

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 кафедры полностью)

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

(код и наименование направления подготовки / специальности)

Рациональное природопользование, рециклинг и утилизация отходов

(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему: «Оптимизация процесса очистки капролактама экстракцией
трихлорэтиленом».

Обучающийся

Рыбакова А.Е.

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

доцент кафедры «ХТиР», к.т.н. Капустин П.П.

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

Тольятти 2025

Аннотация

В выпускной квалификационной работе исследован процесс экстракционной очистки капролактама трихлорэтиленом на производстве ПАО "КуйбышевАзот". Основное внимание уделено оптимизации технологической схемы для повышения эффективности выделения целевого продукта.

Проведен детальный анализ физико-химических свойств компонентов процесса и существующей технологической цепочки. На основании расчетов материального и теплового балансов (общая тепловая нагрузка колонны отгонки составила 13.3 млн кДж/ч) разработаны конкретные предложения по модернизации.

Ключевым усовершенствованием стал перенос стадии ионообменной очистки на более ранний этап технологического процесса. Это решение позволяет сократить энергозатраты на 12-15 % и улучшить качество конечного продукта за счет более эффективного удаления примесей.

Практическая ценность работы подтверждается расчетами, показывающими возможность увеличения выхода капролактама до 96.3 % при одновременном снижении расхода трихлорэтилена. Результаты исследования могут быть использованы для модернизации действующих производственных линий.

Работа включает 41 страницы, 20 иллюстраций, 11 таблиц и 29 литературных источника.

Abstract

This graduation thesis investigates the process of extractive purification of caprolactam using trichloroethylene at the production facilities of PJSC KuibyshevAzot. The main focus is on optimizing the technological scheme to improve the efficiency of target product recovery.

A detailed analysis of the physicochemical properties of the process components and the existing technological chain was carried out. Based on material and heat balance calculations (the total heat load of the stripping column was 13.3 million kJ/h), specific modernization proposals were developed.

A key improvement involves relocating the ion-exchange purification stage to an earlier phase of the technological process. This solution reduces energy consumption by 12–15% and enhances the quality of the final product by more efficient impurity removal.

The practical value of the study is supported by calculations demonstrating the potential to increase caprolactam yield to 96.3% while reducing trichloroethylene consumption. The research results can be applied to modernize existing production lines.

The thesis comprises 41 pages, 20 figures, 11 tables, and 29 references.

Содержание

Введение	5
1. Литературный обзор	6
1.1 Физико-химические свойства основных веществ	6
1.2 Химические основы процесса	8
1.3 Примеси при производстве капролактама	11
1.4 Методы экстракции лактамного масла	13
1.5 Технология экстракционной очистки	14
1.6 Ионно-обменная очистка	17
2 Технологическая часть	19
2.1 Описание технологического процесса	19
2.2. Способ модернизации	26
2.3 Безопасность и охрана труда при экстракционной очистке капролактама	27
3. Расчетная часть	29
3.1 Расчет материального баланса экстрактора 2/06	29
3.2 Расчет материального баланса экстрактора 2/10	33
3.3 Расчет материального баланса колонны отгонки	35
3.4 Расчет отводимого тепла, при охлаждении кубового потока к.1073	37
Заключение	39
Список используемых источников:	40

Введение

Первые промышленные методы получения капролактама были разработаны в Германии в середине XX века и основывались на фенольном сырье с годовым потреблением 3,5 тыс. тонн. Значительный технологический прорыв произошел в 1974 году с внедрением альтернативного метода синтеза через циклогексанон и гидроксиламинсульфат. Именно в этот период завод "КуйбышевАзот" (г. Тольятти) освоил полный цикл производства: от экспериментальной партии 5 июля 1974 года до промышленного выпуска в августе и отработки замкнутой технологической схемы в сентябре того же года.

Лактамы, и особенно капролактамы, служат важнейшим сырьем для производства полиамидных материалов и фармацевтических препаратов. Однако процесс их очистки, где традиционно используется трихлорэтилен в качестве экстрагента, сталкивается с рядом серьезных технологических сложностей, требующих углубленного изучения. Существенные пробелы имеются и в понимании влияния технологических параметров экстракции - таких как температура, продолжительность процесса и соотношение фаз - на конечный выход продукта и его качество. Особенно актуальным является вопрос определения оптимальных рабочих режимов, позволяющих достичь максимальной эффективности очистки.

Цель работы — повышение эффективности очистки капролактама за счет оптимизации технологической схемы.

Для достижения целей ВКР необходимо выполнить следующие задачи:

- изучение физико-химических свойств капролактама и трихлорэтилена;
- анализ существующей технологической схемы экстракции;
- разработка предложений по модернизации процесса, включая перенос стадии ионообменной очистки;
- проведение расчетов материального и теплового балансов для обоснования предложенных решений.

1. Литературный обзор

1.1 Физико-химические свойства основных веществ

«Капролакта́м – лактам ϵ -аминокапроновой кислоты (ϵ -капролакта́м), по внешнему виду представляет собой белое кристаллическое вещество в виде порошка или плоских оплавленных кусочков» [21]. Формула капролактама представлена на рисунке 1:

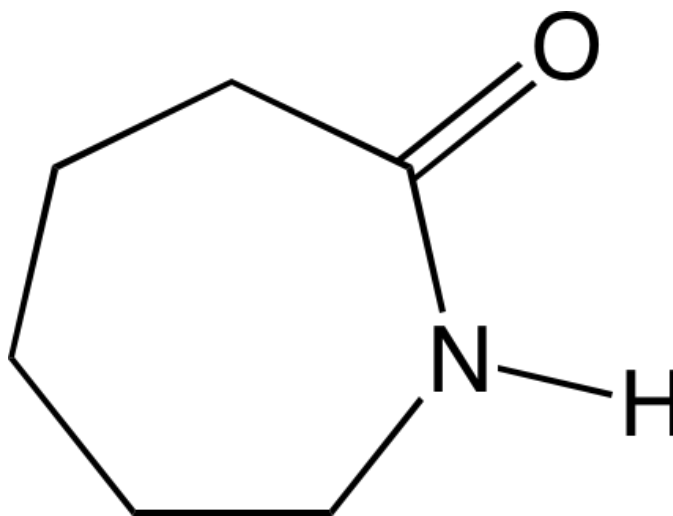


Рисунок 1 – Формула капролактама

Капролакта́м хорошо растворим в воде, спирте, бензоле и плохо – в алифатических углеводородах. Это горючее токсичное вещество при попадании на кожу может вызвать дерматит, а при попадании в организм – судороги и изменения со стороны нервной системы и внутренних органов. Воздух, содержащий капролакта́м, раздражает слизистые оболочки.

Капролакта́м — это вещество, которое широко используется в промышленности. Его основное применение — производство полиамидных волокон и нитей, известных как нилон.

Сульфат аммония (аммоний сернокислый, химическая формула $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) — это неорганическое бинарное соединение, аммонийная соль серной кислоты.

Представляет собой бесцветные прозрачные кристаллы или белый порошок. Не имеет запаха. Плотность составляет 1,769 г/см³ при температуре 20 °С. Хорошо растворим в воде (75,4 г/100 г при 20 °С).

Таблица 1 - Теплоемкость капролактама в зависимости от температуры

Температура, °С	Теплоемкость, кДж/(кг·К)
20	1,67±0,05
50	1,72±0,05
70 (т.пл.)	2,05±0,05
80	2,18±0,05
100	2,25±0,05
120	2,31±0,05
150	2,40±0,05

Трихлорэтилен (C₂Cl₃H) — это хлороорганическое соединение, которое является хлорокарбонил хлоридом или трихлорпропаном. Это прозрачная жидкость с неприятным запахом и используется в промышленности как химический реагент и в качестве охлаждающего средства. Они обычно используются в качестве промежуточных продуктов при синтезе других химических веществ или в качестве реагентов в различных химических реакциях. Плохо испаряется. Плотность: 1,463 г/мл при 25 °С (лит.) плотность пара: 4,5 (по сравнению с воздухом). Нерастворим в воде, во всех соотношениях смешивается с органическими растворителями. Не воспламеняется и не взрывается. Под действием света и воздуха, а также в присутствии увлажненной натронной извести, используемой для поглощения углекислоты в наркозных аппаратах, разлагается с образованием фосгена.

«В качестве растворителя применяется трихлорэтилен, поскольку он менее опасен, чем бензол» [21]. «Трихлорэтилен используется из-за его меньшей взрывоопасности по сравнению с бензолом и толуолом, а также из-за большей плотности, что обеспечивает применение меньшей по объему экстракционной аппаратуры и улучшает разделяемость водного и органического слоя, особенно при экстракции водой» [2].

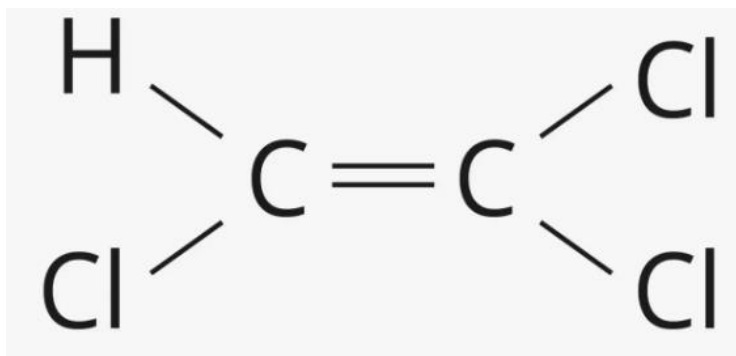


Рисунок 2 - Формула трихлорэтилена

«Большая плотность трихлорэтилена обеспечивает также лучшую разделяемость водного и органического слоев, особенно при рекстракции водой. Кроме того, пожароопасность трихлорэтилена меньше» [1]. «В то же время при его регенерации, которая осуществляется ректификацией при повышенных температурах, некоторая часть трихлорэтилена разлагается с выделением небольших количеств соляной кислоты» [23]. Это вызывает коррозию аппаратуры [3]. «Наконец, трихлорэтилен по сравнению с бензолом и толуолом имеет большую стоимость» [10].

1.2 Химические основы процесса

Процесс перегруппировки протекает согласно реакции, показанной на рисунке 3. Реакция идет с выделением тепла в количестве 235 кДж - в пересчете на 1 моль оксима [13].

Изомеризация протекает с участием агентов, например, буферной смеси олеума и капролактама. Описанный способ предусматривает интенсивное охлаждение реакционной массы с целью снижения риска взрыва [12].

Механизм ионный и включает в себя образование катиона с положительным зарядом на атоме азота и миграцию к нему алкильной группы. На заключительном этапе лактимная форма ϵ - капролактама переходит в лактамную [6].

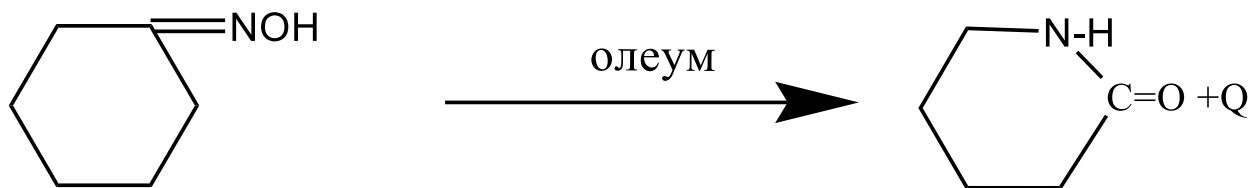


Рисунок 3 – Реакция перегруппировки Бекмана

Механизм процесса можно разделить на несколько этапов, первым из которых является присоединение протона к молекуле оксима, показано на рисунке 4:

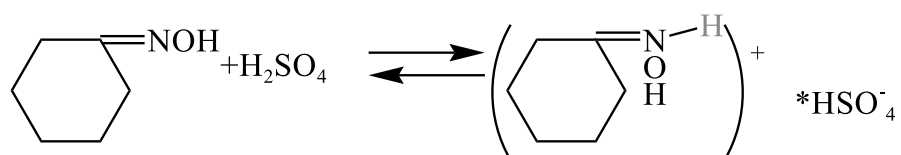


Рисунок 4 – Первая стадия процесса

Вторая стадия - дегидратация оксима в ионной паре, при которой происходит образование катиона с положительным зарядом на атоме азота, на рисунке 5.

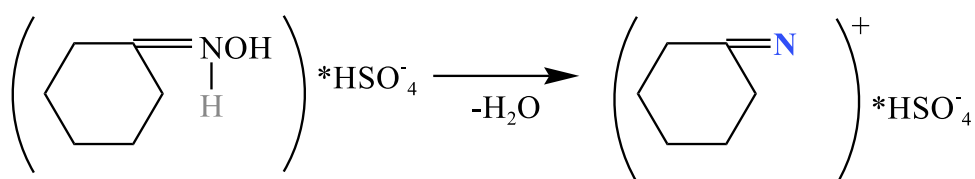


Рисунок 5 – Вторая стадия процесса

Третья - миграция к атому азота близлежащего атома углерода с расширением цикла, представленная на рисунке 6.

Четвертая - Гидролиз сульфозфира лактимной формы ε – капролактама с образованием ε- капролактама в лактимной форме и серной кислоты, на рисунке 7.

Стадия гидролиза сульфэфира в крепком олеуме протекает незначительно, этим и обусловлена необходимость стадии нейтрализации, где в основном проходит гидролиз сульфэфира [9].

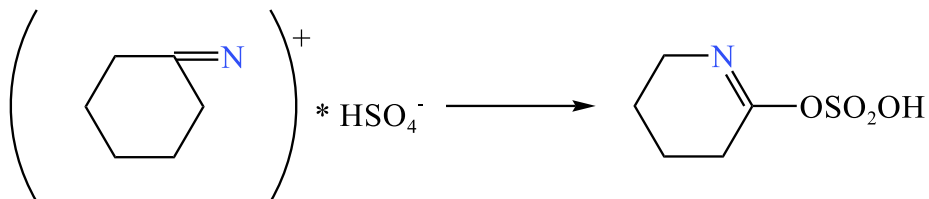


Рисунок 6 – Третья стадия процесса

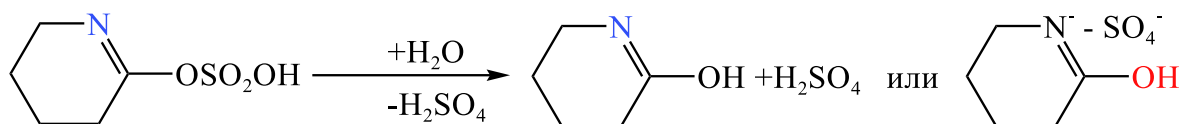


Рисунок 7 – Четвертая стадия процесса

Пятая стадия – переход ϵ -капролактама из лактимной формы в лактамную (лактим-лактаманная таутомерия), на рисунке 8:

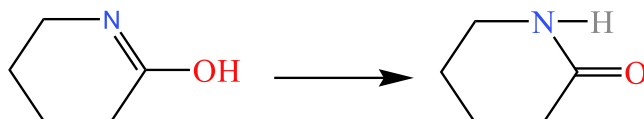


Рисунок 8 – Пятая стадия процесса

Лимитирующей стадией Бекмановской перегруппировки является разрыв связи C–C с образованием связи C–N. Ввиду незначительного гидролиза сульфэфира в 19-24 % олеуме, перегруппированный продукт состоит из следующих соединений, представленных на рисунке 9:

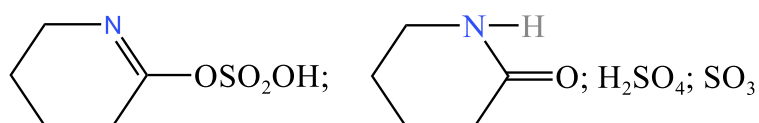


Рисунок 9 – Соединения перегруппированного продукта

В связи с этим процесс получения лактамного "масла" заканчивается обработкой перегруппированного продукта аммиачной водой на стадии нейтрализации, на рисунках 10 и 11:

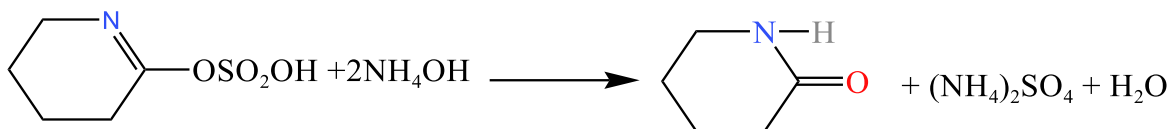


Рисунок 10 – Первая стадия нейтрализации

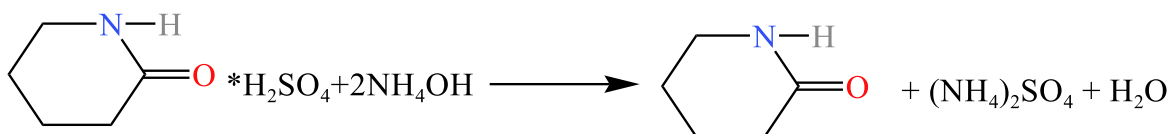


Рисунок 11 – Вторая стадия нейтрализации

Способ получения капролактама представляет собой многоступенчатый процесс. Его реализация требует определенных условий проведения, при несоблюдении которых процесс протекать не будет [8].

1.3 Примеси при производстве капролактама

В процессе производства капролактама образуется множество примесей, которые могут значительно влиять на качество конечного продукта. Эти примеси возникают на разных стадиях синтеза, будь то циклогексановый, фенольный или гидроксилламин-фосфатный метод. Их присутствие обусловлено неполным протеканием реакций, побочными процессами, а также остатками катализаторов и реагентов.

Одними из наиболее распространённых органических примесей являются циклические и линейные олигомеры капролактама, такие как димеры и тримеры, которые образуются из-за частичной поликонденсации ещё на стадии синтеза. Кроме них, в продукте могут оставаться исходные соединения, например, циклогексанон и циклогексанол, если используется окисление

циклогексана. В случае фенольного метода синтеза возможны следы бензола и его производных, которые трудно полностью удалить на стадиях очистки.

Ещё одной группой примесей являются азотсодержащие соединения, такие как N-ацетилкапролактамы, образующийся при взаимодействии капролактама с ацетилирующими агентами, а также аминокaproновая кислота, которая появляется при гидролизе мономера. Эти примеси могут в дальнейшем мешать процессу полимеризации, снижая молекулярную массу полиамида-6 или приводя к образованию дефектов в структуре полимера.

Таблица 2 - Содержание примесей в капролактаме

Наименование примеси	Максимальное содержание, %
Вода	0.1
Циклогексаноноксим	0.002
Железо	0.00002
Летучие основания	0.4 ммоль/кг
Трихлорэтилен	0.06
Сульфат аммония	0.4
Свободная серная кислота	0.6 г/дм ³
Продукты осмоления	Не нормировано
ϵ -аминокапроновая кислота	Не нормировано

Помимо органических соединений, в капролактаме часто присутствуют неорганические примеси, особенно если в процессе используется серная кислота или её производные. Например, сульфаты и сульфиты могут оставаться после стадий нейтрализации, а фосфаты — если применяется гидроксилламин-фосфатный метод. Также в продукте могут обнаруживаться следы металлов, таких как железо, никель или хром, которые попадают из реакционного оборудования и каталитических систем. Эти металлы не только ухудшают цвет капролактама, но и могут действовать как катализаторы нежелательных процессов при последующей переработке.

Отдельно стоит упомянуть воду, которая может присутствовать как в виде адсорбированной влаги, так и в форме гидратов. Её наличие способствует

гидролитической деградации капролактама при хранении и переработке, что приводит к снижению качества полимера.

Для удаления этих примесей применяют различные методы очистки, включая вакуумную дистилляцию, перекристаллизацию из органических растворителей, ионный обмен и адсорбцию на активных углях или цеолитах. Качество очистки напрямую влияет на свойства конечного полиамида-6, поэтому контроль содержания примесей является критически важным этапом производства.

Процентное содержание примесей соответствует требованиям к качеству капролактама.

Некоторые примеси (например, продукты осмоления) не имеют строгих норм, но их наличие контролируется в процессе производства.

1.4 Методы экстракции лактамного масла

«Чаще всего экстракцию капролактама проводят в две стадии, однако есть технологические процессы, проводимые одностадийно» [7]. «Несмотря на то, что данные технологии намного дешевле в энергетическом расходе, однако стоит учесть, что бензол растворяет в себе большую часть примесей, которые не позволяют получить капролактама, соответствующий требуемым условиям чистоты» [11].

«Наиболее распространенным методом экстракции капролактама является двухступенчатая экстракция, которая состоит из выделения капролактама органическим растворителем и последующей реэкстракцией водой. Данный метод является энергозатратным, так как в отличие от других имеет большее количество стадий. Однако данный способ является наиболее эффективным в извлечении чистого капролактама. Данные по выходу этим методом имеют наиболее высокие значения (более 90-95 %)» [4].

«Так же существуют методы экстракции, когда сокращают стадию нейтрализации. Для этого капролактама извлекают в самой реакционной смеси.

Такой способ предполагает промывание смеси раствором щелочи или подачи газового аммиака и воды, однако такой способ не промышленного применения из-за большого количества капролактама, сложностью получения технически чистого продукта» [5].

Остальные подходы к методу экстракции основаны на применении массообменных аппаратов улучшенного типа, подборе растворителя с высокими коэффициентами распределения или изменения концентраций входного потока или же комбинирование нескольких способов сразу [26].

1.5 Технология экстракционной очистки

Рассмотрим патенты, использованные в производстве и способы оптимизации.

«В патенте RU2125556C1 описан способ применения карбоновых кислот в перегруппировке Бекмана с олеумом кетоксимов в амиды и для получения капролактама перегруппировкой циклогексаноноксима в присутствии циклогексанкарбоновой кислоты» [15].

«Целью данного изобретения является получение капролактама с меньшим выходом побочного продукта — сульфата аммония. Еще одной целью данного изобретения является повышение производительности действующих установок по производству капролактама, которые работают по способу SNIA Viscosa, без увеличения количества сульфата аммония, вырабатываемого в качестве побочного продукта, и без дополнительных инвестиций в установки для получения и последующего взаимодействия карбоновой кислоты и гидросульфата нитрозония» [15].

«Но только есть проблемы с побочными продуктами, а именно образование сульфата аммония при использовании серной кислоты или олеума и возникает проблема ограничения мощности установок из-за побочного продукта. на данный момент — это изобретение используют в производстве» [15].

В патенте RU2458053C1 описан способ выделения и очистки капролактама из смеси с водой и примесями трихлорэтиленом из лактамного масла с последующей рекстракцией капролактама водой. «Управление экстракцией осуществляют в двух ступенях, соединенных между собой при подаче лактамного масла, трихлорэтилена и конденсата на экстракторы первой ступени и рекстракции капролактама из трихлорэтилена водой на второй ступени с отводом капролактама на последующие стадии» [19].

«Задачей предлагаемого изобретения является повышение производительности и качества капролактама, а также снижение расходных норм по трихлорэтилену» [19].

«Недостатком является малая производительность по конечному продукту и ухудшение качества капролактама по концентрации примесей при разделении органического и неорганического слоя лактамного масла» [19].

«В патенте RU2114826C1 описан способ гидрогенизационной очистки ϵ -капролактама от примесей ненасыщенных соединений, в котором смесь капролактама - вода с концентрацией капролактама 10 - 95 мас. % предварительно смешивают с газообразным водородом» [14].

«Целью изобретения является создание эффективного и безопасного способа очистки ϵ -капролактама. Эта цель изобретения достигается тем, что сначала смесь ϵ -капролактама и воды контактирует с газообразным водородом, в результате чего водород растворяется в этой смеси ϵ -капролактама и воды, а затем эта водородсодержащая смесь контактирует с катализатором гидрогенизации, и 90-100 % водорода, присутствующего в процессе гидрогенизации, растворяется в этой смеси воды и ϵ -капролактама. Предпочтительно 98-100 % водорода растворяется в смеси воды и ϵ -капролактама. Когда, например, 98 % водорода растворяется в смеси, остальные 2 % водорода находятся в газовой фазе» [14].

«В патенте RU2201920C2 описан способ очистки сырого ϵ -капролактама, полученного путем циклизации нитрила аминокaproновой кислоты или Бекмановской перегруппировки, отличающийся тем, что сырой ϵ

-капролакта́м обраба́тывают от 0,4 до 1 вес. %, в расчете на сырой ε-капролакта́м, комплексным боргидридом, выбранным из группы, включающей боргидрид натрия, боргидрид лития, боргидрид калия, и полученную смесь разгоняют по фракциям с получением продукта» [16].

«Задачей данного изобретения является разработка способа очистки ε-капролакта́ма, полученного путем циклизации нитрила аминокaproновой кислоты или Бекмановской перегруппировки, который может осуществляться с незначительными материальными затратами» [16].

«В патенте RU2366651C1 описан способ управления процессом получения капролакта́ма, в котором регулируют величину pH реакционной среды в реакторе с коррекцией по расходу продукта перегруппировки. Для повышения выхода капролакта́ма измеряют концентрацию сульфата аммония и кислотность перегруппировки и корректируют подачу аммиачной воды и газообразного аммиака в реактор» [18].

«Задачей предлагаемого изобретения является повышение производительности и улучшение качества капролакта́ма, а также расширение области применения» [18].

«Недостатками производства являются невысокое качество капролакта́ма и невысокая производительность при использовании только в схеме одного бензола» [18].

«В патенте RU2317977C2 описан способ управления процессами производства оксида азота, в котором используется на входе смеситель при подаче исходных компонентов: пара, кислорода и аммиака при их определенном соотношении» [17].

«Задачей предлагаемого изобретения является повышение качества оксимирования циклогексаноноксима. Недостатком перемешивания компонентов на начальной стадии является неудовлетворительное перемешивание компоненто́в, что ухудшает показатели при получении концентрированного оксида азота, используемого в производстве капролакта́ма» [17].

«В патенте RU2476425C1 описан способ управления выпаркой воды из капролактама, проводимый в трех ступенях, соединенных между собой трубопроводами при подаче раствора капролактама, пара и отводом выпаренного капролактама на последующие стадии, отличающийся тем, что дополнительно вводят насос подачи водного раствора капролактама с теплообменником» [20].

«Задачей предлагаемого изобретения является повышение производительности и качества, получаемого капролактама, а также упрощение технологического процесса» [20].

1.6 Ионно-обменная очистка

Ионно-обменная очистка представляет собой технологический процесс, основанный на использовании ионных обменных смол для удаления нежелательных ионов и примесей из растворов. Этот метод широко применяется в различных отраслях промышленности, включая химическую, фармацевтическую и пищевую, для повышения чистоты конечных продуктов. В контексте очистки капролактама данный метод служит эффективным средством снижения содержания ионных загрязнений, что способствует повышению качества продукции.

Основной механизм ионно-обменной очистки заключается в использовании ионных обменных смол, содержащих активные функциональные группы, способные связывать ионы загрязнений из раствора. Процесс включает следующие этапы:

Прохождение раствора через ионитовую колонку — в ходе этого этапа ионы загрязнений, присутствующие в растворе, взаимодействуют с активными группами смолы и замещаются ионами, содержащимися в смоле (например, натрием или водородом).

Обмен ионов — происходит замещение ионов загрязнений ионов смолы, что приводит к их удалению из раствора.

Регенерация — по завершении насыщения смолы ионами загрязнений её необходимо регенерировать, пропуская через колонку регенерирующие растворы, восстанавливающие обменные свойства смолы и позволяющие повторное использование.

Данный метод обеспечивает высокую степень очистки за счет селективности ионных обменных процессов, что способствует снижению содержания нежелательных примесей и повышению качества конечного продукта.

В зависимости от типа активных групп и назначения различают следующие виды ионных обменных смол:

Катионитные смолы — предназначены для удаления катионов (например, металлов, аммонийных ионов). Обладают группами, способными связывать положительно.

2 Технологическая часть

2.1 Описание технологического процесса

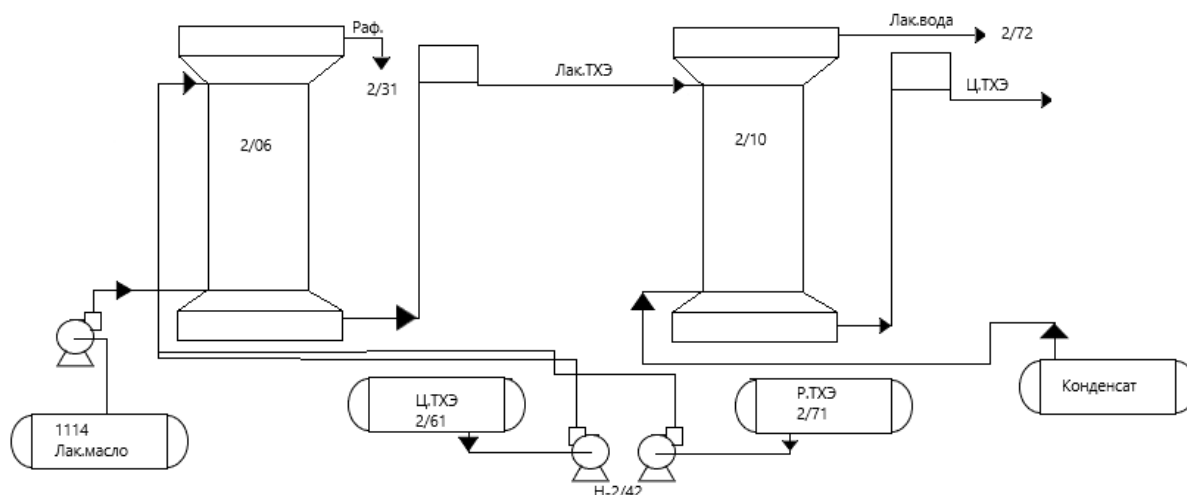


Рисунок 12 – Схема экстракции

Согласно постоянному технологическому регламенту 24 цеха ПАО «КуйбышевАзот», экстракция проходит по следующему технологическому описанию. Технологическом процессе очистки капролактама участвуют следующие стадии:

1. Экстракция

На рисунке 11 представлена схема экстракции. Процесс выделения капролактама из лактамного масла с использованием трихлорэтилена и последующей реэкстракции капролактама с помощью воды осуществляется в специальных аппаратах — экстракторах вибрационного, который показан на рисунке 12.

Описание экстрактора вибрационного типа (Рисунок 13): 1 - распределительная тарелка; 2 - слой насадки из колец Рашига; 3 - глухая тарелка; 4 - промежуточные холодильники; 5 - вариатор частоты колебаний; 6 - штанга; 7,11 - распределители; 8 - стержень; 9 - перфорированные пластины;

10 - отбойные перегородки; 12 - нижняя опора штанги; 13,17 – распределительные решетки; 14 - кольцо статора; 15 - диск ротора; 16 - вал ротора. Поток: I- сырье; II - растворитель; III - рафинатный раствор; IV - экстрактивный раствор.

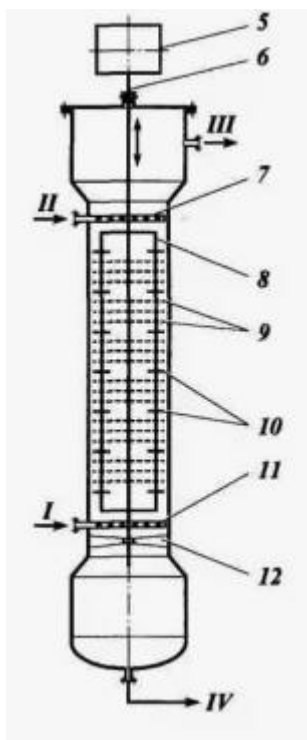


Рисунок 13 – Экстракторах вибрационного типа

Из сборника № 1114₁ масло непрерывно подаётся в нижнюю часть экстракторов № 2/06_{1,2} через узел автоматического регулирования.

В верхнюю часть экстрактора № 2/06_{1,2} через два ввода подаётся регенерированный ТХЭ от насоса № 2/42. Расход ТХЭ регулируется автоматически с помощью клапанной сборки. Также в верхнюю часть экстракторов подаётся циркулирующий ТХЭ от насоса № 2/42, расход которого регулируется клапаном.

В экстракторах № 2/06_{1,2} лактамное масло и трихлорэтилен движутся противотоком. Проходя через просечки «вибрирующих» тарелок, потоки жидкостей дробятся и переходят в мелкодисперсное состояние, что увеличивает площадь контакта компонентов.

В процессе работы происходит разделение раствора капролактама в трихлорэтилене и водного остатка.

В нижнюю часть экстракторов поз. 2/10_{1,2} самотеком подаётся чистый конденсат, КСП или обессоленная вода из сборников поз. 2/02_{1,2} через узел автоматического регулирования.

Раствор капролактама в ТХЭ и конденсат движутся противотоком и смешиваются, при этом происходит экстракция капролактама водой. ТХЭ с содержанием капролактама не более 1% из нижней части экстракторов поз. 2/10_{1,2,3} через «утку» отводится в сборники поз. 2/61_{1,2}.

Водный раствор капролактама с концентрацией 22–32% из верхней части экстракторов поз. 2/10_{1,2} самотеком поступает в сборники поз. 2/72_{1,2}, откуда насосом поз. 1097_{1,2} направляется на установку для отгонки ТХЭ из раствора лактам-вода.

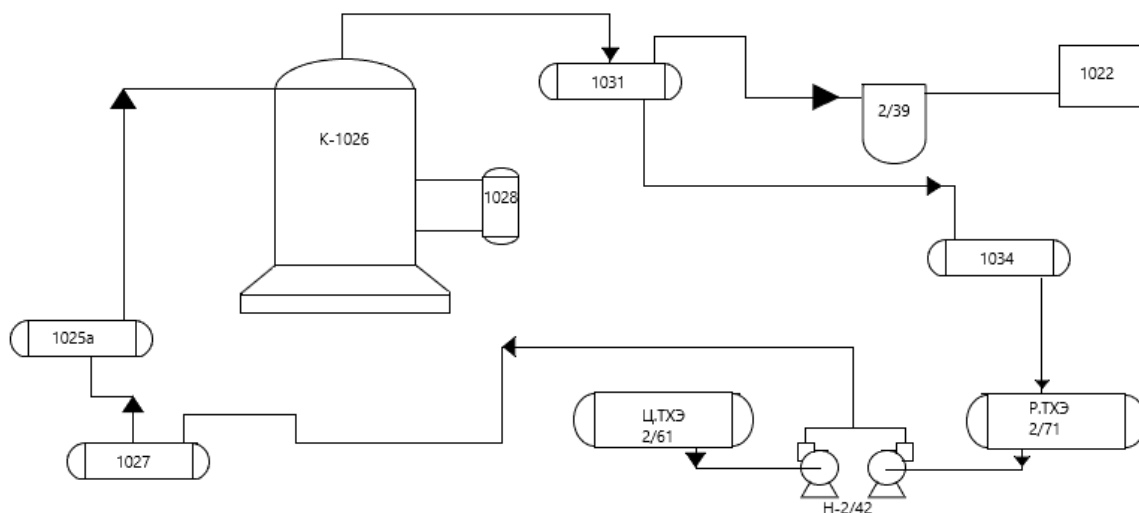


Рисунок 14 – Схема Регенерация трихлорэтилена (ТХЭ)

2. Регенерация трихлорэтилена (ТХЭ) — это процесс восстановления трихлорэтилена из его отходов или загрязненных форм. Трихлорэтилен является органическим растворителем, который широко

используется в промышленности, в том числе для очистки и обезжиривания металлов, а также в производстве некоторых химических веществ.

«Колона 1026 представляет собой колонну с эллиптическими днищами, оборудованную 30 клапанными тарелками» [24].

«Расход трихлорэтилена, поступающего в колонну 1026, не должен превышать 45 м³/ч. Регулирование расхода осуществляется автоматически с помощью регулирующего» [24].

«Для подогрева, поступающего трихлорэтилена до температуры 50-70 °С используется теплообменник 1027. Подогрев осуществляется за счёт охлаждения кубовой жидкости в теплообменнике 1025а. Также для подогрева используется теплообменник 1025, в который подаётся пар давлением не более 0,4 МПа (4 кгс/см²)» [24].

«В колонне 1026 под атмосферным давлением происходит отгонка до 85 % поступающего на регенерацию трихлорэтилена. Отгонка осуществляется при температуре верха колонны не более 90 °С и температуре куба не более 95°С» [24].

«В колонне 1026 установлен выносной испаритель 1028. Температура в кубе колонны 1026 поддерживается за счёт регулирования давления пара 0,015 МПа (0,15 кгс/см²) в испарителе 1028 с помощью регулирующего клапана» [24].

«Пары трихлорэтилена, выходящие с верха колонны, конденсируются в конденсаторе 1031. В трубное пространство конденсатора подаётся обратная вода» [24].

«Сконденсированный трихлорэтилен с температурой не более 50 °С поступает в теплообменник 1034, где охлаждается обратной водой, после чего самотеком направляется в сборник 2/71» [24].

1. Ионообменная очистка водного раствора капролактама осуществляется с использованием специальных ионообменных смол, которые абсорбируют примеси органических и неорганических веществ в растворе.

Процесс проходит в два этапа:

- Очистка на катионовой смоле (на одном из катионитовых фильтров) для удаления положительно заряженных ионов;
- Очистка на анионитовой смоле, где удаляются отрицательно заряженные ионы и происходит абсорбция органических примесей (на анионитовом фильтре).

Водный раствор капролактама из сборника поступает в теплообменники, где охлаждается оборотной водой. Далее раствор подается на одну из ниток ионообменной очистки. Для очистки используют как отечественные, так и импортные смолы. Аниониты предварительно обрабатывают раствором азотной кислоты, промывают деминерализованной водой и переводят в ОН-форму, пропуская через них раствор едкого натрия. Катиониты обрабатывают раствором едкого натрия, а затем промывают деминерализованной водой и переводят в Н-форму, пропуская через них раствор азотной кислоты.

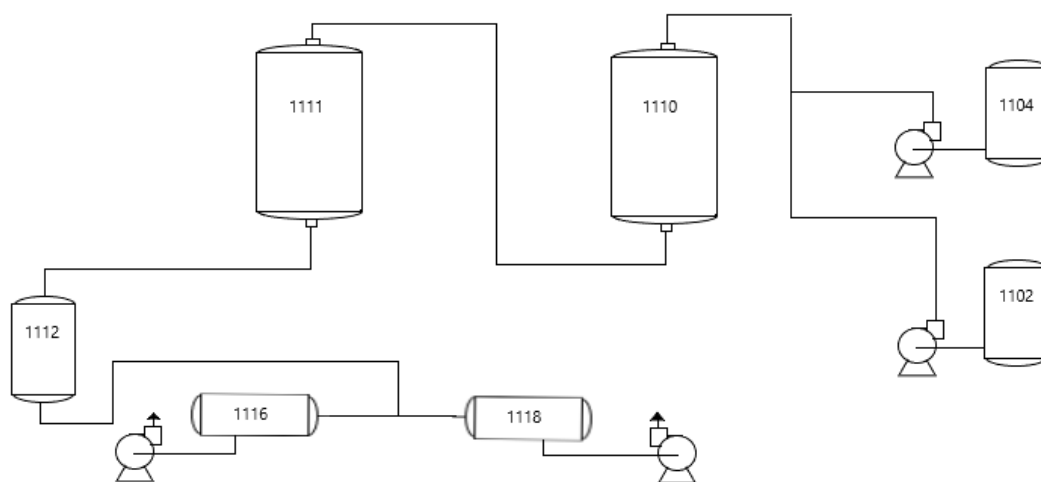


Рисунок 15 - Схема Ионно-обменной очистки

После прохождения через фильтры раствор капролактама очищается от посторонних включений на сетчатых фильтрах, где происходит улавливание мельчайших частиц смолы. Затем раствор поступает в резервуар с очищенным капролактамом.

Для предотвращения попадания регенерирующих растворов в продукт, раствор выводится через «петлю», что обеспечивает более высокое давление в системе очистки.

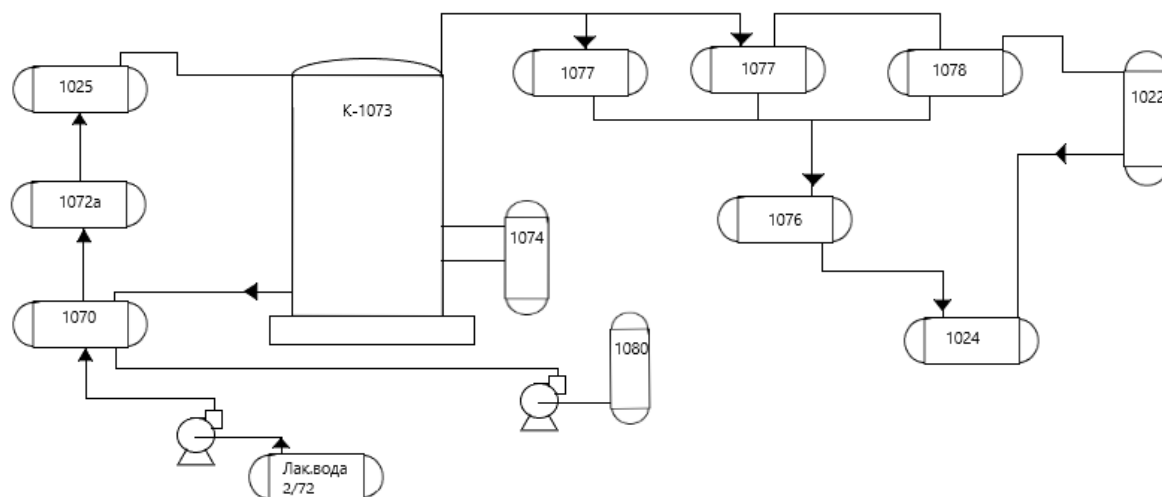


Рисунок 16 – Схема Отгонка

3. Отгонка – это процесс разделения жидких смесей путем частичного испарения с последующей конденсацией паров для выделения целевых компонентов. В производстве капролактама отгонка применяется для удаления трихлорэтилена и воды из раствора после экстракции.

«Лактам – вода из сборника поз. 2/72 насосами поз. Н-1097._{1,2} подается в колонну отгонки поз. К-1073 через теплообменник поз. Т-1070._{1,2}, где происходит частичный подогрев лактам – воды горячей лактам – водой, выходящей из куба колонны поз. К-1073, через теплообменник поз. Т-1072, в котором подогревается конденсатом, выходящим из испарителя поз. Т-1074 и окончательный подогрев лактам – воды перед подачей в колонну происходит в теплообменнике поз. Т-1072, подогреваемый паром давлением 0,4 МПа (4,0 кгс/см²) до температуры не более 95°C. Регулирующий клапан TIRC-147 установлен на линии подачи пара в теплообменник поз. Т-1072» [24].

«В колонне поз. К-1073 при давлении куба колонны 0,03-0,065 МПа (0,3-0,65 кгс/см²) и верха колонны не более 0,015 МПа (0,15 кгс/см²) происходит отгонка паров ТХЭ и частичной воды за счет кипения лактам – воды в выносном испарителе поз. Т-1074 при температуре 90-110 °С. Регулирующий клапан TIRC-149 установлен на линии подачи пара давлением 0,15 МПа (1,5 кгс/см²) в теплообменник поз. Т-1074» [24].

«Для более эффективной отгонки ТХЭ из лактама – воды в колонну предусмотрена подача острого пара под слой насадки. Клапан FIRC-514 установлен на линии подачи пара 0,15 МПа (1,5кгс/см²)» [24].

«Лактам – вода с содержанием трихлорэтилена по лабораторным анализам «отсутствие» выходит из куба колонны поз. К-1073, проходя через теплообменник поз. Т-1070._{1,2} отдает тепло встречному потоку, идущему в колонну, и направляется в сборник поз. Е-1071, откуда насосами поз. Н-1090._{1,2} подается через теплообменник поз. Т-1080, где охлаждается до температуры не выше 40 °С обратной водой, на стадию ионообменной очистки. Уровень в сборнике поз. Е-1071 регулируется клапаном LIRCAhsl-715, установленном на линии нагнетания насосов поз. Н-1090._{1,2}. Предусмотрена подача лактам – воды на стадию выпарки минуя ионообменные фильтры. Выдача производится непосредственно в линию нагнетания насосов поз. Н-1115._{1,2}» [24].

«Уровень в колонне поз. К-1073 регулируется клапаном, установленном на линии выхода лактам – воды из куба колонны» [24].

«2 Дистиллат, содержащий пары воды и трихлорэтилена с верха колонны поз. К-1073 охлаждаются в теплообменнике поз. Т-1077 обратной водой, где происходит конденсация паров. Далее конденсат охлаждается обратной водой в теплообменнике поз. Т-1076 и направляется в разделитель поз. С-1024. Не сконденсировавшиеся пары из конденсатора поз. Т-1077 поступают в хвостовой конденсатор поз. Т-1078, где охлаждаются захоложенной водой. Конденсатор поз. Т-1078 предназначен для более полного улавливания ТХЭ» [24].

«Конденсат из конденсатора поз. Т-1078 направляется в холодильник поз. Т-1076, в котором охлаждается до температуры 30-40 °С оборотной водой» [24].

«Не сконденсированные пары (инерты + незначительное количество трихлорэтилена) направляются в гидрозатвор поз. Х-1022.3, где, проходя через слой конденсатом и осаждаются в кубовой части гидрозатвора поз. Х-1022.3» [24].

«Конденсат, образующийся из паров при разогреве, выдается в сборник конденсата поз. 1/65, с последующей откачкой в корпус 722 цеха № 25» [24].

2.2. Способ модернизации

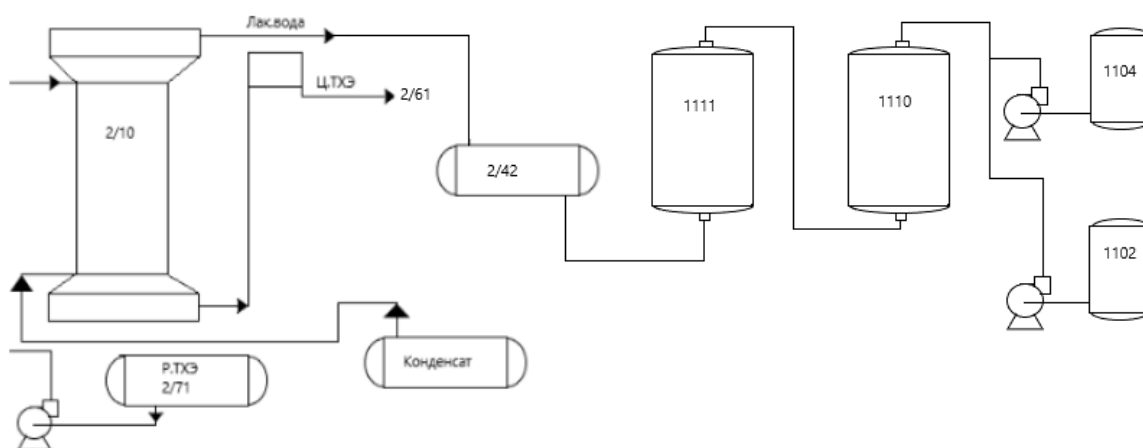


Рисунок 17 - Модернизированная схема

Модернизация стадии экстракции при производстве капролактама предполагает перенос ионно-обменной очистки из позиции после стадии Отгонки на более раннюю стадию непосредственно после реекстракции. Такой подход позволяет повысить эффективность очистки, снизить объемы перерабатываемых растворов и сократить время обработки. В результате этого изменения улучшается качество конечного продукта, снижается потребление реагентов и энергии, а также повышается общая экономическая эффективность процесса.

2.3 Безопасность и охрана труда при экстракционной очистке капролактама

Процесс экстракционной очистки капролактама с использованием трихлорэтилена (ТХЭ) представляет значительную опасность для персонала и окружающей среды [25]. ТХЭ относится к хлорорганическим соединениям II класса опасности, обладает токсичным действием на центральную нервную систему, печень и почки, а при нагреве выше 120 °С может разлагаться с образованием фосгена - чрезвычайно опасного газа. Капролактамы при попадании на кожу вызывает дерматиты, а его пары раздражают слизистые оболочки. В связи с этим, организация безопасного ведения технологического процесса требует строгого соблюдения норм охраны труда, промышленной безопасности и экологических требований.

Основные риски при экстракционной очистке капролактама связаны с химическими и физическими факторами. Трихлорэтилен, используемый в качестве экстрагента, представляет наибольшую опасность. При вдыхании его паров возможно развитие головокружения, головной боли, в тяжелых случаях - потеря сознания. Длительный контакт может привести к хроническим заболеваниям печени. Особую опасность представляет возможность образования фосгена при нагреве ТХЭ или его контакте с открытым пламенем [24].

Капролактамы, хотя и менее опасны, при попадании на кожу вызывает раздражение и дерматиты, а его пыль при вдыхании раздражает дыхательные пути. Дополнительные риски связаны с высокой температурой процесса (до 110 °С в колоннах отгонки), что создает опасность ожогов, а также с шумом и вибрацией от работы экстракционного оборудования.

Для защиты персонала на производстве должны быть предусмотрены как организационные, так и технические меры безопасности [27]. Все работы с ТХЭ должны проводиться в герметичном оборудовании, исключая контакт персонала с химикатами. Цех должен быть оборудован мощной

приточно-вытяжной вентиляцией с кратностью воздухообмена не менее 8-10 объемов в час. Обязательна установка автоматических газоанализаторов для непрерывного контроля концентрации ТХЭ в воздухе рабочей зоны [22].

Персонал должен быть обеспечен средствами индивидуальной защиты: противогазами с фильтрами типа А (для защиты от органических паров), химически стойкими перчатками из бутилкаучука, защитными очками и спецодеждой из устойчивых материалов. На рабочих местах необходимо предусмотреть аварийные души и промывочные станции для глаз.

Особое внимание уделяется обучению персонала. Все работники должны проходить регулярные инструктажи по технике безопасности, знать признаки отравления ТХЭ и правила оказания первой помощи. Медицинские осмотры проводятся не реже 1 раза в год с обязательным обследованием состояния печени и нервной системы.

Производство должно быть оснащено системами улавливания и регенерации паров ТХЭ. Все отходы, содержащие трихлорэтилен, подлежат обязательной утилизации через специализированные организации. Запрещается слив даже небольших количеств ТХЭ в канализацию. Для аварийных ситуаций предусматриваются сорбционные материалы на основе активированного угля.

Помещения, где проводится экстракция, должны иметь непроницаемые полы с бортиками и аварийные емкости для сбора разливов [28]. Все сотрудники должны быть обучены действиям при аварийных ситуациях, включая разгерметизацию оборудования.

3. Расчетная часть

3.1 Расчет материального баланса экстрактора 2/06

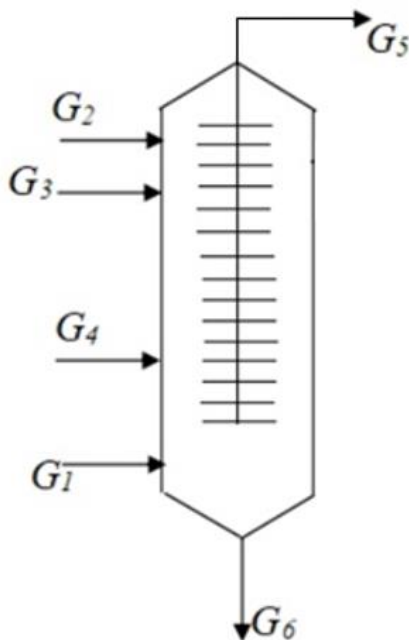


Рисунок 18- Схема материальных потоков экстрактора 2/06

Описание схемы материальных потоков экстрактора 2/06 (Рисунок 18):
 G_1 - количество лактамного масла, подаваемого в экстрактор; G_2 - количество регенерированного ТХЭ, подаваемого в экстрактор; G_3 - количество циркуляционного ТХЭ, подаваемого в экстрактор; G_4 - количество раствора капролактама в ТХЭ, подаваемого в экстрактор; G_5 - количество рафината, уходящего из экстрактора; G_6 - количество концентрированного раствора капролактама в ТХЭ, уходящего из экстрактора.

Материальный баланс

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

Исходные данные:

— производительность по капролактаму, т/год - 120000;

- число рабочих часов в году - 8000;
- соотношение состава: лактамное масло: циркуляционный ТХЭ: регенерированный ТХЭ: раствора капролактама в ТХЭ - 1:1:1:3,5;
- степень извлечения капролактама ТХЭ - 96,3 %;
- состав лактамного масла, подаваемого в экстрактор в % масс: капролактама - 69,6; вода - 28,8; сульфат аммония - 1,5; примеси - 0,2.
- ТХЭ, подаваемого в экстрактор, в % масс.: ТХЭ - 99,8; примеси - 0,2.
- состав слабого раствора капролактама в ТХЭ, подаваемого в экстрактор, %: ТХЭ - 95,0; капролактама - 4,6; сульфат аммония - 0,3; примеси - 0,1.

Часовая производительность по капролактаму:

$$120000-1000 / 8000 = 15000 \text{ кг/ч};$$

$$G_1 = 15000-100/69,6 = 21552 \text{ кг/ч} = 5,987 \text{ кг/с}.$$

Таблица 3 - Состав и количество лактамного масла

Наименование компонента	% масс	кг/ч	кг/с
Капролактама	69,600	15000,000	4,166
Вода	28,800	6206,000	1,724
сульфат аммония	1,500	323,000	0,089
Примеси	0,200	43,000	0,011
Итого	100,000	21552,000	5,987

Количество циркуляционного ТХЭ:

$$G_2 = 21552 \text{ кг/ч} = 5,987 \text{ кг/с}.$$

Таблица 4 - Состав и количество циркуляционного ТХЭ, подаваемого в экстрактор

Наименование компонента	% масс	кг/ч	кг/с
Трихлорэтилен	99,800	21508,000	5,974
Примеси	0,200	43,000	0,011
Итого	100,000	21552,000	5,987

Количество регенерированного ТХЭ:

$$G_3 = 21552,000 \text{ кг/ч} = 5,987 \text{ кг/с.}$$

Таблица 5 - Состав и количество регенерированного ТХЭ, подаваемого в экстрактор

Наименование компонента	% масс	кг/ч	кг/с
Трихлорэтилен	99,800	21508,000	5,974
Примеси	0,200	43,000	0,011
Итого	100,000	21552,000	5,987

Количество слабого раствора капролактама в ТХЭ:

$$G_4 = 21552,000 - 3,500 = 75432,000 \text{ кг/ч} = 20,953 \text{ кг/с.}$$

Таблица 6 - Состав и количество слабого раствора капролактама в ТХЭ, подаваемого в экстрактор

Наименование компонента	% масс	кг/ч	кг/с
Трихлорэтилен	95,000	71660,000	19,905
Капролактама	4,600	3469,000	0,963
сульфат аммония	0,300	226,000	0,062
Примеси	0,100	75,000	0,020
Итого	100,000	75432,000	20,953

Количество экстрагированного капролактама:

$$M = 15000,000 - 96,300/100,000 = 14445 \text{ кг/ч}$$

Количество концентрированного раствора капролактама в ТХЭ, уходящего из экстрактора:

$$G_6 = 14445,000 - 100,000/13,270 = 108854,000 \text{ кг/ч} = 30,237 \text{ кг/с.}$$

Состав и количество концентрированного раствора капролактама в ТХЭ, уходящего из экстрактора приведён в таблице 7.

Таблица 7 - Состав и количество концентрированного раствора капролактама в ТХЭ

Наименование компонента	% масс	кг/ч	кг/с
Капролактама	13,270	14445,000	4,012
Трихлорэтилен	86,730	94409,000	26,224
Итого	100,000	108854,000	30,237

Количество рафината, уходящего из экстрактора:

$$G_3 = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 - G_6 \quad (2)$$

$$G_3 = 21552 + 21552 + 21552 + 75432 - 108854 = 31234 \text{ кг/ч}$$

$$= 8,676 \text{ кг/с.}$$

Таблица 8 - Состав и количество рафината, уходящего из экстрактора

Наименование компонента	% масс	кг/ч	кг/с
Трихлорэтилен	65,320	20402,000	5,667
сульфат аммония	1,760	550,000	0,153
Капролактама	12,880	4023,000	1,118
Вода	19,870	6206,000	1,724
Примеси	0,170	53,000	0,010
Итого	100,000	31234,000	8,676

Сводный материальный баланс представлен в таблице 9.

Таблица 9 - Сводная таблица материального баланса

Приход			Расход		
Компонент	кг/ч	кг/с	компонент	кг/ч	кг/с
Лактамное масло	21552,000	5,987	Рафинат	31234,000	8,676
Регенерированный ТХЭ	21552,000	5,987	Концентрированный раствор капролактама в ТХЭ	108854,000	30,237
Циркуляционный ТХЭ	21552,000	5,987			

Продолжение таблицы 9

Приход			Расход		
Компонент	кг/ч	кг/с	компонент	кг/ч	кг/с
Слабый раствор капролактама в ТХЭ	75432,000	20,953	-	-	-
Итого	140088,000	38913,000	Итого	140088,000	38913,000

3.2 Расчет материального баланса экстрактора 2/10

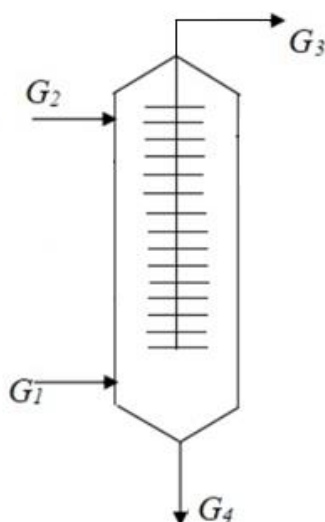


Рисунок 19 – Схема потоков экстрактора 2/10

Описание схемы потоков экстрактора 2/10 (Рисунок 19): G_1 - количество обессоленной воды или конденсата, подаваемого в экстрактор; G_2 - количество смеси Лактам-ТХЭ, подаваемого в экстрактор; G_3 - количество смеси Лактам-вода, уходящего из экстрактора; G_4 - количество раствора ТХЭ, уходящего из экстрактора.

Исходные данные:

Один из входящих потоков, лактам-ТХЭ является выходящий поток из экстрактора 2/06. Его расчет представлен в разделе 3.1. Из этого раздела мы видим, что смесь лактам-ТХЭ составляет 108 854 кг/ч. В него входят

капролактама – 14445 кг/час, трихлорэтилен – 94409 кг/ час. Второй входящий поток является обессоленная вода. Она составляет 35000 кг/час.

Выходящие потоки:

- смесь лактам-вода (экстракт), которая содержит 1,5 масс. трихлорэтилена;
- трихлорэтилен-раствор (рафинат), который содержит 0,2 % капролактама, вода отсутствует.

Для расчета количественного и качественного состава выходящих потоков составили систему уравнений. Для этого обозначим:

x – экстракт (лактама-вода), кг/час

y – рафинат (ТХЭ), кг/час.

Тогда:

$$\begin{aligned} x + y &= 108854.0 \text{ кг/час (ТХЭ – лактам)} \\ + 35000 \text{ кг/час (обессоленная вода)} &= 143854 \text{ кг/час} \end{aligned}$$

Вторым уравнением рассчитываем количество трихлорэтилена, содержащегося в рафинате и экстракте:

$$\frac{x \times 1.5}{100} + \frac{y \times (100 - 0.2)}{100} = 94409,0 \frac{\text{кг}}{\text{ч}} \quad (3)$$

Решая систему этих уравнений, найдем:

$x = 93846,6$ (экстракт) кг/час

$y = 50007,4$ (рафинат) кг/час.

Полученные данные приведены в таблице 10

Таблица 10 - Материальный баланс 2/10

Приход		Расход	
Компонент	Кг/ч	Компонент	Кг/ч
Лактам-ТХЭ	108854,0	Лактам-вода	50007,4
Лактам	14445,0	Вода	35000,0
ТХЭ	94409,0	Капролактам	14257,3
		ТХЭ	750,1
Обессоленная вода	35000,0	ТХЭ -раствор	93846,6
		ТХЭ	93658,9
		Капролактам	187,7
Итого	143854,0	Итого	143854,0

3.3 Расчет материального баланса колонны отгонки

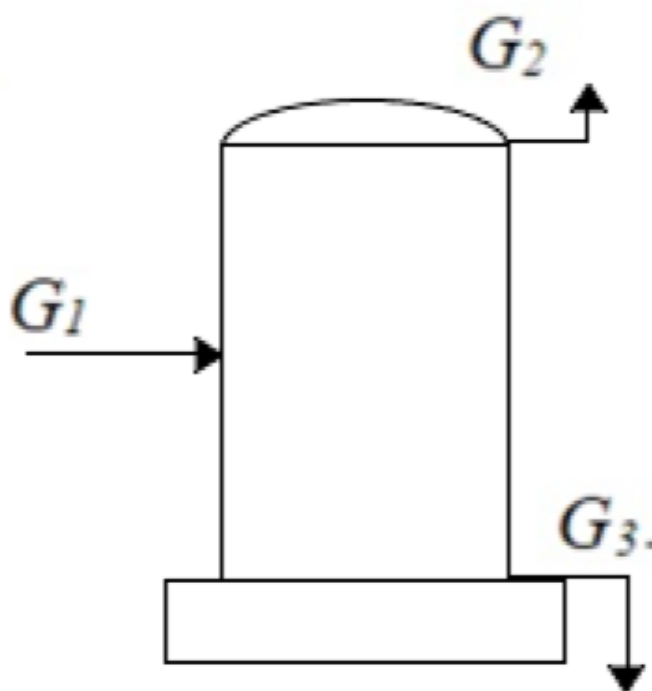


Рисунок 20 – Схема потоков к.1073

Описание схемы потоков к.1073 (Рисунок 20): G_1 - количество смеси Лактам-вода, поступающего в колонну;

Исходные данные:

Входящий поток рассчитан в разделе 3.2 поток G_3 , следовательно, узнаем состав потока G_1 :

Лактам-вода -50007,4 кг/ч

Вода – 35000,0 кг/ч

Капролактам - 14257,3 кг/ч

ТХЭ - 750,1 кг/ч

Выходящий поток G_2 :

Вода – 1200,0 кг/ч

Капролактам - 1,3 кг/ч

ТХЭ - 750,1 кг/ч

Расчет выходящий поток G_3 :

Данные взяты с постоянного технологического регламента производства карбамида цеха № 24 ПАО «КуйбышевАзот».

$$G_3 = G_1 - G_2 \quad (4)$$

$$G_{3,\text{вода}} = 35000,0 \frac{\text{кг}}{\text{ч}} - 1200,0 \text{ кг/ч} = 33800,0 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

$$G_{3,\text{капр}} = 14257,3 \frac{\text{кг}}{\text{ч}} - 1,3 \text{ кг/ч} = 14256,0 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

$$G_{3,\text{ТХЭ}} = 750,1 \text{ кг/ч} - 750,1 \text{ кг/ч} = 0 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

Таблица 11 - Материального баланса колонны отгонки

Приход		Расход	
Компонент	Кг/ч	Компонент	Кг/ч
G_1 : Капролактам ТХЭ Вода	14257,3 750,1 35000,0	G_2 :	
		Вода	1200,0
		Капролактам	1,3
		ТХЭ	750,1
		G_3 :	
		Вода	33800,0
		Капролактам	14256,0
Итого	50007,4	Итого	50007,4

3.4 Расчет отводимого тепла, при охлаждении кубового потока к.1073

Кубовый поток к.1073 направляют согласно регламенту на блок ионно-обменной очистки. В процессе ионного обмена температура подаваемого на фильтр потока должна находиться в интервале 45-50 °С. Выходящий поток из колонны 1073 имеет температуру 110 °С.

Поэтому необходимо охладить поток лактам-вода от 110 °С до 45 °С в теплообменнике, в который для охлаждения подают оборотную воду с температурой 25 °С.

Тепловой поток, выходящий из к.1073 рассчитаем по следующей формуле 4:

$$Q = G \times C_p \times T \quad (5)$$

Поскольку в тепловом потоке 2 компонента: вода и капролактam, то количество тепла Q_1 будет равно:

$$Q_1 = G_{\text{вода}} \times C_{p,\text{вода}} \times T_1 + G_{\text{капр.}} \times C_{p,\text{капр.}} \times T_1 \quad (6)$$

$$Q_1 = T_1 \times (G_{\text{вода}} \times C_{p,\text{вода}} + G_{\text{капр.}} \times C_{p,\text{капр.}}), \quad (7)$$

После охлаждения этот поток имеет температуру 45 °С и его расчет выглядит следующим образом:

$$Q_2 = 45^\circ\text{C} \times (G_{\text{вода}} \times C_{p,\text{вода}} + G_{\text{капр.}} \times C_{p,\text{капр.}}), \quad (8)$$

Поэтому количество тепла, которое необходимо отвести в теплообменнике, можно рассчитать следующим образом:

$$Q_3 = Q_1 - Q_2, \quad (9)$$

$$Q_3 = (T_1 - T_2) \times (G_{\text{вода}} \times C_{p,\text{вода}} + G_{\text{капр.}} \times C_{p,\text{капр.}}), \quad (10)$$

$$\begin{aligned} Q_3 &= (110^\circ\text{C} - 45^\circ\text{C}) \times (33800,0\text{кг} \times 4,194 + 14256,0 \times 2,15) \\ &= 11206494 \text{ кДж/ч} \end{aligned}$$

Главным технологическим преимуществом новой схемы стало устранение дублирующих операций термообработки, которые присутствовали в существующем процессе. Ранее наблюдался нерациональный цикл, при котором поток лактам-воды сначала нагревали до 110 °С для отгонки, затем искусственно охлаждали до 45 °С для ионообменной очистки, после чего снова нагревали до 110 °С. Такой подход не только приводил к значительным энергопотерям (около 2,68 Гкал/час), но и создавал избыточную циклическую нагрузку на теплообменное оборудование, сокращая его эксплуатационный ресурс.

Оптимизированный вариант процесса предусматривает более рациональную организацию технологической цепочки. После экстракции поток сразу направляется на ионообменную очистку при естественной температуре 45 °С, а единственный нагрев до 110 °С осуществляется только перед финальной стадией отгонки. Такое решение позволяет достичь комплексного улучшения показателей: снижения энергопотребления на 15-20 %, уменьшения нагрузки на теплообменное оборудование, сокращения времени технологического цикла и повышения стабильности параметров процесса. Важно отметить, что все эти улучшения реализуются без модернизации основного технологического оборудования, используя существующие аппаратные мощности, что делает внедрение экономически малозатратным и высокоэффективным решением.

Заключение

В ходе выполнения данной работы была изучена научно-техническая и патентная литература по процессам получения капролактама из циклогексанона, выделения целевого продукта из реакционной массы и его очистки. Реакционная масса состоит из двух фаз: водного раствора сульфата аммония и лактамного масла. Обе фазы содержат капролактамы. Наиболее перспективным и внедренным в промышленном масштабе является процесс раздельной экстракции капролактама трихлорэтиленом.

Проведено комплексное исследование процесса экстракционного выделения и очистки капролактама трихлорэтиленом на производстве ПАО «КуйбышевАзот». Основной целью работы была оптимизация технологической схемы для повышения эффективности и экономичности процесса.

Результатом теоретических и практических исследований стала модернизация технологической цепочки, включающая перенос стадии ионообменной очистки на более ранний этап. Такое решение позволило исключить энергоемкие операции охлаждения водного раствора капролактама после колонны отгонки трихлорэтилена и его последующего нагрева после узла ионообменной очистки.

Экономическая целесообразность предложенных изменений была подтверждена тщательными расчетами материального и теплового балансов. Полученные результаты демонстрируют существенное снижение энергопотребления - на 2,68 Гкал/час как по холодильным, так и по нагревательным процессам.

Полученные результаты имеют существенное практическое значение для химической промышленности. Разработанные решения не только повышают энергоэффективность производства, но и сохраняют действующую аппаратную базу, что делает их особенно привлекательными для промышленного внедрения.

Список используемых источников:

1. Баранов, Д.А. Процессы и аппараты химической технологии: Учебное пособие / Д.А. Баранов. - СПб.: Лань, 2020. - 408 с. (дата обращения: 15.02.2025).
2. Безопасность жизнедеятельности в химической промышленности: Учебник / Под общ. ред. Н.И. Акинина. - СПб.: Лань, 2020. - 448 с. (дата обращения: 17.02.2025).
3. Бесчастнов М.В., Соколов В.М. Предупреждения аварий в химических производствах. М.: Химия, 1979. С. 88-91. (дата обращения: 14.02.2025).
4. Бунеева Е.В. Получение капролактама из циклогексанона // Методическое пособие. Кемерово, 2014 (дата обращения: 15.04.2025).
5. Ветошкин А.Г. Технические средства инженерной экологии: Учебное пособие. - СПб.: Лань, 2018. - 424 с. (дата обращения: 15.05.2025).
6. ГОСТ 7850-2013 Капролактамы. Технические условия [Электронный ресурс] URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200105430> (дата обращения: 15.02.2025).
7. Динцес А.И., Потоловский Л. А. Основы нефтехимического синтеза. Гостоптехиздат, 1960. С. 692-694 (дата обращения: 13.02.2025).
8. Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: В 2-х кн.: Часть 2. Массообменные процессы и аппараты. - М.: Альянс, 2017. - 368 с. (дата обращения: 15.02.2025).
9. Лебедев Н.Н. Химия и технология основного органического и нефтехимического синтеза. М.: Химия, 1981. С. 556-572 (дата обращения: 15.02.2025).
10. Москвичев Ю.А. Теоретические основы химической технологии: учебное пособие / Ю.А. Москвичев, А.К. Григоричев, О.С. Павлов. – Санкт-Петербург: Лань, 2020. – 272 с. (дата обращения: 15.02.2025).

11. Овчинников В.И., Ручинский В.Р. Производство капролактама. М.: Химия, 1977. С. 252-254. (дата обращения: 15.02.2025)
12. Патент RU2114826C1 Способ очистки капролактама [Электронный ресурс] URL: <https://patents.google.com/patent/RU2114826C1/ru> (дата обращения: 08.04.2025).
13. Патент RU2125556C1 Способ получения капролактама [Электронный ресурс] URL: <https://patents.google.com/patent/RU2125556C1/ru> (дата обращения: 19.03.2025).
14. Патент RU2201920C2 Способ очистки ϵ -капролактама [Электронный ресурс] URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2201920C2_20030410 (дата обращения: 17.03.2025).
15. Патент RU2317977C2 Установка оксимирования циклогексанона в производстве капролактама [Электронный ресурс] URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2317977C2_20080227 (дата обращения: 17.03.2025).
16. Патент RU2366651C1 Способ управления производством капролактама [Электронный ресурс] URL: <https://patents.google.com/patent/RU2366651C1/ru> (дата обращения: 17.03.2025).
17. Патент RU2458053C1 Способ управления экстракцией капролактама экстрактор [Электронный ресурс] URL: <https://patents.google.com/patent/RU2458053C1/ru> (дата обращения: 16.03.2025).
18. Патент RU2476425C1 Способ управления выпаркой воды из капролактама [Электронный ресурс] URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2476425C1_20130227 (дата обращения: 17.03.2025).

19. Паушкин Я.М., Адельсон С.В., Вишнякова Т.П. Технология нефтехимического синтеза. М.: Химия, 1973. С. 420-424 (дата обращения: 15.02.2025).
20. Поникаров И.И., Поникаров С.И., Рачковский С.В. Расчёты машин и аппаратов химических производств и нефтепереработки (примеры и задачи): учебное пособие. – Санкт-Петербург: Лань, 2020. – 716 с. (дата обращения: 15.02.2025).
21. Постоянный технологический регламент производства карбамида цеха №24 ПАО «КуйбышевАзот» (дата обращения: 25.02.2025).
22. Потехин В.М. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки: Учебник. 2022. – 896 с. (дата обращения: 25.02.2025).
23. Производство капролактама. Под ред. В.И. Овчинникова и В.Р. Ручинского. М.: Химия, 1977. – 264 с. (дата обращения: 25.02.2025).
24. «Polyamides (Caprolactam)» in ECT 3rd ed., W. B. Fisher and L. AlliedSignal, Inc.; posted on-line Dec. 4, 2010. – 89 с. (дата обращения: 25.02.2025).
25. Meng X, Mu X, Zong B, Min E, Zhu Z, Fu S, et al. Purification of caprolactam in reactor. Catal Today 2003, P. 79–80 (дата обращения: 15.02.2025).
26. Zong B, Zhang X, Qiao M. Integration of methanation into the hydrogenation process of benzoic acid. AIChE J 2009;55(1):192–7 (дата обращения: 15.02.2025).
27. Cheng S, Min E, Wu W, Sun B, Zhang S, Wang E, inventors; China Patent Agent (Hong Kong) Co., Ltd., assignee. A method of cyclohexanone oxime's gas phase rearrangement to caprolactam. China patent CN 100497316. 2003, Nov 28 (дата обращения: 15.02.2025).
28. W. B. Fisher: Caprolactam, “Kirk Othmer Encyclopedia of Chemical (дата обращения: 15.02.2025).
29. Technology”, 5th edition, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, online DOI: (дата обращения: 15.02.2025).