

Министерство образования и науки российской федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

Волгоградский государственный технический университет  
Кировский Вечерний Факультет

Кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»

Контрольная работа

(выполнение разделов выпускной квалификационной работы бакалавра)  
на тему «Разработать конструкцию насадочной ректификационной колонны  
выделения легколетучих компонентов стадии ректификации производства  
дихлорэтана мощностью 20 м<sup>3</sup>/ч по исходной смеси»  
по дисциплине «Выполнение выпускной квалификационной работы бакалавра»

Выполнил (а):

студент(ка) группы МВБ-586

Осипов Р.Г.

Проверил (а):

доцент кафедры ПАХПП, к.т.н.

Шибитова Н.В.

Работа защищена

с оценкой *отлично*  
*25.05.18г.*  
*Н.В.*  
*Шибитова*

Волгоград 2018 г.

## Содержание

Введение.....	4
1 Обзор (анализ) научной, научно-технической и патентной литературы.....	6
1.1 Конструкция и виды массообменных насадок.....	6
1.2 Литературно-патентный обзор.....	9
2 Теоретические основы процесса ректификации.....	26
2.1 Методика расчета ректификационной колонны.....	28
3 Описание технологической схемы.....	37
3.1 Выбор и обоснование технических средств автоматизации и контроля.....	40
4 Описание конструкции и принципа работы ректификационной колонны.....	44
5 Технологические расчеты основного оборудования.....	51
5.1 Исходные данные для расчета ректификационной колонны.....	51
5.2 Материальный баланс.....	51
5.3 Определение скорости пара и диаметра колонны.....	55
5.4 Расчет высоты насадки и колонны.....	60
5.5 Расчет гидравлического сопротивления в колонне.....	68
5.6 Тепловой расчет.....	69
5.7 Расчет диаметра штуцеров.....	71
6 Прочностные расчеты.....	74
6.1 Выбор материала для изготовления ректификационной колонны.....	74
Заключение.....	89
Список использованных источников.....	90
Приложение	

## Введение

Производство дихлорэтана тесно связано с винилхлоридом, поэтому современные варианты получения винилхлорида содержат технологические схемы получения дихлорэтана, как полупродукта для переработки в винилхлорид. Из винилхлорида получают поливинилхлорид, занимающего по объему выпуска второе место после полиэтилена среди полимерных материалов [1].

Дихлорэтан (ДХЭ) – бесцветная летучая жидкость со сладковатым запахом. Дихлорэтан смешивается во всех отношениях со спиртами, бензолом, ацетоном и другими органическими соединениями.

Дихлорэтан находит широкое применение в различных областях промышленности и как растворитель: для очистки нефтепродуктов от парафинов, для экстрагирования жиров, для обезжиривания шерсти, мехов, а также для очистки металлических изделий перед хромированием или никелированием. Производство дихлорэтана является одним из важнейших факторов в производственной цепи получения полимеров, конечная цель которого получение полимерных и синтетических материалов (пластмасс), без которых нельзя представить жизнь современного общества [1].

Сырьем для получения 1,2 – дихлорэтана являются этилен и хлор.

В промышленном масштабе 1,2 – дихлорэтан получают двумя совмещенными методами, использующие хлор:

- прямое хлорирование этилена в жидкой фазе;
- окислительное хлорирование этилена в газовой фазе.

Реакция окислительного хлорирования идет с выделением тепла, катализатором служит хлорид меди. Процесс экзотермический, чем больше атомов хлора вводится, тем больше выделяется тепла. Реакция идет в газовой фазе, с теплоотводом справиться трудно. Из – за наличия в реакционной массе паров воды при процессах окислительного хлорирования наблюдается сильная коррозия аппаратуры. Кроме обычной защиты корпуса реакторов

керамическими материалами, для изготовления охлаждающих устройств, применяют специальные сплавы [2].

Недостатками этого способа является образование побочных продуктов замещения, а также трудности очистки дихлорэтана. Процесс газофазного хлорирования требует особенного требования по технике безопасности.

Современная тенденция развития экономии энергетических ресурсов привела к созданию процесса прямого хлорирования этилена с использованием тепла реакции для ректификации образующегося дихлорэтана.

Получение дихлорэтана основано на химической реакции взаимодействия этилена с хлором. Процесс ведут в жидкой фазе, в присутствии катализатора хлорного железа при температуре 49–65<sup>0</sup> С. Благодаря этому достигается безопасность процесса [2].

Характеристика исходного сырья, материалов, полупродуктов и энергоресурсов сведены в таблицу 1.1

Таблица 1.1 – Характеристика исходного сырья [3]

Наименование сырья, материалов, полупродуктов	Национальный стандарт (межгосударственный стандарт организации (СТО, технические условия, регламент или методика на подготовку сырья)	Показатели по стандарту, обязательные для проверки	Регламентируемые показатели с допустимыми отклонениями
1	2	3	4
Дихлорэтан-ректификат	Настоящий регламент	Объемная доля 1,2- дихлорэтана, %	не менее 99,6
		Объемная доля 1,2- дихлорпропана, %	не более 0,2
		Объемная доля низкокипящих примесей, %	не более 0,3
		Массовая доля влаги, %	не более 0,005
1,2-Дихлорэтан технический. Сорт 1	ГОСТ 1942-86 с измен.1	Массовая доля 1,2-дихлорэтана, % Массовая доля влаги %	не менее 99,4 не более 0,05

## 1 Обзор (анализ) научной, научно-технической и патентной литературы

Целью литературно-патентного обзора является анализ существующих типов насадки, применяемых в массообменных аппаратах. На основании проведенного анализа делается выбор наиболее эффективной насадки для ректификационной колонны на стадии отгонки низкокипящих примесей при получении дихлорэтана (ДХЭ) с позиции энергосбережения.

### 1.1 Конструкция и виды массообменных насадок

В химической и нефтеперерабатывающей промышленности применяют разнообразные по форме и размерам насадки, которые в той или иной мере удовлетворяют требованиям, при проведении конкретного процесса ректификации, абсорбции и др. [4].

Различают регулярную и нерегулярную насадку. Регулярной называется насадка, заполнение аппарата которой производится в укладку. Нерегулярной называется насадка, заполнение аппарата которой производится «внавал».

Выбор насадки определяется величиной удельной поверхности, смачиваемостью и коррозионной стойкостью. Насадка изготавливается из различных материалов (керамика, пластмасса, фарфор, фторопласт, сталь, пластмассы и др.), в зависимости от агрессивности рабочей среды.

Применяемые в промышленности насадки приведены на рисунке 1.1.

Одна из самых распространенных насадок – кольцевая, представляющая собой тонкостенные кольца, наружный диаметр которых обычно равен высоте кольца. Диаметр насадочных колец изменяется от 25 до 150 мм. Кольца малого диаметра (до 50 мм) загружают «внавал». При диаметре больше 50 мм кольца укладывают правильными рядами. Чтобы избежать провала жидкости, кольца укладывают в шахматном порядке, т. е. кольца каждого ряда сдвинуты относительно колец смежного ряда. Для увеличения поверхности применяют кольца с перегородками [5].

На рисунке 1.1 представлены кольца Рашига (рисунок 1.1 а), кольца Лессинга (рисунок 1.1 б) и кольца Паля (рисунок 1.1 в).

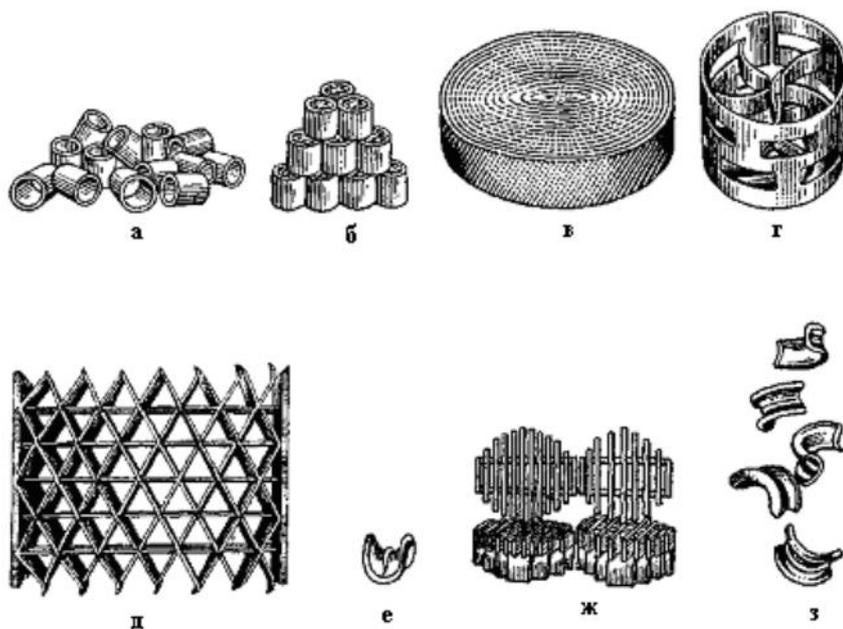


Рисунок 1.1 - Типы насадок [5]

Насадочные кольца (рисунок 1.1) изготавливают чаще всего из керамики или фарфора, в некоторых случаях из углеграфитовых масс. Применяют также тонкостенные металлические кольца из стали или других металлов.

На рисунке 1.1 представлена также седлообразная насадка Берля (рисунок 1.1 е) и «Инталлокс» (рисунок 1.1 з) [5]. Седлообразная насадка также применяется для засыпки «внавал». Поверхность седла Берля представляет собой гиперболический параболоид, а поверхность седла «Инталлокс» – часть тора. Седлообразную насадку изготавливают чаще всего из керамики или фарфора.

Седлообразная насадка при одинаковых размерах насадочных тел имеет в сравнении с кольцами Рашига примерно на 25% большую удельную поверхность и несколько больший свободный объем. Седлообразная насадка обладает меньшим гидравлическим сопротивлением и несколько большей эффективностью, чем кольца Рашига.

На рисунке 1.1 ж показана деревянная хордовая насадка. Она состоит из поставленных на ребро досок образующих решетку. Решетки укладывают друг на друга так, что в смежных решетках доски повернуты на угол  $90^\circ$  (иногда 6-

45°). Наиболее распространена деревянная хордовая насадка, изготовленная из досок толщиной 10-15 мм и высотой 100-150 мм. В нижней части досок через каждые 200-250 мм делают треугольные вырезы, разрывающие стекающую жидкость и не допускающие ее стекание в одну сторону при перекосе насадки.

На рисунке 1.1 (д) представлена насадка Спрейпак [5]. Насадка Спрейпак изготавливается из металлической полосы толщиной 0,5-1,0 мм с расположением в шахматном порядке прорезей и последующим растягиванием полосы в направлении, перпендикулярном прорезям. Прорези расширяются, и полоса принимает вид решетки. Решетка может быть выполнена также путем прессования на специальном прессе. Насадка изготавливается из изогнутых решетчатых элементов, соединяемых стержнями.

На рисунке 1.1 (в) представлена насадка Панченкова (Гудлоу) [5]. Регулярная проволочная насадка Панченкова (Гудлоу) представляет собой свернутую спираль из сетчатого чулка. Ее изготавливают из нержавеющей проволоки марок 12X18H10T, 12X18H9T, O3X18H9T-ВИ, O3X18H10T-ВИ. Регулярную проволочную насадку Панченкова изготавливают двух типов: с мелким гофром и с крупным гофром.

В качестве насадки используют также засыпаемые «внавал» в колонну куски кокса или кварца размерами 25-100 мм. Однако, из-за малой удельной поверхности, высокого гидравлического сопротивления, кусковую насадку применяют редко.

При выборе размеров насадки следует учитывать [5], что чем больше размеры ее элемента, тем выше допустимая скорость газа и ниже его гидравлическое сопротивление. Общая стоимость колонны с насадкой из элементов больших размеров будет ниже за счет уменьшения диаметра аппарата, несмотря на то, что его высота несколько увеличится по сравнению с высотой аппарата, имеющего насадку меньших размеров.

Мелкая насадка предпочтительнее при проведении процесса ректификации под повышенным давлением, так как в этом случае гидравлическое сопротивление колонны не имеет существенного значения. Кроме этого, мелкая на-

садка, обладающая большей удельной поверхностью, имеет преимущества перед крупной в том случае, если для осуществления процесса ректификации необходимо большое число единиц переноса или теоретических ступеней изменения концентраций.

## 1.2 Литературно-патентный обзор

На рисунке 1.2 изображена насадка для тепло- и массообменных аппаратов из горизонтальных элементов [7]. Насадка состоит из собранных в пакеты горизонтальных элементов, сформованных из керамики или пластика. Элементы насадки обладают криволинейной поверхностью, состоящей из регулярно расположенных конических выпуклостей и впадин. На вершине выпуклости и дне впадины имеются круглые сквозные отверстия.

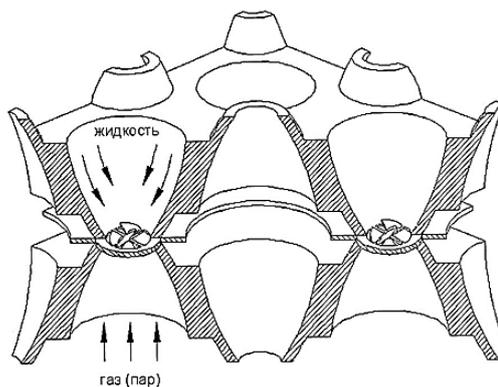


Рисунок 1.2 - Насадка из горизонтальных элементов [7]

Выпуклости и впадины располагаются в шахматном порядке так, что одна выпуклость была окружена четырьмя впадинами. Стенки конических выпуклостей и впадин изготавливаются многогранными (8 граней) или гладкими. Горизонтальные элементы укладываются друг на друга, соединяясь между собой так, чтобы отверстия на вершинах выпуклостей соседних элементов накладывались друг на друга. При этом образуются вертикальные каналы с переменным сечением для прохождения газа и жидкости. Поток газа (пара) проходит [7] снизу вверх по каналам переменного сечения, образованными горизонтальными элементами насадки. Жидкость стекает

сверху вниз. Жидкость орошает наклонные стенки конусообразных выпуклостей и впадин и образует развитую поверхность контакта фаз. Газ (пар) движется снизу вверх, при этом периодически меняется скорость его движения за счет изменения сечения канала, что способствуют образованию вихрей и интенсивному перемешиванию в газовой фазе. Газ проходит через те же отверстия, что и жидкость. Массообмен осуществляется между газом (паром) и жидкостью на поверхности элементов насадки, а также в объеме газожидкостного слоя.

Технический результат, который может быть получен при использовании данного изобретения [7], заключается в повышении тепло- и массообменной эффективности регулярных насадок для тепло- и массообменных аппаратов при одновременном снижении гидравлического сопротивления.

Недостатками данной насадки являются сложность изготовления и повышенная металлоемкость.

Регулярная насадка для тепло- и массообменных аппаратов с периодическим орошением [8], которая показана на рисунке 1.3, относится к конструкциям регулярных насадок, применяемых для проведения тепло- и массообменных процессов в системе газ (пар)-жидкость, таких как процесс ректификации, абсорбции, очистки и осушки газа.

Насадка состоит из вертикальных параллельных листов, которые с обеих сторон покрыты синтетическим (полимерным) ворсом. Длина ворсинок составляет 0,007-0,01 м, расстояние между соседними ворсинками на листе 0,002-0,003 м, диаметр ворсинок 0,001-0,002 м, расстояние между поверхностями листов до 0,02-0,03 м.

При этом жидкость на поверхность листов подается сверху периодически так, чтобы на поверхности листа образовались волны. Расстояние между ворсинками на поверхности листа не менее 0,002 м для того, чтобы не происходило слипания ворсинок.

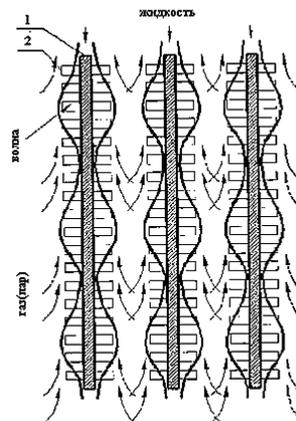


Рисунок 1.3 - Регулярная насадка с периодическим орошением [8]

Очередная волна смачивает ворсинки, при этом ворсинки покрываются пленкой жидкости, и образуется развитая поверхность контакта между газом и жидкостью. Затем приходит новая волна, которая уносит старую пленку и, в то же время, образует новую пленку на ворсинках.

Данная конструкция насадки [8] позволяет:

- обеспечить развитую поверхность контакта фаз и высокую интенсивность тепло- и массообмена;
- повысить эффективность работы насадки;
- уменьшить габаритные размеры аппарата и, как следствие, сократить капитальные затраты на его изготовление.

Недостатком данной конструкции является повышенное гидравлическое сопротивление.

Техническая задача, решаемая посредством другой разработанной конструкции [9], состоит также в оптимизации процесса тепло- массообмена.

Технический результат, получаемый при реализации разработанной конструкции регулярной насадки [9] для противоточных теплообменных аппаратов, состоит в повышении эффективности равномерного распределения газовых и жидкостных потоков по поперечному сечению аппарата.

Регулярная насадка для разработанной конструкции противоточных теплообменных аппаратов состоит из установленных наклонно рельефных листов, соприкасающихся выступами рельефа друг с другом.

Рельеф образован множеством выступов пирамидальной формы. В одном из вариантов реализации конструкции выступы представляют собой усеченные тетраэдры, в верхней части которых выполнено отверстие.

Предпочтительно размер стороны основания выступа составляет от 5 до 400 мм, а длина боковой грани от 5 до 400 мм.

Выполнение рельефа подобным образом позволило оптимизировать распределение газовых и жидкостных потоков по поперечному сечению аппарата. При этом удалось повысить эффективность тепло - и массообмена в процессах разделения многокомпонентных смесей и снизить гидравлическое сопротивление за счет образования в одном элементе наклонно распределенных потоков, направленных в разные стороны. А также повысить интенсификацию массообмена за счет оптимизации распределения потоков по поверхности листа и упростить конструкцию. Предлагаемая насадка [9] проста в изготовлении и может быть выполнена прокаткой или штамповкой.

Двухтавровая насадка для массообменных аппаратов [10] относится к контактному устройству для массообменных аппаратов, а именно для насадочных массообменных аппаратов для систем пар-жидкость и состоит из горизонтальных рядов продольных прямоугольных пластин.

На рисунке 1.4 изображены прямоугольные пластины, которые образуют двухтавровый профиль с углом наклона элементов (стенок и полок) профиля к горизонтали в  $45^\circ$ , причем профиль в ряду относительно профиля соседнего ряда расположен в противоположном направлении и элементы профиля двух соседних рядов образуют продольные ячейки. Торцы стенок профиля образуют щели для прохода фаз.

Кроме того, отношение длин стенки и полки двухтаврового профиля равно 1:2 и кромки стенок двухтаврового профиля выполнены зубчатыми.

Изобретение позволяет одновременно использовать для контакта фаз эффекты, возникающие как при струйно-противоточном движении фаз через щель между торцами стенок профиля, так и при пленочном течении вдоль наклонных полок профиля.

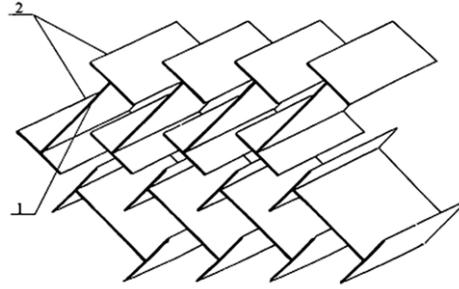


Рисунок 1.4 - Двухъярусная насадка [10]

А также применить эффект, возникающий при турбулизации фаз в объеме продольных ячеек, образованных стенками и полками двухъярусного профиля, расположенного в соседних рядах противоположно друг к другу.

Подобное сочетание взаимодействий между фазами приводит к интенсификации процесса массопередачи, исключает застойные и свободные области контактной зоны и каналобразование при движении фаз. Данная конструкция для массообменных аппаратов [10] обеспечивает равномерность распределения потоков.

Недостатком таких насадок [10] является относительно сложная технология изготовления, повышающая их стоимость.

Насадка, которая представлена на рисунке 1.5 [11], содержит проволоку или полимерные мононити, фиксирующие элементы в виде болтов, установленных равномерно по окружности перфорированных дисков в проволоке или полимерных мононитях и закрепленных на концах дисков с отношением диаметра диска к внутреннему диаметру аппарата  $d/D=0,94\div 0,98$ .

Каждый диск представляет собой сегмент сферы. Верхний диск установлен в аппарате с образованием выпуклой поверхности, а нижний – с образованием вогнутой поверхности, причем отношение радиуса сферы к внутреннему диаметру аппарата составляет  $R/D=3\div 5$ .

Недостатком такой насадки [11] для массообменного аппарата является высокое гидравлическое сопротивление, а также структура насадки не позволяет достичь полного смачивания, остаются сухие зоны, в которых возможны проскоки газа, а также низкая эффективность массообмена.

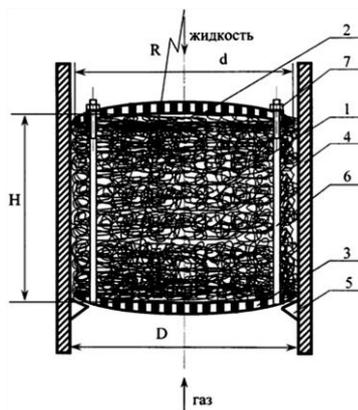


Рисунок 1.5 – Насадка для массообменного аппарата [11]

Известна регулярная рулонная ленточно-винтовая насадка [12] для ректификационных колонн.

Регулярная насадка для ректификационных колонн содержит горизонтальные элементы из гофрированной микросетки, в которой гофры всех элементов параллельны друг другу. Крепление каждого вышележащего элемента на нижележащий происходит по всей длине гофр таким образом, что между элементами образуются горизонтальные каналы для прохода пара. В элементах выполнены отверстия для прохода пара из нижележащих горизонтальных каналов в вышележащие. Каждый слой гофрированной сетки наматывают из отдельной гофрированной ленты вплотную виток к витку, либо с небольшим зазором. Ширина, угол наклона каналов и высота гофров могут отличаться от слоя к слою.

Наиболее перспективно использование предлагаемой насадки [12] для вакуумной ректификации. Технический результат состоит в повышении эффективности процесса ректификации.

Насадка для ректификационной колонны, которая представлена на рисунке 1.6 [13], относится к технологическому ректификационному оборудованию и содержит вертикальную трубу, в которой размещены перпендикулярно ее оси теплообменные устройства, содержащие разнесенные по оси трубы пористые элементы.

Элементы образованы чередующимися тарелками, разделенными кольцевыми проставками. Кольцевые проставки выполнены в виде пакетов,

образованных сдвоенными лентами, одна из которых имеет гофры треугольной формы.

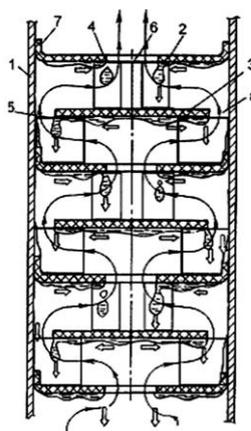


Рисунок 1.6 - Насадка для ректификационной колонны [13]

На боковых поверхностях треугольных гофр ленты выполнены лепестки в виде круговых сегментов, при этом хорды сегментов смежных сторон гофр расположены под углом к другу.

Предложенная конструкция насадки [13] предотвращает возможность неэффективного контакта поднимающегося пара и стекающей флегмы, что повышает ее эффективность.

Недостатком этой конструкции [13] является трудоемкость изготовления, вызванная наличием большого количества отдельных гофрированных листов относительно небольших размеров, а также недостаточная длина каналов для пропуска пара.

Изобретение [14] относится к конструкциям регулярных насадок и может найти применение в технологических процессах нефтяной, газовой, химической и других отраслях промышленности.

Регулярная насадка для тепло- и массообменных процессов [14] содержит пакеты из пучка параллельно установленных вертикальных труб с изменяющейся вдоль оси площадью поперечного сечения и блоки проставок, выполненные в виде горизонтально расположенных треугольных решетчатых призм. В соседних по высоте рядах призмы установлены с поворотом на  $90^\circ$ . Трубы в пакетах в соседних по высоте рядах установлены со смещением,

равным половине диаметра трубы. Трубы имеют форму овала Кассини, а соотношение диаметров наиболее широкого и наиболее узкого сечения труб находится в соотношении 2:1. Такая конструкция насадки позволяет повысить интенсивность тепло- и массообмена.

Недостатком такой насадки является то, что их наибольшая тепло- и/или массообменная эффективность проявляется при проведении определенных технологических процессов, что ограничивает область их применения.

Регулярная насадка [15] предназначена для проведения массообмена.

Технический результат изобретения заключается в:

- увеличении эффективности процессов тепло- и массообмена;
- упрощении конструкции и снижении затрат металла на изготовление насадки;
- снижении гидравлического сопротивления насадки.

Устранение указанных недостатков и достижение заявляемого технического результата от реализации регулярной насадки [15] для массообменных аппаратов, содержащей каркас из стержней, горизонтально расположенные ленты и вертикальные сетки, достигается за счет того, что ленты крепятся на стержнях каркаса и сами не являются несущими элементами. Вследствие чего их толщина может быть существенно снижена. Кроме того, ленты могут выполняться из пластика или химически и механически стойкой ткани, что также приведет к снижению затрат металла.

А расположение компонентов регулярной насадки обеспечивает увеличение поверхности контакта жидкой и газовой (паровой) фазы, при этом за счет увеличения промежутков между компонентами регулярной насадки уменьшается ее гидравлическое сопротивление.

В регулярной насадке для тепло- массообменных аппаратов, которая предложена на рисунке 1.7 [16], поверхность элемента, выполнена в виде секций, установленных в несколько ярусов по высоте аппарата. Секции собраны из параллельно уложенных в ряды каплевидных элементов. Боковая поверхность каплевидного элемента от места соединения посредством стержня

выполнена с продолжениями, образующими  $\gamma$ -образный профиль элемента. Поверхность  $\gamma$ -образных элементов изготавливается из лавсановых сетчатых мононитей. Закругленная кромка профиля ориентирована навстречу газовому потоку, а концы профиля ориентированы навстречу потоку жидкости.

Угол атаки указанных элементов по отношению к газовому потоку находится в пределах от 0 до 20°. Элементы расположены в шахматном порядке и при этом ориентация элементов в соседних рядах по высоте аппаратов выполнена с противоположным наклоном друг относительно друга со смещением друг относительно друга по горизонтали на величину - 3,5 ширины. Причем высота элемента составляет 4,0-8,0 ширины элемента насадки.

Элементы насадки [16] секции в аппарате прямоугольного сечения расположены под углом 90° относительно элементов насадки в соседних секциях. А элементы насадки в каждом ярусе аппарата круглого сечения образуют восьмилепестковую конструкцию и в соседних по высоте рядах смещены относительно друг друга на величину, равную 10-40°.

На рисунке 1.7 элементы насадки секции в аппарате прямоугольного сечения расположены под углом 90° относительно элементов насадки в соседних секциях.

Регулярная насадка для тепло-массообменных аппаратов [16] выполнена в виде секций, собранных из параллельно уложенных в ряды  $\gamma$ -образных элементов высотой  $L$ , установленных в несколько ярусов по высоте аппарата элементов 2, 3, 4.

Боковая поверхность каплевидного элемента от места соединения посредством стержня 5, выполнена с продолжениями, образующими  $\gamma$ -образный профиль элемента. Расстояние между рядами элементов 2, 3, 4 по вертикали  $z$  составляет 0,7-1,5 высоты элемента. Угол атаки  $\alpha$  указанных элементов по отношению к газовому потоку находится в пределах от 0 до 20°. Элементы расположены в шахматном порядке. Их ориентация в соседних рядах по высоте аппарата выполнена с противоположным наклоном относительно

друг друга и со смещением по горизонтали  $t$  на величину, равную 1,0-3,0 ширины элемента насадки. Шаг элементов  $m$  в каждом ряду равен 1,5-3,5 ширины, причем высота  $L$  элемента составляет 4,0- 8,0 ширины элемента насадки  $h$  [16].

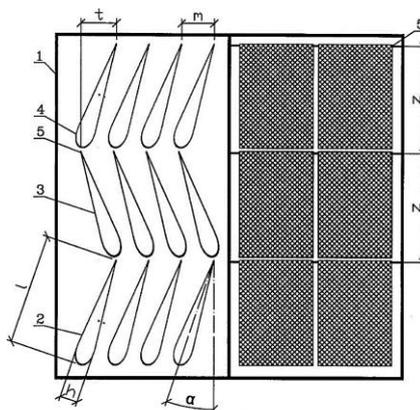


Рисунок 1.7 - Секция собранных из нескольких рядов по высоте  $\gamma$ -образных элементов в шахматном порядке [16]

Элементы насадки в каждом ярусе аппарата круглого сечения образуют восьмилепестковую конструкцию и в соседних по высоте рядах смещены  $\beta$  относительно друг друга на величину, равную 10-40°.

Регулярная насадка работает следующим образом [16]. Жидкая фаза подается равномерно на верхнюю часть секций, собранных, например, из параллельно уложенных в ряды  $\gamma$ -образных элементов и уложенных в горизонтальные ряды 2, 3, 4. Далее стекает по их поверхностям в виде тонкой пленки и капельных струек жидкости, контактируя с восходящими потоками газа, по свободным косым каналам под углом  $\alpha$ , образованным смещением в параллельных рядах элементов насадки.

Таким образом, массообмен между жидкостью и газом происходит в насадке [16] в наиболее эффективном капельно-пленочном режиме течения жидкости. Косо направленные каналы, образованные со смещением элементов насадки в соседних параллельных рядах, обеспечивают увеличение пути прохождения контактирующих потоков в объеме аппарата, а также условия для более полного смывания потоками всей поверхности насадки.

Эффективность процесса тепло- и массообмена при этом в исследованном диапазоне нагрузок по газу 0-3,0 м/с и по жидкости 0-10,0 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> · ч) увеличивается до 10%.

Опытным путем установлено [16], что регулярная насадка в виде секций из многоуровневых групп элементов насадки обладает свойством равномерно перераспределять потоки жидкости по всему поперечному сечению секции насадки, даже при недостаточно равномерной первоначальной раздаче жидкости на входе в секции насадки из-за дефектов водораздающей форсунки аппарата.

Недостатком такой насадки [16] является ее сравнительно высокое гидравлическое сопротивление при невысокой эффективности.

Задачей, на решение которой направлено изобретение [17], является повышение эффективности тепло- и массообмена за счет увеличения турбулизации пленки жидкости и его перемешивания между сторонами насадки и уменьшения габаритов аппаратуры.

Сущность изобретения [17] заключается в том, что регулярная насадка для тепло- и массообменных аппаратов включает размещенные в аппарате блоки, выполненные из вертикально установленных гофрированных пластин. Гофры на гофрированных пластинах выполнены с просечками, образованными за счет смещения соседних рядов гофр относительно друг друга. Гофрированные пластины установлены с зазором друг относительно друга в ряду одного блока и с зазором в соседних по высоте блоках на величину, соизмеримую с высотой гофры. Высота гофры на гофрированных пластинах составляет от 0,2 до 0,5, а величина зазора между соседними гофрированными пластинами в ряду одного блока составляет от 0,6 до 0,8 от величины эквивалентного диаметра канала -  $d_э$ ,

$$d_э = 4 \varepsilon / a,$$

где  $\varepsilon$  - порозность насадки, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> .;

$a$  - удельная поверхность насадки, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup> .

Кроме этого, отличия состоят в том, что [17]:

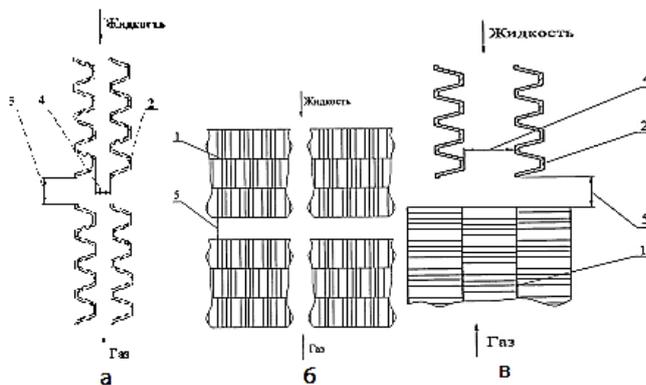
- гофрированные пластины во всех рядах блока могут быть выполнены с горизонтальным расположением гофры;
- гофрированные пластины во всех рядах блока могут быть выполнены с вертикальным расположением гофры;
- гофрированные пластины, соседние в ряду блока, могут быть выполнены с чередующимся горизонтальным и вертикальным расположением гофры;
- гофрированные пластины в соседних по высоте блоках могут быть выполнены и установлены с поворотом друг относительно друга в горизонтальной плоскости на угол, находящийся в пределах от 60 до 120°;
- гофрированные пластины в соседних по высоте рядах блока могут быть выполнены и установлены с чередующимся наклоном в разные стороны относительно оси аппарата на угол, находящийся в пределах от 10 до 50°;
- гофрированные пластины могут быть выполнены с криволинейными изгибами.

Регулярная насадка [17], представленная на рисунке 1.8, как уже говорилось выше, устанавливается в массообменном аппарате в виде нескольких блоков, состоящих из вертикально гофрированных пластин 1, имеющих гофры 2.

Гофры выполнены с просечками 3, образованными за счет смещения соседних рядов гофр 2 относительно друг друга. Гофрированные пластины 1 установлены с зазором 4 друг относительно друга в ряду блока и с зазором 5 в соседних по высоте блоках гофрированных пластин 1 на величину, соизмеримую с высотой гофры 2. При этом величина зазора 4 между соседними гофрированными пластинами 1 в ряду составляет от 0,6 до 0,8, а высота гофрированных пластин 1 составляет от 0,2 до 0,5 от величины эквивалентного диаметра канала -  $d_э$ .

Гофрированные пластины 1 во всех рядах могут быть выполнены [17]:

- с горизонтальным расположением гофры 2;
- с вертикальным расположением гофры 2;



- а - схема укладки гофрированных пластин в насадке с горизонтальным расположением гофр во всех рядах по высоте аппарата;
- б - схема укладки гофрированных пластин в насадке с вертикальным расположением гофр во всех рядах по высоте аппарата;
- в - схема укладки гофрированных пластин в насадке в соседних по высоте блоках с поворотом друг относительно друга в горизонтальной плоскости на угол  $90^\circ$ .

Рисунок 1.8 – Схемы укладки регулярной насадки [17]

- соседние в ряду гофрированные пластины 1 могут также быть выполнены с чередующимся горизонтальным и вертикальным расположением гофры 2;
- гофрированные пластины 1 в соседних по высоте блоках насадки могут быть установлены с чередующимися горизонтальными и вертикальными гофрами 2;
- гофрированные пластины 1 в соседних по высоте блоках насадки могут быть установлены с поворотом друг относительно друга в горизонтальной плоскости на угол, находящийся в пределах от  $60$  до  $120^\circ$ ;
- гофрированные пластины 1 в соседних по высоте рядах блока насадки установлены с чередующимися наклоном в разные стороны относительно вертикали на угол, находящийся в пределах от  $10$  до  $50^\circ$ ;
- гофрированные пластины 1 могут быть выполнены с криволинейными изгибами.

Работает данная насадка следующим образом [17].

Жидкая фаза подается на верхнюю часть блока насадки и в виде тонкой пленки жидкости стекает по поверхности гофрированных пластин 1 насадки. Противотоком, навстречу стекающей жидкости, движется газ (пар) и взаимодействует со стекающей жидкостью. Гофры 2 на поверхности гофрированных пластин 1 придают волновой характер течению пленки жидкости, что резко увеличивает интенсивность тепло- и массообмена.

Наличие просечек 3 на гофрированных пластинах 1 позволяет стекающей жидкости перетекать с одной стороны гофрированной пластины 1 на другую, тем самым вызывая поперечное перемешивание жидкости и, как следствие, увеличение интенсивности тепло - и массообмена в жидкой фазе. За счет уменьшения зазора 4 между соседними гофрированными пластинами 1 в блоке насадки и, как следствие, уменьшения свободного поперечного сечения аппарата, можно достигнуть высокой степени турбулизации газовой фазы и, как следствие, увеличения эффективности процессов тепло- и массообмена.

Увеличивая зазор 5 между соседними по высоте блоками насадки, можно создать в образовавшемся пространстве зону струйно-капельного течения жидкости, что также увеличивает интенсивность тепло- и массообмена. Размещая соседние по высоте гофрированные пластины 1 с поворотом друг относительно друга в горизонтальной плоскости, можно добиться перераспределения жидкости по сечению аппарата, а также турбулизовать газ в зазоре 5 между соседними по высоте блоками насадки, что также способствует интенсификации тепло- и массообмена.

Недостатками данной конструкции регулярной насадки [17], является сложность изготовления и последующего технического обслуживания и ремонта конструкции, а также ее громоздкость

Структурированная насадка для массообменных аппаратов [18] относится к технологическому оборудованию массообменных и, в частности, ректификационных аппаратов.

Структурированная насадка массообменных аппаратов содержит призматическую структуру из капиллярной сетки с вертикальными гранями,

делящей колонну на отсеки равной площади поперечного сечения выпуклой формы, в которых размещена нерегулярная.

Техническая задача достигается тем, что внутри колонны перед засыпкой нерегулярной насадкой размещается призматическая структура из капиллярной сетки с вертикальными гранями, делящая колонну на отсеки равной площади поперечного сечения выпуклой формы любым из известных способов, над каждым отсеком находится свой дефлегматор с распределителем жидкой фазы по площади отсека.

Недостатком при применении такой насадки является неравномерное распределения жидкой и газообразной фаз по сечению колонны

Насадка Зульцер Mellapak 250 Y [19], которая изображена на рисунке 1.9, используется в промышленности на протяжении многих лет и уже оправдала себя в колоннах диаметром до 12 м и более. Она изготавливается из металлических листов толщиной от 0,1 мм.

Специальные характеристики этой насадки:

- перепад давления на 1 теоретическую ступень разделения 0,3-1 мбар (0,03-0,1 кПа);
- перепад давления при 70-80% скорости захлебывания -2 мбар/м (0,2 кПа/м);
- минимальная нагрузка по жидкости - 0,2 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>-ч);
- максимальная нагрузка по жидкости более 200 м<sup>3</sup>/(м-ч), например в десорбционных колоннах.

Насадка применяется:

- от вакуума до избыточного давления;
- при испытаниях – до 120 бар (12 МПа);
- в средне- и крупномасштабных производствах;
- для получения продуктов основной химии (в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности);
- для повышения пропускной способности действующих тарельчатых и насадочных колонн.

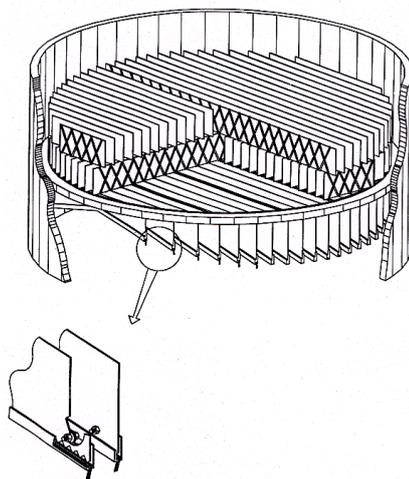


Рисунок 1.9 – Насадка Зульцер Mellapak 250Y [19]

Анализируя приведенный выше литературно-патентный обзор, для проведения процесса ректификации в производстве дихлорэтана на стадии отгонки низкокипящих примесей в качестве контактных элементов в колонном аппарате выбрана регулярная насадка Зульцер Mellapak 250 Y [19]. Эта насадка имеет высокую химическую стойкость, большую удельную поверхность и малое гидравлическое сопротивление. Ее применение позволит повысить эффективность и производительность массообмена уменьшить металлоемкость колонны и снизить энергетические затраты.

## 2 Теоретические основы процесса ректификации

Ректификация [20] – разделение жидких смесей на практически чистые компоненты, отличающиеся температурами кипения, путем многократного испарения жидкости и конденсации паров. В этом основное отличие ректификации от дистилляции, при которой в результате однократного цикла частичное испарение-конденсация достигается лишь предварительное (грубое) разделение жидких смесей.

Для ректификации обычно используют ректификационные колонны (насадочные, тарельчатые и другой конструкции). В них осуществляется многократный контакт между потоками паровой и жидкой фаз.

Движущая сила ректификации [20] – разность между фактическими (рабочими) и равновесными концентрациями компонентов в паровой фазе, отвечающими данному составу жидкой фазы. Парожидкостная система стремится к достижению равновесного состояния, в результате чего пар при контакте с жидкостью обогащается низкокипящими компонентами (НКК), а жидкость – высококипящими компонентами (ВКК).

Поскольку жидкость и пар движутся, как правило, противотоком (пар поднимается вверх, жидкость опускается вниз). Поэтому в верхней части колонны можно получить практически чистый целевой компонент. В зависимости от температур кипения разделяемых компонентов ректификацию проводят под разным давлением [20]:

- при атмосферном (температура кипения 30-150 °С);
- выше атмосферного (когда разделяются компоненты с низкими температурами кипения);
- в вакууме (при разделении высококипящих компонентов для снижения их температур кипения).

Ректификацию можно осуществлять непрерывно или периодически. Для непрерывной ректификации применяют колонны, состоящие из двух частей:

- верхней – укрепляющей (пар обогащается НКК);

- нижней – исчерпывающей (из жидкой смеси исчерпывается НКК).

При периодической ректификации в колонне производится только укрепление пара НКК.

Различают ректификацию бинарных (двухкомпонентных) и многокомпонентных смесей.

При ректификации в колонных аппаратах [20] исходная смесь в количестве  $G_F$  с концентрацией НКК –  $X_F$  поступает (в единицу времени) в среднюю часть колонны, верхний продукт – дистиллят в количестве  $G_D$  с концентрацией НКК –  $X_D$  отбирается из дефлегматора. Кубовый остаток в количестве  $G_w$  с концентрацией –  $X_w$  отводится в качестве нижнего продукта из куба-испарителя. Образующаяся в испарителе паровая фаза поднимается по колонне вверх, взаимодействуя на контактных устройствах (тарелках, насадке) со стекающей жидкой фазой, и поступают в дефлегматор, откуда часть образовавшегося конденсата, называемого флегмой  $G_\phi$ , возвращается в верхнюю часть колонны.

Материальный баланс по НКК для всей колонны имеет вид (2.1) [21]:

$$G_F \cdot \overline{X}_F = G_D \cdot \overline{X}_D + G_w \cdot \overline{X}_w . \quad (2.1)$$

При работе колонны в адиабатических условиях и равенстве молярных теплот испарения компонентов в каждом сечении укрепляющей части (выше ввода питания) концентрация НКК в паровой фазе  $Y$  связана с его концентрацией в жидкой фазе  $X$ , уравнением называемым рабочей линией (2.2) [21]:

$$y = \frac{R}{R+1} \cdot x + \frac{x_D}{R+1} , \quad (2.2)$$

где  $R = G_\phi / G_D$  – флегмовое число.

Уравнение рабочей линии для исчерпывающей части колонны (т.е. ниже ввода питания) (2.3) [21]:

$$y = \frac{R+F}{R+1} \cdot x - \frac{F-1}{R+1} \cdot x_w . \quad (2.3)$$

При расчете насадочных аппаратов определяют число единиц переноса необходимых для заданного разделения, и высоту насадки, эквивалентную по

эффективности одной ТТ (ВЭТТ). Последнюю находят, как правило, по опытным данным или эмпирическим уравнениям [20].

Более строгий метод расчета основан на использовании уравнений массо- и теплопереноса.

Известно, что перенос НКК из жидкой фазы в паровую связан как с диффузией, так и с теплообменом между паром и жидкостью.

В любом сечении колонны температура пара выше температуры жидкости, поэтому вследствие воздействия теплового потока часть жидкости испаряется и примерно такое же количество пара конденсируется. Содержание НКК в образующейся паровой фазе выше, чем в жидкой, а содержание в ней НКК после конденсации пара ниже, чем в паровой фазе [20].

Таким образом, в результате испарения и конденсации возникает дополнительный конвективный поток НКК из жидкой фазы в паровую за счет разной температуры кипения (конденсации) НКК и ВКК в процессе ректификации.

Так как в литературно-патентном обзоре в производстве ДХЭ на стадии отгонки низкокипящих компонентов была выбрана колонна с регулярной насадкой, в этом подразделе приведена последовательность расчета ректификационной колонны с насадкой по методикам приведенным в работах [21], [22] и [19].

## 2.1 Методика расчета ректификационной колонны

2.1.1 Выбираются исходные данные для расчета ректификационной колонны для разделения бинарной смеси:

1) Производительность по конечному продукту (например, дистилляту).

2) Концентрация низкокипящего компонента:

- в исходной смеси  $X_F$ ;

- в дистилляте  $X_D$ ;

- в кубовой жидкости  $X_W$ .

3) Давление в колонне.

4) Тип насадки (регулярная или нерегулярная).

2.1.2 Составляется материальный баланс колонны по формулам (2.1) и (2.1 а) [21]:

$$G_F \cdot \overline{X}_F = G_D \cdot \overline{X}_D + G_W \cdot \overline{X}_W \quad (2.1)$$

$$G_F = G_D + G_W, \quad (2.1 \text{ а})$$

где  $\overline{X}_F, \overline{X}_D, \overline{X}_W$ , - массовые концентрации НКК

2.1.3 Определяется производительность колонны по дистилляту и кубовому остатку из формулы (2.1 б) [21]:

$$G_F = \frac{\overline{G}_D}{\frac{\overline{X}_F - \overline{X}_W}{\overline{X}_D - \overline{X}_W}} \quad (2.1 \text{ б})$$

где  $G_F$  – массовый расход исходной смеси, кг/ч;

$G_D$  – массовый расход дистиллята, кг/ч;

$G_W$  – массовый расход кубовой жидкости, кг/ч.

2.1.4 Для расчетов концентрации питания  $X_F$ , дистиллята  $X_D$  и кубового остатка  $X_W$  выражаются в мольных долях по формуле (2.2) [21]:

$$X_F = \frac{\frac{\overline{x}_F}{M_{22}}}{\frac{\overline{x}_F}{M_{22}} + \frac{1 - \overline{x}_F}{M_{21}}} \quad (2.2)$$

2.1.5 Определяется мольный расход питания по формуле (2.3) [21]:

$$G_F = \frac{G}{X_F \cdot M_{22} + (1 - X_F) \cdot M_{21}} \quad (2.3)$$

2.1.6 Определяется относительный мольный расход питания по формуле (2.4) [21]:

$$F = \frac{x_D - x_W}{x_F - x_W} \quad (2.4)$$

2.1.7 Определяется минимальное число флегмы по формуле (2.5) [21]:

$$R_{min} = \frac{x_D - y_F}{y_F - x_F} \quad (2.5)$$

где  $Y_F$  – мольная доля НКК в паре, равновесном с жидкостью питания, определяем по диаграмме  $x$ - $y$ .

2.1.8 Определяется рабочее число флегмы по формуле (2.6) [21]:

$$R = 1.3 \cdot R_{min} + 0.3 \quad (2.6)$$

2.1.9 При заданном давлении в аппарате из  $t$ - $x$ , -  $y$  диаграммы определяется температура кипения НКК и ВКК.

2.1.10 Координату точки  $B$  на диаграмме  $x$  -  $y$  определяют по формуле (2.7) [21]:

$$B = \frac{X_D}{R+1} \cdot \quad (2.7)$$

2.1.11 Проводят построение рабочих линий процесса ректификации на фазовой диаграмме.

Уравнение рабочих линий.

а) верхней (укрепляющей) части колонны определяют по формуле (2.8) [21]:

$$y = \frac{R+F}{R+1} \cdot x + \frac{x_D}{R+1} \cdot \quad (2.8)$$

б) нижней (исчерпывающей) части колонны определяют по формуле (2.9) [21]:

$$y = \frac{R+F}{R+1} \cdot x - \frac{F-1}{R+1} \cdot x_w \cdot \quad (2.9)$$

2.1.12 Для вычисления равновесных составов фаз используются законы Дальтона и Рауля. Мольная доля низкокипящего компонента  $X$  в жидкости определяется по формуле (2.10) [21]:

$$X = \frac{P - P_T}{P_6 - P_T} \cdot \quad (2.10)$$

Мольная доля низкокипящего компонента в паре  $y^*$  рассчитывается по формуле (2.11) [21]:

$$y^* = \frac{P_6}{P} \cdot x \cdot \quad (2.11)$$

где  $P_6$  – давление насыщенных паров низкокипящего компонента, мм. рт. ст.;

$P_T$  – давление насыщенных паров высококипящего компонента, мм. рт. ст.;  $P$  – общее давление в системе, мм. рт. ст.

2.1.13 По полученным данным о равновесии между жидкостью и паром строят изобары температур кипения и конденсации смеси на диаграмме  $t$ - $x$ ,  $y$  и линию равновесия на диаграмме  $y$ - $x$ .

2.1.14 Определяются средние концентрации жидкости в колонне:

а) в верхней части колонны по формуле (2.12) [21]:

$$x'_{cp} = \frac{x_F + x_D}{2}. \quad (2.12)$$

б) в нижней части колонны по формуле (2.13) [21]:

$$x''_{cp} = \frac{x_F + x_W}{2}. \quad (2.13)$$

2.1.15 Определяются средние концентрации пара по уравнениям рабочих линий:

а) для верхней части колонны;

б) для нижней части колонны.

2.1.16 Определяются средние температуры пара по диаграмме  $t$ - $x$ ,  $y$ :

а) при  $y_{cp'}$ ,  $t_{cp'}$ ;

б) при  $y_{cp''}$ ,  $t_{cp''}$ ;

2.1.17 Определяются средние мольные массы:

а) в верхней части колонны -  $M_{cp'}$ ;

б) в нижней части колонны -  $M_{cp''}$ ;

в) средняя мольная масса в колонне  $M_{cp}$ ;

2.1.18 Средние плотности пара определяют по формуле (2.14) [21]:

$$\rho_{cp} = \frac{M_{cp} \cdot T_0 \cdot P_{раб}}{22.4 \cdot P_0 \cdot T_{cp}}, \quad (2.14)$$

где  $P_{раб}$  - рабочее давление в колонне, мм рт.ст.

а) в верхней части колонны -  $\rho_{cp'}$ ;

б) в нижней части колонны -  $\rho_{cp''}$ ;

в) средняя плотность пара в колонне составляет  $-\rho_{п}$ ;

2.1.19 Определяют температуру в верху колонны при  $y_D$ , и внизу колонны при  $x_w$ .

2.1.20 Определяют среднюю плотность жидкости  $\rho_{ж}$ .

2.1.21 Определим расход проходящего через колонну пара по формуле (2.15) [21]:

$$G_{\Pi} = G_D \cdot (R + 1), \quad (2.15)$$

где  $G_D$  – массовый расход дистиллята, в кг/с.

2.1.22 Расход жидкости, проходящий в верхней части колонны рассчитывают по формуле (2.16) [21]:

$$L_B = \bar{G}_D \cdot R. \quad (2.16)$$

2.1.23 Расход жидкости, проходящий в нижней части колонны определяют по формуле (2.17) [21]:

$$L_H = (\bar{G}_D \cdot R) + \bar{G}_F. \quad (2.17)$$

2.1.24 Определяют скорости пара в колонне. Для этого вначале находят параметры потоков в верхней и нижней частях колонны в соответствии с рекомендациями [19] по формулам (2.18) и (2.19):

$$\Psi_B = \frac{L_B}{G_B} \cdot \sqrt{\rho'_{ср} / \rho_{ж}}. \quad (2.18)$$

$$\Psi_H = \frac{L_H}{G_H} \cdot \sqrt{\rho''_{ср} / \rho_{ж}}. \quad (2.19)$$

Далее из диаграммы  $C_G - \Psi$  по методике представленной в учебнике [19] находят максимальный фактор нагрузки  $C_{Gmax}$ :

- верхняя часть колонны –  $C_{GmaxB}$ ;

- нижняя часть колонны –  $C_{GmaxH}$ .

На практике принимают  $C_G$  75–80 % от максимального значения:

$$C_{GB} = 0,8 \cdot C_{GmaxB},$$

$$C_{GH} = 0,8 \cdot C_{GmaxH}.$$

Нагрузки по пару находят по формуле (2.20) [19]:

$$q = C \cdot C_G \sqrt{(\rho_{ж} - \rho_{\Pi}) \cdot \rho_{\Pi}}. \quad (2.20)$$

Для насадки Mellapak 250Y  $C = 1$  [19].

Площадь поперечного сечения колонны рассчитывается по формулам (2.21) и (2.22) [19]:

- для верхней части

$$A_{CB} = \frac{G_B}{q_B} . \quad (2.21)$$

- для нижней части

$$A_{CH} = \frac{G_H}{q_H} . \quad (2.22)$$

2.1.25 Определяют диаметр колонны по формулам (2.23) и (2.24) [19]:

- для верхней части

$$d_{CB} = 1,13 \cdot \sqrt{A_{CB}} . \quad (2.23)$$

- для нижней части

$$d_{CH} = 1,13 \cdot \sqrt{A_{CH}} . \quad (2.24)$$

2.1.26 Далее проводится выбор стандартного диаметра колонны  $d$ , одинаковый и для верхней и для нижней частей колонны.

2.1.27 Уточняется действительная скорость паров по формулам (2.25) и (2.26) [21]:

- для верхней части колонны

$$\omega_B = \frac{4G_B}{\pi \cdot \rho'_{cp} \cdot d^2} . \quad (2.25)$$

- для нижней части колонны

$$\omega_H = \frac{4G_H}{\pi \cdot \rho'_{cp} \cdot d^2} . \quad (2.26)$$

2.1.28 Определяется действительная высота колонны.

Высоту одной ступени для регулярной насадки  $H_c$  принимают в соответствии с рекомендациями по каталогу [19].

Высота насадки для верхней части колонны рассчитывается по формуле (2.27) [21]:

$$H_B = h_{ув} \cdot m_{ув} . \quad (2.27)$$

Высота насадки для нижней части колонны рассчитывается по формуле (2.28) [21]:

$$H_H = h_{ун} \cdot m_{ун}. \quad (2.28)$$

Общую высоту колонны определяют по формуле (2.29) [21]:

$$H_K = H + (n - 1) \cdot h_P + Z_B + Z_H, \quad (2.29)$$

где  $H$  – высота насадки;

$n$  – число секций;

$h_P$  – высота промежутка между секциями;

$Z_B$  – высота между насадкой и крышкой колонны;

$Z_H$  – расстояние между дном колонны и насадкой.

2.1.29 После расчета высоты насадки определяют гидравлическое сопротивление колонны. Гидравлическое сопротивление сухой насадки находят по диаграмме [19, рисунок 3].

Гидравлическое сопротивление орошаемой насадки находят по формуле (2.30) [21]:

$$\Delta P = 10^{169 \cdot U} \cdot \Delta P_{сух}. \quad (2.30)$$

Плотность орошения в верхней и нижней частях колонны определяют по формулам (2.31) и (2.32) [21]:

- для верхней части колонны

$$U_B = \frac{L_B}{\rho_{ж} \cdot 0,785 \cdot d^2}; \quad (2.31)$$

- для нижней части колонны

$$U_H = \frac{L_H}{\rho_{ж} \cdot 0,785 \cdot d^2}; \quad (2.32)$$

Определяют общее сопротивление орошаемой насадки  $\Delta P$ .

2.1.30 Проводят расчет диаметра штуцеров в колонном аппарате исходя из материального баланса.

2.1.31 Проводят тепловой расчет ректификационной колонны.

Расход теплоты, получаемой кипящей жидкостью от конденсирующего пара в кубе-испарителе колонны определяют по формуле (2.33) [22]:

$$Q_K = Q_D + G_D \cdot C_D \cdot t_D + G_W \cdot C_W \cdot t_W - G_F \cdot C_F \cdot t_F + Q_{пот}; \quad (2.33)$$

где  $Q_D$  – расход теплоты, отнимаемой охлаждающей водой от конденсирующихся в дефлегматоре паров, Вт;

$Q_{\text{пот}}$  – тепловые потери колонны в окружающую среду, Вт;

$C_F$  – теплоёмкость исходной смеси, Дж/кг·К;

$C_D$  – теплоёмкость дистиллята, Дж/кг·К;

$C_W$  – теплоёмкость кубовой жидкости, Дж/кг·К.

Значения теплоемкостей, необходимые для расчета, находят по формуле (2.34) [22]:

$$C = C_{22} \cdot \bar{X}_A + C_{21} \cdot (1 - \bar{X}_B), \quad (2.34)$$

где  $C_{22}$ ,  $C_{21}$  – теплоемкость компонентов при соответствующих температурах;

$\bar{X}_A$ ,  $\bar{X}_B$  – массовые доли компонентов.

Находят теплоемкости смесей  $C_F$ ,  $C_D$ ,  $C_W$ .

Количество тепла, отнимаемого охлаждающей водой от конденсирующегося в дефлегматоре пара определяют по формуле (2.35) [22]:

$$Q_D = G_D \cdot (R + 1) \cdot r_D, \quad (2.35)$$

где  $r_D$  – удельная теплота конденсации дистиллята, Дж/кг, определяют по формуле (2.36) [22]:

$$r_D = r_{22} \cdot \bar{X}_D + r_{21} \cdot (1 - X_D), \quad (2.36)$$

где  $r_{22}$ ,  $r_{21}$  – удельная теплота конденсации компонентов НКК и ВКК при температуре  $t_D$ .

Тепловые потери колонны в окружающую среду определяют по формуле (2.37) [22]:

$$Q_{\text{пот}} = \alpha \cdot F_H \cdot (t_{\text{ст.н}} - t_{\text{возд}}), \quad (2.37)$$

где  $t_{\text{ст.н}}$  – температура наружной поверхности стенки колонны;

$t_{\text{возд}}$  – температура воздуха в помещении.

$\alpha$  – суммарный коэффициент теплоотдачи конвекцией и излучением, Вт/(м<sup>2</sup>·К) определяют по формуле (2.38) [22]:

$$\alpha = 9,3 + 0,058 \cdot t_{\text{ст.н}}. \quad (2.38)$$

$F_H$  – наружная поверхность изоляции колонны, определяют по формуле (2.39) [22]:

$$F_H = \pi \cdot D \cdot H_K + 2 \cdot 0,785 \cdot D^2. \quad (2.39)$$

Определяется расход греющего пара (выбираются параметры пара давление  $p_{абс}$ , влажность) по формуле (2.40) [22]:

$$G_{гр.п} = \frac{Q_K}{r_{гр.п} \cdot x}, \quad (2.40)$$

где  $r_{гр.п}$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг.

Расход теплоты отдаваемой охлаждающему рассолу в холодильнике дистиллята определяется по формуле (2.41) [22]:

$$Q = G_F \cdot C_F \cdot (t_F - t_{кон}), \quad (2.41)$$

где  $C_F$  – теплоемкость дистиллята, Дж/кг·К.

$$C_F = C_{22} \cdot \bar{X}_F + C_{21} \cdot (1 - \bar{X}_F),$$

где  $C_{22}, C_{21}$  – теплоемкость компонентов, Дж/кг·К, при температуре  $t_{ср}$ ;

$\bar{X}_F$  – массовая доля НКК в исходной смеси, в мольных долях.

Приведенная выше методика позволяет:

- составить материальный баланс колонны;
- составить тепловой баланс колонны;
- определить размеры колонного аппарата (диаметр, высоту и др.).

### 3 Описание технологической схемы

Дихлорэтан-сырец из хранилищ дихлорэтана-сырца (ДХЭ-сырца) насосом поз.11<sub>1-3</sub> или насосом поз.12 подается под низ верхней царги колонны отгонки низкокипящих компонентов поз.1 [3].

Колонна поз.1 насадочного типа, имеет 2 слоя насадки Зульцер Mellapak 250У, колонна выполнена из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т. Колонна поз.1 снабжена выносными кипятильниками поз.4<sub>1,2</sub>, обогреваемыми паром низкого давления. Колонна служит для отгонки газообразных веществ, абсорбированных дихлорэтаном на стадии хлорирования этилена.

Объемный расход ДХЭ-сырца на ректификацию 15-20 м<sup>3</sup>/ч регулируется на ДПУ прибором FIC поз.1-1<sub>1</sub> вручную или автоматически с помощью контроллера FICУ поз.1-2 и регистрируется по прибору FFR поз.1-4. Контроль расхода дихлорэтана (ДХЭ) по месту осуществляется по прибору FE поз.1-3.

В целях улучшения отгонки легколетучих примесей и экономии пара в период нормальной эксплуатации системы ректификации ДХЭ производится подогрев холодного дихлорэтана-сырца перед входом в колонну поз.1 горячими газами из шлемовой части колонны в теплообменник поз.3.

Холодный ДХЭ поступает в трубное пространство теплообменника поз.3, где подогревается до температуры 72-75 °С. Подогрев ведется горячими шлемовыми газами колонны, поступающими в межтрубное пространство подогревателя. Температура подогрева контролируется прибором TJR поз.5<sub>1</sub>.

В период вывода теплообменника поз.3 на профилактическую чистку и в ремонт, ДХЭ-сырец перед входом в колонну поз.1 подогревается в подогревателе поз.2 до температуры 80-85 °С. Подогрев ведется паром низкого давления, подаваемым в межтрубное пространство подогревателя. Температура подогрева регулируется на ДПУ регулятором TIC поз.6 и контролируется прибором TJR поз.5<sub>1</sub>.

Температура верха колонны поз.1 75-85 °С контролируется на ДПУ прибором TRY 7<sub>1</sub>.

Температура куба колонны поз.1 85-90 °С контролируется на ДПУ прибором TRУ поз. 7<sub>2</sub>.

Подогрев жидкости в кубе колонны поз.1 осуществляется паром низкого давления, подаваемым в кипятильник поз.4<sub>1,2</sub> не более 600 кг/ч, контроль и регулирование осуществляется с помощью прибора FIC поз.1-1<sub>2</sub> с ДПУ.

Давление в кубе колонны поз.1 контролируется по месту прибором PI поз.8 и на ДПУ с помощью прибора PRУ поз.9 не более 0,1 МПа.

Пары дихлорэтана и низкокипящих компонентов из верхней части колонны поз.1 поступают в конденсаторы поз.6<sub>1,2</sub>, охлаждаемые обратной водой. Сконденсировавшийся в них дихлорэтан поступает через фазоразделитель в сборник флегмы поз.9.

В сборнике флегмы поз.9 происходит отделение ДХЭ от влаги. Влага, отогнанная в результате азеотропной отгонки, отбирается из верхней части сборника поз.9 через сифон и сливается в сборник поз.7.

Дихлорэтан, освобожденный от низкокипящих примесей и влаги, из нижней части сборника поз.9 самотеком подается на флегмирование колонны поз.1.

Несконденсировавшиеся в конденсаторе поз.6<sub>1,2</sub> пары дихлорэтана и низкокипящие компоненты из фазоразделителя поступают в обратный холодильник поз.5, охлаждаемый рассолом с температурой минус 15 °С.

Температура абгазов 0-5 °С на выходе из холодильника поз.5, регулируется подачей рассола в теплообменник регулятором расхода TIRC поз.10, установленным на ДПУ.

Сконденсировавшийся ДХЭ из нижней части холодильника поз.5 направляется в сборник дихлорэтана поз.7.

Обводненный ДХЭ из сборника дихлорэтана поз.7 по гибкому шлангу выводится в одну из промежуточных емкостей 9-Е<sub>1</sub> 9-Е<sub>2</sub>, заполненных по 400 л чистой воды в каждой. Заполнение производится до объема 800 л, затем вывод обводненного ДХЭ из сборника ДХЭ поз.7 настраивается во вторую емкость.

В заполненной обводненным ДХЭ емкости происходит растворение хлористого водорода в воде и разделение фаз. После 12 часов разделения и отстоя нижний слой, до границы раздела фаз, передавливается азотом низкого давления по линии дренажа в сборник обводненного ДХЭ. Имеется возможность вывода обводненного ДХЭ в хранилище. Для поддержания постоянного давления 0,1 МПа в емкостях 9-Е<sub>1,2</sub>, на линии подачи азота установлено редуцирующее устройство РС-1.

Затем освобожденная емкость заполняется чистой водой и готова к работе.

Операции по заполнению обводненным ДХЭ, разделению и расслоению фаз производятся попеременно двумя емкостями.

Имеется возможность вывода ДХЭ из нижней части сборника поз.7 в хранилище ДХЭ-сырца.

Инерты из верхней части обратного холодильника поз.5 поступают на промывку в санитарный скруббер поз.8<sub>1,2</sub>. Промытые в скруббере поз.8<sub>1,2</sub> нейтральные газы через огнепреградитель сбрасываются в атмосферу, а вода сливается в химзагрязненную канализацию.

Санитарный скруббер поз.8<sub>1,2</sub> представляет собой цилиндрический аппарат, имеющий один слой упорядоченной насадки из колец "Рашига" 50x50 мм.

Дихлорэтан из куба колонны поз. по уровню откачивается насосом поз.10<sub>1,2</sub> в колонну отделения высококипящих компонентов. Уровень в кубе колонны поз.1 поддерживается 40-80% регулятором уровня местного монтажа ЛИС поз.11, регулирующий клапан которого установлен на линии вывода дихлорэтана из куба колонны поз.1. Контроль за уровнем осуществляется по месту прибором LI поз.12 и на ДПУ по прибору LI поз.13.

На ДПУ предусмотрена световая сигнализация о работе насосов системы ректификации дихлорэтана:

- поз.10<sub>1,2</sub> прибором МА поз.20

Предусмотрен контроль объемной доли (ДХЭ) в производственном помещении. Осуществляется это следующим образом, при достижении объемной

доли ДХЭ в воздухе производственного помещения 30% от НКДХЭ срабатывают световая и звуковая сигнализации на ДПУ по прибору QA поз.18 и над входными дверьми в производственное помещение по прибору QA поз.19.

### 3.1 Выбор и обоснование технических средств автоматизации и контроля

Для получения ДХЭ заданного качества и производительности на стадии отгонки низкокипящих примесей необходимо контролировать и регулировать следующие основные параметры:

Контролируемые параметры:

- расход дихлорэтана-сырца поз.FE 1-3;
- температуру подогрева ДХЭ поз.TJR 5;
- температуру верха колонны поз.TRY 7<sub>1</sub>;
- температуру куба колонны поз.TRY 7<sub>2</sub>;
- давление в кубе колонны поз.PI 8, поз.PRY 9;

Регулируемые параметры:

- объемный расход дихлорэтана-сырца поз.FIC 1-1<sub>1</sub>;
- температура подогрева дихлорэтана-сырца поз.TIC 6;
- подогрев жидкости в кубе колонны поз.FIC 1-1<sub>2</sub>;
- температура абгазов на выходе из холодильника поз.TIRC 10;
- уровень в кубе колонны поз.LIC 11;

Сигнализируемые параметры:

- контроль объемной доли ДХЭ в производственном помещении поз.QA 18, поз.QA 19;
- контроль работы насосов системы ректификации поз.МА 20;

Из всех параметров процесса, следует выбрать те, которые подлежат регулированию.

Показателем эффективности работы системы является температура и давление в колонне поз.1.

На эти параметры воздействуют:

- температура греющего пара;
- изменение расхода подаваемого в колонны продукта;
- температура окружающей среды;

В работе используются следующие системы автоматического регулирования:

- объемный расход дихлорэтана-сырца поз.FIC 1<sub>1</sub>;
- температура подогрева дихлорэтана-сырца поз.TIC 6;
- подогрев жидкости в кубе колонны поз.PRY 9;
- температура абгазов на выходе из холодильника поз.TIRC 10;
- уровень в кубе колонны поз.LI 13;

Управление, контроль и регулирование технологического процесса производства осуществляется с диспетчерского пульта управления (ДПУ), с помощью средства дистанционного контроля, управления и регулирования. Питание осуществляется сжатым воздухом 1,4 кгс/см<sup>2</sup>. Все приборы вынесены на центральный щит диспетчерского пульта управления (ДПУ), и отделенный от производственных помещений капитальными стенами. В зимнее время предусмотрен обогрев шкафов с датчиками.

Для возможности местного контроля и регулирования технологического процесса предусмотрена установка приборов контроля и регулирования по месту.

### 3.1.1 Контроль и регулирование расхода.

Дистанционный контроль, регулирование, измерение расходов продуктов и энергетических средств, участвующих в технологическом процессе стадии отгонки низкокипящих компонентов ведется приборами расхода:

- регулирование расходов на ДПУ осуществляется с помощью измерителей-регуляторов автоматических ИРТ-5920Н в паре с клапанами регулирующими ПОУ-7М.Э установленным по месту;
- контроль и регистрация расходов на центральном щите выполняется приборам типа РПВ4.2Э;

- контроль расходов продуктов ректификации по месту осуществляется расходомером Метран 150RFA [23];

Автоматическое регулирование и регистрация расходов ведется с помощью контроллера Базис-21.

### 3.1.2 Контроль и регулирование температуры.

Общий контроль и регистрация температуры осуществляется приборами типа КСП-4, работающими с термоэлектрическими преобразователями типа ТХК, и КСМ-4 работающими в комплекте с термопреобразователями сопротивления типа ТСМ.

Температура подогрева ДХЭ регулируется прибором ИРТ-5920Н в паре с клапаном регулирующим ПОУ-7М.Э установленным по месту.

### 3.1.3 Контроль и регулирование уровня.

Для регулирования и контроля уровня применяется уровнемер буйковый Метран-249 [23], электропневматический позиционер ЭПП-300, работающий в комплекте с вторичным прибором ПКП.1Э, и клапаном регулирующим ПОУ-7М.Э.

### 3.1.4 Контроль давления.

Для контроля и регистрации давления применены датчики давления серии Метран-100ДИ, манометры пневматические типа МС-П, в комплекте с вторичными приборами типа, ПВ10.1Э.

### 3.1.5 Сигнализация.

Контроль объемной доли дихлорэтана (ДХЭ) в воздухе рабочей зоны осуществляется газоанализаторами стационарными ЭРИС-TVOC.

Работа насосов системы ректификации контролируется с помощью световой сигнализации установленной на ДПУ.

Системой предусматривается световая и звуковая сигнализация отклонений технологических параметров от нормы. На диспетчерский пульт управления (ДПУ) вынесена сигнализация основных технологических параметров.

Питание пневматических приборов системы автоматизации осуществляется осушенным сжатым воздухом по ГОСТ 17433-80, от существующего вво-

да. Расход воздуха до 6 м<sup>3</sup>/ч. Подготовка сжатого воздуха для питания средств автоматизации существующего пульта управления осуществляется централизованным узлом, для питания вне щитовых приборов, с помощью индивидуальных фильтров-редукторов.

Электропитание контрольно-измерительных приборов осуществляется с помощью блоков питания БПС-906.

В отношении обеспечения надежности электроснабжения приборы относятся ко II категории. Потребляемая мощность не более 2 кВт.

Предусмотрен автоматический контроль и регулирование всех основных параметров процесса с сигнализацией их отклонений от номинальных значений с помощью контроллера Базис-21 установленным на диспетчерском пульте управления (ДПУ).

Обозначения приборов и средств автоматизации на схеме приняты в соответствии с ГОСТ 21.208-2013 [24].

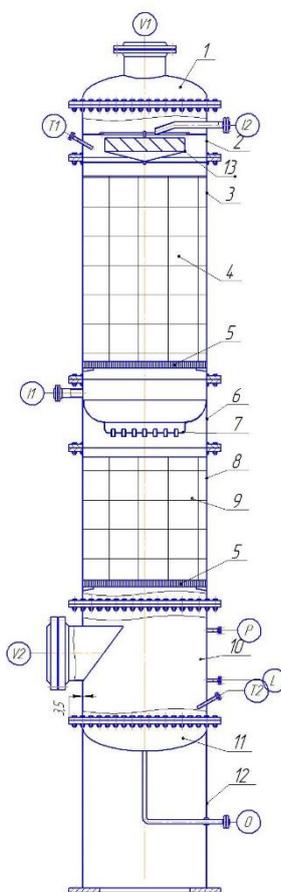
Выводы:

- в этой главе была рассмотрена схема очистки ДХЭ стадии отгонки легколетучих компонентов действующего производства дихлорэтана;
- разработана система контроля технологических параметров данной стадии для получения продукта заданного количества и качества;
- произведен выбор оборудования КИП и А для данной стадии технологического процесса.

#### 4 Описание конструкции и принципа работы ректификационной колонны

На основании обзора научно-технической и патентной литературы в качестве контактных элементов в ректификационной колонне на стадии отгонки низкокипящих компонентов выбрана регулярная насадка Зульцера – Mellapak 250Y [19].

На рисунке 4.1 показан общий вид выбранного аппарата для проведения процесса ректификации



- 1 - днище верхнее; 2 - царга; 3 - обечайка; 4 - верхний слой насадки;  
5 - опорная решетка; 6 - царга; 7 - перераспределительное устройство;  
8 - цилиндрический корпус; 9 - нижний слой насадки; 10 - царга;  
11 - днище нижнее; 12 - опора; 13- распределительное устройство.

Рисунок 4.1 - Ректификационная колонна

Колонна изготовлена из стали 12Х18Н10Т и имеет следующие рабочие режимы:

- давление  $1 \text{ кгс/см}^2$  (0,1 МПа);
- температура 84,5-100 °С.

Колонна поз.1 установлена в вертикальном положении на типовой опоре 12. Опора представляет собой цилиндрическую обечайку с кольцевым опорным поясом, она придает большую устойчивость и снижает удельное давление на опорную поверхность.

Ректификационная колонна имеет цилиндрический корпус 8, внутри которого установлены контактные устройства в виде регулярной насадки 4 и 9, которые расположены на опорных решетках 5.

Снизу вверх по колонне движутся пары [5], поступающие в нижнюю часть аппарата из кипятильника (через штуцер V2), который находится вне колонны, т. е. является выносным, либо размещается непосредственно под колонной. Следовательно, с помощью кипятильника создается восходящий поток пара. Пары проходят через слой жидкости в насадке снизу вверх.

Пар, представляющий собой на выходе из кипятильника почти чистый высококипящий компонент (ВКК), по мере движения вверх все более обогащается низкокипящим компонентом (НКК) и покидает верхнюю часть колонны в виде почти чистого НКК (из штуцера V1), который практически полностью переходит в паровую фазу на пути пара от кипятильника до верха колонны.

Пары конденсируются в дефлегматоре, и получаемая жидкость разделяется в делителе на дистиллят и флегму, которая возвращается в верхнюю часть колонны (через штуцер L2). Следовательно, с помощью дефлегматора в колонне создается нисходящий поток жидкости.

Жидкость, поступающая на орошение колонны (флегма), представляет собой почти чистый НКК [5]. Флегма подается в распределитель центробежного типа 13, который обеспечивает равномерность орошения насадки. Стекая по колонне и взаимодействуя с паром, жидкость все более обогащается ВКК, конденсирующимся из пара. Когда жидкость достигает нижней части колонны, она

становится практически чистым ВКК и поступает в кипятильник (через штуцер О), обогреваемый глухим паром.

На некотором расстоянии от верха колонны к жидкости из дефлегматора присоединяется исходная смесь, которая поступает на так называемую питающую тарелку колонны (через штуцер L1).

Для того чтобы уменьшить тепловую нагрузку кипятильника, исходную смесь обычно предварительно нагревают в подогревателе до температуры кипения жидкости на питающей тарелке.

В таблице 4.1 показаны штуцеры, расположенные на ректификационной колонне (рисунок 4.1).

Таблица 4.1 – Таблица штуцеров

Обозначение	Назначение	Кол-во	Условный проход, мм	Условное давление, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )
V2	Вход пара	1	-	-
L2	Вход флегмы	1	-	-
L1	Вход питания	1	-	-
V1	Выход пара	1	-	-
О	Выход кубовой жидкости	1	-	-
L	Для камеры уровнемера	2	50	-
T1, T2	Для замера температуры	2	M20x1,5	-
P	Для замера давления	2	50	0,1 (1)

#### 4.1 Краткая характеристика технологического оборудования применяемого на стадии очистки ДХЭ

Подогреватель ДХЭ-сырца поз.2:

- изготовлен из SS41L;
- горизонтальный кожухотрубчатый аппарат;
- давление трубного пространства 1 кгс/см<sup>2</sup> (0,1 МПа);
- давление межтрубного пространства не более 5,5 кгс/см<sup>2</sup> (0,55 МПа);
- температура трубного пространства 75-85 °С;
- температура межтрубного пространства 160 °С;

Подогреватель ДХЭ поз.3:

- сталь углеродистая Ст.20;
- вертикальный кожухотрубчатый аппарат;
- давление трубного пространства  $1 \text{ кгс/см}^2$  (0,1 МПа);
- давление межтрубного пространства  $1 \text{ кгс/см}^2$  (0,1 МПа);
- температура трубного пространства 75-85 °С;
- температура межтрубного пространства 85-95 °С;

Кипятильник поз.4<sub>1</sub>:

- сталь 12Х18Н10Т;
- вертикальный кожухотрубчатый аппарат;
- давление трубного пространства  $1 \text{ кгс/см}^2$  (0,1 МПа);
- давление межтрубного пространства не более  $5,5 \text{ кгс/см}^2$  (0,55 МПа);
- температура трубного пространства 99,5 °С;
- температура межтрубного пространства 160 °С;

Кипятильник поз.4<sub>2</sub>:

- сталь 12Х18Н10Т;
- вертикальный кожухотрубчатый аппарат;
- давление трубного пространства (расчетное)  $16 \text{ кгс/см}^2$  (1,6 МПа);
- давление трубного пространства (рабочее)  $1 \text{ кгс/см}^2$  (0,1 МПа);
- давление межтрубного пространства (расчетное)  $14,9 \text{ кгс/см}^2$

(1,49МПа);

- давление межтрубного пространства (рабочее) не более  $5,5 \text{ кгс/см}^2$

(0,55МПа);

- температура трубного пространства (расчетное) минус 20-100 °С;
- температура трубного пространства (рабочее) 85-90 °С;
- температура межтрубного пространства (расчетное) минус 20 – 200 °С;
- температура межтрубного пространства (рабочее) 160 °С;

Холодильник поз.5:

- графит;
- блочный аппарат;
- давление в камере продукта  $1 \text{ кгс/см}^2$  (0,1 МПа);

- давление в камере теплоносителя  $5,0 \text{ кгс/см}^2$  (0,5 МПа);
- температура в камере продукта 0-28 °С;
- температура в камере теплоносителя минус 15 °С;

Конденсатор поз.6<sub>1,2</sub>:

- коробон
- блочный аппарат;
- давление в камере продукта  $1 \text{ кгс/см}^2$  (0,1 МПа);
- давление в камере теплоносителя атмосферное;
- температура в камере продукта 83 °С;
- температура в камере теплоносителя 28 °С;

Сборник ДХЭ поз.7:

- сталь 12Х18Н10Т;
- фторопласт;
- вертикальный цилиндрический аппарат;
- давление  $1 \text{ кгс/см}^2$  (0,1 МПа);

Санитарный скруббер поз.8<sub>1,2</sub>:

- сталь углеродистая гуммированная;
- давление атмосферное;
- температура 20-30 °С;
- диаметр 250 мм;
- высота 3200 мм.

Емкость для разделения обводненного ДХЭ поз.9-Е<sub>1</sub>:

- сталь углеродистая, эмалированная;
- вертикальный цилиндрический аппарат;
- давление не более  $2,0 \text{ кгс/см}^2$  (0,2 МПа);
- температура 5-30 °С;
- вместимость  $1,6 \text{ м}^3$ .

Емкость для разделения обводненного ДХЭ поз.9-Е<sub>2</sub>:

- сталь углеродистая эмалированная;
- вертикальный цилиндрический аппарат;

- давление не более  $2,0 \text{ кгс/см}^2$  ( $0,2 \text{ МПа}$ );
- температура  $5\text{-}30 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- вместимость  $1,0 \text{ м}^2$ .

Насос для откачки ДХЭ поз.10<sub>1</sub> из колонны:

- сталь углеродистая;
- центробежный;
- объемная производительность  $12 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- напор  $30 \text{ м ст.жидкости}$  ( $0,3 \text{ МПа}$ ) ;
- электродвигатель AORK ;
- частота вращения  $1440 \text{ мин}^{-1}$ ;
- мощность  $5,5 \text{ кВт}$ ;
- исполнение EG2.

Насос для подачи ДХЭ-сырца поз.11<sub>1</sub>:

- сталь углеродистая;
- центробежный;
- объемная производительность  $21 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- напор  $30 \text{ м ст. жидкости}$  ( $0,30 \text{ МПа}$ );
- электродвигатель HAR132 SZ2;
- частота вращения  $2890 \text{ мин}^{-1}$ ;
- мощность  $5,5 \text{ кВт}$ .

Насос для подачи ДХЭ-сырца поз.11<sub>2</sub>:

- сталь углеродистая;
- центробежный;
- объемная производительность  $45 \text{ м}^2/\text{ч}$ ;
- напор  $31 \text{ м ст. жидкости}$  ( $0,31 \text{ МПа}$ );
- электродвигатель ВАО-51-2;
- частота вращения  $2940 \text{ мин}^{-1}$ ;
- мощность  $10,0 \text{ кВт}$ ;
- исполнение ВЗГ.

Насос для перекачки ДХЭ поз.12:

- сталь н\ж;
- центробежный;
- объемная производительность 45 м<sup>2</sup>/ч;
- напор 54 м ст. жидкости (0,54 МПа);
- электродвигатель AORK;
- частота вращения 2930 мин<sup>-1</sup>;
- мощность 11,0кВт;
- исполнение eG3.

В данной главе был рассмотрен принцип действия ректификационной колонны очистки ДХЭ и приведены характеристики вспомогательного технологического оборудования применяемого на данной стадии.

## 5 Технологические расчеты основного оборудования

### 5.1 Исходные данные для расчета ректификационной колонны

Необходимо рассчитать ректификационную колонну непрерывного действия для разделения смеси 1,2- ДХЭ–1,1,2-ТХЭ

Краткая характеристика компонентов:

- 1,2 - ДХЭ, температура кипения равна 83,47 °С, принимаем его за низкокипящий компонент (НКК);

- 1,1,2 – ТХЭ, температура кипения равна 113,5 °С, соответственно принимаем его за высококипящий компонент (ВКК)

Исходные данные:

1) Давление в колонне 1 кгс/см<sup>2</sup> (0,1 МПа).

2) Производительность по исходной смеси  $F = 20 \text{ м}^3/\text{ч} = 6,9 \text{ кг/с}$ .

3) Содержание легколетучего компонента:

- в исходной смеси  $\bar{x}_f = 97,63 \text{ \% масс}$ ;

- в дистилляте  $\bar{x}_p = 99,27 \text{ \% масс}$ ;

- в кубовом остатке  $\bar{x}_w = 72,31\% \text{ масс}$ .

4) Регулярная насадка Зульцера Mellapak 250Y [19]

Расчет ректификационной колонны производится по методикам приведенным в работах [21], [22] и [19].

### 5.2 Материальный баланс

Уравнение общего материального баланса определяется по формулам (5.1) и (5.2):

$$F = P + W \quad (5.1)$$

$$F\bar{x}_f = P \cdot \bar{x}_p + W \cdot \bar{x}_w, \quad (5.2)$$

где  $F$  – расход исходной смеси, кг/с;

$P$  – расход дистиллята, кг/с;

$W$  – расход кубового остатка, кг/с.

Решаем эти два уравнения совместно и определяем расходы дистиллята и кубового остатка по формулам (5.3) и (5.4)

$$P = \frac{F \cdot \overline{x_f} - \overline{x_w}}{\overline{x_p} - \overline{x_w}}, \quad (5.3)$$

$$P = \frac{6,9 \cdot 0,9763 - 0,7231}{0,9927 - 0,7231} = 6,48 \text{ кг/с,}$$

$$W = F - P, \quad (5.4)$$

$$W = 6,9 - 6,48 = 0,42 \text{ кг/с.}$$

Для дальнейших расчетов пересчитаем по формуле (5.5) составы фаз из массовых долей в мольные по соотношению:

$$x_f = \frac{\overline{x_f} / M_{\text{ДХЭ}}}{\frac{\overline{x_f}}{M_{\text{ДХЭ}}} + \frac{1 - \overline{x_f}}{M_{\text{ТХЭ}}}} \quad (5.5)$$

Питание:

$$x_f = \frac{\frac{0,9763}{98}}{\frac{0,9763}{98} + \frac{1 - 0,9763}{133,4}} = 0,9822 \text{ кмоль/кмоль смеси,}$$

где  $M_{\text{ДХЭ}} = 98$  – молекулярная масса 1.2-дихлорэтана, кг/кмоль,

$M_{\text{ТХЭ}} = 133,4$  – молекулярная масса 1.1.2 трихлорэтана, кг/кмоль.

Дистиллят:

$$x_p = \frac{\frac{0,9927}{98}}{\frac{0,9927}{98} + \frac{1 - 0,9927}{133,4}} = 0,995 \text{ кмоль/кмоль смеси.}$$

Кубовый остаток:

$$x_w = \frac{\frac{0,7231}{98}}{\frac{0,7231}{98} + \frac{1-0,7231}{133,4}} = 0,78 \text{ кмоль/кмоль смеси.}$$

Строим диаграмму равновесия, заносим равновесные составы жидкости (x) и пара (y) в мол. % и температуры кипения жидкостей (t) в °С в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Равновесные составы жидкости и пара

x	1	0,766	0,611	0,470	0,370	0,279	0,202	0,137	0,08	0,03
y	1	0,884	0,795	0,68	0,59	0,486	0,381	0,279	0,174	0,069
t	83,5	86,68	92,8	95,9	99,0	102,1	105,2	108,3	111,4	114

По данным таблицы 5.1 строим кривую равновесия в координатах x-y (рисунок 5.1). Проводим диагональ на графике x-y. Затем на оси абсцисс откладываем значение концентраций  $x_f$ ,  $x_p$ ,  $x_w$ . Из точек  $x_w$  и  $x_p$  восстанавливаем перпендикуляры до пересечения с диагональю и получаем точки  $x_w = y_w$ ;  $x_p = y_p$ .

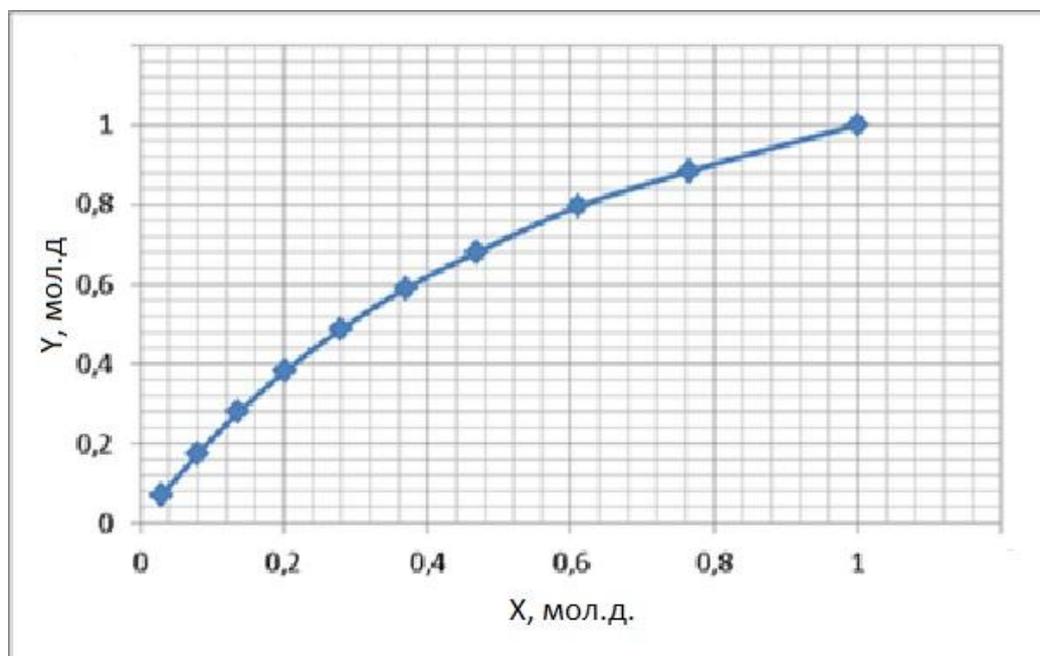


Рисунок 5.1 - X-Y диаграмма равновесия

Нагрузки ректификационной колонны по пару и жидкости зависят от рабочего флегмового числа. Оптимальное значение флегмового числа определяют путем технико-экономического расчета.

$R_{\min}$  - минимальное флегмовое число, которое определяется по формуле (5.6):

$$R_{\min} = \frac{x_p - y_f^*}{y_f^* - x_f}, \quad (5.6)$$

где  $x_p$ ,  $x_f$  - мольные доли легколетучего компонента соответственно в исходной смеси и дистилляте;

$y_f^*$  - концентрация легколетучего компонента в паре, находящемся в равновесии с исходной смесью.

$$y_f^* = 0,98.$$

Тогда минимальное флегмовое число равно:

$$R_{\min} = \frac{0,995 - 0,98}{0,98 - 0,78} = 0,136.$$

Действительное флегмовое число рассчитываем по формуле (5.7):

$$R = 1,3 \cdot R_{\min} + 0,3, \quad (5.7)$$

$$R = 1,3 \cdot 0,136 + 0,3 = 0,477.$$

- для исчерпывающей (нижней) части колонны, формула (5.8):

$$y_n = \frac{R + F}{R + 1} \cdot x - \frac{F - 1}{R + 1} x_w, \quad (5.8)$$

где  $R$  - рабочее (оптимальное) флегмовое число.

$F$ - число питания определяется по формуле (5.9):

$$F = \frac{x_p - x_w}{x_f - x_w}, \quad (5.9)$$

$$F = \frac{0,995 - 0,78}{0,9822 - 0,78} = 1,06.$$

### 5.3 Определение скорости пара и диаметра колонны

Определяем внутренние материальные потоки для верха и низа колонны.

#### 5.3.1 Верх колонны.

- количество пара, поднимающегося по колонне рассчитывается по формуле (5.10):

$$G_B = P \cdot R + 1, \quad (5.10)$$

$$G_B = 6,48 \cdot 0,477 + 1 = 9,57 \text{ кг/с.}$$

Количество стекающей жидкости находим по формуле (5.11):

$$L_B = P \cdot R, \quad (5.11)$$

$$L_B = 6,48 \cdot 0,477 = 3,09 \text{ кг/с.}$$

Концентрация легколетучего компонента в паре определяем по формуле (5.12):

$$y_{\text{ср.в}} = \frac{y_f + y_p}{2}, \quad (5.12)$$

$$y_{\text{ср.в}} = \frac{0,99 + 0,98}{2} = 0,985 \text{ кмоль/кмоль смеси,}$$

где  $y_f$  – содержание легколетучего компонента в паре, поднимающегося с питательной тарелки.

Средняя молекулярная масса пара вверху колонны находим по формуле (5.13):

$$M_y = M_{\text{ДХЭ}} \cdot y_{\text{ср.в}} + M_{\text{ТХЭ}} \cdot (1 - y_{\text{ср.в}}), \quad (5.13)$$

$$M_y = 98 \cdot 0,995 + 133,4 \cdot (1 - 0,995) = 98,2 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}.$$

Средняя температура верха колонны определяется по диаграмме  $t - x$ ,  $y$  изображенной на рисунке 5.2 по средней температуре пара.

$$t_{\text{ыв}} = 84,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

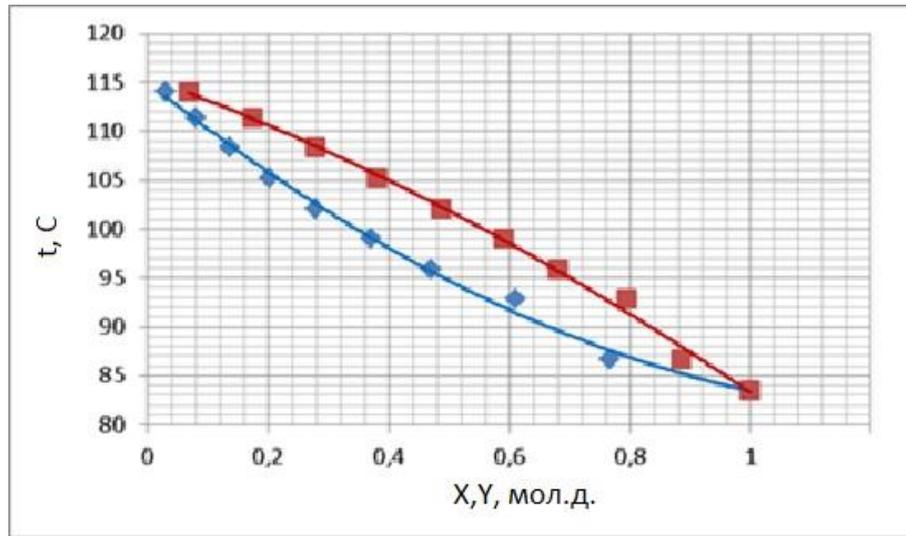


Рисунок 5.2 - t - x, y диаграмма

Плотность пара верха колонны рассчитываем по формуле (5.14):

$$\rho_{\text{ув}} = \frac{M_{\text{вУ}}}{22,4} \cdot \frac{273}{273 + t_{\text{ув}}}, \quad (5.14)$$

$$\rho_{\text{ув}} = \frac{98,2}{22,4} \cdot \frac{273}{273 + 84,5} = 3,35 \text{ кг/м}^3.$$

Тогда объемный расход пара в верхней части колонны определим по формуле (5.15):

$$V_{\text{уг}} = \frac{G_{\text{г}}}{\rho_{\text{уг}}}, \quad (5.15)$$

$$V_{\text{ув}} = \frac{9,57}{3,35} = 2,86 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Средняя концентрация жидкости рассчитывается по формуле (5.16):

$$x_{\text{ср.в}} = \frac{x_{\text{п}} + x_{\text{ф}}}{2}, \quad (5.16)$$

$$x_{\text{ср.в}} = \frac{0,9822 + 0,995}{2} = 0,9886 \text{ кмоль/кмоль смеси}.$$

Плотность жидкости определяется по формуле (5.17):

$$\rho_{\text{хв}} = \rho_{\text{дхэ}} \cdot x_{\text{ср.в}} + \rho_{\text{тхэ}} \cdot (1 - x_{\text{ср.в}}), \quad (5.17)$$

$$\rho_{\text{хв}} = 1257 \cdot 0,9886 + 1442 \cdot (1 - 0,9886) = 1259 \text{ кг/м}^3,$$

где  $\rho_{\text{вх}} = 1257 \text{ кг/м}^3$  – плотность 1,2-дихлорэтана;

$\rho_{\text{ТХЭ}} = 1442 \text{ кг/м}^3$  - плотность 1,1,2-трихлорэтана.

Объемный расход жидкости найдем по формуле (5.18):

$$V_{\text{ХВ}} = \frac{L_{\text{В}}}{\rho_{\text{ХВ}}}, \quad (5.18)$$

$$V_{\text{ХВ}} = \frac{3,09}{1259} = 0,0024 \text{ м}^3/\text{с}.$$

### 5.3.2 Низ колонны.

Средняя концентрация пара определяется по формуле 5.19:

$$y_{\text{ср.н}} = \frac{y_w + y_f}{2}, \quad (5.19)$$

$$y_{\text{ср.н}} = \frac{0,98 + 0,88}{2} = 0,93 \text{ кмоль/кмоль смеси}.$$

Среднюю температуру пара низа колонны, соответствующая средней концентрации пара низа колонны определяем по диаграмме  $t - x, y$  изображенной на рисунке 2.

$$t_{\text{ср.н}} = 85,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

Средняя молекулярная масса пара низа колонны рассчитаем по формуле (5.20):

$$M_{\text{ср.н}} = M_{\text{ДХЭ}} \cdot y_{\text{ср.н}} + M_{\text{ТХЭ}} \cdot (1 - y_{\text{ср.н}}), \quad (5.20)$$

$$M_{\text{ср.н}} = 98 \cdot 0,93 + 133,4 \cdot (1 - 0,93) = 100,5 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}.$$

Плотность пара найдем по формуле (5.21):

$$\rho_{\text{ун}} = \frac{M_{\text{ср.н}}}{22,4} \cdot \frac{273}{273 + t_{\text{ср.н}}}, \quad (5.21)$$

$$\rho_{\text{ср.н}} = \frac{100,5}{22,4} \cdot \frac{273}{273 + 85,2} = 3,42 \text{ кг/м}^3$$

Объемный расход пара определяется по формуле (5.22):

$$V_{\text{ун}} = \frac{G_{\text{н}}}{\rho_{\text{ун}}}, \quad (5.22)$$

$$V_{y.H} = \frac{9,57}{3,42} = 2,80 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Количество стекающей жидкости рассчитывается по формуле (5.23):

$$L_H = P \cdot R + F, \quad (5.23)$$

$$L_H = 6,48 \cdot 0,477 + 1,06 = 4,15 \text{ кг/с}.$$

Средняя концентрация жидкости находится по формуле (5.24):

$$x_{cp.H} = \frac{x_f + x_w}{2}, \quad (5.24)$$

$$x_{cp.H} = \frac{0,9822 + 0,78}{2} = 0,8811 \text{ кмоль/кмоль смеси}.$$

Средняя плотность жидкости определяется по формуле (5.25)

$$\rho_{x.H} = \rho_{дхэ} \cdot x_{cp.H} + \rho_{тхэ} \cdot (1 - x_{cp.H}), \quad (5.25)$$

$$\rho_{x.H} = 1257 \cdot 0,8811 + 1442 \cdot (1 - 0,8811) = 1279 \text{ кг/м}^3$$

Для ректификационных колонн, работающих пленочном режиме при атмосферном давлении, рабочую скорость принимают на 20 ÷ 30 % ниже скорости захлебывания.

Предельную фиктивную скорость пара, при которой происходит захлебывание колонны находим по формуле (5.26):

$$\lg \left[ \frac{\omega_{np}^2 \cdot a}{g \cdot \varepsilon^3} \cdot \frac{\rho_y}{\rho_x} \cdot \left( \frac{\mu_x}{\mu_g} \right)^{0,16} \right] = A - B \left( \frac{L}{G} \right)^{0,25} \cdot \left( \frac{\rho_y}{\rho_x} \right)^{1,8}, \quad (5.26)$$

где  $a$  – удельная поверхность насадки,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;

$g$  - ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$\varepsilon$  - свободный объем насадки,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;

$\mu_x$  - вязкость жидкости,  $\text{мПа} \cdot \text{с}$ ;

$A = - 0,125$ ;

$B = 1,75$ ;

$L$  и  $G$  - расход жидкости и пара,  $\text{кг}/\text{с}$ .

Насадка Mellapak-250Y фирмы Зульцер имеет следующие характеристики [19] :

- удельная поверхность  $a = 250 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ;

- свободный объем  $\varepsilon = 0,9 \text{ м}^3/\text{м}^3$ .

Вязкость жидкости рассчитываем по формуле (5.27):

$$\lg \mu_{\text{см}} = x_{\text{ср}} \lg \mu_{\text{дхэ}} + 1 - x_{\text{ср}} \cdot \lg \mu_{\text{тхэ}}, \quad (5.27)$$

где  $\mu_{\text{дхэ}} = 0,73 \text{ мПа} \cdot \text{с}$  – вязкость 1,2–дихлорэтана;

$\mu_{\text{трэ}} = 0,566 \text{ мПа} \cdot \text{с}$  – вязкость 1,1,2–трихлорэтана.

$$\lg \mu_x = 0,935 \cdot \lg 0,73 \cdot 10^{-3} + 1 - 0,935 \cdot \lg 0,566 \cdot 10^{-3} = -3,14$$

$$\mu_x = 0,72 \text{ мПа} \cdot \text{с}$$

Вязкость пара

$$\lg \mu_y = 0,935 \cdot \lg 0,0115 \cdot 10^{-3} + 1 - 0,935 \cdot \lg 0,0085 \cdot 10^{-3} = -4,97$$

$$\mu_y = 0,01 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Скорость пара вверху колонны найдем подставив найденные данные в уравнение (5.26)

$$\lg \left[ \frac{\omega_{\text{пр}}^2 \cdot 250}{9,81 \cdot 0,9^3} \cdot \frac{3,35}{1259} \cdot \left( \frac{0,72}{0,01} \right)^{0,16} \right] = -0,125 - 1,75 \cdot \left( \frac{9,57}{3,09} \right)^{0,25} \cdot \left( \frac{3,35}{1259} \right)^{1/8},$$

$$\lg \omega_3^2 0,18 = -1,26,$$

$$\omega_{\text{пр}} = 1,33 \text{ м/с}.$$

Скорость пара внизу колонны:

$$\lg \left[ \frac{\omega_{\text{пр}}^2 \cdot 250}{9,81 \cdot 0,9^3} \cdot \frac{3,42}{1279} \cdot \left( \frac{0,72}{0,01} \right)^{0,16} \right] = -0,125 - 1,75 \cdot \left( \frac{9,57}{4,15} \right)^{0,25} \cdot \left( \frac{3,42}{1279} \right)^{1/8},$$

$$\lg \omega_3^2 0,185 = -1,15,$$

$$\omega_{\text{пр}} = 1,2 \text{ м/с}.$$

Рабочая скорость определяется из формулы (5.28):

$$\omega = 0,9 \cdot \omega_{\text{пр}}, \quad (5.28)$$

$$\omega = 1,33 \cdot 0,9 = 1,2 \text{ м/с}.$$

Расчетный диаметр колонны находим по формуле (5.29):

$$D_p = \sqrt{\frac{4 \cdot v_y}{\pi \cdot \omega}}, \quad (5.29)$$

$$D_p = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,86}{3,14 \cdot 1,2}} = 1,74 \text{ м.}$$

Принимаем ближайшее большее из стандартного ряда:

$$D = 1,8 \text{ м.}$$

$$\omega = \frac{V}{0,785 \cdot D^2},$$

$$\omega = \frac{2,86}{0,785 \cdot 1,8^2} = 1,12.$$

#### 5.4 Расчет высоты насадки и колонны

Высоту насадки определяем нахождением числа единиц переноса  $m_y$  и высоты насадки  $h_y$ , эквивалентной одной единицы переноса по формуле (5.30).

$$H = m_y \cdot h_y. \quad (5.30)$$

Общее число единиц переноса определяем методом графического интегрирования.

Для этого составим таблицу 5.1 значений содержаний в паре для ряда точек рабочей линии, и соответствующих им, значений равновесных содержаний  $u_p$ .

Используем диаграмму равновесия и вычисляем для каждой точки величину  $\frac{1}{y_p - y}$ .

Сводим данные в таблицу 5.1 и строим график зависимости  $\frac{1}{y_p - y} - y$  изображенный на рисунке 5.3.

Найдем площадь под кривой изображенной на рисунке 5.3.

Получаем:

- для верхней части  $m_{ув} = 2,7;$

- для нижней части  $m_{ун} = 2,7.$

Таблица 5.1- Значения содержаний в паре для ряда точек рабочей линии

№ п/п	У	У <sub>р</sub>	у <sub>р</sub> - у	$\frac{1}{y_p - y}$
1	0,08	0,2	0,12	8
2	0,18	0,35	0,17	5,9
3	0,29	0,5	0,21	4,7
4	0,39	0,62	0,21	4,7
5	0,49	0,70	0,21	4,7
6	0,58	0,77	0,19	5,3
7	0,68	0,83	0,14	7,1
8	0,79	0,88	0,09	11,1
9	0,88	0,94	0,06	16,7
10	0,95	0,97	0,02	50
11	0,98	0,99	0,01	100

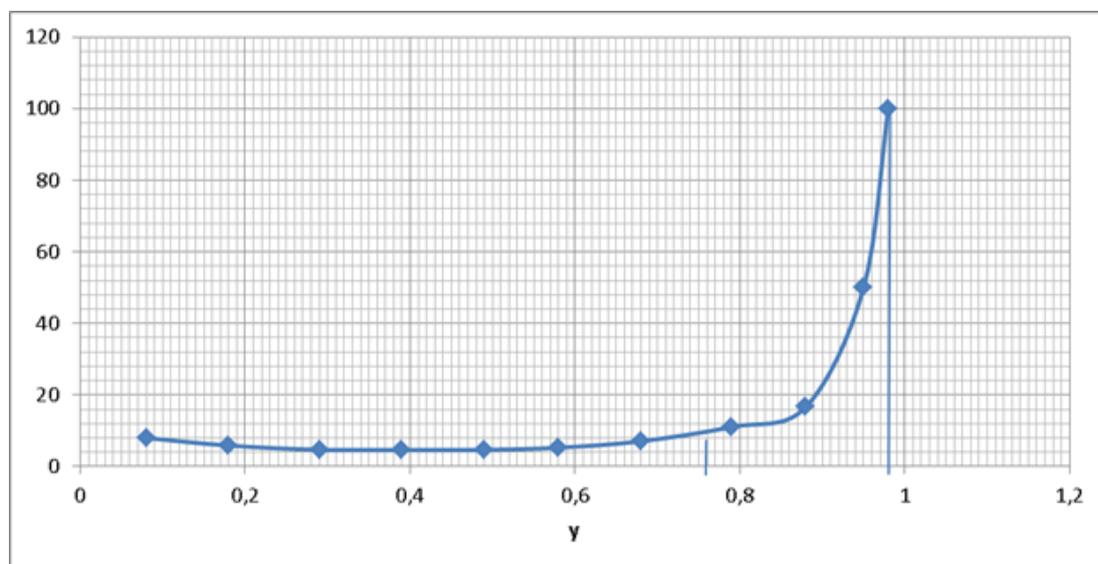


Рисунок 5.3 - График определения числа единиц переноса

Высота насадки  $h_y$ , эквивалентная одной единице переноса рассчитываем по формуле (5.31):

$$h_y = h_{oy} + \frac{m \cdot G}{L} \cdot h_{ox}, \quad (5.31)$$

где  $m$  – коэффициент распределения;

$G$  – количество пара, поднимающееся по колонне;

$L$  – количество жидкости, стекающей на колонне;

$h_{oy}$  и  $h_{ox}$  – высота насадки, эквивалентная одной единице переноса соответственно паровой и жидкой фаз.

Определяем коэффициент смачиваемости насадки  $\psi$  по графику [4]

$$\psi = f\left(\frac{u}{u_{opt}}\right). \quad (5.32)$$

Верх колонны.

Рассчитываем действительную плотность орошения по формуле (5.33)

$$u = \frac{V_{xb}}{S_k}, \quad (5.33)$$

где  $V_{xb} = 0,0024 \text{ м}^3 / \text{с} = 8,64 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;

$$u = \frac{4 \cdot 8,64}{3,14 \cdot 1,8^2} = 3,4 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Оптимальная плотность орошения определяем по формуле (5.34)

$$u_{opt} = v \cdot a, \quad (5.34)$$

где  $a = 250 \text{ м}^2/\text{м}^3$  – удельная поверхность насадки [19];

$v = 0,065$  – постоянный коэффициент для ректификации [5];

$$u_{opt} = 0,065 \cdot 250 = 16,25.$$

$$\frac{u}{u_{opt}} = \frac{3,4}{16,25} = 0,19.$$

Соответственно по графику [4]:

$$\psi = 0,2$$

Определяем по формуле (5.35) число Рейнольдса для паровой фазы:

$$\text{Re}_y = \frac{4\omega \cdot \rho_y}{\mu_y \cdot a}, \quad (5.35)$$

$$\text{Re}_y = \frac{4 \cdot 1,12 \cdot 3,35}{0,01 \cdot 10^{-3} \cdot 250} = 6003.$$

Определяем число Рейнольдса для жидкой фазы по формуле (5.36) :

$$\text{Re}_x = \frac{4 \cdot L}{\frac{\pi D^2}{4} \cdot a \cdot \mu_{\text{ж}}}, \quad (5.36)$$

$$\text{Re}_x = \frac{4 \cdot 3,09}{0,785 \cdot 1,8^2 \cdot 250 \cdot 0,72 \cdot 10^{-3}} = 26.$$

Рассчитываем коэффициент диффузии в жидкой  $D_x$  и паровой  $D_y$  фазах.

Коэффициент диффузии в жидкости при средней температуре ( $t$  °C) определяем по формуле (5.37) :

$$D_x = D_{x_{20}} \cdot [1 + \epsilon \cdot t - 20]. \quad (5.37)$$

$\mu_{\text{ex}} = 0,52$  мПа · с – вязкость смеси при 20 °C.

Коэффициент диффузии в жидкости  $D_{x_{20}}$  при 20 °C определим по формуле (5.38) :

$$D_{20} = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{A \cdot B \sqrt{\mu_x} \left( v_{\text{ex}}^{\frac{1}{3}} + v_{\text{mx}}^{\frac{1}{3}} \right)^2} \sqrt{\frac{1}{M_e} + \frac{1}{M_{y.k}}}, \quad (5.38)$$

где А, В – коэффициенты, зависящие от свойств веществ;

A = 1;

B = 1.

$$D_{20} = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 1 \cdot \sqrt{0,52} \cdot \left( 74^{\frac{1}{3}} + 59,2^{\frac{1}{3}} \right)^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{97} + \frac{1}{131,5}} = 5,56 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$$

Температурный коэффициент определим по формуле (5.39):

$$\epsilon = \frac{0,2 \cdot \sqrt{\mu_{\text{жс}}}}{3 \sqrt{\rho_{\text{жс}}}}, \quad (5.39)$$

$$B = \frac{0,2 \cdot \sqrt{0,72}}{3 \sqrt{1259}} = 0,016.$$

Отсюда:

$$D_x = 5,56 \cdot 10^{-9} [1 + 0,016 \cdot 84,5 - 20] = 0,75 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Рассчитываем число Прандтля жидкой фазы по формуле (5.40)

$$Pr' = \frac{\mu_{жс}}{\rho_{жс} \cdot D_x}, \quad (5.40)$$

$$Pr'_{KB} = \frac{0,72 \cdot 10^{-3}}{1259 \cdot 0,75 \cdot 10^{-8}} = 34$$

Рассчитываем коэффициент диффузии для газовой фазы по формуле (5.41):

$$D_{yг} = \frac{4,3 \cdot 10^{-7} \cdot T^{3/2}}{P \left( \nu_{г}^{\frac{1}{3}} + \nu_{y,к}^{\frac{1}{3}} \right)^2} \sqrt{\frac{1}{M_{г}} + \frac{1}{M_{y,к}}}, \quad (5.41)$$

где  $T$  – абсолютная температура паров;

$P$  – давление в колонне,  $\text{кг}/\text{см}^2$ .

$$D_{yг} = \frac{4,3 \cdot 10^{-7} \cdot 273 + 49}{0,1 \cdot \left( 74^{\frac{1}{3}} + 59,2^{\frac{1}{3}} \right)^2} \sqrt{\frac{1}{97} + \frac{1}{131,5}} = 5,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Определяем число Прандтля:

$$Pr'_{yB} = \frac{0,01 \cdot 10^{-3}}{3,35 \cdot 5,2 \cdot 10^{-6}} = 0,57.$$

Высоту  $h_{oy}$  (эквивалентная одной единице переноса) для паровой фазы вычисляем по формуле (5.42).

$$h_{oyB} = \frac{\varepsilon}{v \cdot a \cdot \psi} \cdot Re_y^{0,25} \cdot Pr_y'^{2/3}, \quad (5.42)$$

где  $v = 0,123$  – коэффициент, зависящий от вида насадки.

$$\psi = 0,5.$$

$$h_{oyB} = \frac{0,9}{0,123 \cdot 250 \cdot 0,2} \cdot 6004^{0,25} \cdot 0,57^{2/3} = 0,89 \text{ м}.$$

Высоту  $h_{oyB}$  (по жидкой фазе) вычисляем по формуле (5.43):

$$h_{ox} = 119 \cdot \left( \frac{\mu_{жс}^2}{\rho_{жс}^2 \cdot g} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot Re_{жс}^{0,25} \cdot Pr'_{жс}{}^{0,5}, \quad (5.43)$$

$$h_{ox} = 119 \cdot \left( \frac{0,72 \cdot 10^{-3}}{1259^2 \cdot 9,81} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot 26^{0,25} \cdot 34^{0,5} = 0,0051 \text{ м.}$$

Высоту насадки  $h_{yb}$  эквивалентную одной единице переноса, рассчитываем по формуле (5.44):

$$h_{yb} = h_{oy} + \frac{m_g \cdot G_g}{L_g} h_{ox}, \quad (5.44)$$

где  $m$  – коэффициент распределения (среднее значение тангенса наклона к оси  $x$  кривой равновесия смеси в координатах  $x$ - $y$ ).

Для верха колонны  $m_b = 1$ .

Для низа колонны  $m_n = 1$ .

Тогда:

$$h_{yb} = 0,89 + \frac{1 \cdot 9,57}{3,09} \cdot 0,0051 = 0,91 \text{ м.}$$

Высота насадки верхней части рассчитывается по формуле (5.45) :

$$H_B = h_{yb} \cdot m_{yb}, \quad (5.45)$$

$$H_B = 2,7 \cdot 0,93 = 2,5 \text{ м.}$$

Принимаем высоту секции насадки в верхней части колонны – 2,7м.

Для низа колонны рассчитываем плотность орошения находится по формуле (5.46):

$$U = \frac{V_{xH}}{S}, \quad (5.46)$$

$$U = \frac{4 \cdot 0,0032 \cdot 3600}{3,14 \cdot 1,8^2} = 4,5.$$

Отношение:

$$\frac{u}{u_{opt}} = \frac{4,5}{16,25} = 0,28.$$

По графику [4]:

$$\psi_H = 0,3.$$

Определяем число Рейнольдса для паровой фазы по формуле (5.47):

$$\text{Re}_{y_H} = \frac{4\omega \cdot \rho_y}{\mu_y \cdot a}, \quad (5.47)$$

$$\text{Re}_{y_H} = \frac{4 \cdot 1,12 \cdot 3,42}{0,01 \cdot 10^{-3} \cdot 250} = 6128.$$

Определяем число Рейнольдса для жидкой фазы:

$$\text{Re}_{x_H} = \frac{4 \cdot L}{\frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot a \cdot \mu_{ж}}, \quad (5.48)$$

$$\text{Re}_{x_H} = \frac{4 \cdot 4,15}{0,785 \cdot 1,8^2 \cdot 250 \cdot 0,72 \cdot 10^{-3}} = 36.$$

Коэффициенты диффузии равны:

$$D_{xH} = 0,75 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$D_{yH} = 5,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

Определяем число Прандтля для паровой фазы по формуле (5.49):

$$\text{Pr}'_{y_H} = \frac{\mu_y}{\rho_y \cdot D_y}, \quad (5.49)$$

$$\text{Pr}'_{y_H} = \frac{0,01 \cdot 10^{-3}}{3,42 \cdot 5,2 \cdot 10^{-6}} = 0,38.$$

Определяем число Прандтля для жидкой фазы по формуле (5.50):

$$\text{Pr}'_{x_H} = \frac{\mu_x}{\rho_x \cdot D_x}, \quad (5.50)$$

$$\text{Pr}'_{x_H} = \frac{0,72 \cdot 10^{-3}}{1279 \cdot 0,75 \cdot 10^{-8}} = 75.$$

Определяем  $h_{oy}$  и  $h_{ox}$  для низа колонны по формулам (5.51) и (5.52):

$$h_{oy_H} = \frac{\varepsilon}{v \cdot a \cdot \psi} \cdot \text{Re}_y^{0,25} \cdot \text{Pr}'_y^{2/3}, \quad (5.51)$$

$$h_{oy_H} = 0,45 \text{ м}.$$

$$h_{oxH} = 119 \cdot \left( \frac{\mu_{жс}^2}{\rho_{жс}^2 \cdot g} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot Re_{жс}^{0,25} \cdot Pr'_{жс}{}^{0,5}, \quad (5.52)$$

$$h_{oxH} = 0,08 \text{ м.}$$

Находим  $h_{yh}$  высоту (эквивалентную одной единице переноса) по формуле (5.53) :

$$h_{yh} = h_{oy} + \frac{m_n \cdot G_H}{L_H} h_{ox}, \quad (5.53)$$

$$h_{yh} = 0,45 + \frac{1,0 \cdot 9,57}{4,15} \cdot 0,08 = 0,63 \text{ м.}$$

Высота насадки нижней части колонны определим по формуле (5.54):

$$H_H = h_{yh} \cdot m_{yh}, \quad (5.54)$$

$$H_H = 0,63 \cdot 2,7 = 1,7 \text{ м.}$$

Принимаем высоту секции насадки в нижней части колонны – 1,8 м.

Общая высота насадки:

$$H = 2,7 + 1,8 = 4,5 \text{ м.}$$

Для обеспечения равномерного орошения насадки ее располагают слоями: высота одной секции насадки  $Z = (3-5) D$ . Получаем 2 секции, в верхней части 2,7 метра, а в нижней 1,8 метра. Расстояние между секциями  $h = 1$  м [21].

Общая высота колонны определяется по формуле (5.55):

$$H_k = Z \cdot n + (n-1) \cdot h + Z_B + Z_H, \quad (5.55)$$

где  $n$  – число секций;

$Z_B$  и  $Z_H$  - соответственно высота сепарационного пространства над насадкой и расстояние между днищем колонны и насадкой, м.

$$H_k = 2 \cdot 2,5 + (2 - 1) \cdot 1 + 1 + 2 = 8,5 \text{ м.}$$

Принимаем высоту колонны 9 м.

## 5.5 Расчет гидравлического сопротивления в колонне

Определяем гидравлическое сопротивление сухой насадки по формуле (5.56):

$$\Delta P_c = \lambda \cdot \frac{H}{d_3} \cdot \frac{\omega_o^2 \cdot \rho_y}{2}, \quad (5.56)$$

где  $\omega_o = \frac{\omega}{\varepsilon}$  – скорость пара в свободном сечении насадки.

$$\omega_o = \frac{1,62}{0,9} = 1,8 \text{ м/с.}$$

$d_3$  – эквивалентный диаметр насадки определим по формуле (5.57):

$$d_3 = \frac{4 \cdot \varepsilon}{a}, \quad (5.57)$$

$$d_3 = \frac{4 \cdot 0,9}{250} = 0,0145 \text{ м.}$$

$\lambda$  – коэффициент сопротивления, определяется по формуле (5.58):

$$\lambda = \frac{16}{\text{Re}^{0,2}}. \quad (5.58)$$

Критерий Рейнольдса рассчитываем по формуле (5.59):

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot \omega_o \cdot \rho_y}{\mu_y \cdot a}, \quad (5.59)$$

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot 1,8 \cdot 3,38}{0,011 \cdot 10^{-3} \cdot 250} = 8850.$$

Тогда:

$$\lambda = \frac{16}{8850^{0,2}} = 2,6.$$

Гидравлическое сопротивление сухой насадки:

$$\Delta P_c = 2,6 \cdot \frac{4,2}{0,0145} \cdot \frac{1,8^2 \cdot 3,38}{2} = 4124 \text{ Па.}$$

Гидравлическое сопротивление орошаемой насадки определяется:

$$\Delta P = \Delta P_c \cdot 10^{B \cdot U},$$

Где  $U$  – объёмная плотность орошения;

$v = 169$  – коэффициент насадки [21] .

$$\Delta P = 4124 \cdot 10^{169 \cdot 1,1 \cdot 10^{-3}} = 6,2 \text{ кПа} .$$

## 5.6 Тепловой расчет

Расход теплоты, отдаваемого охлаждающей воде в дефлегматоре-конденсаторе, находим по уравнению (5.60):

$$Q_D = G_D \cdot 1 + R \cdot r_D, \quad (5.60)$$

$$Q_D = 6,48 \cdot 1 + 0,477 \cdot 1491 \cdot 10^3 = 14,27 \cdot 10^6 \text{ Вт} ,$$

$$r_D = x_D \cdot r_{сп} + (1 - x_D) \cdot r_{вод}, \quad (5.61)$$

где  $r_{сп}$  и  $r_{вод}$  - удельные теплоты конденсации 1,2-дихлорэтана и 1,1,2- трихлорэтана при  $85^\circ\text{C}$ .

$$r_D = 0,995 \cdot 845 \cdot 10^3 + 0,005 \cdot 2308 \cdot 10^3 = 12386 \text{ Дж/кг}.$$

Расход теплоты, получаемой в кубе-испарителе от греющего пара, находим по уравнению (5.62):

$$Q_k = Q_D + G_D c_D t_D + G_W c_W t_W - G_F c_F t_F + Q_{пот}, \quad (5.62)$$

$$Q_k = 1,03 \cdot (14,27 \cdot 10^6 + 0,995 \cdot 6,48 \cdot 4190 \cdot 85 + 0,42 \cdot 0,9822 \cdot 4190 \cdot 85 - 6,9 \cdot 0,78 \cdot 4190 \cdot 95) = 15,13 \cdot 10^6 \text{ Вт}.$$

Здесь тепловые потери  $Q_{пот}$  приняты в размере 3% от полезно затрачиваемой теплоты; удельные теплоемкости взяты соответственно при  $t_D = 85^\circ\text{C}$ ,  $t_W = 85^\circ\text{C}$  и  $t_F = 95^\circ\text{C}$ ; температура кипения исходной смеси  $t_F = 90^\circ\text{C}$  определена по рисунку 5.2.

Расход теплоты в паровом подогревателе исходной смеси находим по уравнению (5.63):

$$Q = 1,05 \cdot G_F \cdot c_F \cdot (t_F - t_{нач}), \quad (5.63)$$

$$Q = 1,05 \cdot 6,9 \cdot 0,4 \cdot 4190 \cdot (85 - 18) = 854233 \text{ Вт} .$$

Здесь тепловые потери приняты в размере 5%, удельная теплоемкость исходной смеси  $c_F = (0,9763 \cdot 0,4 + 0,0237 \cdot 0,45) \cdot 4190 = 0,4 \cdot 4190 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$  взята при средней температуре:

$$t_{cp} = (85 + 18)/2 = 52 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Расход теплоты, отдаваемой охлаждающей воде в водяном холодильнике дистиллята находим по уравнению (5.64):

$$Q = G_D \cdot c_D \cdot (t_D - t_{кон}), \quad (5.64)$$

$$Q = 6,48 \cdot 0,4 \cdot 4190 \cdot (83 - 25) = 629908 \text{ Вт.}$$

где удельная теплоемкость дистиллята  $c_D = 0,4 \cdot 4190 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$  взята при средней температуре  $(83 + 25)/2 = 54 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Расход теплоты, отдаваемой охлаждающей воде в водяном холодильнике кубового остатка находим по уравнению (5.65):

$$Q = G_W \cdot c_W \cdot (t_W - t_{кон}), \quad (5.65)$$

$$Q = 0,42 \cdot 0,43 \cdot 4190 \cdot (85 - 25) = 45403 \text{ Вт.}$$

где удельная теплоемкость кубового остатка  $c_W = 0,43 \cdot 4190 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$  взята при средней температуре  $(85 - 25)/2 = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Расход греющего пара, имеющего давление  $p_{абс} = 4 \text{ кгс/см}^2$  и влажность 5%:

а) в кубе-испарителе находим по уравнению (5.66):

$$G_{г.п} = \frac{Q_k}{r_{г.п} \cdot x}, \quad (5.66)$$

где  $r_{г.п} = 2141 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$  – удельная теплота конденсации греющего пара;

$$G_{г.п} = \frac{15,13 \cdot 10^6}{2141 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 7,6 \text{ кг/с.}$$

б) в подогревателе исходной смеси:

$$G_{г.п} = \frac{854233}{2141 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 0,42 \text{ кг/с.}$$

Всего:

$$7,6 + 0,42 = 7,62 \text{ кг/с или } 28,9 \text{ т/ч.}$$

Расход охлаждающей воды при нагреве ее на  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

а) в дефлегматоре находим по уравнению (5.67):

$$V_B = \frac{Q_D}{c_B \cdot t_{кон} - t_{нач} \cdot \rho_B}, \quad (5.67)$$

$$V_B = \frac{14,27 \cdot 10^6}{4190 \cdot 20 \cdot 1000} = 0,17 \text{ м}^3/\text{с}.$$

б) в водяном холодильнике дистиллята:

$$V_B = \frac{629908}{4190 \cdot 20 \cdot 1000} = 0,0075 \text{ м}^3/\text{с}.$$

в) в водяном холодильнике кубового остатка:

$$V_B = \frac{45403}{4190 \cdot 20 \cdot 1000} = 0,00054 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Всего  $0,178 \text{ м}^3/\text{с}$ , или  $0,64 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

## 5.7 Расчет диаметра штуцеров

Для подачи флегмы диаметр штуцера определим по формуле (5.68):

$$d_\phi = \sqrt{\frac{4 \cdot V_x}{\pi \cdot v}}, \quad (5.68)$$

где  $V_x$  – расход потока,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$v$  – скорость движения потока,  $\text{м}/\text{с}$ .

$$V_\phi = V_{\text{хв}} = 0,00024 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$d_\phi = \sqrt{\frac{0,0024}{0,785 \cdot 0,5}} = 0,078 \text{ м} = 78 \text{ мм}.$$

Принимаем по ГОСТ ISO 3183—2015  $d_\phi = 89 \times 4 \text{ мм}$ .

Для подачи исходной смеси  $V_F$ :

$$d_F = \sqrt{\frac{0,0054}{0,785 \cdot 0,5}} = 0,12 \text{ м} = 120 \text{ мм}.$$

Принимаем  $d_F = 133 \times 4,5 \text{ мм}$  [25].

Для отвода паров:

$$V_{y\text{cp}} = 2,8 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$d_y = \sqrt{\frac{2,8}{0,785 \cdot 10}} = 0,59 \text{ м} = 590 \text{ мм}.$$

Принимаем  $d_y = 630 \times 8 \text{ мм}$  [25].

Для отвода кубовой жидкости диаметр рассчитывается по формуле (5.69) :

$$d_w = \sqrt{\frac{L_H}{0,785 \cdot 0,5 \cdot \rho_n}}, \quad (5.69)$$

$$d_w = \sqrt{\frac{0,001}{0,785 \cdot 0,5}} = 0,05 \text{ м} = 50 \text{ мм}.$$

Принимаем  $d_w = 57 \times 3,5 \text{ мм}$  [25].

Для ввода кубового пара диаметр штуцера определяется по формуле:

$$d_{w_y} = \sqrt{\frac{V_{yH}}{0,785 \cdot \omega_y}}, \quad (5.70)$$

$$d_w = \sqrt{\frac{4,15}{0,785 \cdot 10}} = 0,72 \text{ м} = 720 \text{ мм}.$$

Принимаем  $d_w = 720 \times 8 \text{ мм}$  [25].

В разделе проведен технологический расчет ректификационной колонны непрерывного действия для разделения смеси 1,2 ДХЭ - 1,1,2 ТХЭ :

- составлен материальный баланс ректификационной колонны;
- определены:

а) высота насадки в колонне  $H = 4,5 \text{ м}$  (Зульцер Mellapak 250 Y [19]);

б) диаметр колонны  $d = 1800 \text{ мм}$ ;

в) диаметры штуцеров на аппарате.

## 6 Выбор материала для изготовления ректификационной колонны

Технологические свойства конструкционных материалов в значительной степени определяют выбор способа изготовления из него отдельных деталей и узлов. Конструкционные материалы для химического машиностроения должны обладать высокой коррозионной стойкостью, т. е. способностью противостоять коррозионному воздействию среды [26].

Коррозионная стойкость понятие относительное, так как зависит от многих факторов: вида агрессивной среды, конструкции химически активного компонента, скорости движения среды, температуры, давления и др.

Коррозионная стойкость металлов оценивается различными методами. Одним из наиболее распространенных является метод оценки по глубинному показателю коррозии (скорости коррозии). Глубинный показатель коррозии – это величина, характеризующая уменьшение толщины металла в течение года вследствие коррозии.

Согласно ГОСТ 9.908-85 [26] все конструкционные материалы по коррозионной стойкости делятся на группы и оцениваются по десятибалльной шкале. Так, материалы для химического машиностроения должны иметь балл не более 5, что соответствует скорости коррозии 0,1 мм/год. Для конструкционных материалов менее ответственных деталей химического оборудования скорость коррозии допускается до 0,5 мм/год.

Для изготовления ректификационной колонны, кипятильника, дефлегматора, холодильников дистиллята, аварийного сборника продукта, выбираем сталь 12X18H10T ГОСТ 5632-72 [27], характеристики которой приведены в таблице 6.1, применяемую при изготовлении аппаратов, работающих с коррозионными средами. Диапазон температур от минус 196 до 600 °С, хорошо сваривается и обрабатывается, обладает устойчивыми прочностными характеристиками.

Выбор материала основан на анализе свойств стали 12X18H10T [28] и ее аналогов, указанных в таблицах 6.1, 6.2.

Таблица 6.1 – Коррозионностойкие стали для сред средней агрессивности [28]

Коррозионностойкие стали для сред средней агрессивности	
08X17T, 08X18T1, 15X25T	Заменители стали марки 12X18H10T и 12X18H9T для сварных конструкций, не подвергающихся воздействию ударных нагрузок при температуре эксплуатации не ниже 20 °С. Для труб теплообменной аппаратуры. Эксплуатировать в интервале температур 400-700 °С не рекомендуется. Стойкие к действию азотной, фосфорной, лимонной, уксусной, щавелевой кислот разных концентраций при температурах не более 100 °С.
08X22H6T, 08X18Г8H2T	Заменитель сталей 12X18H10T и 08X18H10T. Обладает более высокой прочностью, чем эти стали и используется для изготовления сварной аппаратуры, работающей при температуре не выше 300 °С.
12X21H5T	Заменитель стали 12X18H9T для сварных конструкций.
12X18H9T, 12X18H10T, 12X18H12T	Высокая коррозионная стойкость по отношению к азотной, холодной фосфорной и органическим кислотам (за исключением уксусной, муравьиной, молочной и щавелевой), к растворам многих солей и щелочей, морской воде, влажному воздуху. Неустойчивы в соляной, серной, плавиковой, горячей фосфорной, кипящих органических кислотах. Обладают удовлетворительной сопротивляемостью к межкристаллитной коррозии.
08X18H12Б	Обладает более высокой стойкостью, чем сталь 12X18H10T. Например, сталь устойчива к действию 65% азотной кислоты при температуре не более 50 °С, к действию концентрированной азотной кислоты при температуре не более 20 °С, к большинству растворов солей органических и неорганических кислот при разных температурах и концентрациях.

Таблица 6.2 – Характеристика стали 12Х18Н10Т [28]

Наименование	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости нормальный	198000	МПа
Модуль упругости при сдвиге и кручении	77000	МПа
Относительное сужение	55	%
Относительное удлинение после разрыва	48	%
Плотность	790	кг/м <sup>3</sup>
Свариваемость	без ограничения	

Для изготовления опоры колонны применим сталь 20, так как опора не контактирует непосредственно с коррозионными веществами.

Краткая характеристика и химический состав стали 20.

Сталь конструкционная углеродистая качественная.

Применение: трубы подогревателей, коллекторов и трубопроводов котлов высокого давления, листы для штампованных деталей, цементуемые детали для длительной и весьма длительной службы при температурах до 350 град. Химический состав стали представлен в таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Химический состав стали 20 ГОСТ 1050 - 88 [29]

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
0.17 - 0.24	0.17 - 0.37	0.35 - 0.65	до 0.3	до 0.04	до 0.035	до 0.25	до 0.3	до 0.08

Так же при изготовлении вспомогательного технологического оборудования применяются сплавы SS41L, 09Г2С, Ст.08сп, ВТ10, Ст3сп5.

Рассмотрим область применения и химический состав каждой из них:

- конструкционная углеродистая сталь обыкновенного качества SS41L (отечественный аналог Вст4пс) в виде фасонного/листового/сортового проката используется для изготовления малонагруженных деталей – оси, валы, втулки, другие изделия, конструкций повышенной прочности – болтовых (сварных) клепаных [30]. Химический состав стали SS41L представлен в таблице 6.4;

Таблица 6.4 - Химический состав стали SS41L [30]

Кремний	Марганец	Медь	Мышьяк	Никель	Сера	Углерод	Фосфор	Хром
0,05–0,17	0,4–0,7	0,3	0,08	0,3	0,05	0,18–0,27	0,04	0,3

- сталь марки 09Г2С (отечественные аналоги 09Г2, 09Г2ДТ, 09Г2Т, 10Г2С). Сталь конструкционная низколегированная для сварных конструкций, марка стали 09Г2С широко применяется при производстве труб и другого металлопроката. Химический состав стали 09Г2С представлен в таблице 6.5. Сталь используется для изготовления различных деталей и элементов сварных металлоконструкций, работающих при температуре от минус 70 до плюс 425 °С под давлением;

Таблица 6.5 - Химический состав в % материала 09Г2С ГОСТ 19281 - 2014 [31]

С	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	V	N	Cu	As
до 0.12	0.5 - 0.8	1.3 - 1.7	до 0.3	до 0.035	до 0.03	до 0.3	до 0.12	до 0.008	до 0.3	до 0.08

- 08пс (заменитель: 08). Сталь конструкционная углеродистая качественная, используется в промышленности: для прокладок, шайб, вилок, труб, а также деталей, подвергаемых химико-термической обработке - втулок, проушин, тяг. Химический состав представлен в таблице 6.6;

Таблица 6.6 - Химический состав в % материала 08пс ГОСТ 1050 - 88 [29]

С	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
0.05 - 0.11	0.05 - 0.17	0.35 - 0.65	до 0.3	до 0.04	до 0.035	до 0.1	до 0.3	до 0.08

- титан технический ВТ1-0, применяется для изготовления изделий с высокой прочностью при достаточной пластичности и вязкости, высоким сопротивлением малым пластическим деформациям, хрупкому и усталостному разрушению, применяемых в машиностроении, приборостроении и инструментальной промышленности, для изготовления изделий криогенной техники. Химический состав сплава ВТ1-0 указан в таблице 6.7;

Таблица 6.7 - Химический состав в % материала ВТ1-0 ГОСТ19807 – 91 [32]

Fe	C	Si	N	Ti	O	H	Примесей
до 0.25	до 0.07	до 0.1	до 0.04	99.24 - 99.7	до 0.2	до 0.01	прочих 0.3

- СтЗсп - сталь конструкционная углеродистая обыкновенного качества, применяется для изготовления несущих элементов сварных и не сварных конструкций и деталей, работающих при положительных температурах, химический состав СтЗсп приведен в таблице 6.8;

Таблица 6.8 - Химический состав в % материала СтЗсп ГОСТ 80 – 2005[33]

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu	As
0.14 - 0.22	0.15 - 0.3	0.4 - 0.65	до 0.3	до 0.05	до 0.04	до 0.3	до 0.008	до 0.3	до 0.08

Для неподвижных соединений: герметизация фланцевых соединений аппаратов, насосов, арматуры, трубопроводов применяем прокладочный материал из фторопласта [34].

В соответствии с задачами, решаемыми прокладками, к прокладочным материалам предъявляется целый набор требований, наиболее важными из которых являются:

- дешевизна и доступность, эти качества важны как фактор снижения эксплуатационных расходов трубопроводной арматуры в связи с большими объемами использования прокладочных материалов и необходимостью их частой замены;

- упругость, упругость — качество, необходимое для обеспечения лучшей герметичности уплотняемых с помощью прокладок соединений. Например, при искривлениях уплотняемых поверхностей материал прокладки должен компенсировать эти искривления даже при не слишком больших усилиях зажатия, чтобы предупредить возможность появления опасных, приводящих к потере герметичности пустот между соединяемыми деталями. Или при колебаниях температуры компенсировать упругими свойствами вызванное температурным расширением изменение размеров прокладки.

В отдельных документах это искривление (отклонение от параллельности) может быть регламентировано. Например, в «ГОСТ 32569-2013. Межгосударственный стандарт. Трубопроводы технологические стальные. Требования к устройству и эксплуатации на взрывопожароопасных и химически опасных производствах» указано, что при сборке фланцевых соединений сборочных единиц, допускаемые отклонения от параллельности уплотнительных поверхностей фланцев не должны превышать 10% от толщины прокладки;

- механическая прочность, прокладка не должна разрушаться под воздействием механических нагрузок, связанных с ее монтажом, т. е. при затягивании болтов или шпилек; в то же время материал прокладки не должен быть таким твердым и прочным, чтобы деформировать уплотняемые поверхности, что может иметь место при использовании в качестве прокладочных материалов металлов;

- температуроустойчивость, материал прокладки не должен терять свои механические свойства при воздействии высоких и низких температур. Иначе он расплавится и вытечет при высоких температурах или начнет трескаться и рассыпаться при низких;

- коррозионная устойчивость, подобно механическим нагрузкам и высоким температурам химическое воздействие рабочей среды способно вызвать разрушение или, по меньшей мере, потерю функциональности прокладки.

Фторопласт - материал химически стойкий и достаточно температуроустойчивый (сохраняет свои механические свойства при температуре от минус до плюс 200 градусов Цельсия) — применяется для изготовления прокладок любых сечений, как конструктивно простых, так и сложных, в т. ч. в комбинации с асбестом, резиной, сталью. В любых формах (лист, лента, жгут) фторопласт в качестве уплотнителя податлив, удобен в использовании, способен уплотнять даже изношенные и неровные поверхности, прекрасно проявляет себя на сложных контурах [35].

Для уплотнения фланцевых соединений царг колонны применим прокладки типа «Графлекс» из терморасширенного графита. Прокладки типа «Графлекс» изготавливаются из терморасширенного графита по ТУ 3799-001-48948122-98. Прокладки выпускаются в виде лент и набивок. Такие прокладки выдерживают давление до 25 МПа ( $250 \text{ кгс/см}^2$ ) и температуру рабочей среды от минус 200 до плюс 560 °С.

Применяемость данных материалов обосновывается тем, что все они являются легкодоступными, имеют высокие эксплуатационные характеристики, которые были проверены в результате долгого применения при изготовлении аппаратов химической промышленности, легкодоступны на рынке металлопроката.

## Заключение

При выполнении контрольной работы были выполнены следующие задачи:

1) Для проведения процесса ректификации на основании литературно-патентного обзора выбрана колонна с регулярной насадкой Зульцера. Эта насадка имеет высокую химическую стойкость, большую удельную поверхность и малое гидравлическое сопротивление. Ее применение позволит повысить эффективность и производительность массообмена и снизить энергетические затраты.

2) Разработана технологическая схема стадии ректификации ДХЭ.

3) Выбрана методика расчета, которая позволяет:

- составить материальный баланс колонны;
- составить тепловой баланс колонны;
- определить размеры колонного аппарата (диаметр, высоту и др.).

4) В результате проведенных технологических расчетов определены основные размеры колонного аппарата:

- диаметр - 1800 мм;
- высота колонны - 9,0 м (2,7 м – для укрепляющей части, 1,8 м – для черпывающей части);
- составлен тепловой баланс и определены расходы теплоносителей для заданной производительности.

5) Для изготовления колонны выбран конструкционный материал - нержавеющая сталь марки 12Х18Н10Т. Для герметизации фланцевых соединений аппаратов, насосов, арматуры, трубопроводов рекомендуется прокладочный материал фторопласт Ф-4. Для уплотнения фланцевых соединений царг колонны выбраны прокладки типа «Графлекс» из терморасширенного графита.

## Список использованных источников

- 1 Юкельсон, И. И. Технология основного органического синтеза - М.: Химия, 1968 – 848 с.
- 2 Лебедев, Н. Н. Химия и технология основного органического и нефтехимического синтеза. изд. 2-е, пер. М.: Химия, 1985 г.
- 3 Постоянный технологический регламент производства винила хлористого технического (винилхлорида).
- 4 Плановский, А. Н. Процессы и аппараты химической технологии / А.Н. Плановский, В. М. Рамм, С.З. Каган. - М.: Химия, 1968.
- 5 Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учебник для ВУЗов. изд. 14-е, стереотип. - М.: ООО ИД «Альянс», 2008. - 753 с.
- 6 Расчеты основных процессов и аппаратов нефтепереработки. Справочник / Под ред. Е.Н. Судакова. - М: Химия, 1979. - 568 с.
- 7 Пат. 2506125 Российская Федерация, МПК В 01 J 19/32. Регулярная насадка для тепло-и массообменных аппаратов из горизонтальных элементов / А. В. Бальчугов, М. Ш. Залилеев, А. В. Бадеников ; патентообладатель ФГБОУ ВПО Ангарская государственная техническая академия. - №2012140978/05 ; заявл. 25.09.2012 ; опубл. 10.02.2014.
- 8 Пат. 2515330 Российская Федерация, МПК В 01 J 19/32. Регулярная насадка для тепло-и массообменных аппаратов с периодическим орошением / А. В. Бальчугов, М. Ш. Залилеев, А. В. Бадеников ; патентообладатель ФГБОУ ВПО Ангарская государственная техническая академия. - №2012140979/05 ; заявл. 25.09.2012 ; опубл. 10.05.2014.
- 9 Пат. 2456525 Российская Федерация, МПК F28F 3/00. Регулярная насадка для противоточных тепломассообменных аппаратов / А.Ю. Беляев, С.М. Зырянов, О.А. Приймак ; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Экспертный технический центр ЦКБН". - № 2011109677/06 ; заявл. 16.03.2011 ; опубл. 20.07.2012. Бюл. № 20.

10 Пат. 2218983 Российская Федерация, МПК В 01 J 19/32. Двухтавровая насадка для массообменных аппаратов / В.И. Фетисов, С.Г. Хисматуллин, Ф.Ш. Хафизов и др. ; патентообладатель Закрытое акционерное общество «Каустик». - № 2002128688/15 ; заявл. 25.10.2002 ; опубл. 20.12.2003.

11 П.м. 117317 РФ, МПК В 01 J 19/32. Насадка для массообменного аппарата / А. Б. Голованчиков, С.Б. Воротнева, Н.А. Дулькина ; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). - №2012106991/05 ; заявл. 27.02.2012 ; опубл. 27.06.2012.

12 Пат. 2424052 Российская Федерация, МПК В01J19/32. Регулярная рулонная ленточно-винтовая насадка / И. Л. Селиваненко, К. Д. Суворкин ; патентообладатель И. Л. Селиваненко. - № 2009135461/05 ; - заявл. 24.09.2009 ; опубл. 20.07.2011.

13 Пат. 2339442 Российская Федерация, МПК В01J19/32. Насадка ректификационной колонны / А. В. Козлов, М. В. Ярошенко, Бадур Ахмед Шабан ; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Воронежское высшее военное авиационное инженерное училище (военный институт). - № 2006135063/15 ; - заявл. 03.10.2006 ; опубл. 27.11.2008.

14 Пат. 2480275 Российская Федерация, МПК В 01 J 19/32. Регулярная насадка для тепло- и массообменных аппаратов / А.С. Пушнов, А.А. Харитонов, М.Г. Лагуткин ; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ). - №2011123436/05 ; заявл. 09.06.2011; опубл. 27.04.2013.

15 Пат. 2467792 Российская Федерация, МПК В 01 J 19/32. Регулярная насадка для массообменных аппаратов / А.В. Бальчугов А.В., И.В. Скачков, И.Е. Кузора ; патентообладатель А.В. Бальчугов А.В., И.В. Скачков, И.Е. Кузора. - №2011112698/05 ; заявл. 01.04.2011; опубл. 27.11.2012.

16 Пат. 2457026 Российская Федерация, МПК В01J 19/32. Регулярная насадка для тепло-массообменных аппаратов / А.С. Пушнов, Д.Ф. Масагутов ; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный университет инженерной экологии". - №2010154222/05 ; заявл. 30.12.2010 ; опубл. 27.07.2012. Бюл. № 21.

17 Пат. 2533722 Российская Федерация, МПК В01J 19/32. Регулярная насадка для тепло- и массообменных аппаратов / М.Г. Беренгартен, А.С. Пушнов, А.А. Городилов ; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)". - №2013142009/05 ; заявл. 16.09.2013 ; опубл. 20.11.2014. Бюл. № 32.

18 Пат. 2406565 Российская Федерация, МПК В01J19/32. Структурированная насадка для массообменных аппаратов / И. Л. Селиваненко, К. Д. Суворкин ; патентообладатель И. Л. Селиваненко. - № 2009135458/04 ; - заявл. 24.09.2009 ; опубл. 20.12.2010.

19 Регулярная насадка для процессов абсорбции и ректификации. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.sulzerchemtech.com](http://www.sulzerchemtech.com).

20 Ректификация. Химическая энциклопедия. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/2/3870.html>.

21 Дытнерский, Ю. И. Основные процессы и аппараты химической технологии. Пособие по проектированию / Под ред. Ю.И. Дытнерского. - М.: Химия, 1983. - 272 с.

22 Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. - Л.: Химия, 1987. - 575 с.

23 Каталог приборов Метран [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.metran.ru/>.

24 ГОСТ 21.208-2013. Система проектной документации для строительства. Автоматизация технологических процессов. Обозначения

условные приборов и средств автоматизации в схемах. Технические условия. - М.: ИПК издательство стандартов, 2013. - 31 с. - (Межгосударственный стандарт).

25 ГОСТ 3183 - 2015 Трубы стальные для трубопроводов нефтяной и газовой промышленности. Общие технические условия. - Взамен: ГОСТ 3183-2012; введ. 01.06.2016. - М.: ИПК издательство стандартов, 2016. - 149с. - (Межгосударственный стандарт).

26 ГОСТ 9.908-85. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. - Взамен ГОСТ 13819-68; введ. 01.01.85. - М.: ИПК издательство стандартов, 1985. - 21с. - (Межгосударственный стандарт).

27 ГОСТ 5632-72. Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. - Взамен ГОСТ 5632-61; введен 01.01.75. - М.: ИПК издательство стандартов, 1975. - 46 с. - (Межгосударственный стандарт).

28 Центральный металлический портал РФ [Электронный ресурс] - Режим доступа: [http://metallicheckiy-portal.ru/marki\\_metallov/stk/12X18H10T](http://metallicheckiy-portal.ru/marki_metallov/stk/12X18H10T).

29 ГОСТ 1050-88. Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия. Введ. 01.01.91 М.: ИПК издательство стандартов, 1991. - 20 с. - (Межгосударственный стандарт).

30 Марочник стали и сплавов [Электронный ресурс] - Режим доступа: [http://splav-kharkov.com/choose\\_type.php](http://splav-kharkov.com/choose_type.php).

31 ГОСТ 19281 - 2014. Прокат повышенной прочности - Взамен ГОСТ 19281 - 89; введ. 1 января 2015 - М.: ИПК издательство стандартов, 2015. - 50 с. - (Межгосударственный стандарт).

32 ГОСТ 19807 - 91. Титан и сплавы титановые деформируемые. Взамен ГОСТ 19807-74; введ. в действие: 01 июля 1992 - 2015 - М.: ИПК издательство стандартов, 1992. - 6 с. - (Межгосударственный стандарт).

33 ГОСТ 380 – 2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Взамен ГОСТ 380-94; введ. в действие: 01 января 2008 - М.: ИПК издательство стандартов, 2008. – 26 с. - (Межгосударственный стандарт).

34 ГОСТ 10007-80. Фторопласт-4. Технические условия. Взамен ГОСТ 10007-72; введ. в действие: 01 июля 1981 - М.: ИПК издательство стандартов, 1981. – 17 с. - (Межгосударственный стандарт).

35 Материалы для изготовления прокладок [Электронный ресурс] - Режим доступа: [http://armatek.ru/materialy\\_prokladok](http://armatek.ru/materialy_prokladok).