание технологической схемы установки дегазации полимера производства СКИ	29
2.2 Недостатки существующей технологической схемы и выбор путей её усовершенствования	34
2.3 Изменение существующей технологической схемы	34
3 Расчётная часть	36
3.1 Составление материального баланса установки дегазации полимера производства СКИ	36
3.2 Составление теплового баланса теплообменника-рекуператора	41
3.3 Конструкционный расчёт теплообменника-рекуператора (змеевика) ..	45
...3.4 Уточняющий расчёт змеевика и аппарата	50
Заключение	54
Список используемой литературы и используемых источников	55
Приложение А Существующая принципиальная технологическая схема узла дегазации СКИ	59
Приложение Б Модернизированная технологическая схема СКИ	60
Приложение В Общий вид теплообменника-рекуператора	61

Введение

Промышленность синтетического каучука в России является одной из наиболее конкурентоспособных и успешных частей нефтехимии, её оптимизация важна для российской экономики.

Одним из путей оптимизации производства является решение весьма актуальной на сегодняшний день проблемы энергосбережения, и одним из наиболее эффективных способов её решения является сокращение энергетических потерь производства путём рекуперации (повторного использования) сырья и энергоресурсов, и уносимого ими тепла [11], [12], [14], [23].

Цель работы: снижение энергоемкости процесса выделения СКИ за счет модернизации технологической схемы дегазации полимеризата с применением рекуперации тепла циркуляционной воды.

Задачи работы:

- 1) Выбрать и обосновать техническое решение для нагрева полимеризата в теплообменнике-рекуператоре с 35 до 65 °С по результатам литературного и патентного поиска
- 2) Разработать модернизированную технологическую схему узла дегазации производства синтетического изопренового каучука;
- 3) Рассчитать материальный баланс дегазатора и тепловой баланс теплообменника-рекуператора;
- 4) Произвести конструкционный расчёт теплообменника-рекуператора.

1 Литературный обзор

1.1 Общие вопросы получения полимеров

Промышленность синтетического каучука (СК) является одной из ведущих отраслей химической и нефтехимической промышленности. По состоянию на начало 2023 года мощности по производству СК в РФ составляют около 2.8 млн. т/год. Объем выпуска готовой продукции – каучуков различного типа в 2022 году более 2.2 млн. т. [1], [2], [10].

«Физические свойства полимеров, в частности эластомеров – СК как перерабатываемого материала, так и готового изделия зависят от природы и состава исходных мономеров (бутадиен, изопрен, стирол, α -метилстирол, пропилен, этилен, изобутилен и другие), молекулярно-массовых характеристик полимерных цепей – микроструктуры, молекулярной массы (ММ), наличия разветвленности, молекулярно-массового распределения (ММР) и других показателей.

Свойства же полимеров, выход в процессе получения, в свою очередь, задаются условиями проведения процесса, при которых производится синтез (механизм реакции, последовательностью сочетания собственно реакции и процессов массопереноса), скоростью протекания реакции и многими другим факторами.

Процесс массопереноса оказывает влияние на реакцию полимеризации на различных уровнях. Качество полимера связано также со скоростью протекания желательных и побочных процессов. Изменяя избирательность реакции, можно варьировать свойства эластомера в необходимом направлении» [13].

Следует отметить, что при проведении реакций полимеризации необходимо учитывать и ряд физико-химических и термодинамических характеристик, таких, например, как [13]:

- низкую диффузионную способность реагентов;

- низкую теплопроводность реагентов;
- потенциально огромное увеличение вязкости реакционной среды;
- экзотермическую природу реакции [13].

Выбор способа полимеризации определяется не только влиянием на свойства полимера, но и экономическими факторами. В зависимости от выбираемой среды и характера различают несколько основных способов проведения полимеризации [13].

Рассмотрим основные способы проведения полимеризации.

1.1.1 Способы проведения полимеризации

В производстве полимеров используются следующие способы полимеризации: растворная, в массе (блоке), в суспензии и эмульсии.

«Полимеризация в массе самая простая, если относить по участию наименьшего числа добавок, которые в дальнейшем могут приводить к образованию примесей или дополнительным затратам (в случае, например, растворного процесса).

Полимеризация осуществляется при высокой температуре, вследствие чего затруднен теплообмен, возрастает возможность протекания побочных неуправляемых реакций, в том числе термодеструкция полученного эластомера.

Если полимер растворим в собственном мономере, то реакционная масса становится очень высоковязкой, и могут возникать сопутствующие эффекты типа автоускорения (гель эффекта), неуправляемого разогрева.

Если полимер не растворяется в мономере, то он начинает выпадать в осадок, обуславливая возникновение других нежелательных эффектов. И в том и другом случаи наблюдаются эффекты налипания образующегося каучука на стенки аппаратов.

Полимеризация в растворе проводится в жидкой фазе, в которой предположительно должны растворяться мономер, катализатор и полимер – гомогенный процесс» [13].

«Если катализатор нерастворим, то процесс получил название гетерогенный. Механизм полимеризации может быть в отдельных случаях идентичен механизму полимеризации в массе, если, конечно, растворитель полностью инертен.

В противном случае он может участвовать в процессе передачи цепи, изменять полярность и др. Присутствие растворителя ухудшает условия безопасного ведения процесса, его необходимо отделять, удалять, очищать. Однако позволяет гибко управлять и менять по ходу непрерывного процесса свойства получаемых каучуков в широких пределах.

В качестве растворителя применяют углеводородные соединения ароматического ряда – толуол, бензол и другие, алифатического – гексан, изопентан, нефрас, циклогексан, циклопентан и другие и/или их смеси разного состава. Кроме того, возможно использование или сочетание с полярными углеводородами, например, хлоралкилами и т.п.

При суспензионной полимеризации условия проведения реакции такие же, как и при проведении реакции в растворе (низкая вязкость, улучшенная теплопередача и т.д.). Здесь в качестве среды можно использовать разбавители, в которых могут быть не растворимы или растворимы мономер, катализатор, полимер, (например, хлорметан или воду).

Используемую среду требуется также отделять в конце процесса с последующим возвратом в рецикл. Химический путь реакции в дисперсионной органической фазе может быть также идентичным пути реакции при полимеризации в массе. Дисперсию готовят механическим перемешиванием, добавляя при этом в большинстве случаев инертные стабилизаторы, вследствие чего в систему вводят загрязняющие элементы.

При эмульсионной полимеризации в качестве разбавителя среды используется предварительно подготовленная специальным образом вода, но органическая фаза в ней более стабильна и более тонко диспергирована» [13].

«Катализатор – инициатор и многие другие составляющие обычно растворим в воде, а точки развития роста цепи находятся в так называемых мицеллах.

Полимер выделяют коагулированием с последующими стадиями дегазации и другими.

Исходя из природы активных центров и характера протекающей реакции роста полимерной цепи процессы цепной полимеризации условно делят на ионно-координационные, анионные, катионные и радикальные.

К ионно-координационным относятся процессы полимеризации, в которых используются каталитические системы, состоящие из, как правило, углеводородорастворимых соединений переходных (редкоземельных) металлов (титана, кобальта, никеля, неодима, железа, хрома и других) и алюмо- или магнийорганических соединений (триалкилалюминий – триэтил-, триизобутил-, метилалюмоксан, полиалкилалюмоксаны, диалкилмагний и многие другие).

За открытие стереоспецифической полимеризации олефинов и диенов в начале пятидесятых годов двадцатого века два ученых – немецкий Карл Циглер и итальянский Джулио Натта получили Нобелевскую премию по химии, а этот класс катализаторов стали называть их именем. В настоящее время большой объем в РФ и в мире выпускается в присутствии таких каталитических систем – полиизопрен, полибутадиен, сополимеры этилена с пропиленом и диеном, а также все полиолефины.

Ионная полимеризация, в зависимости от природы активного центра, который обеспечивает рост цепи, подразделяется на анионный процесс и катионный (состояние растущего иона условно $\sim\text{CA}^+$ или $\sim\text{C}^+\text{B}^-$).

То есть, анионный процесс имеет на конце растущей группы отрицательный заряд, а катионный имеет активную концевую группу, заряженную положительно» [13].

«Инициирование анионной полимеризации (образование активных центров) происходит в основном под действием алкилов (ариллов) щелочных (в некоторых случаях щелочноземельных) металлов» [13], [30].

«Наиболее распространенным соединением в промышленности и исследованиях является н-бутилитий» [13], [29].

«Возможно использование для инициирования анионной полимеризации щелочных металлов. Первый каучук, полученный в СССР в присутствии натрия, – СКБ. Инициирование может осуществляться комплексами щелочных металлов самого различного характера: бифункциональные катализаторы, смешанные, например, натрий-алюминиевые, литий натриевые, комбинация щелочных металлов с их алкоголятами» [5], [13], [29].

«Кроме того, используя принцип «живущего» характера протекания реакции роста, т.е. когда длительно сохраняется активность и неоднократно возобновляется полимеризация с ростом ММ, применяют предварительно сформированные «живые» низкомолекулярные полимеры. Этот подход особенно широко используется при получении сополимеров с блочной структурой» [13], [29].

«В частности, так производят бутадиен-стирольные термоэластопласты. Под действием каталитических систем анионного типа предприятиями СК в России выпускается полибутадиен, полиизопрен, сополимер бутадиена со стиролом.

Катионная полимеризация и сополимеризация иницируется галогенидами металлов, трифторид, алкилгалогенидами металлов (в основном алюминия). В качестве соинициатора обязательно наличие доноров протонов – спирты, вода и хлоралкилы (арилы) и многие другие. Процесс протекает очень быстро (несколько десятков секунд), при низкой температуре (до минус 100 °С). В промышленности СК РФ таким способом получают высокомолекулярный полиизобутилен, бутилкаучук (сополимер изобутилена с небольшим количеством изопрена)» [13].

«Радикальная (свободнорадикальная) полимеризация инициируется, как правило, окислительно-восстановительными системами, состоящими из гидропероксида (изопропилбензола, диизопропилбензола, п-ментана и др.) и комплекса двухвалентного железа (пирофосфат-, трилонового-) и ронгалита (соль ронгалитовой – формальдегидсульфоксиловой кислоты).

Так как процесс получения каучуков проходит и в водной среде, то кроме инициирующей системы вводят эмульгаторы и диспергаторы (калиевые или натриевые мыла жирных кислот, канифоль и т.п.), электролиты (хлорид калия и/или тринатрийфосфат и лейканол (продукт конденсации формальдегида с нафталинсульфокислотой) для повышения устойчивости латекса и в конце процесса коагулянты. Кроме того, вводятся регуляторы ММ и ММР и как для всех других процессов стопперы полимеризации, антиоксиданты. В настоящее время таким способом производится очень большое количества эмульсионных сополимеров бутадиена и стирола (α -метилстирола). Большое внимание уделено экологическим проблемам, что привело к существенным изменениям в составе инициирующих систем и добавок. В зависимости от температуры проведения процесса (50 °С и ниже, 40-50 °С) получают каучук с разными потребительскими свойствами.

За последние 20 лет получило развитие направление так называемых контролируемых радикальных процессов полимеризации и сополимеризации. Однако для эластомеров это пока не нашло широкого применения.

В крупномасштабных производствах СК преимущественно используется непрерывная технология получения готового продукта. И лишь для отдельных типов и марок эластомеров, где требуется иметь очень узкое ММР и/или блочную структуру сополимера, заданную разветвленность и т.д., применяют периодический или полупериодический способ.

Технология процесса полимеризации в установках периодического действия проще, чем в установках непрерывного действия. Однако производительность установок периодического действия ниже, чем установок непрерывного действия» [13].

1.1.2 Особенности проведения полимеризации в производстве каучуков

Для полимеризации в растворе, как и для любой технологии, независимо от характера процесса можно условно выделить несколько основных стадий процесса получения каучука [13]:

- прием и хранение мономеров, растворителя и другого сырья;
- подготовка (очистка, осушка и т.п.) мономеров и растворителя;
- получение и подготовка компонентов каталитической системы;
- полимеризация, стопперирование и усреднение;
- выделение: дегазация, сушка и упаковка.

«Для всех технологий основные различия характерны для стадий 3, 4. В то же время, все процессы полимеризации при получении каучуков не завершаются полным превращением мономеров. Это в наибольшей степени характерно для эмульсионной полимеризации, при которой конверсия мономеров обычно составляет 70-75 %. И кроме отгона воды появляется необходимость специального узла отгонки не прореагировавших мономеров.

При полимеризации в растворе, как правило, конверсия тоже никогда не достигает 100 % (93-95 % и более), и полимер получается в большинстве случаев в виде гомогенной смеси с растворителем. Кроме того, исходные мономеры могут содержать примеси, которые частично остаются в полимере и/или растворителе, так как не вступают в реакцию полимеризации.

Поэтому обязательной операцией при всех способах полимеризации является дегазация – отгонка летучих веществ (мономеров, примесей, среды воды, растворителей из раствора полимера).

В соответствии с методами полимеризации могут быть выделены процессы дегазации блочного полимера, латексов, а также каучуков, получаемых полимеризацией в растворе. В основном, в действующих производствах СК используется водная (острым паром) дегазация.

Кроме того, возможно для некоторых процессов использование и безводной дегазации» [13].

«Термодинамически дегазация от десорбции отличается незначительно. Физическая природа этих процессов одинакова. Однако дегазация имеет некоторые особенности. Например, в случае дегазации латексов отличие ее от десорбции состоит в том, что мономеры не образуют раствора в одной фазе (жидкой или твердой), а адсорбированы полимером (одной из фаз). Кроме того, некоторая часть мономера может быть растворена в эмульгаторе, с получением до 17 %_{об.} коллоидного раствора. Таким образом, мономер может находиться в твердой, жидкой и паровой фазах» [13].

Назначение дегазации сводится к следующему:

- выделение полимера за счёт отгонки (извлечением) не прореагировавших мономеров и среды (растворителя и воды);
- конденсация отогнанных мономеров и растворителя и их возврат в рецикл (и/или утилизация);
- концентрирование водной крошки полимера – освобождение от избытков воды при водной дегазации перед отжимной машиной.
- для полиолефинов – обеспечение надлежащего качества изделий, так как мономеры могут привести к образованию пузырей в изделиях;
- полное удаление взрывопожароопасных сжиженных газов мономеров и легковоспламеняющихся жидкостей углеводородной среды из продукта, обеспечение безопасности производства на стадиях отжима, сушка и упаковка [13].

«Дегазация проводится в аппаратах специальной конструкции, а для некоторых процессов она совмещена с полимеризацией (производство полиизобутилена, кремнийорганических полимеров).

Для осуществления процесса дегазации к полимеру необходимо подвести теплоту. Энергетические затраты при этом ложатся на подогрев до температуры кипения среды и основная часть на испарения» [13].

«Тепловая энергия для дегазации латексов и каучуков из раствора может подводиться либо через стенку, либо при непосредственном смешении с жидким или парообразным теплоносителем.

Дегазация может осуществляться и при двояком подводе теплоты — через стенку и при непосредственном смешении. Для ускорения процесса дегазации может применяться вакуум.

Полимеризация в среде инертного растворителя в настоящее время является основным методом получения синтетического каучука, так как только проведением ионной и ионно-координационной полимеризации в растворе в неполярных средах (или в присутствии необходимых добавок — доноров) можно получить стереорегулярные полимеры с заданной микроструктурой и другими характеристиками с высокой конверсией мономера.

Процесс полимеризации в растворителях можно осуществить двумя путями:

- в растворителе, из которого затем выделяют различными способами полимер;

- в растворителе, в котором растворим только мономер, из которого полимер может быть выделен фильтрацией, центрифугированием и т.д.

Достоинства полимеризации в растворе: гибкость управления процессом, скоростью реакции; возможность осуществления необходимого отвода тепла — можно увеличить нагрузки (как правило, считается по мономеру тонн/час) при проведении непрерывной полимеризации и таким образом обеспечить режим движения реагентов, близкий к идеальному вытеснению, и дифференцированный тепловой режим.

Для уменьшения тепловыделений в начальных аппаратах батареи мономер в виде шихты может подаваться дробно. Дробная подача шихты и каталитического комплекса в первые два-три полимеризатора батареи приводит также к повышению однородности каучука» [13].

«При непрерывной схеме получения полимеров можно создавать единичные агрегаты большой емкости, повышать активность и стереоселективность действия каталитических систем, улучшать технико-экономические показатели производства.

Однако при растворной полимеризации необходимо предъявлять высокие требования к чистоте исходных мономеров (как, впрочем, и для других процессов) и растворителю, повышать затраты на регенерацию и транспортировку большого количества растворителей.

Полимеризацию в растворе в основном проводят в батарее, состоящей из 6-12 аппаратов, снабженных рубашкой для отвода тепла реакции и мешалкой скребкового типа.

Технологическое оформление всех стадий процесса получения полимера должно обеспечивать максимальный выход продукта с единицы реакционного объема при минимальных затратах на сырье, капитальное вложение, энергетiku и т.д. Кроме этого общего для всей химической технологии подхода при получении каучуков и других полимеров важнейшее значение имеет комплекс свойств получаемого продукта, определяемый химическим строением и структурой полимера.

Поэтому в технологии синтеза каучуков кинетические особенности процессов, от которых зависит производительность оборудования нельзя рассматривать в отрыве от достигаемых молекулярно-массовых характеристик и микроструктуры полимера. Решение этих двух взаимосвязанных задач осуществляется правильным выбором условий, применяемых на каждой стадии процессов и их аппаратным оформлением.

Технологическое оформление получения растворных полимеров включает следующие основные стадии: подготовка исходных компонентов, полимеризация, дезактивация катализатора, стабилизация полимера, дегазация, сушка, очистка возвратного растворителя» [13].

После рассмотрения общей теории получения полимеров, перейдем к способам рекуперации тепла для нагрева полимеризата.

1.2 Патентный поиск по способам рекуперации тепла в производствах растворных каучуков.

Для рекуперации тепла, выделяемого в процессе полимеризации, используются в основном теплообменники различных типов. В силу вязкости полимеров их выбор не так широк. Приведем здесь несколько примеров.

Рассмотрим патент RU 2170174 С2 «Способ и устройство для нагревания и/или сшивания полимеров». Заявка: 98107163/12. Дата подачи заявки: 20.09.1996. Дата публикации: 10.07.2001. Статус: действующий. Владелец патента: ВИРСБО БРУКС АБ (SE). Авторы: Сьеберг Микаэль, Рюдберг Ян (SE), Йервенкюле Юри (FI) [19].

«Изобретение относится к способу равномерного и быстрого нагрева полимеров или смесей полимеров и, кроме того, к способу сшивания полимеров, которые можно сшивать посредством тепла, с помощью инфракрасного излучения; в особенности к способу бесконтактного сшивания отливок способного сшиваться полимерного материала в связи с производством отливок, особенно при изготовлении экструдированных труб из полиэтилена.

Изобретение также относится к устройству для осуществления способа. Образование пространственных сеток или поперечных связей в полимерах, таких как полиэтилен, в настоящее время обычно осуществляют в соответствии с двумя основными принципами.

В соответствии с первым основным принципом образование пространственной сетки достигается химически с помощью функциональных групп, т.е. химически реакционноспособные боковые группы в цепи полиэтилена участвуют в процессе конденсации, который приводит к поперечным связям. В данном процессе используют трисметоксивинилсилан, и по этой причине процесс называют силановым процессом» [19].

Согласно другому основному принципу, сшивка осуществляется с помощью радикалов, образующихся либо в результате прямого воздействия

энергии излучения на полимерную цепь, например, при облучении электронным пучком или ультрафиолетовым излучением, либо под действием добавочных сшивающих агентов, таких как органические пероксиды или азосоединения [19].

«В последнем случае реакция сшивания обычно запускается с помощью тепла. Среди всего прочего, изобретение относится к данному последнему типу сшивания с помощью тепла.

Методы, основанные на переносе тепла от инструмента, обычно обладают тем преимуществом, что будет использована вся перекись, т.к. для нее не хватит времени испариться. Однако тогда требуются очень длинные инструменты для того, чтобы позволить поднять температуру до той степени, которая достаточна для запуска сшивания.

Следствием этого является то, что в инструменте существует высокий перепад давления, приводящий к необходимости высоких давлений экструзии, что, в свою очередь, обуславливает то, что экструдер должен удовлетворять высоким стандартам - обычно должен быть использован так называемый поршневой экструдер.

В результате длинных каналов также есть проблемы с трением в инструменте. Попытки решить проблемы с трением включали покрытие инструментов тефлоном и объединение шнековых экструдеров с инструментами, например, для совместной экструзии (например, WO 94/21441). Однако в этих способах совместно экструдированные поверхностные слои могут требовать удаления после экструзии.

Важной областью, в которой может быть полезен способ по изобретению, является требование, чтобы полимерный материал нагревался быстро и равномерно по всей толщине, и по этой причине нагрев ИК-излучением, выбранным в соответствии с изобретением, является очень выгодным. На рис. 1 изображен пример подвижного ИК-источника 51, расположенного на снабженной колесами тележке 52, которая может двигаться в ремонтируемом трубопроводе 53» [19].

Внутри трубопровода 53 расположена облицовочная труба 54 с нанесённым на её наружную поверхность слоем пены 55 [19].

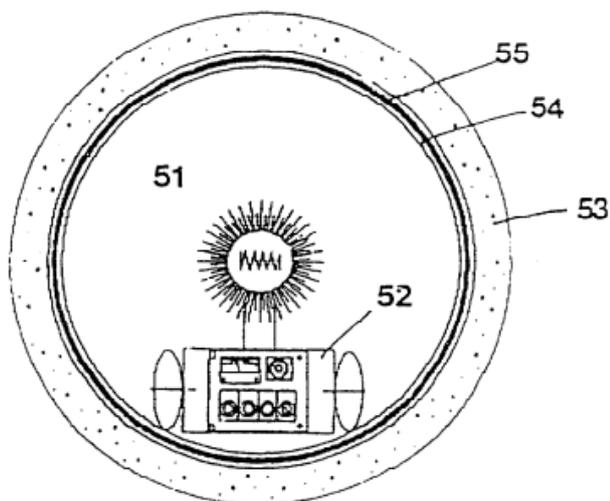


Рисунок 1 – Подвижный ИК-источник [19]

«В одном из вариантов, который более всего подходит для трубопроводов, имеющих большой диаметр, можно использовать множество тонких сложенных облицовочных трубчатых слоев, изготовленных из свариваемого полимера, которые последовательно вводят и подвергают действию давления после введения, причем каждый полимерный слой подвергается действию тепла для формования и/или сварки, от подвижного ИК-источника.

Следует подчеркнуть то, что изобретение также имеет другие области применения в рамках объема прилагаемой формулы изобретения. Например, способ в соответствии с изобретением очень подходит для нагрева концов труб с целью последующего приспособления их к соединительным рукавам» [19].

Конечно, инфракрасные источники могут быть любого возможного вида, например, можно упомянуть газовые факелы, газовые горелки без открытого пламени, электрические сопротивления и т. д., если длины волн испускания поддерживаются в указанном диапазоне, например,

непосредственно из источника, с помощью любого возможного контроля источника, с помощью фильтрования излучения или с помощью любого другого способа регулировки длины волны [19].

Но данный патент не является единственным, рассмотрим патент RU 2121921 С1 «Способ нагрева теплоносителем в технологическом процессе производства полимеров, резины и шин» [18].

«Заявка: 96124736/25. Дата подачи заявки: 31.12.1996. Дата публикации: 20.11.1998. Статус: действующий. Патентообладатели: Общество с ограниченной ответственностью ГАЗЧЕРМЕТ. Авторы: Г.Я. Власов, С.М. Зенович, Н.Х. Нагимов, Г.С. Нурутдинов.

Изобретение относится к нефтехимической, химической, легкой промышленности, в частности к процессу производства различных полимерных материалов, например, каучука, резины, изделий из них» [18].

Принципиальная схема процесса нагрева изображена на рис. 2 [18]:

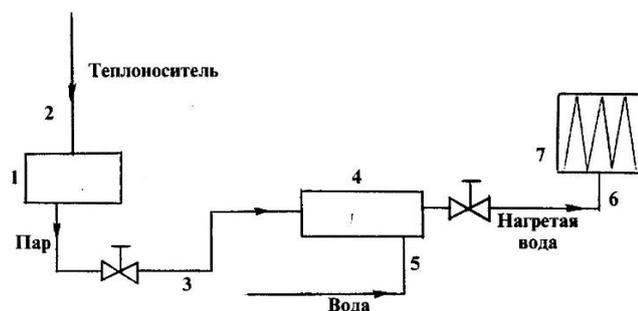


Рисунок 2 – Принципиальная технологическая схема процесса нагрева [18]

«В способе нагрева теплоносителем в технологическом процессе производства полимеров, резины и шин последовательно производят интенсивный нагрев изделия в вулканизационном аппарате 1 теплоносителем (паром или перегретой водой), подводимым по трубопроводу 2, затем излишек пара отводят по трубопроводу 3 в двухфазный струйный аппарат 4, в который по трубопроводу 5 подают извне воду, предназначенную для нагревания» [18].

«В двухфазном струйном аппарате 4 подведенные пар и вода смешиваются с образованием двухфазной смеси, которая за счет гидродинамических эффектов в струйном аппарате переводится в жидкую фазу - нагретую воду, температура которой повышается за счет конденсации пара. Затем по трубопроводу 6 нагретую воду подают назначенному потребителю 7.

Установка для приготовления и подачи перегретой воды к форматорам-вулканизаторам содержит водоподогреватели, подпиточное устройство, средства контроля и автоматики, циркуляционные насосы и трубопроводы, а также сосуд резервной воды, который компенсирует инерционность подпиточного устройства за счет наличия в нем демпфирующей среды - пара.

Образующиеся при этом излишки пара с температурой в диапазоне 130–200 °С отводят и подают на паровой вход (всас) двухфазного струйного аппарата, на водяной вход (всас) которого подают по трубопроводу тепловую воду (теплофикат) из обратного трубопровода заводской теплосети, имеющую температуру 50–90 °С.

В аппарате теплофикат нагревают до температуры 80–130 °С и подают насосом в прямой трубопровод теплосети завода. Точные значения температуры теплофиката в прямом и обратном трубопроводах зависят от теплового графика и могут регулироваться регулирующей арматурой.

Способ нагрева теплоносителем в технологическом процессе производства полимеров, резины и шин позволяет полностью исключить потери тепловой энергии пара, отводимого из технологического процесса при производстве шин, резины, резиновых изделий и других полимеров, что снижает себестоимость их производства, дает экономию энергоресурсов и повышает экологичность производства» [18].

Способ нагрева теплоносителем в технологическом процессе производства полимеров, резины и шин, в котором осуществляют интенсивный нагрев изделия с применением пара или перегретой воды в качестве теплоносителя, отличающийся тем, что избыток пара,

образовавшийся после нагрева, имеющий температуру 105–200 °С, или часть его отводят и смешивают с использованием двухфазного струйного аппарата с дополнительно подведенной извне водой, имеющей температуру 10–200 °С, с образованием двухфазной смеси с последующим переводом всей смеси в нагретую воду, которую подают назначенному потребителю [18].

Теперь перейдем к выбранной для расчёта конструкции.

1.3 Выбор и обоснование решения по рекуперации тепла циркуляционной воды со стадии дегазации для повышения температуры полимеризата СКИ, поступающего на дегазацию, с 35 до 65 °С

Рассмотренные выше конструкции не подходят для рассматриваемого процесса производства каучука, так как рассчитаны на нагрев готового полимера или изделий из него, а не полимеризата, поэтому было выбрано устройство, описанное патентом RU 2237676 С2 «Устройство для предварительного нагревания раствора полимера и способ предварительного нагревания такого раствора» [20].

«Заявка: 2002125464/12. Дата подачи заявки: 21.03.2001. Опубликовано: 10.10.2004. Авторы: Стреиф Феликс (СН), Випинер Анжелина М. (US). Патентообладатель: КОХ-ГЛИЧ, ЛП (US). Статус: действующий.

Предлагаемое изобретение относится к обработке растворов полимеров, в частности к оборудованию для обработки и способу предварительного нагревания растворов полимеров в растворителях и для обработки, ведущей к по меньшей мере частичному удалению летучих продуктов из растворов полимеров в растворителе перед окончательной вакуумной обработкой, ведущей к удалению летучих продуктов из подогретого разжиженного полимера в течение короткого времени пребывания в подогретой камере и при низком перепаде давлений» [20].

«Устройства для предварительного нагревания растворов полимеров, получающихся при реакциях полимеризации, перед вакуумной обработкой, ведущей к удалению летучих продуктов, хорошо известны в данной отрасли.

Для известных способов предварительного нагревания растворов полимеров характерно использование такого оборудования как устройства для предварительного нагревания с многотрубным теплообменником с мешалками или без них.

Однако такое оборудование часто не может обеспечить стабильность потока, при этом причиной нестабильности потока является образование пленки на поверхности раствора полимера, большие размеры раковин и большая толщина трубных листов, что приводит к увеличению затрат, к перегреву раствора в условиях уменьшения потока, причиной чего является наличие только одной фиксированной зоны нагрева, к расширению термического очага при выгорании и к трудностям при техническом обслуживании и чистке.

Другие известные устройства для предварительного нагревания растворов полимеров включают специально сконструированные ребреные трубы, установленные непосредственно в камере для обработки, ведущей к удалению летучих продуктов. Такого рода устройство раскрыто в Европейской патентной публикации № 0352727 B1.

Однако такие устройства для предварительного нагревания раствора полимера очень дороги и требуют большого времени пребывания обрабатываемого раствора в подогретой камере, а результатом таких условий обработки часто является деградация продукта. Кроме того, во многих известных устройствах данного назначения используется излишне большой перепад давлений.

Кроме того, известно использование в качестве реакторов или охладителей для полимеров некоторых типов теплообменников, в частности теплообменника, раскрытого в патенте США № 4314606 (SMR-реактор)» [20].

«В конструкции по стандарту SMR предусмотрена большая жидкостная задержка и поэтому большое время пребывания обрабатываемого раствора полимера в подогревной камере.

Ввиду особенностей типичного проекта SMR-реактора расход обрабатываемого жидкого продукта должен быть низким, что обусловлено требованием поддержания перепада давлений обрабатываемого жидкого продукта в допустимых пределах.

Если бы реакторы стандарта SMR использовались в качестве устройств для обработки, ведущей к удалению из раствора полимера летучих продуктов, и для предварительного нагревания раствора полимера, то время пребывания раствора в подогревной камере составляло бы от 5 минут до 20 минут, что могло бы приводить к ухудшению качества полимера.

Предметом предлагаемого изобретения является способ и устройство для предварительного нагревания полимера и для обработки, ведущей к удалению из полимера летучих продуктов, применение которых позволяет решить описанные выше проблемы, имеющие место при применении известных устройств этого типа.

В частности, при применении способа и устройства по предлагаемому изобретению обеспечивается минимизация стоимости оборудования, перепада давлений, времени пребывания (в реакционной среде), неравномерности распределения температуры и нестабильности потока.

Согласно идеям и принципам, заложенным в предлагаемом изобретении, усовершенствованное устройство для предварительного нагревания полимера и для обработки, ведущей к удалению из полимера летучих продуктов, сконструировано в виде удлиненной вертикальной емкости, в которой расположена подогревная камера, имеющая верхний конец и нижний конец, при этом между верхним концом и нижним концом подогревной камеры можно провести ее продольную ось» [20].

«Удлиненная вертикальная емкость содержит также входной канал, через который осуществляется подача подлежащего обработке раствора полимера в растворителе и который расположен смежно либо с верхним концом подогревной камеры, либо с ее нижним концом. Разжиженный полимер выпускается через выходное отверстие, расположенное смежно либо с нижним концом подогревной камеры, либо с ее верхним концом.

Кроме того, устройство по предлагаемому изобретению включает также по меньшей мере одну нагревательную трубопроводную систему, расположенную в подогревной камере.

Нагревательная трубопроводная система включает по меньшей мере одну нагревательную трубку, выполненную в виде змеевика, образующего структуру, в которой может быть выделена главная ось, ориентированная в поперечном направлении относительно продольной оси подогревной камеры. Образующая змеевик нагревательная трубка расположена таким образом, что для раствора полимера, подаваемого в подогревную камеру, по мере его протекания от входного канала к выходному отверстию обеспечен контакт с наружной поверхностью, образующей змеевик нагревательной трубки с обеспечением условий для теплопередачи.

Если сформулировать в более широком аспекте, то используемая в предлагаемом изобретения нагревательная трубка имеет некоторую совокупность изогнутых участков и некоторую совокупность прямых соединительных участков, посредством которых изогнутые участки нагревательной трубки соединены между собой.

Изогнутые участки нагревательных трубок и ее прямые соединительные участки расположены в одной плоскости, и в предпочтительных вариантах осуществления предлагаемого изобретения эта плоскость практически параллельна продольной оси подогревной камеры. В идеальном случае каждая образующая змеевик нагревательная трубка образует структуру прямоугольной формы, противоположные края которой параллельны ее главной оси, о которой упоминалось выше» [20].

«В одном из особо предпочтительных вариантов осуществления предлагаемого изобретения прямые соединительные участки нагревательных трубок расположены параллельно друг другу, при этом они имеют вытянутый размер и ориентированы под углом к главной оси структуры, образованной соответствующей нагревательной трубкой, выполненной в виде змеевика.

В предпочтительных вариантах осуществления предлагаемого изобретения нагревательная трубопроводная система включает по меньшей мере две нагревательные трубки, которые расположены рядом в параллельных плоскостях.

Эти нагревательные трубки имеют входные и выходные каналы для соответственно подачи и отвода жидкого теплоносителя, выходящие за пределы вертикальной емкости сквозь ее стенки.

В предпочтительных вариантах осуществления предлагаемого изобретения нагревательные трубки расположены таким образом, что входной канал одной нагревательной трубки расположен смежно с выходным каналом другой нагревательной трубки и наоборот.

Таким образом, для жидкого теплоносителя, подаваемого через входные каналы расположенных рядом нагревательных трубок, обеспечено протекание по этим двум нагревательным трубкам в противоположных направлениях.

В еще более предпочтительных вариантах осуществления предлагаемого изобретения устройство для предварительного нагревания раствора полимера содержит две нагревательные трубопроводные системы, расположенные внутри подогревной камеры. Одна нагревательная трубопроводная система может быть расположена над другой» [20].

В идеальном случае нагревательные трубопроводные системы ориентированы таким образом, что главные оси структур, образуемых выполненными в виде змеевиков нагревательными трубками одной нагревательной трубопроводной системы, расположены с поворотом вокруг продольной оси подогревной камеры относительно главных осей структур,

образуемых выполненными в виде змеевиков нагревательными трубками других нагревательных трубопроводных систем» [20].

На рис.3 с частичным разрезом, вид спереди, показано устройство для предварительного нагревания раствора полимера в растворителе, воплощающее идеи и принципы предлагаемого изобретения, а на рис. 4 изображена конструкция змеевика [20].

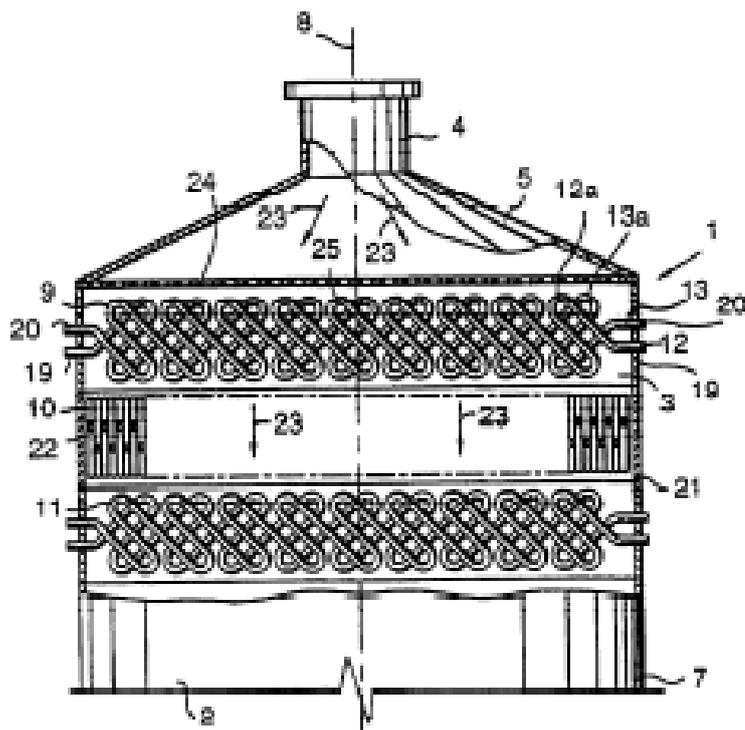


Рисунок 3 – Вид устройства спереди с частичным разрезом [20].

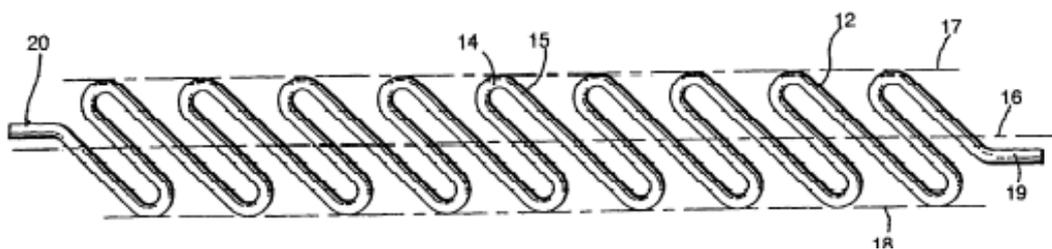


Рисунок 4 – Змеевик [20]

На рис. 5 с частичным разрезом изображено устройство, показанное на рис.1, вид сверху, а на рис. 6 с частичным разрезом изображено устройство с частичным разрезом с показанным трубопроводом для подачи подогреваемого полимеризата и отводом подогретого полимеризата [20].

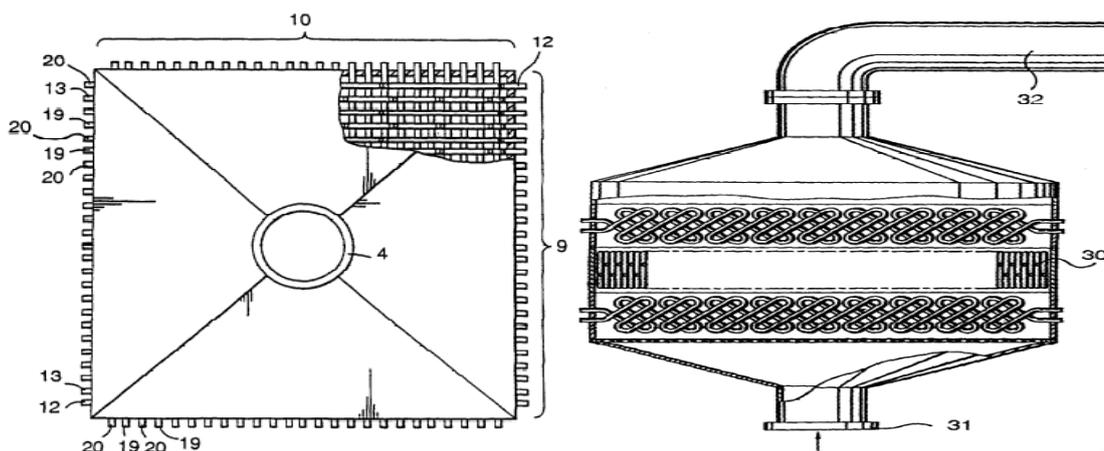


Рисунок 5, 6 – Вид устройства сверху и вид устройства сбоку с подводом и отводом полимеризата [20]

«В более широком техническом контексте предлагаемое изобретение может быть использовано там, где требуется удаление летучих продуктов из любого полимера, растворимого в каком-либо растворителе.

Например, с использованием идей и принципов предлагаемого изобретения может осуществляться удаление летучих продуктов из растворов таких полимеров как полистиролакрилонитрил, полистирол и полиэтилен. При этом в качестве растворителей могут быть использованы гексан и другие органические растворители.

В предпочтительных вариантах осуществления предлагаемого изобретения содержание твердого вещества в подлежащем обработке исходном растворе полимера в растворителе составляет от приблизительно 50 % до приблизительно 80 % по массе, его динамическая вязкость находится в пределах от приблизительно 1 Па·с до приблизительно 100 Па·с, его температура находится в пределах от приблизительно 120 °С до приблизительно 160 °С, а его расход достигает 50000 фунтов (около 22700 кг) полимерного твердого вещества в час» [20].

Подогретый разжиженный полимер, отводимый из подогретой камеры, может иметь температуру в пределах от приблизительно 150°С до

приблизительно 280°C, а его динамическая вязкость может находиться в пределах от приблизительно 1 до приблизительно 5000 Па·с [19].

«В предпочтительных вариантах осуществления предлагаемого изобретения время пребывания обрабатываемого раствора полимера в подогревной камере может быть менее 2 минут, а в идеальном случае - менее 50 секунд. В предпочтительных вариантах осуществления предлагаемого изобретения общий перепад давлений на протяжении подогревной камеры меньше, чем приблизительно 5 бар ($5 \cdot 10^5$ Па).

При использовании предлагаемого изобретения может быть осуществлена обработка раствора полимера в растворителе, обеспечивающая удаление растворителя, непрореагировавшего мономера и низкомолекулярных олигомеров в условиях, при которых перепад давлений и деградация полимерного продукта сведены к минимуму» [20].

В качестве теплоносителя могут быть использованы вода или масло, трубы выполнены из нержавеющей стали по ГОСТ 9941-81 [9], [20].

В данном случае данное решение будет использоваться для нагрева полимеризата СКИ, поступающего с узла усреднения при температуре 35 градусов, циркуляционной водой до температуры 65 °С, после чего он будет поступать на дегазацию. Решение идеально подходит для поставленной задачи, приступаем к описанию технологической схемы и расчётам.

2 Технологическая часть

2.1 Описание технологической схемы установки дегазации полимера производства СКИ

Существующая принципиальная технологическая схема узлов усреднения и дегазации полимеризата СКИ изображена на рис. А.1 приложения А [7], [8].

«Полимеризат с водой из отстойников № 500 узла отмывки полимеризата установки полимеризации изопрена (ИП-5) по трем параллельно работающим трубопроводам поступает в общий коллектор и далее в усреднители № 465/II и № 465/III, где осуществляется усреднение полимеризата и отделение основной массы воды, уносимой с полимеризатом.

Верхний слой полимеризата из аппаратов № 465/II и № 465/III по переливной трубе поступает в усреднители № 465/I и № 465/IV, где производится дополнительное отделение воды, после чего полимеризат насосами № 466 направляется на дегазацию в крошкообразователи № 117г.

Отстоявшаяся вода из усреднителей № 465/II,III насосами № 153 выводится в емкость № 450 или смеситель № 501/II отделения полимеризации установки полимеризации изопрена (ИП-5)» [22].

Уровни раздела фаз в усреднителях № 465/II,III выдерживаются регуляторами, регулирующие клапаны установлены на линиях нагнетания насосов № 153 [22].

«Отстоявшаяся вода из усреднителей № 465/I,IV насосами № 154 подается в коллектор приема полимеризата и далее в усреднители № 465/II,III» [22].

Предусмотрена возможность подачи отстоявшейся воды насосом № 154 из усреднителей № 465/I,IV в емкость № 450 или аппарат № 501/II установки полимеризации изопрена (ИП-5). Уровни раздела фаз в усреднителях №

465/I,IV выдерживаются регуляторами, регулирующие клапаны установлены на линиях нагнетания насосов № 154 [22].

«Пары углеводородов и азот из усреднителей № 465/I-IV поступают на узел конденсации в два последовательно соединенных конденсатора № 150 и № 119/1, охлаждаемых оборотной и захоленной водой соответственно.

Углеводородный конденсат (преимущественно изопентан) из аппаратов № 150 и № 119/II собирается в емкости № 145а, откуда насосом № 146/II(I) по уровню в емкости № 145а откачивается в емкость № 125 и далее подается на водно-щелочную отмывку растворителя» [22].

Давление в системе конденсации выдерживается регулятором, регулирующий клапан которого установлен на линии отдувок из конденсатора № 119/II в атмосферу [22].

«Полимеризат из усреднителей № 465/I,IV насосами № 466/I-VI подается в нагнетательный коллектор, откуда в заданном количестве через регуляторы расхода подается на системы дегазации» [22].

Регулирующие клапаны установлены на линиях подачи полимеризата в крошкообразователи № 117г систем дегазации [22].

«Дегазация полимеризата производится в 3-х параллельно работающих системах в две стадии в аппаратах № 117/I,II,IV и № 117а/I,III,IV. Каждый из дегазаторов № 117/I,II,IV снабжен крошкообразователем: № 117/I - № 117г/I; № 117/II - № 117г/II; № 117/III - № 117г/III; № 117/IV - № 117г/IV.

Полимеризат из усреднителей № 465/I и № 465/IV любой группой насосов № 466 подается в соответствующий крошкообразователь № 117г, куда также подается:

- пар давлением 20 кгс/см² для получения крошки каучука и испарения основного количества растворителя изопентана, а также изопрена, не вступившего в реакцию полимеризации;

- циркуляционная вода из емкости № 326а (№ 326в) насосом № 326б (№ 326г) для транспортировки крошки каучука из крошкообразователя в дегазатор» [22].

Давление пара выдерживается регулятором в пределах 15–20 кгс/см², клапан установлен на линии ввода пара 20 кгс/см² на установку [22].

Расход полимеризата выдерживается регулятором, клапан установлен на линии полимеризата в крошкообразователь № 117г [22].

Расход циркуляционной воды выдерживается регулятором расхода в пределах:

- для I, IV систем дегазации 100-300 м³/час;
- для III системы дегазации 100-120 м³/час [22].

«Для предотвращения слипания образующейся при дегазации крошки каучука в циркуляционную воду вводится антиагломератор стеарат кальция, водная суспензия которого непрерывно, в расчетном количестве, подается насосом 210 из отделения приготовления антиагломератора во всасывающую линию насосов № 326б (№ 326г)» [22].

Расход суспензии выдерживается регулятором расхода. Регулирующий клапан установлен на линии подачи антиагломератора во всасывающую линию насосов № 326б (№ 326г) [22].

«Образующаяся газожидкостная смесь из крошкообразователя № 117г поступает в дегазатор № 117 - I ступени.

Ввод пульпы в дегазаторы № 117 из крошкообразователей № 117г предусматривается под слой жидкости» [22].

Температура в кубе дегазаторов № 117 выдерживается в пределах 96–110 °С регулятором, клапан которого установлен на линии подачи пара 20 кгс/см² в крошкообразователь № 117г. Для дополнительного поддержания температуры в дегазаторе № 117 предусмотрена подача пара через встроенный внутри аппарата барботер [22].

Давление пара, подаваемого в барботеры, выдерживается регулятором не более 5 кгс/см². Регулирующий клапан установлен на вводе пара 8 кгс/см² в отделение дегазации [22].

«Дегазаторы № 117/I,III,IV, № 117а/I,III,IV оборудованы лопастными мешалками с верхним приводом» [22].

«Лопасты закреплены на валах в три яруса. Частично дегазированная крошка каучука в потоке циркуляционной воды из нижней части дегазаторов № 117/I,III,IV – I ступени – насосами № 142 подается на II ступень дегазации в дегазаторы № 117а/I,III,IV для окончательного выделения углеводородов из крошки каучука.

Температура в дегазаторах второй ступени выдерживается в пределах 96–105 °С за счёт подачи пара давлением не более 5,0 кгс/см² в куб дегазатора № 117а/I,III,IV через встроенный барботер. Предусмотрено регулирование расхода пара в барботер дегазатора № 117а/I,III,IV с коррекцией по температуре.

Окончательно дегазированная крошка каучука из нижней части дегазаторов № 117а/I,III,IV насосом № 142а подается в соответствующие концентраторы А-700, А-700/II, А-700/III установок ЛК-8/I и ЛК-8/II, ЛК-4/III.

Циркуляционная вода после отстоя крошки каучука в концентраторах А-700 (А-700/II, А-700/III) самотеком поступает в емкости № 326а (№ 326в), откуда насосами № 326б (№ 326г) непрерывно подается в крошкообразователь № 117г. Заполнение системы водой перед пуском, а также восполнение потерь производится умягченной водой через емкости № 326а (№ 326в).

Подогрев циркуляционной воды перед пуском установки дегазации осуществляется паром с давлением не более 5,0 кгс/см², подаваемым в барботер ёмкости № 326а (№ 326в).

Выдерживание рН циркуляционной воды в заданных пределах 7,5–9,5 обеспечивается подачей раствора щелочи в емкость № 326а, № 326в, на всас насоса 61, № 326б/I и № 326б/II, № 326г/I и № 326г/II и в концентраторы А-700, А-700/II, А-700/III, в емкость № 716.

Концентрированный раствор щелочи (NaOH или KOH) из отделения ИП-20-30 принимается в емкость № 718, куда также предусмотрен прием умягченной воды для приготовления раствора щелочи с концентрацией не более 15 %_{масс}» [22].

«Пары углеводородов и воды из дегазаторов № 117 через фильтры № 118 (по 2 фильтра после каждого дегазатора № 117, установленные последовательно), где отделяется унесенная газовым потоком крошка каучука, по двум параллельным трубопроводам поступают на систему конденсации установки полимеризации изопрена ИП-5.

Пары углеводородов и воды из дегазаторов № 117 - II ступени дегазации через фильтр № 118а, где отделяется унесенная газовым потоком крошка каучука, поступают на конденсацию в конденсатор № 144, охлаждаемый оборотной водой, поступающей из коллектора оборотной воды» [22].

Углеводородный конденсат из конденсатора № 144 стекает в емкость № 145, а несконденсированные пары поступают в конденсатор № 119/1, охлаждаемый оборотной или захлажденной водой, поступающей из отделения ИП-3 установки ИП-3-4 [22].

Конденсат из конденсатора № 119/1 стекает в емкость № 145, откуда насосом № 146/1 подается в емкость № 125 и далее направляется на водно-щелочную отмывку возвратного растворителя установки полимеризации изопрена ИП-5 [22].

Несконденсированные инерты из конденсатора № 119/1 стравливаются в сферу. Давление в системе конденсации выдерживается регулятором давления. Воздушка оборудована огнепреградителем [22].

Для защиты аппаратов № 117 и № 117а от завышения давления на них установлены предохранительные клапаны с защитными мембранами перед ними [22].

Сброс от предохранительных клапанов направляется в емкость № 148. Для защиты от завышения давления на емкости № 145 установлен предохранительный клапан, сброс от которого также направлен в емкость № 148 [22].

«Углеводороды из емкости № 148 откачиваются насосом № 148а в емкость № 125 установки полимеризации изопрена ИП-5» [22].

2.2 Недостатки существующей технологической схемы и выбор путей её усовершенствования

Основным недостатком существующей технологической схемы является большое количество водяного пара 20 и 5 ати, подаваемого в крошкообразователь [22] и дегазаторы обеих ступеней (для поддержания температуры дегазации) соответственно, который в ходе процесса разбавляет циркуляционную воду и возвращается вместе с ней в ёмкость 326а(в).

Количество этого пара зависит от температуры полимеризата, чем она ниже, тем больше пара нужно на крошкообразование и дегазацию полимеризата. Повышение температуры полимеризата (с учётом опасность «свёртывания» полимеризата в результате его перегрева) сократит количество пара, необходимое для крошкообразования и дегазации.

Из этого так же следует ещё один полезный для производства положительный эффект: сокращение пребывания полимеризата в крошкообразователе и дегазаторах, что позволит увеличить количество производимого в час каучука СКИ-3.

Соответственно, способом повышения эффективности узла дегазации является внедрение теплообменника-рекуператора для нагрева заданного количества полимеризата с 35 до 65 °С с использованием циркуляционной воды температурой 90°С в количестве, соответствующем сконденсировавшемуся пару 20 ати и 5 ати.

2.3 Изменение существующей технологической схемы

Модернизированная принципиальная технологическая схема узла дегазации СКИ изображена на рис. Б.1 приложения Б [7], [8].

Полимеризат из усреднителей № 465/I,IV насосами № 466/I-VI подается в нагнетательный коллектор НК, откуда в заданном количестве через регуляторы расхода подается при 35 °С по трубопроводу в нижнюю часть

внедряемого теплообменника-рекуператора. Регулирующие клапаны установлены на линиях подачи полимеризата.

Для нагрева полимеризата служит циркуляционная вода температурой 90 °С, подаваемая из ёмкости 326а(в) (на схеме обе ёмкости обозначены как общая ёмкость 326). Для этого необходимо установить дополнительные насосы за каждой из ёмкостей.

Вода подаётся по всей высоте нагревательной камеры теплообменника-рекуператора в нагревательные системы, выполненные в виде змеевиков, расположенные внутри нагревательной камеры перпендикулярно движущемуся вверх полимеризату. Температура воды контролируется установленными на входе и выходе змеевика температурными датчиками.

Охладившаяся в процессе теплопередачи вода выходит с другой стороны теплообменника-рекуператора и сливается в сточные воды

Нагретый до температуры 65 °С полимеризат выходит из нагревательной камеры в верхней части аппарата и по трубопроводу любой группой насосов 466 подаётся в крошкообразователь [22], дальнейшее описание технологической схемы (как и сама технологическая схема) аналогична существующей.

В технологической части была описана технологическая схема узла усреднения и дегазации СКИ установки ИП-6, проанализированы её недостатки и предложена модернизированная технологическая схема с внедрением теплообменника-рекуператора для предварительного нагрева полимеризата перед его подачей в крошкообразователь, переходим к расчётной части.

3 Расчётная часть

3.1 Составление материального баланса установки дегазации полимера производства СКИ

Исходные данные:

Состав полимеризата и отходящих углеводородов:

Таблица 1 – Состав потоков

Поток	Полимеризат из усреднителя 465	Углеводороды после I системы дегазации
Компонент	Содержание, % _{масс.}	
Полиизопрен	13,0	0,0
Изопентан	70,0	74,0
Изопрен	3,5	4,0
Амилены	13,0	13,5
Толуол	0,5	0,5
Вода	0,0	8,0
Итого	100,0	100,0

Расход полимеризата $G_{\text{полимеризат}} = 35 \text{ т/ч} = 35000 \text{ кг/ч}$.

Материальный баланс дегазатора рассчитывается по следующей формуле:

$$G_1 + G_2 + G_3 + G_4 = G_5 + G_6 \quad (1)$$

где G_1 – количество полимеризата, подаваемого в крошкообразователь, кг/ч;

G_2 – количество водяного пара $P = 20$ ати, подаваемого в крошкообразователь, кг/ч

G_3 – количество циркуляционной воды, подаваемой в крошкообразователь, кг/ч;

G_4 – количество водяного пара $P = 5$ ати, подаваемого в барботёр дегазатора, кг/ч;

G_5 – количество кубовой жидкости (пульпы), кг/ч;

G_6 – количество паров углеводородов и воды, кг/ч.

Материальный баланс аппарата выражается следующей схемой, изображённой на рис. 7:



Рисунок 7 – Схема материального баланса

Приход:

В дегазатор поступают полимеризат, циркуляционная вода и водяные пары 20 и 5 ати, примем соотношение начальных потоков как полимеризат:пар 20 ати:циркуляционная вода:пар 5 ати = 1:0,5:5:0,025 и рассчитаем их количество:

Количество пара 20 ати:

$$G_2 = 0,5 \cdot G_{\text{полимеризат}} = 0,5 \cdot 35000 \text{ кг/ч} = 17500 \text{ кг/ч.}$$

Количество циркуляционной воды:

$$G_{\text{цвз}} = 5 \cdot G_{\text{полимеризат}} = 5 \cdot 35000 \text{ кг/ч} = 175000 \text{ кг/ч.}$$

Количество пара 5 ати:

$$G_4 = 0,025 \cdot G_{\text{полимеризат}} = 0,025 \cdot 35000 \text{ кг/ч} = 875 \text{ кг/ч}$$

Исходное количество газожидкостной смеси (прихода) из крошкообразователя:

$$G_n = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 \quad (2)$$

К полимеризату добавляется раствор антиоксиданта С-789 в изопентане (25,0 %_{масс.}) (дозировка С-789 на полиизопрен – 0,3 %_{масс.}), рассчитаем состав полимеризата G_1 в соответствии с таблицей 1 с учётом раствора антиоксиданта и сведём в таблицу 2.

Количество полиизопрена и амиленов:

$$G_{\text{полиизопрен}_1} = \frac{35000 \text{ кг/ч} \cdot 13 \%}{100 \%} = 4550 \text{ кг/ч} = G_{\text{амилены}_1}$$

Количество неполимеризованного изопрена:

$$G_{\text{изопрен}_1} = \frac{35000 \text{ кг/ч} \cdot 3,5 \%}{100 \%} = 1225 \text{ кг/ч.}$$

Количество толуола:

$$G_{\text{толуол}_1} = \frac{35000 \text{ кг/ч} \cdot 0,5 \%}{100 \%} = 175 \text{ кг/ч.}$$

Количество добавляемого антиоксиданта С-789:

$$G_{\text{АО}_1} = \frac{4550 \text{ кг/ч} \cdot 0,3 \%}{100 \%} = 13,65 \text{ кг/ч.}$$

Количество изопентана, приходящего с раствором антиоксиданта:

$$G_{\text{изопентан}_{\text{АО}}} = \frac{13,65 \text{ кг/ч} \cdot 75 \%}{25 \%} = 40,95 \text{ кг/ч.}$$

Количество изопентана в полимеризате:

$$G_{\text{изопентан}_{\text{полимеризат}}} = \frac{35000 \text{ кг/ч} \cdot 70 \%}{100 \%} = 24500 \text{ кг/ч.}$$

Общее количество изопентана в полимеризате:

$$G_{\text{изопентан}_{\text{полимеризат}}} = 24500 \text{ кг/ч} + 40,95 \text{ кг/ч} = 24540,95 \text{ кг/ч}$$

Таблица 2 – Конечный состав полимеризата

Компонент	% _{масс.}	кг/ч
Полиизопрен	12,98	4550,00
Изопентан	70,01	24540,95
Изопрен	3,49	1225,00
Амилены	12,98	4550,00
Толуол	0,50	175,00
Антиоксидант	0,04	13,65
Всего:	100,00	35054,60

В циркуляционную воду добавляется 4 %-ная суспензия антиагломератора (стеарата кальция) его дозировка на полимер 1 %.

Количество стеарата кальция (АА) в суспензии:

$$G_{\text{стеарат кальция}_{с3}} = \frac{4550 \text{ кг/ч} \cdot 1 \%}{100 \%} = 45,50 \text{ кг/ч}$$

Количество воды в суспензии стеарата кальция (АА):

$$G_{\text{в}_{с3}} = \frac{45,50 \text{ кг/ч} \cdot 96 \%}{4 \%} = 1092 \text{ кг/ч}$$

Общее количество циркуляционной воды:

$$G_3 = G_{\text{стеарат кальция}_{с3}} + G_{\text{в}_{с3}} + G_{\text{цв}_{3}} \quad (3)$$

$$G_3 = 45,50 \text{ кг/ч} + 1092 \text{ кг/ч} + 175000 \text{ кг/ч} = 176137,50 \text{ кг/ч}$$

Общее количество приходящих потоков в соответствии с формулой (1):

$$G_{\text{приход}} = 35054,60 + 17500 + 176137,50 + 875 = 229567,10 \text{ кг/ч}$$

Расход:

Из дегазатора выходит два потока: дистиллят (G_4), состоящий из выделенных паров углеводородов и воды и пульпа (суспензия) (G_5), состоящая из сконденсировавшейся воды и крошки каучука.

В соответствии с таблицей 1, дистиллят содержит 8 % воды, рассчитаем её количество через количество полимеризата и содержащихся в нём углеводородов:

$$G_{\text{в}_{5}} = \frac{(G_{\text{полимеризат}} - G_{\text{полиизопрен}_1}) \cdot C_{\text{в}_4}}{100 \% - C_{\text{в}_4}} \quad (4)$$

$$G_{\text{в}_{5}} = \frac{30490,95 \text{ кг/ч} \cdot 8 \%}{92 \%} = 2651,39 \text{ кг/ч}$$

Тогда количество дистиллята равно:

$$G_5 = G_{\text{ув}} + G_{\text{в}_{5}} = 30490,95 \text{ кг/ч} + 2651,39 \text{ кг/ч} = 33142,34 \text{ кг/ч}$$

Состав суспензии, вышедшей из дегазатора:

Исходя из количества воды на входе в дегазатор и количества паров воды в дистилляте, найдём количество воды в пульпе:

$$G_{B_6} = (G_2 + G_{B_{C_3}} + G_{ЦВ_3} + G_4) - G_{B_5} \quad (5)$$

$$G_{B_5} = (17500,00 + 1092,00 + 175000,00 + 875,00) - 2651,39 = 191815,61 \text{ кг/ч}$$

Состав крошки СКИ–3:

- Полимер – 4550 кг/ч;
- Стеарат кальция (Антиагломератор) (АА) – 45,50 кг/ч;
- Антиоксидант (АО) – 13,65 кг/ч.

Общее количество крошки СКИ-3 и пульпы (суспензии):

$$G_{K_5} = 4550,00 \text{ кг/ч} + 13,65 \text{ кг/ч} + 45,50 \text{ кг/ч} = 4609,15 \text{ кг/ч}$$

$$G_4 = 4609,15 + 191815,61 = 196424,76 \text{ кг/ч.}$$

Материальный баланс установки дегазации отражён в таблице 3.

Таблица 3 – Материальный баланс

Поток Компонент	Приход							
	Полимеризат		Циркуляционная вода		Водяной пар 20 ати		Водяной пар 5 ати	
	кг/ч	% масс.	кг/ч	% масс.	Кг/ч	% масс.	кг/ч	% масс.
Полимер	4550,00	12,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Изопрен	1225,00	3,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Изопентан	24540,95	70,01						
Амилены	4550,00	12,98						
Толуол	175,00	0,50						
Стеарат кальция	0,00	0,00	45,50	0,03	17500,00	100,00	875,00	100,00
Антиоксидант	13,65	0,04	0,00	0,00				
Каучук	0,00	0,00	176092,00	99,97				
Вода								
Всего:	35054,60	100,00	176137,50	100,00				
Итого:	229567,10							

Продолжение таблицы 3

Поток	Расход			
	Дистиллят		Пульпа	
Компонент	кг/ч	% масс.	кг/ч	% масс.
Полимер	0,00	0,00	0,00	0,00
Изопрен	1225,00	3,70		
Изопентан	24540,95	74,05		
Амилены	4550,00	13,73		
Толуол	175,00	0,53		
Стеарат кальция	0,00	0,00		
Антиоксидант			13,65	0,01
Каучук			4550,00	2,32
Вода	2651,39	8,00	191815,61	97,65
Всего:	33142,34	100,00	196424,76	100,00
Итого:	229567,10			

3.2 Тепловой баланс теплообменника-рекуператора

Исходные данные:

- температура полимеризата на входе в теплообменник – 35 °С;
- температура полимеризата на выходе из теплообменника – 65 °С;
- температура теплоносителя (воды) на входе в теплообменник – 90 °С.

Схема теплового баланса изображена на рис. 8.

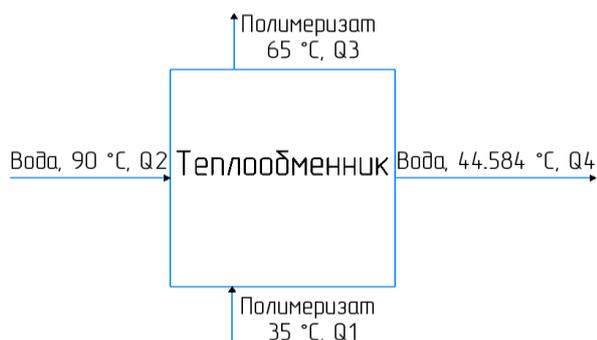


Рисунок 8 – Схема теплового баланса

Тепловой баланс описывается следующим уравнением:

$$Q_{\text{приход}} = Q_{\text{расход}} \quad (6)$$

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 \quad (7)$$

где Q_1 – тепло, приходящее с полимеризатом;
 Q_2 – тепло, приходящее с теплоносителем (водой);
 Q_3 – тепло, уходящее с подогретым полимеризатом;
 Q_4 – тепло, уходящее с теплоносителем.

Приход:

Исходя из уравнений (6, 7), тепло приходящих потоков равно:

$$Q_{\text{приход}} = Q_1 + Q_2 \quad (8)$$

1) Количество теплоты, приходящее с полимеризатом, представляет собой сумму теплоты всех его компонентов:

$$Q_1 = Q_{\text{полиизопрен}_1} + Q_{\text{изопрен}_1} + Q_{\text{изопентан}_1} + Q_{\text{амилены}_1} + Q_{\text{толуол}_1} \quad (9)$$

Для полиизопрена теплоёмкость вычисляется по формуле (10) [28]:

$$c_{\text{полиизопрен}} = 4,19 \cdot (0,4346 + 7,029 \cdot 10^{-4} t + 1,156 \cdot 10^{-6} t^2), \quad (10)$$

где 4,19 – коэффициент перевода килокалорий в килоджоули;
 t – температура, °C.

$$\begin{aligned} c_{\text{полиизопрен}_1} &= 4,19 \cdot (0,4346 + 7,029 \cdot 10^{-4} \cdot 35 + 1,156 \cdot 10^{-6} \cdot 35^2) = \\ &= 1,93 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}). \end{aligned}$$

Тогда количество тепла, приходящее с полиизопреном:

$$Q_{\text{полиизопрен}_1} = 4550 \text{ кг/ч} \cdot 1,93 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot 35 \text{ }^\circ\text{C} = 307352,50 \text{ кДж/ч}.$$

Для остальных углеводородов количество приходящего или уходящего тепла будет рассчитываться по следующей общей формуле [21]:

$$Q = G \cdot c \cdot t \quad (11)$$

Количество тепла, пришедшего с изопреном [27]:

$$Q_{\text{изопрен}_1} = 1225,00 \text{ кг/ч} \cdot 2,12 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot 35 \text{ }^\circ\text{C} = 90895,00 \text{ кДж/ч}.$$

Тепло, приходящее с изопентаном [24], [27]:

$$Q_{\text{изопентан}_1} = 24540,95 \text{ кг/ч} \cdot 2,32 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{°C)} \cdot 35 \text{ °C} = 1992725,14 \text{ кДж/ч}.$$

Теперь найдём количество тепла, приходящее с амиленами. Существует три изомера амилена: α -амилен (пентен-1), цис- β -амилен (цис-пентен-2) и транс- β -амилен (транс-пентен-2) [25], вычислим значение удельной массовой теплоёмкости амиленов как среднее арифметическое (приняв их доли в смеси равными) [27]:

$$c_{\text{амилены}_1} = \frac{c_{\alpha\text{-амилен}_1} + c_{\text{цис-}\beta\text{-амилен}_1} + c_{\text{транс-}\beta\text{-амилен}_1}}{3}, \quad (12)$$

$$c_{\text{амилены}_1} = \frac{2,25 + 2,15 + 2,22}{3} = 2,21 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{°C)}.$$

Тогда количество тепла, пришедшее с амиленами:

$$Q_{\text{амилены}_1} = 4550,00 \text{ кг/ч} \cdot 2,21 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{°C)} \cdot 35 \text{ °C} = 351942,50 \text{ кДж/ч}.$$

Количество тепла, пришедшее с толуолом [3]:

$$Q_{\text{толуол}_1} = 175,00 \text{ кг/ч} \cdot 1,73 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{°C)} \cdot 35 \text{ °C} = 10596,25 \text{ кДж/ч}.$$

Общее количество тепла полимеризата по формуле (8):

$$Q_1 = 307352,50 + 90895,00 + 1992725,14 + 351942,50 + 10596,25 = \\ = 2753511,39 \text{ кДж/ч}.$$

2) Тепло, приходящее с водой, рассчитаем по следующей формуле [27]

$$Q_2 = G_2 \cdot I_2, \quad (13)$$

где I_2 – удельная энтальпия воды при 90 градусах, кДж/кг;

$$Q_{\text{вода}_2} = 15723,61 \text{ кг/ч} \cdot 376,96 \text{ кДж/кг} = 5927172,03 \text{ кДж/ч}$$

Тогда по формуле (11) суммарное количество приходящего тепла:

$$Q_{\text{приход}} = 2753511,39 \text{ кДж/ч} + 5927172,03 \text{ кДж/ч} = 8680683,42 \text{ кДж/ч}$$

Расход:

Исходя из уравнений (6, 7), количество уходящего тепла рассчитываем по следующей формуле:

$$Q_{расход} = Q_3 + Q_4 \quad (14)$$

1) Количество тепла, уходящее с полимеризатом, рассчитывается аналогично приходящему количеству тепла полимеризата. Теплоёмкость полиизопрена также вычислим по формуле (10) [28]:

$$C_{полиизопрен_3} = 4,19 \cdot (0,4346 + 7,029 \cdot 10^{-4} \cdot 65 + 1,156 \cdot 10^{-6} \cdot 65^2) = 2,03 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}).$$

Тогда количество тепла, уходящее с полиизопреном:

$$Q_{полиизопрен_3} = 4550,00 \text{ кг/ч} \cdot 2,03 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot 65 \text{ }^\circ\text{C} = 600372,50 \text{ кДж/ч}.$$

Количество тепла, уходящее с изопреном [27]:

$$Q_{изопрен_3} = 1225,00 \text{ кг/ч} \cdot 2,30 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot 65 \text{ }^\circ\text{C} = 183137,50 \text{ кДж/ч}.$$

Количество тепла, уходящее с изопентаном [27]:

$$Q_{изопентан_3} = 24540,95 \text{ кг/ч} \cdot 2,50 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot 65 \text{ }^\circ\text{C} = 3987904,38 \text{ кДж/ч}.$$

Вычислим теплоёмкость амиленов при температуре 65 °C по формуле (16) [27]:

$$C_{амилены_3} = \frac{2,40 + 2,30 + 2,37}{3} = 2,36 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}).$$

Тогда количество тепла, ушедшее с амиленами:

$$Q_{амилены_3} = 4550,00 \text{ кг/ч} \cdot 2,36 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot 65 \text{ }^\circ\text{C} = 697970,00 \text{ кДж/ч}.$$

Количество тепла, ушедшее с толуолом [3]:

$$Q_{толуол_3} = 175,00 \text{ кг/ч} \cdot 1,84 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot 65 \text{ }^\circ\text{C} = 20930,00 \text{ кДж/ч}.$$

Тогда по формуле, аналогичной формуле (9), суммарное тепло, уходящее с полимеризатом, равно:

$$Q_3 = 600372,50 + 183137,50 + 3987904,38 + 697970,00 + 20930,00 = 5490323,38 \text{ кДж/ч.}$$

2) Определим количество тепла, уходящее с водой G_4 по следующему уравнению, исходя из формул (6-8, 14):

$$Q_4 = Q_{\text{приход}} - Q_3 \quad (15)$$

$$Q_4 = 8680683,42 \text{ кДж/ч} - 5490323,38 \text{ кДж/ч} = 3190360,04 \text{ кДж/ч}$$

Аппроксимировав значения теплоёмкости воды от 0 до 100 °С с шагом в 1 °С по литературным данным [4], получаем следующее уравнение зависимости теплоёмкости от температуры:

$$c_p = 0,000000000000343t^6 - 0,000000000138782t^5 + 0,000000023789190t^4 - 0,000002182847870t^3 + 0,000118928757274t^2 - 0,003414689098008t + 4,216559561247780 \quad (17)$$

Для определения конечной температуры воды, подставим имеющиеся данные в уравнение (11):

$$3190360,04 \text{ кДж/ч} = 15723,61 \text{ кг/ч} \cdot c_p \cdot t$$

$$t = 48,54 \text{ °С} \approx 48,5 \text{ °С}$$

3.3 Конструкционный расчёт теплообменника-рекуператора (змеевика)

Рассчитать и подобрать по чертежу патента RU 2237676 [20] конструкцию змеевикового теплообменника, выполненного из стальных бесшовных труб для нагрева $G_1 = 35040,95 \text{ кг/ч}$ (9,73 кг/с) полимеризата с $t_{1н} = 35 \text{ °С}$ до $t_{1к} = 65 \text{ °С}$. Нагрев производится охлаждающейся при теплопередаче от $t_{2н} = 90 \text{ °С}$ до $t_{2к} = 48,5 \text{ °С}$ водой $G_{\text{вода}} = 15723,61 \text{ кг/ч}$ (4,37 кг/с), имеющей давление $1,01325 \text{ кгс/см}^2$ (0,101325 МПа).

Температурная схема теплопередачи:

$$\begin{array}{ccccc}
 & & t_{1к} = 65,0 \text{ }^\circ\text{C} & & \\
 & & \uparrow & & \\
 t_{2н} = 90,0 \text{ }^\circ\text{C} & \rightarrow & + & \rightarrow & t_{2к} = 48,5 \text{ }^\circ\text{C} \\
 & & \uparrow & & \\
 & & t_{1н} = 35,0 \text{ }^\circ\text{C} & &
 \end{array}$$

Решение:

Рассчитаем по следующим формулам большую и меньшую разницы температур потоков (и их отношение) для выбора формулы расчёта среднелогарифмической разницы температур:

$$\Delta t_{\text{б}} = t_{2н} - t_{1н} \quad (19)$$

$$\Delta t_{\text{м}} = t_{2к} - t_{1к} \quad (20)$$

$$\Delta t_{\text{б}} = 90,0 \text{ }^\circ\text{C} - 35,0 \text{ }^\circ\text{C} = 65,0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{\text{м}} = 65,0 \text{ }^\circ\text{C} - 48,5 \text{ }^\circ\text{C} = 16,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}} = \frac{65,0}{16,5} = 3,9 \Rightarrow \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}} > 2$$

При $\frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}} > 2$ среднелогарифмическую разницу температур вычисляем по следующей формуле [6]:

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{2,3 \lg \left(\frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}} \right)} \quad (21)$$

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{65,0 \text{ }^\circ\text{C} - 16,5 \text{ }^\circ\text{C}}{2,3 \lg \left(\frac{65,0 \text{ }^\circ\text{C}}{16,5 \text{ }^\circ\text{C}} \right)} = 35,4 \text{ }^\circ\text{C}$$

Средняя температура полимеризата равна:

$$t_{\text{полимеризат}} = t_{2н} - \Delta t_{\text{ср}} \quad (22)$$

$$t_{\text{полимеризат}} = 90 \text{ }^\circ\text{C} - 35,4 \text{ }^\circ\text{C} = 54,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

Средний расход передаваемой теплоты (исходя из теплового баланса):

$$Q = \frac{Q_3 - Q_1}{3600} \quad (23)$$

$$Q = \frac{5490323,38 \text{ кДж/ч} - 2753511,39 \text{ кДж/ч}}{3600} = 760,23 \text{ кВт} = 760225,55 \text{ Вт}$$

Рассчитаем плотность полимеризата при $t = 54,6$ °C как аддитивную величину (приняв доли изомеров амиленов в их смеси равными друг другу) по формулам (25, 25.1) [25], [27]:

$$\rho_{\text{полимеризат}} = \frac{1}{\sum \frac{C_i}{\rho_i}}, \quad (24)$$

$$\rho_{\text{амиленыполимеризат}} = \frac{(\rho_{\text{пентен-1амилены}} + \rho_{\text{цис-2-пентенамилены}} + \rho_{\text{транс-2-пентенамилены}})}{3} \quad (24.1)$$

где C_i – содержание i -го вещества в полимеризате, доли от единицы;

ρ_i – плотность i -го вещества полимеризата при температуре $t_{\text{полимеризата}}$, кг/м³.

$$\rho_{\text{амиленыполимеризат}} = \frac{(604 + 624 + 611)}{3} = 613 \text{ кг/м}^3.$$

Аппроксимируем уравнение зависимости плотности изопрена от температуры исходя из литературных данных [4] и найдём его плотность при температуре полимеризата:

$$\rho_{\text{изопренполимеризат}} = f(t) \quad (25)$$

$$f(t) = -0.0008666666666666701531t^3 + 0.07714285714314428333t^2 - 2.71190476189804030582t + 711.27999999999883584678 \quad (25.1)$$

$$\rho_{\text{изопренполимеризат}} = f(54,6) = 652 \text{ кг/м}^3$$

Тогда плотность полимеризата равна [4], [27]:

$$\rho_{\text{полимеризат}_1} = \frac{1}{\frac{0,130}{910} + \frac{0,700}{583} + \frac{0,035}{652} + \frac{0,130}{613} + \frac{0,005}{834}} = 619 \text{ кг/м}^3$$

Для расчёта теплоёмкости полимеризата предварительно рассчитаем теплоёмкость амиленов аналогично формуле (24.1) [27]:

$$C_{\text{амиленыполимеризат}} = \frac{(2,35 + 2,24 + 2,32)}{3} = 2,30 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}.$$

Теплоёмкость полиизопрена вычислим по формуле (26) [28]:

$$C_{\text{полиизопрен}} = 4,19 \cdot (0,4346 + 7,029 \cdot 10^{-4} t + 1,156 \cdot 10^{-6} t^2), \quad (26)$$

где 4,19 – коэффициент перевода килокалорий в килоджоули;

t – температура, °С.

$$C_{\text{полиизопрен}} = 4,19 \cdot (0,4346 + 7,029 \cdot 10^{-4} \cdot 54,6 + 1.156 \cdot 10^{-6} \cdot 54.6^2) = 2,00 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}).$$

Теплоёмкость полимеризата вычислим аналогично формуле (25) [4], [21]:

$$C_{\text{полимеризат}_1} = \frac{1}{\frac{0,130}{2,00} + \frac{0,700}{2,44} + \frac{0,035}{1,66} + \frac{0,130}{2,30} + \frac{0,005}{1,80}} = 2.31 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$$

Рассчитаем коэффициент теплопроводности амиленов аналогично формуле (25.1) [17]:

$$\lambda_{\text{амиленыполимеризат}} = \frac{(0,11 + 0,13 + 0,11)}{3} = 0,12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Для вычисления коэффициента теплопроводности изопрена, аппроксимируем функцию его зависимости от температуры по литературным данным [4]:

$$\lambda_{\text{изопренполимеризат}} = f(t) \quad (27)$$

$$f(t) = 0,00000000941549134274x^3 + 0,00000087843997248027x^2 - 0,00039893217520881735x + 0,12911847265224329906 \quad (27.1)$$

$$\lambda_{\text{изопренполимеризат}} = f(54,6) = 0,11 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Коэффициент теплопроводности полимеризата рассчитаем аналогично формуле (25) [4], [26], [27]:

$$\lambda_{\text{полимеризат}_1} = \frac{1}{\frac{0,130}{0,17} + \frac{0,70}{0,10} + \frac{0,035}{0,11} + \frac{0,130}{0,12} + \frac{0,005}{0,12}} = 0,11 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Зададимся ориентировочным значением коэффициента теплопередачи $K = 300 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и найдём поверхность теплообмена по основному уравнению теплопередачи [15]:

$$Q = KF\Delta t_{cp} \quad (28)$$

$$F = \frac{Q}{K\Delta t_{cp}} \quad (28.1)$$

$$F = \frac{760225,55 \text{ Вт}}{300 \cdot 35,4} = 71,58 \text{ м}^2$$

Выбираем для змеевика трубу 20×2 мм, рассчитаем общую длину змеевика по следующей формуле [15]:

$$L = \frac{F}{\pi d} \quad (29)$$

$$L = \frac{71,58 \text{ м}^2}{3,14 \cdot 0,020 \text{ м}} = 1140,81 \text{ м}$$

Примем длину трубы змеевика L' равной 4,45 м, количество змеевиков:

$$n_{\text{змеевик}} = \frac{L}{L'} \quad (30)$$

$$n_{\text{змеевик}} = \frac{1140,81 \text{ м}}{4,45 \text{ м}} = 257$$

Если принять ширину подогревательной камеры равной 1 м, расстояние между змеевиками равным диаметру трубы змеевика, а расстояние между крайним змеевиком и стенкой аппарата равным 0,03 м, то в одну секцию вмещается 24 змеевика, при 11 секциях $n_{\text{змеевик}} = 264$, тогда общая длина змеевиков и площадь поверхности теплообмена равны [15]:

$$L = L' n_{\text{змеевик}} \quad (31)$$

$$F = L \pi d_{\text{змеевик}} \quad (31.1)$$

$$L = 4,45 \text{ м} \cdot 264 = 1174,80 \text{ м}$$

$$F = 1174,80 \text{ м} \cdot 3,14 \cdot 0,020 \text{ м} = 73,78 \text{ м}^2$$

Примем высоту секции, расстояние между секциями и расстояние между секцией и дном/крышкой аппарата равными половине высоты секции (0,08 м), тогда высота подогревающей камеры составит:

$$H_k = hn_{\text{секция}} + 0,5h(n_{\text{секция}} - 1 + 2) \quad (32)$$

$$H_k = 0,16 \text{ м} \cdot 11 + 0,5 \cdot 0,16 \text{ м} \cdot (11 - 1 + 2) = 2,72 \text{ м}$$

После того, как был произведён конструкционный расчёт нагревательной системы аппарата, проведём уточняющий расчёт змеевика с учётом массовых потоков.

3.4 Уточняющий расчёт теплообменника-рекуператора

По данным конструкционного расчёта нагревательная система аппарата состоит из 11 секций, в каждой из которых находится 24 змеевика, суммарное количество змеевиков составляет 264, длина одного змеевика – 4,45 м, общая длина змеевиков составляет $L = 1174,80$ м, полная площадь теплообмена равна $F_{\text{теор}} = 73,78$ м². Далее проведём уточняющий конструкционный расчёт теплообменника-рекуператора. Примем площадь сечения равной 1 м² и вычислим площадь, занимаемую змеевиками и площадь свободного сечения нагревательной камеры по следующим формулам:

$$S_{\text{змеевики}} = S'_{\text{змеевик}} n_{\text{змеевик}_0} \quad (33)$$

$$S_{\text{змеевики}} = l_{\text{змеевик}} d_{\text{змеевик}_{\text{вн}}} n_{\text{змеевик}} \quad (33.1)$$

$$S_{\text{змеевики}} = 1 \text{ м} \cdot 0,020 \text{ м} \cdot 24 = 0,48 \text{ м}^2$$

$$S_{\text{полимеризат}} = S_{\text{камера}} - S_{\text{змеевики}} \quad (34)$$

$$S_{\text{полимеризат}} = 1 - 0,48 = 0,52 \text{ м}^2$$

Определяем скорость движения воды по змеевикам через её массовый расход:

$$\omega_{\text{вода}_{\text{нач}}} = \frac{G_{\text{вода}}}{n_{\text{змеевик}} \cdot \rho_{\text{вода}} \cdot 0,785 \cdot d_{\text{змеевик}_{\text{вн}}}^2} \quad (35)$$

$$\omega_{\text{вода}_{\text{нач}}} = \frac{4,37 \text{ кг/с}}{264 \cdot 965 \text{ кг/м}^3 \cdot 0,785 \cdot 0,016^2 \text{ м}^2} = 8,48 \cdot 10^{-2} \text{ м/с.}$$

Критерий Рейнольдса [4]:

$$Re = \frac{\omega_{\text{вода}_{\text{нач}}} \cdot d_{\text{змеевик}_{\text{вн}}} \cdot \rho_{\text{полимеризат}}}{\mu_{\text{полимеризат}}} \quad (36)$$

$$Re = \frac{8,48 \cdot 10^{-2} \text{ м/с} \cdot 0,016 \text{ м} \cdot 965 \text{ кг/м}^3}{0,32 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}} = 4091,66$$

Для случая переходного движения жидкости в трубе ($2300 \leq Re < 10^4$) для критерия Нуссельта существует следующее уравнение, примем для его расчёта $(\frac{Pr}{Pr_{ст}})^{0,25} = 1$ [4]:

$$Nu = 0,008 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr^{0,43} \cdot (\frac{Pr}{Pr_{ст}})^{0,25} \quad (37)$$

$$Nu = 0,008 \cdot 4091,66^{0,9} \cdot 1,97^{0,43} \cdot 1 = 19,07$$

Коэффициент теплоотдачи воды (температура – 90 °С) [4]:

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{d} \quad (38)$$

$$\alpha_{вода} = \frac{19,07 \cdot 0,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})}{0,016 \text{ м}} = 798,56 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Среднюю скорость полимеризата как жидкости, протекающей через сечение в единицу времени, найдём через её объёмный расход по следующей формуле (39.2):

$$\omega_{полимеризат} = \frac{Q_{полимеризат}}{S_{полимеризат}} \quad (39)$$

$$Q = \frac{G_{полимеризат}}{\rho_{полимеризат}} \quad (39.1)$$

$$\omega_{полимеризат} = \frac{G_{полимеризат}}{\rho_{полимеризат} \cdot S_{полимеризат}} \quad (39.2)$$

$$\omega_{полимеризат} = \frac{9,73 \text{ кг}/\text{с}}{619 \text{ кг}/\text{м}^3 \cdot 0,52 \text{ м}^2} = 3,02 \cdot 10^{-2} \text{ м}/\text{с}$$

Рассчитаем критерий Рейнольдса по формуле (40):

$$Re = \frac{\omega_{полимеризат} \sqrt{S_{полимеризат}} \cdot \rho_{полимеризат}}{\mu_{полимеризат}} \quad (40)$$

$$Re = \frac{3,02 \cdot 10^{-2} \text{ м}/\text{с} \cdot \sqrt{0,52 \text{ м}^2} \cdot 619 \text{ кг}/\text{м}^3}{0,72 \text{ Па} \cdot \text{с}} = 18,72$$

Рассчитаем для полимеризата число Прандтля по формуле (39):

$$Pr = \frac{c \mu}{\lambda} \quad (41)$$

$$Pr = \frac{2,31 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot 0,72 \text{ Па} \cdot \text{с}}{0,11 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})} = 15120$$

Рассчитаем критерий Нуссельта Nu для полимеризата, обтекающего трубы с водой, принимая для него с запасом $(Pr/Pr_{ст})^{0,25} = 1$, при $Re < 10^3$ уравнение примет следующий вид [16], [17]:

$$Nu = 0,56 Re^{0,65} Pr^{0,33} \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}}\right)^{0,25} \quad (42)$$

$$Nu_{\text{полимеризат}} = 0,56 \cdot 18,72^{0,65} \cdot 15120^{0,33} = 90,04$$

Коэффициент теплоотдачи для полимеризата [26]:

$$\alpha_{\text{полимеризат}} = \frac{90,04 \cdot 0,11 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})}{0,020 \text{ м}} = 495,22$$

Термическое сопротивление стальной стенки воды и загрязнений [17]:

$$\sum r_{ст} = r_{\text{загр. 1}} + \frac{\delta}{\lambda_{ст}} + r_{\text{загр. 2}} \quad (43)$$

$$\sum r_{ст} = 2 \cdot \frac{1}{5800} + \frac{0,002}{17} = 0,000462 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$$

Теперь запишем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} q = \alpha_{\text{вода}} \Delta t_{\text{вода}} = \frac{\Delta t_{ст}}{\sum r_{ст}} = \alpha_{\text{полимеризат}} \Delta t_{\text{полимеризат}} \\ \Delta t_{ср} = \Delta t_{\text{вода}} + \Delta t_{ст} + \Delta t_{\text{полимеризат}} \end{cases} \quad (44)$$

$$\Delta t_{\text{вода}} = (t_{2н} - t_{ст1}) \quad (44.1)$$

$$\Delta t_{ст} = (t_{ст1} - t_{ст2}) \quad (44.2)$$

$$\Delta t_{\text{полимеризат}} = (t_{ст2} - t_{\text{полимеризат}}) \quad (44.3)$$

$$q = \alpha_{\text{пар}} (t_{\text{конд}} - t_{ст1}) = \frac{(t_{ст1} - t_{ст2})}{\sum r_{ст}} = \alpha_{\text{полимеризат}} (t_{ст2} - t_{\text{полимеризат}}) \quad (44.4.1)$$

$$\Delta t_{ср} = (t_{\text{конд}} - t_{ст1}) + (t_{ст1} - t_{ст2}) + (t_{ст2} - t_{\text{полимеризат}}) \quad (44.4.2)$$

Выражение (44.4.2) при сокращении превращается в иную форму уравнения (22), следовательно, получаем следующее:

$$\Delta t_{ср} = (t_{\text{конд}} - t_{\text{полимеризат}}) \quad (45)$$

$$(t_{ст1} - t_{ст2}) = 0 \quad (45.1)$$

$$t_{ст1} = t_{ст2} = t_{ст} \quad (45.2)$$

$$q = \alpha_{вода}(t_{2н} - t_{ст1}) = 0 = \alpha_{полимеризат}(t_{ст2} - t_{полимеризат}) \quad (46)$$

$$a=b=c \Leftrightarrow a=c \quad (46.1)$$

$$\alpha_{вода}(t_{2н} - t_{ст1}) = \alpha_{полимеризат}(t_{ст} - t_{полимеризат}) \quad (46.2)$$

Подставим имеющиеся числа и найдём $\Delta t_{полимеризат}$ для выбранной водяной трубы:

$$\begin{aligned} 798.56 \cdot (90 - t_{ст}) &= 495,22 \cdot (t_{ст} - 54,6) \\ t_{ст} = t_{ст2} &= 76,4 \text{ }^\circ\text{C} \\ \Delta t_{полимеризат} &= 76,4 \text{ }^\circ\text{C} - 54,6 \text{ }^\circ\text{C} = 21,8 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Соответственно, тепловой поток по формуле (46) равен:

$$q = 495,22 \cdot 21,8 = 10795,80 \text{ Вт/м}^2$$

Требуемая площадь теплообмена [14]:

$$\begin{aligned} F &= \frac{Q}{q} \quad (47) \\ F &= \frac{760225,55 \text{ Вт}}{10795,80 \text{ Вт/м}^2} = 70,42 \text{ м}^2 \end{aligned}$$

Тогда запас площади теплообменной поверхности змеевика:

$$\begin{aligned} F_{св} &= F_{теор} - F_{практ} \quad (48) \\ \Delta F &= \frac{F_{св}}{F_{практ}} \cdot 100\% \quad (48.1) \\ F_{св} &= 73,78 \text{ м}^2 - 70,42 \text{ м}^2 = 3,36 \text{ м}^2 \\ \Delta F &= \frac{3,36 \text{ м}^2}{70,42 \text{ м}^2} \cdot 100\% = 4,77 \text{ \%} \end{aligned}$$

Таким образом, требуемая теплообменная площадь аппарата меньше его полной теплообменной площади и запас теплообменной площади является достаточным для рассчитанного аппарата. Общий вид рассчитанного теплообменного аппарата изображён на рисунке В.1 приложения В [7; 8]

Заключение

1. В работе предложена модернизация технологической схемы дегазации изопренового каучука.

2. Показана возможность использования рекуперации тепла циркуляционной воды для подогрева 35040,95 кг/ч (9,73 кг/с) полимеризата (латекса) с $t_{1н} = 35$ °С до $t_{1к} = 65$ °С в теплообменнике-рекуператоре, конструкция которого по патенту RU 2237676 представляет собой камеру для подогрева полимеризата водой, проходящей по 11 расположенным параллельно друг другу секциям, в каждой из которых в оси, перпендикулярной проходящему полимеризату, установлены 24 расположенных параллельно друг другу змеевика (всего 264 змеевика), выполненные из стальных бесшовных труб 20×2 мм (внутренний диаметр 0,016 м, внешний диаметр 0,020 м, толщина стенки 0,002 м). Нагрев производится подаваемой из ёмкости 326 циркуляционной водой $G_{\text{вода}} = 15723,61$ кг/ч (4,37 кг/с) с температурой $t_{2н} = 90$ °С, результате теплообмена охлаждающейся до $t_{2к} = 48,5$ °С.

3. Размеры аппарата: длина и ширина подогревающей камеры 1 м, высота составляет 2,72 м; общая длина змеевиков 1174,8 м, длина одной трубы змеевика составляет 4,45 м, расстояние между змеевиками и между змеевиком и параллельной ему стенкой аппарата равно внешнему диаметру змеевика. Высота одной секции равна 0,16 м, а расстояние между секциями равно расстоянию от дна камеры до крайней нижней секции и от крайней верхней секции до крышки аппарата и составляет 0,08 м.

Полная площадь теплопередачи составляет 73,78 м², требуемая равна 70,42 м², таким образом, запас площади теплопередачи составляет 3,36 м² или 4,77 %.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Аксёнов В.И. Анализ производства синтетического каучука российскими компаниями в 2021 г.: итоги, события и возможные перспективы развития // Промышленное производство и использование эластомеров. — 2022, № 1, с. 3-15 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-proizvodstva-sinteticheskogo-kauchuka-rossiyskimi-kompaniyami-v-2021-g-itogi-sobytiya-i-vozmoznnye-perspektivy-razvitiya?ysclid=lx0otin9su403222055> (дата обращения 25.05.2024)

2. Аксёнов В.И., Золотарев В.Л. Производство синтетического каучука в России за 2018 г. и последние десять лет. Краткие итоги // Каучук и резина. , 2019, т. 78, № 2, с. 78-87. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/proizvodstvo-sinteticheskikh-kauchukov-v-rossiyskoj-federatsii-i-za-poslednie-desyat-let-kratkie-itogi?ysclid=lx0p8n3gfu164784493> (Дата обращения: 25.05.2024)

3. Бобылев В.Н. Физические свойства наиболее известных химических веществ: Справочное пособие – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2003, 24 с

4. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей: изд. 2, доп. и пер. – М.: Наука, 1972. 720 с.

5. Васильев В.А., Насыров И.Ш. Отечественные промышленные стереорегулярные каучуки. Исследования и разработки // Уфа: Башкирская энциклопедия, 2018, 288 с. URL: <https://bashenc.online/ru/library/40/> (Дата обращения: 25.05.2024)

6. Гавра Г.Г., Михайлов П.М., Рис В.В. Тепловой и гидравлический расчет теплообменных аппаратов компрессорных установок. Учебное пособие. – Л., ЛПИ, 1982, 72 с.

7. ГОСТ 2.789-74. Государственный стандарт Союза ССР. Единая система конструкторской документации. Обозначения условные графические. Аппараты теплообменные: утв. и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 29.04.74 N 1039 // Консультант плюс: справочно-правовая система

8. ГОСТ 21.101-97. Государственный стандарт РФ. Единая система конструкторской документации. Общие положения: утв. и введен в действие Постановлением Госстандарта РФ от 3.05.94 N 50 // Консультант плюс: справочно-правовая система

9. ГОСТ 9941-81. Государственный стандарт Союза ССР. Трубы бесшовные холодно- и теплодеформированные из коррозионностойкой стали. Технические условия: утв. и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 19.11.81 N 5037 // Консультант плюс: справочно-правовая система

10. Гришин Б.С., Аксёнов В.И. Резиновая промышленность РФ в условиях «свободного» рынка. Анализ состояния и направлений развития // Химия и бизнес, 2015, № 7-8, с. 18-23. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rezinovaya-promyshlennost-rossii-ot-nastoyaschego-cherez-proshloe-k-buduschemu?ysclid=lx0pbif1x1228705579>
(Дата обращения: 25.05.2024)

11. Каблов В. Ф. Проблемы современной технологии полимеров: монография / Волжский: ВПИ (филиал) ВолГТУ, 2019, 340 с. URL: <https://kablovvf.ru/images/document/problemy-sovremennoj-tehnologii-polimerov.pdf> (Дата обращения: 25.05.2024)

12. Калыгин В.Г. Промышленная экология: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Изд. центр "Академия", 2004. – 432 с.

13. Кочетков В.Г., Каблов В.Ф. Оборудование производств по переработке полимеров: учеб. пособие / Волжский : ВПИ (филиал) ВолГТУ, 2017, 73 с. URL: <http://lib.volpi.ru:57772/csp/lib/PDF/573131044.pdf> (Дата обращения: 25.05.2024)

14. Липатов Ю.С., Нестеров А.Е., Гриценко Т.М., Веселовский Р.А. Справочник по химии полимеров – К.: Наукова думка, 1971, 536 с

15. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи: издание второе, стереотипное, М. : Энергия, 1977 – 344 с.

16. Основные процессы и аппараты химической технологии / Пособие по проектированию / Г.С. Борисов, В.П. Брыков, Ю.И. Дытнерский и др. Под ред. Ю.И. Дытнерского, 2-ое изд. перераб. и дополнен. М: Химия, 1991, 227 с.

17. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. – Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Учебное пособие для вузов/Под ред. чл.-корр. АН СССР П.Г. Романкова – 10-е изд., переработанное и доп. – Л.: Химия, 1987 – 576 с.

18. Патент № 2121921 С1 Российская Федерация, МПК В29С 35/04. Способ нагрева теплоносителем в технологическом процессе производства полимеров, резины и шин: № 96124736/25: заявл. 31.12.1996; опубл. 20.11.1998/ Власов Г.Я., Зенович С.М., Нагимов Н.Х., Нурутдинов Г.С.; заявитель Общество с ограниченной ответственностью ГАЗЧЕРМЕТ

19. Патент № 2170174 С2 Российская Федерация, МПК В29С 35/08. Способ и устройство для нагревания и/или сшивания полимеров: № 98107163/12: заявл. 20.09.1996; опубл. 07.10.2001/ Съеберг Микаэль, Рюдберг Ян (SE), Йервенкюле Юри (FI); заявитель ВИРСБО БРУКС АБ (SE)

20. Патент № 2237676 С2 Российская Федерация, МПК С08F 6/06 6/10, С08 J 3/00, В01D 19/00. Устройство для предварительного нагревания раствора полимера и способ предварительного нагревания такого раствора: № 2002125464/12: заявл. 21.03.2001; опубл. 10.10.2004/ Стреиф Ф. (CH), Випинер А.М. (US); заявитель Кох-Глитч, ЛП (US)

21. Перри Дж. Справочник инженера-химика: Т. 2/ пер. с англ.- Л.: Химия, 1974.

22. Пиминова Н.И., Саяпина М.А. Процесс производства синтетического изопренового каучука: учебно-методическое пособие, ООО «Сибур Тольятти», 2019. 273 с

23. Протасов И.А. Энергосбережение в промышленной области // Вестник магистратуры. 2016. №4-1 (55). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/energoberezhenie-v-promyshlennoy-oblasti> (дата обращения: 09.06.2024)

24. Рид. Р. Свойства газов и жидкостей/ Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд. - пер с англ.- Л.: Химия, 1982. – 592 с.
25. Химическая энциклопедия в 5 томах / Редкол.: Кнунянц И.Л. и др. – М.: Советская энциклопедия, 1992. — Т. 3 (Мед-Пол). — 639 с. URL: <https://djvu.online/file/BwMdYepbvG2YX?ysclid=lx7uoyozvfn740922185> (Дата обращения: 1.05.2024)
26. Vasilev A., Lorenz T., Breitkopf C. Thermal Conductivity of Polyisoprene and Polybutadiene from Molecular Dynamics Simulations and Transient Measurements // Polymers, 2020, Vol. 12, I. 1081 URL: https://mdpi-res.com/d_attachment/polymers/polymers-12-01081/article_deploy/polymers-12-01081.pdf (Дата обращения: 29.04.2024)
27. Ethermo Thermodynamic & Transport Properties Calculation Platform – [Электронный ресурс] URL: <http://www.ethermo.us/default.aspx> (Дата обращения: 22.04.2024)
28. Rands R.D., Ferguson W.J.; Prather J.L. Specific heat and increases of entropy and enthalpy of the synthetic rubber GR-S from 0 to 330 K // Journal of Research of the National Bureau of Standards Research Paper RP1595 Part of Journal of Research of the National Bureau of Standards. Volume 33. July 1944 63-70. URL: <https://archive.org/details/jresv33n1p63/mode/2up> (Дата обращения: 9.04.2024)
29. Zhu Y, Yu Z.P., Liu R., Jin Y., Shi Q., Wu Y. Advances in green cationic polymerization // Journal of Polymer Science, 2024, Vol. 12, I. 11 p. 2549-2573 URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/pol.20230971> (Дата обращения: 20.06.2024)
30. Yousu N., Ma Y.P, Mahmood Q., Zhang W., Wang Y., Saeed H., Sun W.H. Enhancing isoprene polymerization with high activity and adjustable monomer enchainment using cyclooctyl-fused iminopyridine iron precatalysts // Dalton Transactions, 2024, Vol. 53, p. 753-764

Приложение А

Существующая принципиальная технологическая схема узла дегазации СКИ

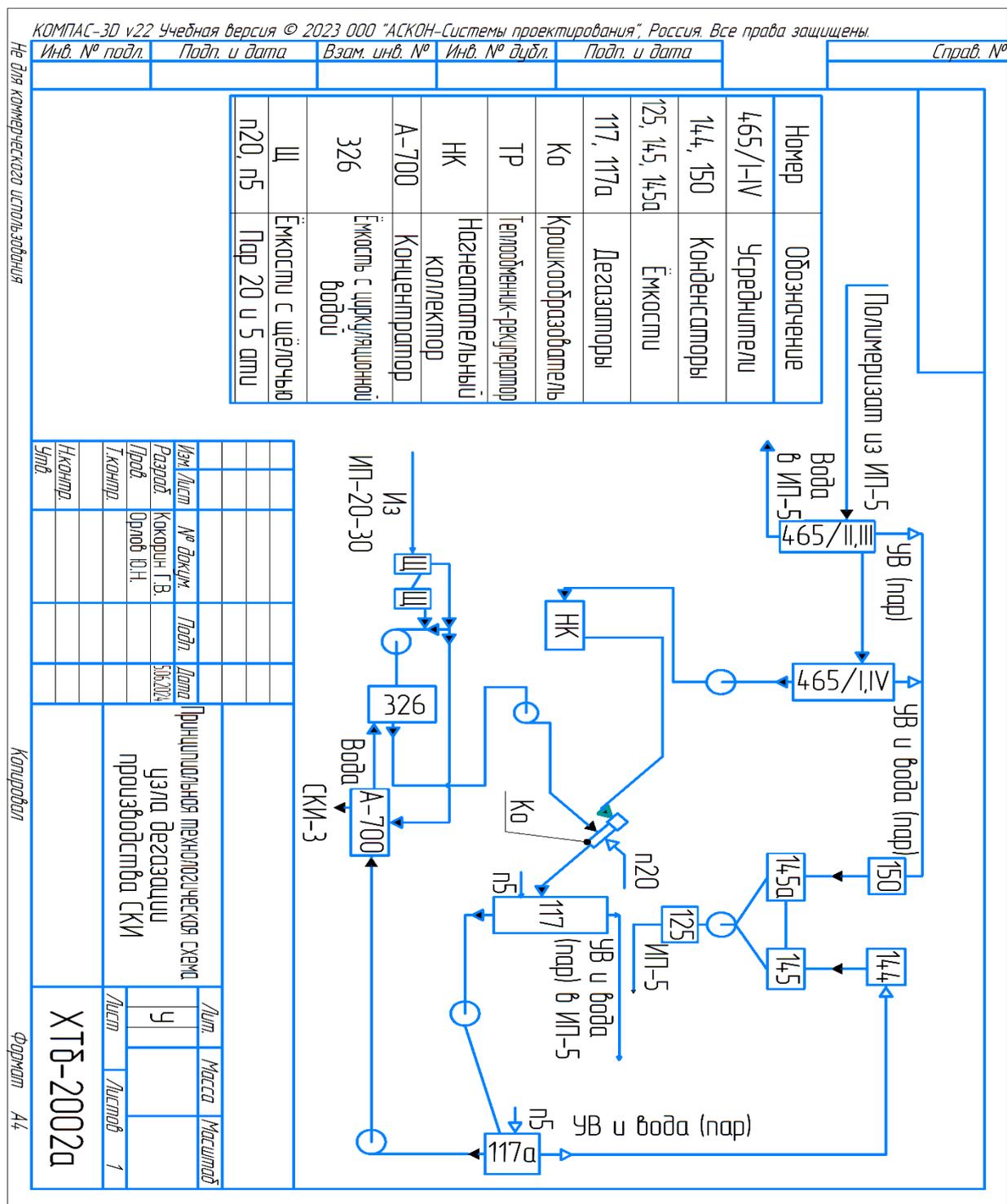


Рисунок А.1 – Существующая принципиальная технологическая схема узла дегазации производства СКИ

Приложение Б

Модернизированная принципиальная технологическая схема узла дегазации СКИ

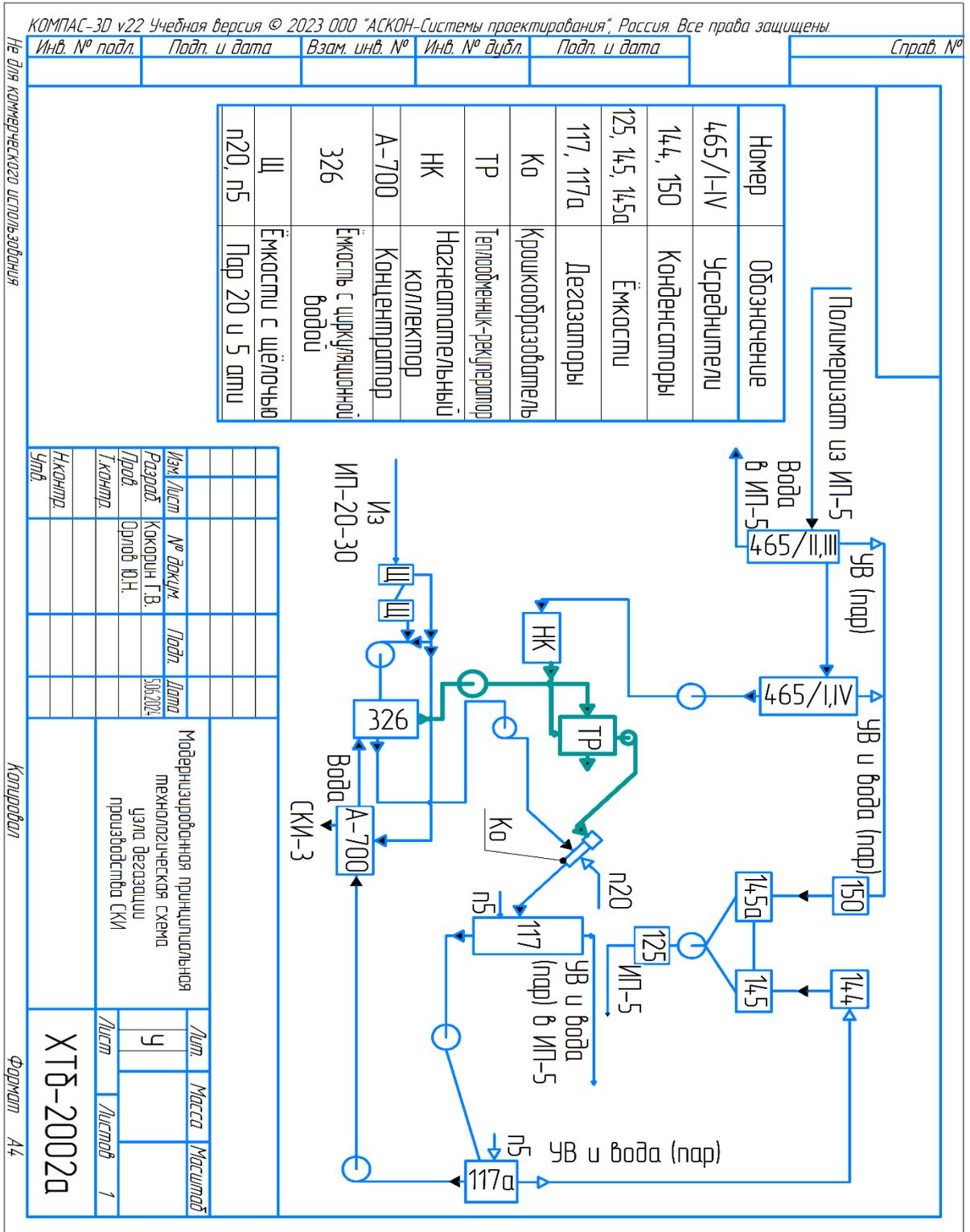


Рисунок Б.1 – Модернизированная принципиальная технологическая схема узла дегазации СКИ

Приложение В

Общий вид теплообменника-рекуператора

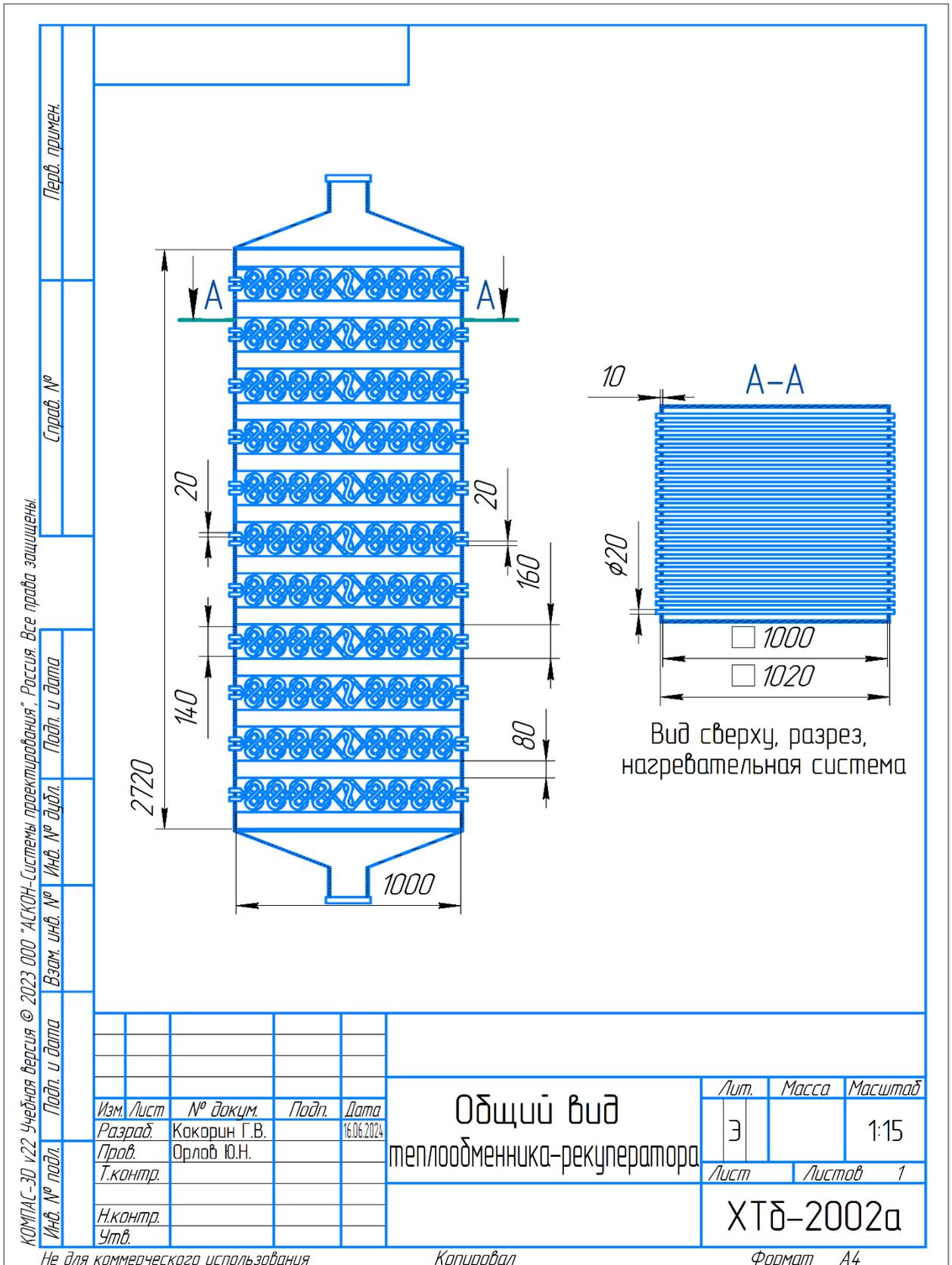


Рисунок В.1 – Общий вид теплообменника-рекуператора