**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего профессионального образования

**“Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ”**

**им. В.И. Ульянова (Ленина)” (СПбГЭТУ)**

|  |
| --- |
|  |

**Направление Системный анализ и управление**

**Кафедра Автоматики и процессов управления**

*К защите допустить:*

**Руководитель направления Фомин Б.Ф.**

**ВЫПУСКНАЯ**

**КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

БАКАЛАВРА

***Тема:* *Исследование математической модели системы регулирования температуры укрепляющей секции ректификационной колонны***

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| *Студент* |  |  |  | */ Курдакова Е.М. /* |
| *Руководитель* |  |  |  | */ Душин С.Е. /* |
| *Зав. кафедрой* |  |  |  | */ Кузьмин Н.Н. /* |
| *Консультант по ГОСТ и ЕСКД* |  |  |  | */ Белаш О.Ю. /* |
| *Консультант по программному обеспечению* |  |  |  | */ Власенко С.В. /* |

Санкт-Петербург

2012 г.

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего профессионального образования

**“Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ”**

**им. В.И. Ульянова (Ленина)” (СПбГЭТУ)**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | | | | |
|  |  |  |  | УТВЕРЖДАЮ |
| Факультет | КТИ |  |  | Руководитель |
|  |  |  |  | направления |
| Кафедра | АиПУ |  |  | */ Фомин Б.Ф. /* |
|  |  |  | «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 201\_\_г. | |

**ЗАДАНИЕ**

**на выпускную квалификационную работу бакалавра**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Студент | **Курдакова Елена Михайловна** |  | Группа № | **8391** |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 1. Тема работы | **Исследование математической модели системы** | |
| **регулирования температуры укрепляющей секции ректификационной** | | |
| **колонны** | | |
| *(утверждена приказом № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_)* | | |
|  |  | |
| 2. Исходные данные (технические требования) | | Абрамкин С.Е., Душин С.Е. Динамиче- |
| ская модель подсистемы «РЕКТИФИКАЦИЯ» в системе «ДЕСОРБЦИЯ абсорбента» // | | |
| Проблемы автоматизации и управления в технических системах: труды Международной | | |
| научно-технической конференции / под ред. д.т.н., проф.М.А. Щербакова. | | |
| Абрамкин С.Е., Душин С.Е. Разработка математической модели технологического ком- | | |
| плекса «Абсорбция – Десорбция» // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 1. С. 29–33. | | |
| Непрерывные модели процесса ректификации в виде ДУЧП | | |
| Характеристики физических величин на номинальном режиме, значения коэффициентов | | |
| и параметров | | |

|  |  |
| --- | --- |
| 3. Содержание работы | 1). Теоретические сведения. 2). Математические модели |
| подсистемы «ректификация». 3). Компьютерное моделирование. | |
| 4). Разработка системы регулирования температуры флегмы в укрепляющей секции РК. | |

|  |  |
| --- | --- |
| 4. Перечень отчетных материалов | Пояснительная записка, материалы презентации. |

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Дата выдачи задания | |  | | | Дата представления  работы к защите | |
| «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_ 201\_\_г. | |  | | | «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_ 201\_\_г. | |
| Заведующий кафедрой | |  | */ Кузьмин Н.Н. /* | |
| Руководитель | |  | */ Душин С.Е. /* | |
| Задание к исполнению принял | |  | */ Курдакова Е.М. /* | |
|  | | «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2012 г. | | |

**Реферат**

Объем пояснительной записки – 71 страниц.

Пояснительная записка содержит 44 рисунка, 5 таблиц.

Ключевые слова – ДЕСОРБЦИЯ, РЕКТИФИКАЦИЯ АБСОРБЕНТА, НАСАДОЧНАЯ РЕКТИФИКАЦИОННАЯ КОЛОННА, ПРОЦЕСС ТЕПЛООБМЕНА, МАССООБМЕННЫЙ ПРОЦЕСС, СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ, ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ, ЭЛЕКТРОПНЕВМОПОЗИЦИОНЕР, МЕМБРАННЫЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ, КЛАПАН-РЕГУЛЯТОР.

*Объект исследования* − укрепляющая секция ректификационной колонны, система регулирования температуры флегмы.

*Цель работы* – разработка и исследование математической модели системы регулирования температуры флегмы укрепляющей секции ректификационной колонны.

*Задачи*, направленные на достижение поставленной цели.

1. Изучение физических основ процесса ректификации и основных принципов действия ректификационных колонных аппаратов.

2. Разработка дискретно-непрерывной модели массообменного процесса по математической модели, представленной системой дифференциальных уравнений в частных производных.

3. Разработка дискретно-непрерывной модели теплообменного процесса, представленного системой дифференциальных уравнений в частных производных.

4. Исследование устойчивости массообменного и теплообменного процессов по дискретно-непрерывной модели.

5. Компьютерное моделирование теплообменного и массообменного процессов с использованием программного средства MATLAB/Simulink.

6. Разработка структурной схемы системы регулирования температуры флегмы.

7. Компьютерное моделирование поведения системы регулирования средствами MATLAB/Simulink.

**Содержание**

[Условные обозначения 5](#_Toc327386407)

[Введение 6](#_Toc327386408)

[1 Теоретические сведения 8](#_Toc327386409)

[1.1 Краткие сведения о процессе осушки газа 8](#_Toc327386410)

[1.2 Десорбция абсорбента 9](#_Toc327386411)

[1.3 Физические основы процесса ректификации 14](#_Toc327386412)

[1.4 Ректификационный колонный аппарат и его секции 18](#_Toc327386413)

[1.5 Насадочная ректификационная колонна 20](#_Toc327386414)

[1.6 Укрепляющая секция ректификационной колонны 23](#_Toc327386415)

[1.7 Автоматическое регулирование процесса ректификации 26](#_Toc327386416)

[2 Математические модели 29](#_Toc327386417)

[2.1 Динамическая математическая модель тепло- и массообменных процессов укрепляющей секции подсистемы «Ректификация» 29](#_Toc327386418)

[2.1.1 Математическая модель массообменного процесса 30](#_Toc327386419)

[2.1.2 Математическая модель теплообменного процесса 31](#_Toc327386420)

[2.2 Получение дискретно-непрерывных моделей 32](#_Toc327386421)

[2.2.1 Дискретно-непрерывная модель массообмена 32](#_Toc327386422)

[2.2.2 Дискретно-непрерывная модель теплообмена 33](#_Toc327386423)

[3 Компьютерное моделирование 35](#_Toc327386424)

[3.1 Моделирование массообменного процесса 35](#_Toc327386425)

[3.2 Моделирование теплообменного процесса 45](#_Toc327386426)

[4 Разработка системы регулирования температуры флегмы в укрепляющей секции ректификационной колонны 54](#_Toc327386427)

[4.1 Разработка функциональной схемы системы регулирования 54](#_Toc327386428)

[4.2 Технические характеристики элементов системы регулирования 55](#_Toc327386429)

[4.3 Компьютерное моделирование системы регулирования температуры УРК 66](#_Toc327386430)

[Заключение 69](#_Toc327386431)

[Список использованных источников. 70](#_Toc327386432)

# Условные обозначения

РК – ректификационная колонна

УРК – укрепляющая ректификационная колонна

НТС - низкотемпературная сепарация

НА - насыщенный абсорбент

ОРА - огневая ректификация абсорбента

ДЭГ – диэтиленгликоль

АВО – аппарат воздушного охлаждения

ММ – математическая модель

НКК – низкокипящий компонент

ВКК - высококипящий компонент

ФПС – форма пространства состояний

ИУ – исполнительное устройство

ЭПП – электропневмопозиционер

МИМ – мембранный исполнительный механизм

КлР – клапан-регулятор

ИИС – информационно-измерительная система

ЧЭ – чувствительный элемент

НП – нормирующий преобразователь

Р – регулятор

НО – нормально-открытый

НЗ – нормально-закрытый

РО – регулирующий орган

ОУ – объект управления

ИМ – исполнительный механизм

# Введение

Процессы разделения смесей и получение индивидуальных веществ различной чистоты играют ключевую роль в современной промышленности. Причем наблюдается ярко выраженная тенденция получения все более чистых веществ. Среди процессов разделения доминирующую роль играет ректификация, и ее количественная доля составляет около 90%.

Объясняется это достаточной универсальностью процессов ректификации или дистилляции и способностью перерабатывать огромные массовые потоки веществ.

Однако современные ректификационные процессы отличаются огромным потреблением энергии, затрачиваемой на испарение и охлаждение смеси веществ и разделяемых продуктов. Очень часто расходы энергии на дистилляцию составляют более 50% потребления энергии от всего производства. Кроме того, современные ректификационные колонны отличаются огромными размерами. Часто высота ректификационных колонн достигает 30-50 и более метров и, по сути, они определяют внешний вид многих современных химических и нефтехимических предприятий.

Целью работы является исследование математической модели системы регулирования температуры флегмы укрепляющей секции ректификационной колонны.

Задачи, направленные на достижение поставленной цели:

1. Изучение физических основ процесса ректификации и основных принципов действия ректификационных колонных аппаратов.

2. Разработка дискретно-непрерывных модели массообменного и теплообменного процессов по математическим моделям, представленных системой дифференциальных уравнений в частных производных.

3. Исследование устойчивости массообменного и теплообменного процессов по дискретно-непрерывным моделям.

4. Компьютерное моделирование теплообменного и массообменного процессов с использованием программного средства MATLAB/Simulink.

5. Разработка структурной схемы системы регулирования температуры флегмы и компьютерное моделирование поведения системы средствами MATLAB/Simulink.

# Теоретические сведения

## Краткие сведения о процессе осушки газа

Природный газ, добываемый на газовых и газоконденсатных месторождениях, транспортируется на большие расстояния до потребителей по магистральным газопроводам, пересекающим различные климатические зоны. Поэтому при эксплуатации месторождений особое внимание уделяется вопросам качественнойподготовки природного газа.

Существует три типовых способа подготовки природного газа на газовых и газоконденсатных промыслах:

- абсорбционная осушка и очистка природного газа – технологический процесс, предназначенный для извлечения из потока газа жидких углеводородов и воды жидкими поглотителями (маслами, гликолями);

- адсорбционная осушка и очистка природного газа – технологический процесс, предназначенный для извлечения из потока газа жидких углеводородов и воды твердыми поглотителями (песок, оксиды железа и т.д.);

- низкотемпературная сепарация (НТС) природного газа – технологический процесс, предназначенный для извлечения из потока газа жидких углеводородов и влаги при низких температурах.

В настоящее время наибольшее распространение, особенно в районах Крайнего Севера, получил абсорбционный способ подготовки природного газа (Уренгойское, Ямбургское, Заполярное, Песцовое месторождения), так как данный способ имеет ряд экономических и технологических преимуществ перед адсорбцией и низкотемпературной сепарацией:

- незначительные затраты на строительство сооружений (примерно в 3-4 раза ниже, чем при адсорбции);

- незначительный перепад давлений на установке;

- непрерывность процесса, простота управления;

- возможность разработки компактных, легких, транспортабельных установок;

- незначительные потери абсорбента;

- более длительный срок службы абсорбента по сравнению с твердым поглотителем и меньшая стоимость.

К основным недостаткам данного процесса относятся следующие:

- извлечение влаги меньше, чем при осушке адсорбентами;

- возможность увеличения потерь абсорбента в присутствии некоторых тяжелых углеводородов из-за тенденции растворов к вспениванию.

Подготовку природного газа к транспортировке методом абсорбционной осушки на УКПГ, осуществляемую по замкнутому циклу (по жидкой фазе), с точки зрения системного подхода можно представить как технологический комплекс систем «АБСОРБЦИЯ – ДЕСОРБЦИЯ», в который входят две взаимосвязанные системы: «АБСОРБЦИЯ газа» и «ДЕСОРБЦИЯ абсорбента». Следует учесть, что процесс абсорбции газа протекает при низкой температуре и высоком давлении, а процесс десорбции происходит, напротив, при высокой температуре и низком давлении. Процесс абсорбции газа является физической абсорбцией, так как между поглощаемым компонентом (влагой) и абсорбентом отсутствует химическое взаимодействие.

## Десорбция абсорбента

Система «ДЕСОРБЦИЯ абсорбента» состоит из ряда подсистем: подсистемы дегазации, подсистемы фильтрации, подсистемы «насосное оборудование», подсистемы «емкостное оборудование», подсистемы выпаривания, подсистемы ректификации и подсистемы охлаждения флегмы (или рефлюкса). Типовая технологическая схема системы «ДЕСОРБЦИИ абсорбента» представлена на рисунках 1.1 и 1.2.

Раствор насыщенного абсорбента (НА) поступает из абсорбера А последовательно в дегазатор Д, блок фильтров БФ (в них происходит очистка НА от механических примесей и солей), теплообменники Т1, Т2 и разделительную емкость Р2. В теплообменниках Т1 и Т2 осуществляется поэтапный нагрев НА с целью доведения его температуры до заданного значения перед подачей в колонну регенерации РК. Нагрев производится встречным потоком РА, поступающего из блока огневой ректификации абсорбента (ОРА).

Блок ОРА является многофункциональным агрегатом, состоящим из следующих элементов: буферной емкости БЕ, колонны ректификации РК, испарителя И, дымовой трубы ДТ. Колонна ректификации РК, так же как и абсорбер А, заполнена регулярной насадкой решетчатого типа.

Блок ОРА может работать в двух режимах: вакуумной регенерации (в случае применения ДЭГа) и атмосферной регенерации (в случае применения ТЭГа), что необходимо учесть при разработке системы автоматического регулирования. При вакуумной регенерации в блоке ОРА поддерживается разрежение для того, чтобы понизить температуру кипения парожидкостной смеси и тем самым исключить возможность окисления и разложения абсорбента.

Нагретый в теплообменниках Т2 НА поступает в трубное пространство буферной емкости БЕ, где нагревается до заданной температуры за счёт тепла, выводимого из испарителя И РА. Далее НА поступает на распределительную тарелку нижней насадочной секции колонны ректификации РК.

В колонне ректификации РК происходит тепломассообмен между НА и насыщенным паром, который поднимается из испарителя И, а также улавливаются аэрозольные частицы абсорбента из поднимающихся насыщенных паров.

Насыщенные пары отводятся из верхней части колонны РК на охлаждение в аппарат воздушного охлаждения (иначе – конденсатор) АВО и далее в разделитель Р3, откуда полученная в результате конденсации флегма насосом Н2 подается обратно на орошение верхней части колонны РК. АВО служит также для создания разрежения в РК и И. Разреженное пространство в АВО создается за счет того, что объем получаемой флегмы во много раз меньше объема пара, из которого она образовалась. Следует отметить, что разрежение увеличивается с уменьшением температуры конденсации.

рис

*Рисунок 1.1 – Типовая технологическая схема системы «ДЕСОРБЦИЯ абсорбента» (начало)*

Рис

*Рисунок 1.2 – Типовая технологическая схема системы «ДЕСОРБЦИЯ абсорбента» (окончание)*

Температура конденсации тем ниже, чем больше (при прочих равных условиях) расход охлаждающего агента (атмосферного воздуха) и ниже его конечная температура. Одновременно с процессом конденсации в рабочем пространстве АВО происходит накопление воздуха и других неконденсирующихся газов, которые выделяются из флегмы, а также проникают через неплотности аппаратуры из окружающего воздуха. Накопление неконденсирующихся газов и рост их парциального давления приводят к уменьшению разрежения в РК. Поэтому для поддержания вакуума в РК на заданном уровне производится непрерывный отвод из АВО неконденсирующихся газов. Для этого в системе «ДЕСОРБЦИЯ» применяется вакуум-насос Н4, который также служит для предотвращения колебаний давления, обусловленных изменением температуры охлаждающего агента (атмосферного воздуха).

Частично регенерированный абсорбент стекает из колонны ректификации РК в испаритель И. В испарителе И происходит нагрев абсорбента до заданной температуры (на газовых промыслах до температуры разложения ДЭГа - 164°С) и окончательная выпарка из него паров воды. Из испарителя И РА переливается в буферную емкость БЕ, где охлаждается встречным потоком НА. Далее из буферной емкости БЕ РА насосом Н3 последовательно подается на охлаждение в теплообменники Т2, Т1, после чего поступает в расходную емкость Е с атмосферным давлением. Из расходной емкости Е РА забирается высоконапорными насосами Н1 и подается в абсорбер А. Таким образом, осуществляется полное замыкание непрерывного технологического цикла осушки природного газа, подготовленного для дальнейшей транспортировки.

Анализ технологической схемы позволил выделить три объекта, которые влияют на технологический процесс – это ректификационная колонна, испаритель и аппарат воздушного охлаждения. Процессы, происходящие в данных объектах, являются определяющими для системы «ДЕСОРБЦИЯ абсорбента». В данной работе будет представлена разработка и исследование ММ массообменного процесса в укрепляющей секции ректификационной колонны [1].

## Физические основы процесса ректификации

*Ректификация* бинарных систем является процессом разделения растворов на один или два практически чистых компонента путем осуществляемого в ректификационной колонне многократного двустороннего массообмена между движущимися противотоком парами и жидкостью.

Хотя в промышленной практике сравнительно редко встречаются случаи разделения двухкомпонентных систем, теория ректификации бинарных смесей имеет большое познавательное значение, ибо позволяет со всей отчетливостью выявить приемы и методы исследования процесса, происходящего в ректификационном аппарате, и представить результаты такого изучения на весьма наглядных расчетных диаграммах. Используя графические приемы, удается наиболее просто представить принципы расчета различных режимов работы колонны, носящие общий характер в равно приложимые и к более трудным случаям, когда разделению подвергается уже не бинарная, а значительно более сложная многокомпонентная система.

Взаимодействие фаз при ректификации представляет собой *диффузию* низкокипящего компонента из жидкости в пар и высококипящего компонента из пара в жидкость, обусловленную разностью концентраций компонентов в массообменивающихся потоках паров и жидкости. Основным условием эффективного обмена веществом между фазами является их интенсивный контакт между собой.

Способ контактирования фаз внутри колонны: *ступенчатый* (на тарелках) или *непрерывный* (вдоль слоя насадки), оказывает существенное влияние на глубину достигаемого разделения и на методы анализа и расчета процесса в целом.

В насадочной части колонны РК происходит типичный противоточный  
дифференциальный процесс — потоки флегмы и паров находятся  
в постоянном взаимодействии на поверхности насадки, перенос вещества между фазами идет непрерывно. Механизм работы насадочной колонны не состоит из отдельных самостоятельных ступеней, а представляет собой непрерывное изменение концентрации жидких и паровых потоков вдоль всей поверхности контакта фаз. Именно этой непрерывностью изменения составов и отличается насадочная колонна, осуществляющая истинный противоток паров и жидкости, от тарельчатой колонны, в которой составы фаз меняются скачком от одной ее тарелки к другой.

Если две неравновесные фазы, паровую и жидкую, привести во взаимный контакт и создать возможно более благоприятные условия для массопередачи, а затем после обмена веществом и энергией отделить эти фазы одну от другой каким-нибудь механическим способом, то всю такую операцию в целом принято называть одной *ступенью контакта*. Механизм работы тарельчатой колонны, взятый в чистом виде, состоит в том, что ее тарелки действуют как ряд вполне самостоятельных ступеней контакта для встречающихся и перемешивающихся паровых и жидких потоков. Существенно, что на тарелках колонны истинный противоток паров и флегмы полностью нарушается (чего не происходит в насадочной колонне), и контактирующие фазы обмениваются веществом и энергией вследствие стремления взаимодействующих сред к состоянию равновесия.

Чтобы установить оценку работы тарелок колонны, вводится понятие об *идеальной контактной ступени* или *теоретической тарелке*, характеризующейся тем, что в ходе массообмена взаимодействующие потоки достигают равновесного состояния.

Степень приближения контактирующих фаз к равновесию, реализуемая в практической ступени, условно определяется как *ее эффективность* или *коэффициент полезного действия*.

На тарелках ректификационной колонны, могущих иметь самую различную конструкцию, осуществляется интенсивное взаимодействие между восходящим паровым и нисходящим жидким потоками. В предельном случае работы тарелки энергообмен между соприкасающимися парами и жидкостью приводит к выравниванию их температур, в результате обмена веществом устанавливаются равновесные значения составов фаз, и процесс их взаимодействия прекращается, так как парожидкая система приходит в равновесное состояние. Пары и жидкость отделяются друг от друга, и процесс продолжается вследствие нового контактирования этих фаз уже на следующей ступени с другими жидкими и паровыми потоками.

В термодинамической теории массообменных процессов разделения при переходе от составов фаз в одном межтарелочном отделении к составам фаз в соседнем за количественную основу принимается *гипотеза теоретической тарелки (ступени)*. Особенность этой теории состоит в том, что она не занимается вопросом о механизме процесса и не исследует диффузионной природы и кинетической картины явления массопередачи на контактной  
ступени. Теория массообменных процессов разделения, основанная на концепции теоретической тарелки (ступени), изучает *предельные условия проведения процесса* и устанавливает меры, сравнением с которыми можно получить правильное суждение о работе практического аппарата и о степени его отклонении от наиболее совершенного в данных условиях образца.

Гипотеза теоретической тарелки не воспроизводит в точности действительной картины явления, протекающего в контактной ступени, ибо основана на статической представлении процесса. Тем не менее эта концепция позволяет осуществить анализ и расчет процесса разделения исходной смеси в ректификационной колонне и получить достаточно близкую к действительности картину реального процесса, несмотря на наше неумение вполне компетентно и всесторонне исследовать сложные явления массопередачи, происходящие на практической ступени контакта.

Другим обоснованием целесообразности разработки термодинамической теории ректификации является установившийся, по-видимому, окончательно  
взгляд, согласно которому исследование и определение эффективности практических ступеней разделения оказывается, как правило, задачей менее  
трудной, чем непосредственное изучение диффузионной картины процесса ректификации в реальной колонне. Таким образом, термодинамическая теория ректификации является пока первой ступенью общей теории ректификации. Для суждения о направленности самопроизвольных процессов энергообмена и массообмена в отдельно взятой контактной ступени следует рассмотреть ее работу на основе метода теоретической тарелки.

*Gi-1*

*Gi*

*gi+1*

*gi*

*xi*

*xi+1*

*yi*

*yi-1*

*ti*

*ti+1*

*ti-1*

*ta*

*a*

*t,0*

*0*

*x, y*

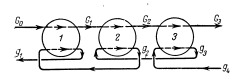
*t*

*Рисунок 1.3 – Диаграмма процесса, протекающего на теоретической тарелке.*

Нa изобарные кривые кипения и конденсации, приведенные  
на рисунке 1.3 нанесены фигуративные точки *gi+1* и *Gi-1* потоков флегмы и паров, поступающих на *i*-тую тарелку колонны. Пары находятся при более высокой температуре, чем жидкость, и концентрации компонентов в обеих фазах отличаются от равновесных. При достаточной длительности контакта в результате взаимодействия неравновесных жидкостей и паров в условиях теоретической тарелки устанавливается состояние парожидкостного равновесия, состав паров сдвигается в сторону обогащения низкокипящим компонентом (НКК), а состав жидкости — в сторону обогащения высококипящим компонентом (ВКК).

Фигуративные точки *Gi* и *gi*, образовавшихся равновесных  
паров и флегмы расположатся уже па изотерме *ti*, отвечающей  
условию *ti+1* < *ti* < *ti-1*.

В процессе ректификации обогатительный эффект отдельно  
взятых контактных ступеней, недостаточный для получения желательной чистоты продуктов, увеличивается благодаря объединению в группы ступеней, представляющие единый *каскад* — ректификационную колонну, в которой и обеспечиваются условия для достижения требуемой глубины разделения. Схема трехступенчатого каскада приведена на рисунке 1.4.



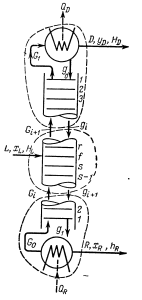
*Рисунок 1.4 – Схема трехступенчатого каскада*

Цель расчета ректификационной колонны состоит в том, чтобы  
на основе анализа ее рабочего режима и процессов, происходящих на контактных ступенях, установить для каждой из них степень обогащения фаз и тем самым получить возможность судить о необходимом для назначенного разделения числе тарелок и о составах, количествах, температурах и давлениях потоков паров и флегмы по всей высоте колонны при установившемся режиме ее работы [2].

## Ректификационный колонный аппарат и его секции

Процесс ректификации может осуществляться двумя принципиально различающимися способами: непрерывным и периодическим. Будет рассмотрен непрерывный процесс, на основе теории которого построен метод расчета периодического процесса ректификации.

При непрерывном процессе ректификации в установившемся  
состоянии величины паровых и жидких потоков, их составы, и давления постоянны в каждой точке по высоте колонны и независимы от времени. На рисунке 1.5 приведена принципиальная схема работы так называемой *полной ректификационной колонны*, сверху которой отводится практически чистый низкокипящий компонент, а снизу — высококипящий. Паровые потоки внутри колонны обозначаются через *G*, а жидкие — через *g*. Нижние индексы указывают контактную ступень (тарелку), с которой данный поток отводится.



*Рисунок 1.5 – Принципиальная схема полной ректификационной колонны*

В общем случае сырье поступает в колонну в двухфазном  
парожидкостном состоянии. Сечением ввода сырья колонна разделяется на две части: верхнюю — *укрепляющую секцию* и нижнюю, обычно называемую *отгонной*. Самая верхняя тарелка отгонной секции называется *тарелкой питания* и, в отличие от остальных, выполняет кроме обычных функций разделительной ступени еще и функции смесителя жидкой фазы *gc* сырья и потока флегмы *gк*, стекающего с нижней тарелки укрепляющей секции. Смешение же паровой фазы *Gc* сырья с паровым потоком *Gл* поднимающимся с тарелки питания, происходит в эвапорационном пространстве между тарелкой питания и нижней ступенью укрепляющей секции (см. рисунок 1.5).

Чтобы в укрепляющей секции создать встречный парам жидкий поток, наверху колонны устанавливается *парциальный конденсатор*, в котором часть поднимающихся с верхней тарелки паров конденсируется и возвращается обратно в виде жидкого орошения *g0*. Чтобы в отгонной секции создать встречный флегме паровой поток, внизу колонны устанавливается *парциальный кипятильник*, в котором часть жидкости, стекающей с нижней тарелки, испаряется и возвращается в виде парового орошения *G0*.

Несконденсировавшиеся в парциальном конденсаторе пары — это верхний продукт колонны — *дистиллят D* состава *уD*, обычно близкого к единице. Жидкий остаток процесса однократного выкипания в парциальном кипятильнике есть нижний продукт колонны — *остаток* *R*, состава *xR*,  
обычно близкого к нулю. Таким образом, дистиллят *D* колонны является практически чистым НКК, а остаток — практически чистым ВКК.

Отношение *g0/D*, представляющее жидкое орошение верха колонны в расчете на 1 кмоль дистиллята, называется *флегмовым числом* укрепляющей секции колонны. Отношение *G0/R*, представляющее *паровое* орошение низа колонны в расчете на 1 кмоль остатка, называется *паровым числом* отгонной секции колонны.

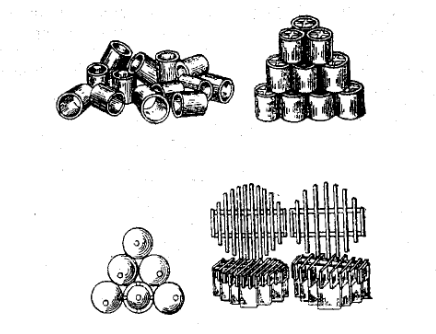
Как нижняя, так и верхняя секции полной колонны могут работать и отдельно друг от друга, как самостоятельные *отгонная* или *укрепляющая колонны*. В отличие от рассмотренной выше полной колонны такие колонны называются *неполными,* ибо позволяют в практически чистом виде получать только один из компонентов системы: отгонная - ВКК, а укрепляющая - НКК. Получение же обоих компонентов системы в практически чистом виде в неполных колоннах оказывается экономически нецелесообразным из-за чрезмерно большого расхода энергии [2].

## Насадочная ректификационная колонна

Насадочная ректификационная колонна, наиболее простая по конструкции, представляет собой цилиндрический вертикальный аппарат, заполненный по всей высоте или на отдельных участках так называемой насадкой — определенных размеров и конфигурации телами из инертных материалов. На рисунке 1.6 приведено несколько типов встречающихся на практике насадок.

Насадка предназначена для создания большой поверхности контакта между стекающей по ней жидкостью и поднимающимся потоком паров и интенсивного перемешивания их. Контакт и массообмена в насадочной колонне происходят непрерывно на всем участке аппарата, заполненном насадкой. Этим и отличается работа насадочной колонны от тарельчатой.

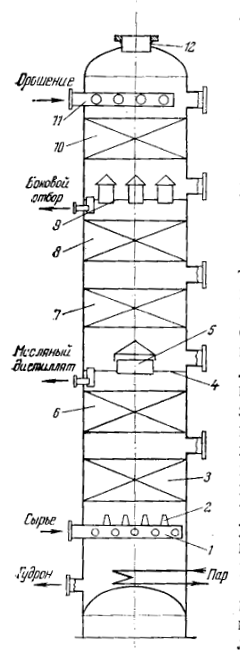
В насадочных колоннах практически невозможно добиться равномерного распределения стекающей сверху вниз жидкости по всем поперечным сечениям аппарата. Особенно неравномерно распределяется жидкость при больших диаметрах колонн. Именно поэтому контактирование фаз в них недостаточно, вследствие чего трудно достигнуть четкого разделения.



*Рисунок 1.6 – Типы элементов насадки для колонных аппаратов*

Насадочные колонны для ректификации применяют редко, их вытеснили тарельчатые колонны Конструкции их представляют интерес скорее для проведения процессов абсорбции, экстракции и т. д. Однако в тех случаях, когда для разделения смеси в тарельчатой колонне требуется большое число тарелок, применение насадочных ректификационных колонн может оказаться оправданным. На практике встречаются тарельчатые ректификационные колонны, у которых одна или несколько тарелок (обычно над участком вводя сырья или в верхней части аппарата) выполнены насадочными. Такие насадочные тарелки в колоннах чаше всего выполняют роль отбойников, хотя на них также происходит ректификация.

Важным качеством работы насадочных колонн являются небольшие по сравнению с тарельчатыми колоннами гидравлические сопротивления. Благодаря этому создаются более благоприятные условия для ректификации в них жидкостей с высокими температурами кипения, обычно осуществляемой при высоком вакууме.



*Рисунок 1.7 – Насадочная ректификационная колонна*

На рисунке 1.7 показана схема насадочной ректификационной колонны. Колонна представляет собой вертикальный цилиндрический аппарат с верхним н нижним эллиптическими днищами. Она разделена по высоте внутренними устройствами на несколько секций.

По трубному коллектору l, снабженному специальными распылителями 2 сырье, предварительно нагретое до нужной температуры, вместе с перегретым паром поступает в колонну. Коллекторы и распылители предназначены для создания одинаковой, равномерной нагрузки по всему сечению колонны. Первый слой насадки 3 расположен непосредственно над участком ввода сырья и водяного пара и служит одновременно для контактирования фаз и сепарирования от устремленного вверх потока сырья тяжелых капель жидкости, которые проваливаются в нижнюю часть колонны, не загружая ее верхней части, т.е. выполняют роль отбойника. С отборной тарелки 4. снабженной несколькими переходными трубами 5, сконденсировавшиеся пары целевого дистиллята, образовавшегося в результате ректификации при прохождении через слои насадок 3 и 6, откачиваются насосом. Легкие же нары нефтепродуктов вместе с водяными парами, поднимаясь вверх, проходят слои насадок 7 и 8. Жидкость, опираемая с тарелки 9, охлаждается в теплообменниках и холодильниках и насосом возвращается в колонну через ороситель в качестве орошения. Количеством этого орошения регулируется температурный режим верхнего участка колонны и предотвращается унос из колонны высококипящих компонентов. Часть легких сконденсировавшихся компонентов откачивается с отборной тарелки 9 как готовый дистиллят, остальная часть переливается с нее вниз, являясь жидкой фазой в диффузионном процессе. Несконденсировавшиеся пары через шлемовую трубу 12, расположенную в верхней части колонны, поступают в барометрический конденсатор, где частично конденсируются, а частично отсасываются вакуумсоздающими устройствами. Снизу колонны остаток от перегонки насосом откачивается в резервуар.

При определении диаметра насадочных колонн обычно руководствуются допустимыми скоростями движения паров по колонне и, в частности, в каналах насадки.

Скорость паров должна быть ниже той, при которой жидкость не стекает по насадке, а вытесняется из нее скоростным напором потока пара, движущегося снизу вверх, создавая так называемый режим захлебывания. Режим захлебывания вызывает резкое повышение сопротивления движущимся парам, т. е. давление в колонне, поэтому при заданной производительности диаметр колонны должен быть таким, чтобы скорость восходящих паров не нарушала постоянного противоточного движения жидкой и паровой фаз [3].

## Укрепляющая секция ректификационной колонны

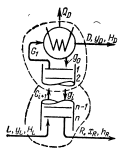
На рисунке 1.8 представлена ректификационная колонна в разрезе. Укрепляющая секция колонны состоит из трех насадочных элементов. Следует отметить, что при моделировании используется общая высота насадочных элементов. Как нижняя, так и верхняя секции полной колонны могут работать и отдельно друг от друга, как самостоятельные отгонная или укрепляющая колонны.

*Рисунок 1.8 – Колонна ректификации*

В отличие от рассмотренной выше полной колонны такие колонны называются неполными, ибо позволяют практически в чистом виде получать только один из компонентов системы: отгонная – ВКК, а укрепляющая – НКК. Получение же обоих компонентов системы в практически чистом виде в неполных колоннах оказывается экономически нецелесообразным из-за чрезмерно большого расхода энергии.

Ректификационная колонна называется *укрепляющей*, если разделяемое сырье в паровой фазе подается под ее нижнюю тарелку.

С верха укрепляющей колонны, принципиальная схема которой показана на рисунок 1.9, в паровой фазе отводится практически чистый НКК, а с нижней тарелки получают флегму *R*, в общем случае достаточно отличающуюся по составу от практически чистого ВКК.



*Рисунок 1.9 – Принципиальная схема укрепляющей колонны*

Для желательного обогащении нижней флегмы укрепляющей колонны менее летучим компонентом обычно необходима ее дополнительная ректификация. Именно поэтому укрепляющую колонну называют еще и неполной колонной для ректификации паров.

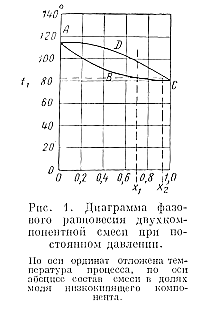
Укрепляющая колонна и движение материальных потоков в ней  
схематически представлены на рисунке 1.9. Сырье *L* в паровой фазе подается под нижнюю тарелку колонны, с которой отводится флегма *R* состава *xR*, представляющая один из продуктов колонны. Паровой поток *G1*, с верхней, первой по счету, тарелки отводится в парциальный конденсатор, где в результате отдачи тепла *QD*, кДж/ч, подвергается частичной конденсации, образуя поток флегмы *g0*, которая возвращается я колонну в качестве орошения; отводимый паровой остаток конденсации — дистиллят *D* состава *уD* является основным продуктом укрепляющей колонны.

Из сравнения принципиальных схем отгонной н укрепляющей  
колонн легко усматривается определенная симметрия в характере  
их работы. Так, каждая из этих схем, при повороте на 180° и замене паровых потоков на жидкие и наоборот, совпадает с другой, если вместо подвода тепла указать отвод и наоборот. Поэтому наблюдается весьма близкое сходство и в аналитических соотношениях материальных и тепловых балансов и в расчетных уравнениях, получаемых на их основе. Это позволяет опустить многие подробности при выводе уравнении укрепляющей колонны и тем самым избежать излишних повторений [2].

## Автоматическое регулирование процесса ректификации

Основные задачи автоматического регулирования процесса ректификации заключаются в достижении заданной точности разделения смеси жидкостей и максимальной интенсивности и экономичности процесса.

Интенсивность н экономичность процесса для данной системы зависят в основном от величины нагрузки ректификационной колонны и выбранной степени разделения. Обычно наиболее аффективной является работа колонны при нагрузке, близкой к максимально возможной. В этих, условиях массо- и теплообмен между контактирующими фазами будет наилучшим, но регулирование процесса должно быть точным для предотвращении «захлебывания» колонны или уноса брызг жидкости с одной тарелки на другую.



*С1*

*С2*

*Рисунок 1.10 – Диаграмма фазового равновесия двухкомпонентной смеси при постоянном давлении.*

Автоматическое регулирование позволяет материальный и тепловой балансы процесса ректификации вести экономичнее, точнее и интенсивнее, чем при управлении процессом вручную.

*Температура и давление в колонне.* Если двухкомпонентная система состоит из двух фаз, то она бивариантна, т. е. имеет две степени свободы. В качестве независимых переменных системы принимают давление, температуру и концентрацию. Для получения определенного состава в соответствии с правилом фаз необходимо поддерживать в колонне постоянными давление и температуру. Практически процесс проводят при постоянном давлении, поэтому можно построить диаграмму фазового равновесия: температура — концентрация. На рисунке 1.10 приведена диаграмма фазового равновесия двухкомпонентной смеси при постоянном давлении 760 мм рт.ст.

На диаграмме по опытным данным нанесены кривые ABC — зависимости состава жидкости от температуры ее кипения и ADC — состава паров, находящихся в равновесии с жидкостью, в зависимости от температуры. При концентрации смеси *С1* долей моля низкокипящего компонента и при температуре меньшей, чем *1* существует только одна жидкая фаза — смесь двух компонентов. С повышением температуры кипения смеси до *1* появляется паровая фаза, концентрация которой равен *С2*. Так как давление в колонне постоянно, то при наличии двух фаз имеется только одна степень свободы. Следовательно, с изменением температуры изменяется и концентрация фаз. На этом основании в ректификационных колоннах регулируются постоянное давление и температура кипения жидкости, т. е. концентрация ее в верхней или нижней частях колонны [4].

*Выбор регулируемых параметров процесса ректификации*

Сложность обслуживания и стоимость регуляторов, необходимых для управления данным технологическим процессом, а также качество регулирования в значительной мере зависят от правильности выбора регулируемых параметров. Регулируемый параметр должен однозначно характеризовать технологический процесс. Это требование обязательное, но недостаточное, так как часто процесс характеризуется не одним, а несколькими параметрами. В этом случае необходимо выбрать в качестве регулируемого один из параметров, наиболее полно отвечающий следующим требованиям.

1. Наличие простых и надежных приборов для измерения выбранного параметра.

2. Удовлетворительная динамическая характеристика системы автоматического регулирования. Желательно минимальное запаздывание в изменении параметра и восприятии импульса регулятором при любых возмущениях процесса.

3. Значительные допустимые величины статических и динамических отклонений регулируемого параметра от заданной величины, чтобы можно было применить стандартный промышленный регулятор.

4. Минимальные взаимные связи параметров в объекте через процесс или, если это возможно, использование связи между параметрами для улучшения качества регулирования.

5. Минимум количества регуляторов, необходимых для управления процессом.

6. Замкнутость системы автоматического регулирования, чтобы все возмущения процесса воспринимались регулятором.

7. Экономичность ведения технологического процесса [4].

# Математические модели

## Динамическая математическая модель тепло- и массообменных процессов укрепляющей секции подсистемы «Ректификация»

В результате анализа поведения укрепляющей секции подсистемы «Ректификация» в части массообменных процессов при отсутствии управления были приняты следующие *допущения*:

– жидкость (флегма) в насадках колонны регенерации полностью перемешивается (модель идеального перемешивания);

– в основе получения ММ массообменных процессов между паром и жидкостью лежит гидродинамическая модель полного вытеснения (поршневого режима течения фаз);

– режим продольного перемешивания фаз отсутствует;

– скорости пара  и флегмы  одинаковы как по сечению колонны, так и по высоте насадочной секции колонны;

– концентрации пара  и флегмы  одинаковы по сечению колонны;

– массопередача на насадках эквимолярная, т. е. через поверхность раздела фаз в противоположных направлениях переносится одинаковое количество целевого компонента;

– флегма, проходя через насадку, не задерживается, что исключает образование зон простоя в насадках, а также исключается зависание флегмы в насадках;

– зависимость равновесной концентрации целевого компонента в флегме  линейная (при выполнении закона Рауля) и нелинейная в общем случае.

На основе принятых допущений, применительно к изучаемым потокам, были разработаны математические модели технологических процессов, происходящих в укрепляющей секции колонны ректификации, а также определены начальные и граничные условия.

### Математическая модель массообменного процесса

С учетом принятых допущений динамическая ММ массообменного процесса в укрепляющей секции колонны регенерации в достаточно общем виде может быть представлена системой дифференциальных уравнений в частных производных относительно концентраций целевого компонента по пару и жидкости:

 (2.1)

где  – концентрации целевого компонента (влаги) во флегме и в паре;  – равновесная концентрация целевого компонента во флегме;  - скорости флегмы и пара;  - температура пара; - технологические коэффициенты, зависящие от физико-химических свойств фаз и геометрии аппарата [11].

Примем, что скорость пара не зависит от температуры пара.

В результате линеаризации по концентрации (выполнении закона Рауля) система уравнений (3.1) принимает вид:

 (2.2)

где *Е* – коэффициент фазового равновесия. Данная модель справедлива при условии .

Граничные условия ММ:

, ;

, .

Граничные условия соответствуют первой краевой задаче – задаче Дирихле [9].

Начальные условия ММ:

, .

### Математическая модель теплообменного процесса

В подсистеме «Ректификация» температурные профили пара и флегмы по всей высоте укрепляющей секции колонны не постоянны, поэтому была построена, в общем случае, нелинейная модель тепловых процессов, происходящих в колонне регенерации:

 (2.3)

где  – температура флегмы и пара;  – скорость флегмы и пара;  – коэффициенты, зависящие от физико-химического состояния фаз и геометрии аппарата. В данной модели учитывается влияние температуры пара на его физические характеристики (например, плотность пара, от которого зависит ). Модель (2.3) справедлива при [12].

Граничные условия ММ:

, ,

, .

Начальные условия ММ:

, .

Следует заметить, что полученная модель теплообмена в противоточном движении фаз не учитывает накопления теплоты в стенках аппарата. Это связано с тем, что в реальных условиях такое накопление мало влияет на процесс теплообмена, если теплоемкость стенок мала и если достаточно велика интенсивность теплообмена пара и флегмы, т. е. относительно велик коэффициент теплопередачи *.*

Управление в укрепляющей секции подсистемы «Ректификация» производится за счет регулирования подачи флегмы.

Объединяя ММ (2.1) и (2.3) получили нелинейную ММ взаимосвязанных тепло- и массообменных процессов укрепляющей секции подсистемы «Ректификация»:



(2.4)

## Получение дискретно-непрерывных моделей

### Дискретно-непрерывная модель массообмена

В качестве исходной рассматривается непрерывная модель массообменного процесса ректификации:

(2.5)

где  – концентрации целевого компонента (влаги) во флегме и в паре;  - скорости флегмы и пара; *Е* – коэффициент фазового равновесия.

От непрерывной модели (2.5) необходимо перейти к дискретно-непрерывной модели (непрерывность по ). При этом «распределённость» модели вдоль пространственной оси  сосредотачиваем, например, в нескольких точках, заменив частную производную  на конечную разность: для пара , для жидкости .Производя соответствующие преобразования, можно в итоге получить систему обыкновенных дифференциальных уравнений, представляющих дискретно-непрерывную модель.

Дискретно-непрерывная модель для трех точек имеет вид:

(2.6)

### Дискретно-непрерывная модель теплообмена

В качестве исходной рассматривается непрерывная модель теплообменного процесса ректификации:

(2.7)

где  – температура флегмы и пара;  – скорость флегмы и пара;  – технологические коэффициенты, зависящие от физико-химического состояния фаз и геометрии аппарата. От непрерывной модели (2.7) необходимо перейти к дискретно-непрерывной. Дискретно-непрерывная модель для трех точек имеет вид:

(2.8)

Полученные дискретно-непрерывные модели (2.6) и (2.8) могут быть положены в основу компьютерного моделирования процессов с использованием программного средства MATLAB/Simulink.

# Компьютерное моделирование

## Моделирование массообменного процесса

По уравнениям (2.6) была разработана структурная схема ММ массообменного процесса в укрепляющей секции РК, представленная на рисунке 3.1.



*Рисунок 3.1 – Структурная схема ММ массообменного процесса в укрепляющей секции РК*

В таблице 1 приведены параметры модели, изучение поведения которой будет производиться в среде MATLAB/Simulink.

*Таблица 1 –*  *Значения параметров массообменного процесса в УРК.*

| Значения параметров  парового компонента | Значения параметров  жидкостного компонента (флегмы) |
| --- | --- |
| Расход пара | Расход флегмы |
| Скорость пара | Скорость флегмы |
| Плотность пара | Плотность флегмы |
| с-1 | с-1 |
| % мол. | % мол. |
| % мол. | % мол. |
| % мол. | % мол. |
| % мол. | % мол. |
| Давление в верхней части колонны Па | |
|  | |
| Длина насадочной части  *l*нс=3,5 м | |
|  | |

Число насадок в УС РК шт. Число насадочных секций шт.

На основе структурной схемы была построена компьютерная модель массообменного процесса в укрепляющей секции РК, реализованная в среде разработки MATLAB/Simulink и изображенная на рисунке 3.2.



*Рисунок 3.2 – Компьютерная модель массообменного процесса в укрепляющей секции РК в среде MATLAB/Simulink*

Первой задачей при моделировании является уточнение начального профиля концентрации целевого компонента в жидкости в разных точках аппарата. Задача может быть решена с помощью метода установления [9]. Произведем моделирование процесса при номинальном режиме. В итоге получили следующие результаты (рисунок 3.3 и рисунок 3.4):



*Рисунок 3.3 –* *Начальный профиль концентраций целевого компонента в газе в различных точках УРК*



*Рисунок 3.4 – Начальный профиль концентраций целевого компонента во флегме в различных точках УРК*

Другим подходом уточнения равновесного начального профиля является использование итерационного метода. Найдем положение равновесия системы, воспользовавшись командой trim из математического пакета MATLAB. Для этого сначала модифицируем компьютерную модель к виду, изображенному на рисунке 3.5.

**

*Рисунок 3.5 – Компьютерная модель системы для использования команды trim*

Для применения расширенной команды **trim** зададим следующие начальные условия:

**x0=[0.66; 0.819; 1; 0.89; 0.7; 0.576];**

**y0=0;**

**u0=[0.53];**

**iy=[];**

**iu=[1];**

**ix=[];**

а саму команду опишем следующим образом:

**[x,u,y,dx]=trim('RK\_US\_massa\_trim',x0,u0,y0,ix,iu,iy)**

Получим следующие результаты:

x =

0.6552

0.8100

1.0014

0.8243

0.6821

0.5671

u = 0.5300

y = 1.0014

dx =

1.0e-016 \*

-0.9641

0.1431

0.3391

-0.0000

0

-0.0001

Не сложно заметить, что полученные значения практически совпадают с теми результатами, которые были получены при исследовании статического режима через динамику. Наблюдаются лишь небольшие отклонения, которые могут быть обоснованы большей точностью работы команды trim.

***Исследование устойчивости дискретно-непрерывной модели***

Понятие *устойчивости* системы связано со способностью возвращаться в состояние равновесия после исчезновения внешних сил, которые вывели ее из этого состояния [10]. Существуют определенные критерии устойчивости, применимые к линейным системам. К ним относятся алгебраические критерии устойчивости Гурвица, Рауса, частотный критерий Михайлова, критерий Найквиста [8].

Далее проверим, будет ли являться положение равновесия системы устойчивым.

Приведем к форме пространства состояний в окрестности равновесия.

Для конечномерных систем состояние представляется как *n*-мерный вектор ; при вектор **–** начальное состояние.

Система уравнений в так называемой нормальной форме пространства состояний (ФПС) записывается следующим образом:

где **–** *P-*мерный вектор входа;  **-** *K***-**мерный вектор выхода;  **-** матрица состояний;  **-** матрица входа;  **-** матрица выхода;  **-** матрица обхода соответствующих размеров [8].

Для определения ФПС системы применим следующую команду:

**>> [A,B,C,D]=linmod('RK\_US\_massa')**

В результате её выполнения получим модель объекта в ФПС:

A =

-0.62223 0 0 0  0 -0.000000000145

0.7692 -0.62223 0 0 -0.000000000145 0

0 0.7692 -0.62223 -0.000000000145 0 0

0 0 -0.000006 -0.000034188 0 0

0 -0.000006 0 0.000034188 -0.000034188 0

-0.000006 0 0 0 0.000034188 -0.000034188

B =

0.76923 0

0 0

0 0

0 0.000034188

0  0

0 0

C =

1 0 0 0 0 0

0 1 0 0 0 0

D =

0 0

0 0

Как известно, для устойчивости линейной системы необходимо и достаточно, чтобы собственные значения матрицы A имели отрицательные действительные части. Вычислим собственные значения матрицы A по команде:

**>> eig(A)**

ans =

-0.622230783776320

-0.622230761957996 + 0.000000012591295i

-0.622230761957996 - 0.000000012591295i

-0.000034194819956 + 0.000000011748268i

-0.000034194819956 - 0.000000011748268i

-0.000034174462648

Собственные значения системы находятся в левой части комплексной плоскости. Это говорит о том, что данная система устойчива. Обратим внимание на то, что если пренебречь малыми значениями комплексной части, то собственные значения получатся практически кратными. Незначительные различия числовых значений можно объяснить слабым взаимодействием газовой и жидкой фаз. Проверим это, определив корни отдельных контуров с обратной связью, образующих систему.

Верхние три контура по газу будут одинаковыми. Они имеют вид, изображенный на рисунок 3.6.

*Рисунок 3.6* *– Контур с обратной связью по газу*

В общем виде контур можно представить следующим образом:

Wn(s)

WОС(s)

*Рисунок 3.7 – Контур с обратной связью в общем виде*

Тогда передаточная функция каждого из контуров по газу будет выглядеть так:

Отсюда .

Проведем аналогичный анализ для трех контуров с обратной связью по флегме, которые будут иметь вид, изображенный на рисунке 3.8.

*Рисунок 3.8 – Контур с обратной связью по флегме*

В общем виде контур будет выглядеть так же, как на рисунке 3.7. Поэтому рассчитаем передаточные функции каждого из трех контуров по флегме:

Откуда .

Подтвердить устойчивость положения равновесия системы можно с помощью *критерия устойчивости Рауса*, который предполагает построение таблицы 2. Найдем коэффициенты характеристического полинома с помощью команды poly(A):

ans = 1.000000000000000 1.866794871794872 1.161704849660309 0.241028926278346 0.000024712769306 0.000000000844788 0.000000000000010

Тогда характеристический полином примет вид:

D(s)=s6+1.866794871794872s5+1.161704849660309s4+0.241028926278346s3+0.000024712769306s2+ +0.000000000844788s+0.00000000000001

*Таблица 2* *– Таблица Рауса для процесса массообмена*

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 0-ой столбец | 1-ый столбец | 2-ой столбец | 3-ий столбец | 4-ый столбец |
|  | **1** | **1,1617** | **2,47E-05** | **1E-14** |
|  | **1,8668** | **0,241** | **8,45E-10** |  |
| **0,535676** | 1,032602078 | 2,47E-05 | 1E-14 | 0 |
| **1,80786** | 0,240955347 | 8,45E-10 | 0 | 0 |
| **4,28545** | 2,46959E-05 | 1E-14 | 0 | 0 |
| **9756,886** | 7,47213E-10 | 0 | 0 | 0 |
| **33050,72** | 1E-14 | 0 | 0 | 0 |
| **74721,31** | 0 | 0 | 0 | 0 |

Все коэффициенты вспомогательного или нулевого столбца таблицы Рауса положительны. Поэтому можно сделать вывод, что система устойчива.

Если в дальнейшем системой потребуется управлять, то в таком случае необходимо проверить систему на управляемость. Р. Калманом был доказан критерий управляемости, который гласит, что размерность управляемой части системы совпадает с рангом матрицы [10]:

U=|| B AB A2B … An-1B ||.

Для системы теплообменного процесса матрица управляемости будет иметь вид: U=|| B AB A2B A4B A5B ||.

При помощи команды **ctrb(A, B))** получим матрицу:

0.7692 0 -0.4786 0 0.2978 0 -0.1853 -0.0000 0.1153 0.0000 -0.0717 -0.0000

0 0 0.5917 0 -0.7363 -0.0000 0.6873 0.0000 -0.5702 -0.0000 0.4435 0.0000

0 0 0 -0.0000 0.4551 0.0000 -0.8496 -0.0000 1.0573 0.0000 -1.0965 -0.0000

0 0.0000 0 -0.0000 0 0.0000 -0.0000 -0.0000 0.0000 0.0000 -0.0000 -0.0000

0 0 0 0.0000 -0.0000 -0.0000 0.0000 0.0000 -0.0000 -0.0000 0.0000 0.0000

0 0 -0.0000 0 0.0000 0.0000 -0.0000 -0.0000 0.0000 0.0000 -0.0000 -0.0000

Важно отметить, что значения вида -0.0000 или 0.0000 являются малыми, но не нулевыми.

Определим ранг матрицы:

**>> rank(ctrb(A, B)**

ans = 6

Ранг матрицы управляемости равен размерности матрицы состояний. Это означает, что система управляема.

***Исследование влияния возмущений на состояние системы***

Понаблюдаем, как будет вести себя система при подаче на ее входы возмущений. Увеличим и уменьшим концентрацию целевого компонента на входе пара на 10%, графики переходных процессов будут выглядеть следующим образом (рисунок 3.9 и рисунок 3.10).



*Рисунок 3.9 –* *Переходные процессы по пару (слева) и флегме (справа) при %*



*Рисунок 3.10 – Переходные процессы по пару (слева) и флегме (справа)при %*

Проведем аналогичные действия, увеличив и уменьшив концентрацию целевого компонента на входе жидкости на 10% (рисунки 3.11, 3.12).



*Рисунок 3.11* *– Переходные процессы по пару (слева) и флегме (справа) при %*



*Рисунок 3.12 – Переходные процессы* *по пару (слева) и флегме (справа) при %*

Заметим, что подача возмущения на вход жидкости не оказывает большого влияния на процессы, происходящие в системе, в то время как при подаче возмущения на вход пара уже наблюдается переходные процессы.

## Моделирование теплообменного процесса

По уравнениям (2.8) была разработана структурная схема ММ теплообменного процесса в укрепляющей секции РК, представленная на рисунке 3.13.



*Рисунок 3.13 – Структурная схема ММ теплообменного процесса в укрепляющей секции РК*

В таблице 3 приведены параметры модели, изучение поведения которой будет производиться в среде MATLAB/Simulink.

*Таблица 3* – *Значения параметров теплообменного процесса в УРК*

|  |  |
| --- | --- |
| Температура флегмы, на входе | 30 |
| Температура пара, на выходе | 67 |
| Температура пара на входе и флегмы на выходе | 142,51 |
| Скорость флегмы, |  |
| Скорость пара, |  |
| Коэффициенты, зависящие от физико-химического состояния фаз и геометрии аппарата | |
| м/с | |
|  | |
| П = 64 мм = 64\*10-3 м | |
| S= 86 мм2 = 86\*10-3м | |
| кДж/кг\*К | |
| кг/м3 | |
| кВт/м2\*К | |
| кДж/кг\*К | |
| кг/м3 | |
| кВт/м2\*К | |

α – коэффициент теплоотдачи, ккал/м2\*ч\*°С

П – периметр поперечного сечения среды (периметр одной щели в насадке)

S – площадь поперечного сечения среды (площадь 1 щели в насадке)

с – удельная теплоемкость среды, ккал/кг\*°С

γ – удельный вес, кг/м3

На основе структурной схемы была построена компьютерная модель процесса теплообмена в укрепляющей секции РК, реализованная в среде разработки Simulink. Она изображена на рисунке 3.14.



*Рисунок 3.14 – Компьютерная модель теплообменного процесса в укрепляющей секции РК в среде* MATLAB*/Simulink*

Произведя моделирование процесса при номинальном режиме, получили следующие результаты (рисунок 3.15 и рисунок 3.16):



θ

θ

θ

*Рис. 3.15 – Начальное распределение температуры пара по высоте колонны*

  
*Рисунок 3.16 – Начальное распределение температуры флегмы по высоте колонны*

θ

θ

θ

Другим подходом уточнения равновесного начального профиля является использование итерационного метода. Найдем положение равновесия системы, воспользовавшись командой trim из математического пакета MATLAB. Для этого сначала модифицируем компьютерную модель к виду, изображенному на рисунке 3.17.

**

*Рисунок 3.17 – Компьютерная модель теплообменного процесса для использования с помощью команды trim*

Для применения расширенной команды trim зададим следующие начальные условия:

**x0=[142.5; 106.5; 67.5; 66.5; 105; 142.5];**

**y0=67.5;**

**u0=[142.5];**

**iy=[];**

**iu=[1];**

**ix=[];**

а саму команду опишем следующим образом:

**[x,u,y,dx]=trim('RK\_US\_teplo\_trim',x0,u0,y0,ix,iu,iy)**

Получим следующие результаты:

x =

1.0e+002 \*

1.188155204072217

0.936821079461265

0.670111220149364

0.588046648054773

0.859487502655442

1.115279882248709

u = 1.425000000000000e+002

y = 67.011122014936433

dx =

1.0e-009 \*

0.344499540005927

0.106467723526293

-0.613454176345840

-0.000009423017922

-0.000041808570495

0.000024768381790

Проведя исследование системы с помощью команды **trim**, мы подтвердили результаты, полученные при исследовании статического режима через динамику.

***Исследование устойчивости дискретно-непрерывной модели***

Аналогично, как и для массообмена, произведем анализ устойчивости системы в равновесном состоянии.

Модель в ФПС:

**>> [A,B,C,D]=linmod('RK\_US\_teplo')**

A =

-3.26923 0 0.76923 2.5 0 0

0 -3.26923 0 0 0 2.5

0 0.76923 -3.26923 0 2.5 0

0.00012 0 0 -0.0001542 0 0

0  0 0.00012  0.0000342 -0.0001542 0

0 0.00012 0 0 0.0000342 -0.0001542

B =

0.76923 0

0 0

0 0

0 0.0000342

0 0

0 0

C =

1 0 0 0 0 0

0 1 0 0 0 0

D =

0 0

0 0

В результате выполнения этой команды мы получили модель объекта в ФПС.

Вычислим собственные значения матрицы A по команде:

**>>** **eig(A)**

ans =

-0.000022127037846

-0.000066489255282

-0.000098649338471

-3.269362830226970

-3.269286307926592

-3.269318468009698

Собственные значения системы находятся в левой части комплексной плоскости. Это говорит о том, что данная система устойчива. Исследуем корни отдельных контуров с обратной связью, образующих систему.

Верхние три контура по газу будут одинаковыми. Они имеют вид, изображенный на рисунке 3.18.

*Рисунок 3.18 – Контур с обратной связью по газу для теплообмена*

В общем виде контур будет выглядеть так же, как на рисунке 3.7

Тогда передаточная функция каждого из контуров по газу будет выглядеть так:

Отсюда .

Проведем аналогичный анализ для трех контуров с обратной связью по флегме, которые будут иметь вид, изображенный на рисунке 3.19.

*Рисунок 3.19 – Контур с обратной связью по флегме для теплообмена*

В общем виде контур будет выглядеть так же, как на рисунке 3.7. Поэтому рассчитаем передаточные функции каждого из трех контуров:

Откуда .

Собственные значения матрицы отличаются от корней отдельных контуров с обратной связью. Это говорит о том, что в системе присутствует взаимодействие газовой и жидкой фаз.

Подтвердить устойчивость положения равновесия системы можно с помощью *критерия устойчивости Рауса*, который предполагает построение таблицы 4. Найдем коэффициенты характеристического полинома с помощью команды poly(A):

ans = 1.000000000000000 9.808154871794859 32.067246225167921 34.950060162523123 0.006544148079088 0.000000356893496 0.000000000005072

Тогда характеристический полином примет вид:

D(s)=s6+9.808154871794859s5+32.067246225167921s4+34.950060162523123s3+ +0.006544148079088s2+ 0.000000356893496s+0.000000000005072

*Таблица 4 – Таблица Рауса для теплообмена*

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 0-ой столбец | 1-ый столбец | | 2-ой столбец | | 3-ий столбец | | 4-ый столбец | |
|  | | **1** | | **32,06725** | | **0,00654415** | | **5,07E-12** | |
|  | | **9,808154872** | | **34,95006** | | **3,5689E-07** | | **0** | |
| **0,101956** | | 28,50387874 | | 0,006544 | | 5,072E-12 | | 0 | |
| **0,344099** | | 34,94780834 | | 3,57E-07 | | 0 | | 0 | |
| **0,815613** | | 0,006543821 | | 5,07E-12 | | 0 | | 0 | |
| **5340,582** | | 3,29804E-07 | | 0 | | 0 | | 0 | |
| **19841,52** | | 5,072E-12 | | 0 | | 0 | | 0 | |
| **65024,51** | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | |

Все коэффициенты вспомогательного или нулевого столбца таблицы Рауса положительны, что говорит о том, что система устойчива.

Т.к. в данной работе предусмотрено управление системой, то тогда необходимо проверить систему на управляемость. Для этого получим матрицу управляемости и определим ее ранг.

Матрица управляемости будет выглядеть следующим образом:

0 0 0 0.0001 0.4552 -0.0003 -4.4641 0.0009 29.1889 -0.0030 -159.0455 0.0098

0 0 0.0001 0 -0.0003 0.0000 0.0010 -0.0000 -0.0032 0.0000 0.0105 -0.0000

0.7692 0 -2.5148 0 8.2217 0 -26.8793 0.0000 87.8771 -0.0000 -287.2985 0.0000

0 0 0.5917 0 -3.8689 0.0000 18.9729 -0.0000 -82.7043 0.0000 337.9830 -0.0000

0 0.0000 0 -0.0000 0 0.0000 0.0001 -0.0000 -0.0005 0.0000 0.0035 -0.0000

0 0 0 0.0000 0.0001 -0.0000 -0.0005 0.0000 0.0023 -0.0000 -0.0099 0.0000

Отметим, что значения вида -0.0000 или 0.0000 являются малыми, но не нулевыми.

Ранг матрицы управляемости:

**>>** **rank(****ctr****b(A, B))**

ans = 6

Ранг матрицы управляемости равен размерности матрицы состояний. Это означает, что система управляема.

***Исследование влияния возмущений на состояние системы***

Проанализируем поведение системы при возмущениях. Подадим на вход пара возмущение, равное . Переходные процессы в промежуточных и конечной точках показаны на рисунке 3.20 и рисунке 3.21.



t,c

t,c

*Рисунок 3.20 – Переходные процессы по пару при*



t,c

*Рисунок 3.21 – Переходные процессы по флегме при*

Подадим теперь на вход пара возмущение равное . Переходные процессы по флегме и пару изображены на рисунке 3.22 и рисунке 3.23.



t,c

t,c

*Рисунок 3.22 – Переходные процессы по пару при*



t,c

*Рисунок 3.23 – Переходные процессы по флегме при*

Прямые по флегме получились в связи с тем, что пар оказывает слабое влияние на флегму, поэтому переходные процессы практически не наблюдаются.

# Разработка системы регулирования температуры флегмы в укрепляющей секции ректификационной колонны

## Разработка функциональной схемы системы регулирования

В соответствии с техническими параметрами составляющих контура регулирования строится функциональная схема контура регулирования температуры флегмы верхней части укрепляющей секции ректификационной колонны (рисунке 4.1).

ЭПП

МИМ

КлР

ОУ

НП

ЧЭ

Р

ИУ

ИИС

Gф

Rд

*Рисунок 4.1 – Функциональная схема контура регулирования*

На схеме приняты следующие обозначения:

***ИУ*** – исполнительное устройство в составе: ***ЭПП*** – электропневмопозиционер (преобразователь токового сигнала в пневматический), ***МИМ*** – мембранный исполнительный механизм (преобразователь пневматического сигнала в механический), ***КлР*** – клапан-регулятор;

***ИИС*** – информационно-измерительная система в составе: ***ЧЭ*** – чувствительный элемент (платиновый термопреобразователь сопротивления ТСПУ), ***НП*** – нормирующий преобразователь (преобразует измеренное сопротивление в токовый сигнал 4…20 мА);

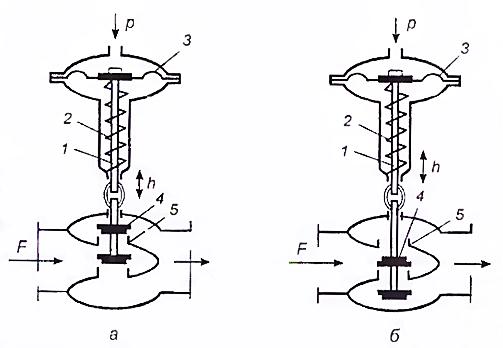
***Р*** – регулятор (в данном случае это модуль в системе АСУ ТП). На входе регулятора измеренный токовый сигнал и заданная температура, на выходе токовый сигнал 4…20мА, который подается на ЭПП.

## Технические характеристики элементов системы регулирования

***Исполнительное устройство***

Устройство автоматической системы управления, воздействующее на технологический процесс в соответствии с полученным от управляющего устройства командным сигналом, называется исполнительным устройством (ИУ). Выходным параметром ИУ является расход вещества, поступающего в объект управления, а входным — командный сигнал управляющего устройства.

По виду действия ИУ мембранного типа делятся на нормально-открытые (НО) и нормально - закрытые (НЗ). При прекращении подвода энергии, создающей перестановочные усилия, проходное сечение нормально открытого ИУ полностью открывается (рисунок 4.2, а), нормально закрытого ИУ — полностью перекрывается (рисунок 4.2, б).



*G*

*G*

*Рисунок 4.2 – Схемы клапанов с мембранными исполнительными механизмами: a – нормально открытый (НО); нормально закрытый (НЗ); 1 – шток, 2 – пружина, 3 – мембрана, 4 – затвор, 5 – седло*

В данном случае целесообразно применять нормально открытый, т.к. при аварийном прекращении подачи воздуха в исполнительный механизм безопасно иметь открытую технологическую линию (трубопровод).

Исполнительное устройство является «рабочей лошадкой» процессов управления. Одно из главных требований к ИУ — высокая надежность работы. В большинстве современных контуров управления используются датчики и регуляторы без движущихся частей. Единственным элементом контура, содержащим движущиеся части, остается исполнительное устройство. Следовательно, оно наиболее подвержено износу и коррозии и требует повышенного внимания для того, чтобы находиться в рабочем состоянии.

Основными функциональными блоками ИУ являются исполнительный механизм и регулирующий орган.

***Регулирующий орган (КлР)***

Регулирующий орган (РО) — техническое средство изменения материального или энергетического потока, влияющего на регулируемую величину в ОУ. Это устройство, непосредственно воздействующее на ОУ для поддержания заданного значения регулируемой величины или изменения ее по заданному закону. Регулирующие органы различаются по непрерывности воздействия на расход рабочей среды, по конструкции, по пропускным характеристикам, по типоразмерам, по материалам, применяемым для их изготовления, области применения.

Для непрерывного регулирования расхода жидкостей и газов в химической промышленности широко применяются дроссельные РО, представляющие собой переменное гидравлическое сопротивление для протекающей рабочей среды. Изменение расхода рабочей среды осуществляется за счет изменения проходного сечения РО.

Пропускная характеристика показывает зависимость пропускной способности регулирующего органа от перемещения затвора h:

При малых перемещениях характеристика будет линейно зависимой и приращение пропускной способности пропорционально перемещению затвора, т. е.

где *С* — постоянная величина; *h* — перемещение затвора.

Тогда передаточная функция определяется отношением выхода к входу:

где – коэффициент передачи клапана.

Пропускную способность регулирующего органа Кv, необходимую для обеспечения максимального расхода жидкости, определяют по уравнению:

где — максимальный объемный расхода жидкости, м3/ч; — перепад давления на РО при максимальном расходе, МПа; — плотность жидкости, кг/м3.

Применяются следующие значения величин:

=64кПа, = 977кг/м3, = 280,47 кг/ч = 0,287м3/ч.

Тогда

Подставив значения и *h*=10мм*,* получим передаточную функцию клапана регулятора в виде пропорционального звена:

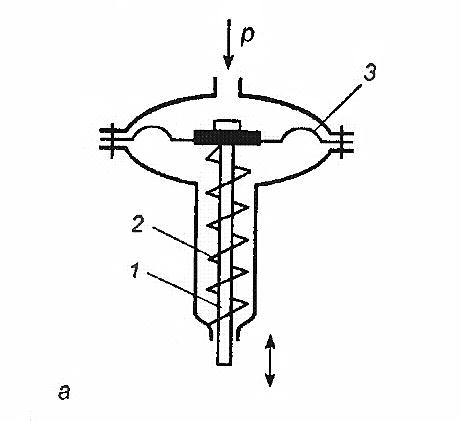
***Исполнительный механизм (МИМ)***

Исполнительный механизм (ИМ) предназначен для усиления мощности командного сигнала, получаемого от регулятора, и воздействия на регулирующий орган.

Пневматические исполнительные механизмы просты, надежны и удобны в эксплуатации. Они взрыво- и пожаробезопасны. Пневматические ИМ обладают высоким быстродействием и точностью позиционирования при умеренном перестановочном усилии и небольших габаритах.

Входным сигналом пневматических исполнительных механизмов является давление сжатого воздуха (0,02...0,1 МПа), соответствующее командному сигналу регулятора. МИМ преобразует изменение входного пневматического сигнала в перемещение выходного звена. Величина перемещения пропорциональна изменению входного сигнала.

В данном случае будет использоваться *исполнительный пневматический мембранный механизм* (в дальнейшем - МИМ) (рисунок 4.3).



*Рис.4.3. Мембранный исполнительный механизм (1 – шток, 2 – пружина, 3 – мембрана )*

Прорезиненная мембрана *3* с жестким металлическим центром зажата между двумя фланцами, разделяя пространство МИМ на две полости. Жесткий центр мембраны связан со штоком *1*. Под мембраной расположена противодействующая пружина *2*. Командный сигнал в виде давления сжатого воздуха подается в рабочую полость над мембраной, создавая усилие

*F1, = Аpк,*

пропорциональное командному сигналу (А — эффективная площадь мембраны).

Под действием усилия *F1* мембрана вместе со штоком перемещается вниз. Пружина сжимается, создавая уравновешивающее усилие

*F2=сh,*

пропорциональное перемещению штока ИМ (с — коэффициент жесткости пружины). При равновесии *F1=F2,*т. е.

h = (A/c)*pк*,

откуда следует, что в статическом режиме перемещение штока ИМ пропорционально командному сигналу. Это позволяет использовать величину командного давления *pк*  в качестве сигнала, определяющего положение регулирующего органа. Статическая характеристика, связывающая величину командного давления с положением штока во всем диапазоне его перемещения, называется *ходовой характеристикой* ИМ.

Шток исполнительного механизма соединен со штоком регулирующего органа (см., например, рисунок 4.2, а). С увеличением давления воздуха в полости над мембраной *3* шток *1* вместе с затвором *4* движется вниз и уменьшает проходное сечение клапана, что снижает расход рабочей среды. При уменьшении давления воздуха затвор за счет упругих сил пружины *2* приподнимается, и клапан открывается.

Передаточная функция исполнительного механизма представляет собой апериодическое звено первого порядка:

Коэффициент передачи:

*k*мим*= pк/h,*

где *pк=*100кПаи *h=*10мм.

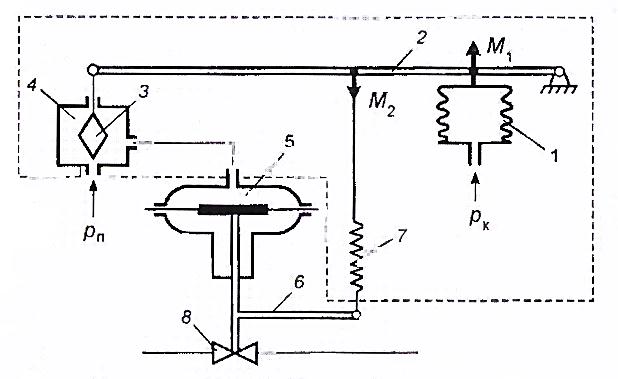
Тогда *k*мим*=*10/100=0.1 кПа/мм. Постоянная времени .

Тогда передаточная функция МИМ будет иметь вид:

Для повышения точности и быстродействия пневматических ИУ при работе в тяжелых условиях (большое давление и повышенная вязкость регулируемой среды, большая длина пневматической соединительной линии и др.) их снабжают позиционерами.

***Позиционер (ЭПП)***

*Позиционеры* служат для усиления мощности пневматического сигнала и обеспечения строгой пропорциональности между перемещением штока ИМ и давлением *pк*, соответствующем командному сигналу регулятора. Это своеобразные усилители с обратной связью по положению штока. Обязательными конструктивными элементами позиционера (рисунок 4.4) являются чувствительный элемент (например, сильфон *1*), пружина обратной связи *7*, одним концом связанная со штоком ИМ, и золотниковое устройство *3*, *4*, в которое подается сжатый воздух от внешнего источника питания (например, компрессора). Командный сигнал *pк* поступает в сильфон *1*, который преобразует этот сигнал в параметр, удобный для сравнения, — перемещение или усилие. Вид параметра сравнения предопределяет принцип действия позиционера — компенсация перемещений или компенсация сил. Большее распространение получил принцип компенсации сил, который легко реализуется конструктивно и обеспечивает высокую точность. Сравниваются усилие, создаваемое командным сигналом, и усилие, зависящее от текущего положения штока ИМ. создаваемое пружиной обратной связи *7*. При рассогласовании этих сил чувствительный элемент управляет работой золотникового устройства, которое изменяет расход сжатого воздуха, направляемого из внешнего источника питания в верхнюю полость МИМ [5].



*Рисунок 4.4 – Схема позиционера: 1- сильфон, 2 – рычаг, 4 – золотникова камера, 5- МИМ, 6 – тяга, 7 – пружина обратной связи, 8 – РО, pn – давление питания, pк – командный сигнал.*

Для усиления мощности пневматического сигнала и уменьшения рассогласования в данном случае был выбран электропневматический позиционер SIPART PS2.

Выведем передаточную функцию позиционера.

Электропневмопозиционер будет представлять собой пропорциональное звено с коэффициентом передачи равным

Тогда

***Термопреобразователь сопротивления.***

В качестве датчика температуры используется платиновый термопреобразователь сопротивления. Термопреобразователи сопротивлений применяют для измерения температур в пределах от до . Рабочим органом термопреобразователя является чувствительный элемент, выполненный из платиновой проволоки.

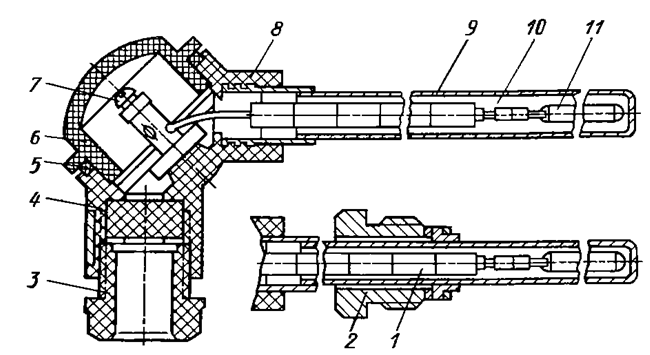
Чувствительность преобразователей сопротивления определяется температурным коэффициентом сопротивления материала, из которого сделан термопреобразователь, т.е. относительным изменением сопротивления чувствительного элемента термопреобразователя при нагревании его на 1 ℃.

Чувствительный элемент платиновых термопреобразователей сопротивления представляет собой платиновую спираль из тонкой проволоки, помещенную в капиллярную керамическую трубку, заполненную керамическим порошком, который одновременно изолирует и поддерживает спираль. С торцов трубка плотно закрыта пробками. Такая конструкция обеспечивает большую надежность в условиях вибрации и высокой температуры. К концам спирали припаяны выводные провода.

Конструкция термопреобразователя сопротивления показана на рисунке 4.5. Собранный чувствительный элемент *11* помещают в защитный чехол *9*, который предохраняет его от механических повреждений и агрессивных воздействий измеряемой среды. Выводные провода чувствительного элемента изолируют фарфоровыми изоляторами *1* и присоединяют к контактным клеммам *7*, расположенным в головке *4* преобразователя, которую закрывают крышкой *6* с прокладкой *5*. Герметизацию выходных проводов чувствительного элемента осуществляют с помощью эпоксидного компаунда *8*. Свободное пространство защитного чехла заполняют окисью алюминия *10*.

Термопреобразователь сопротивления может иметь штуцеры *2* и *3* для крепления по месту и ввода соединительных проводов измерительных приборов.

Принцип действия термопреобразователей сопротивления основан на пропорциональном изменении его электрического сопротивления в зависимости от температуры.



*Рисунок 4.5 – Термопреобразователь сопротивления*

Преимуществами платиновых термопреобразователей сопротивления являются: большой температурный коэффициент электрического сопротивления и высокое удельное сопротивление; устойчивость к окислительной (воздушной) среде; способность продолжительное время сохранять свои характеристики.

В данном случае используется именно платиновый термопреобразователь сопротивления ТСМ 100М, а не медный. Так как медные термопреобразователи применяют для измерения небольших температур, а также медь имеет не большое удельное сопротивление и интенсивное окисление уже при невысоких температурах [6].

Выведем передаточную функцию платинового термопреобразователя сопротивления. Если считать термопреобразователь объектом с сосредоточенными параметрами, то количество теплоты, переходящее от окружающей среды к материалу термопреобразователя, может быть описано уравнением Ньютона:

где количество теплоты; время; коэффициент теплопроводности; толщина стенки чувствительного элемента; внешняя поверхность чувствительного элемента; текущая температура среды; текущая температура чувствительного элемента.

Количество теплоты, аккумулируемое чувствительным элементом, может быть определено из уравнения:

где средняя удельная теплоемкость материала чувствительного элемента; объем чувствительного элемента; удельный вес материала чувствительного элемента.

Продифференцировав уравнение (4.2) по времени, получим

Приравняем правые части уравнений (4.1) и (4.3), тогда получим

Разделим уравнение (4.4) на выражение тогда

В уравнении (4.5) коэффициент при производной есть величина постоянная, называемая постоянной времени чувствительного элемента:

Подставив значение в уравнение (4.5), получим дифференциальное уравнение 1-го порядка:

Принимая значение за с учетом коэффициента передачи , запишем уравнение динамики чувствительного элемента термопреобразователя в следующем виде:

Преобразовав уравнение (8) по Лапласу, получим передаточную функцию термопреобразователя в виде апериодического звена 1-го порядка:

где коэффициент усиления, который определяется зависимостью выходной величины от входной  постоянная времени чувствительного элемента, которая характеризуется температурным коэффициентом электрического сопротивления платины.

Вследствие инерционности чувствительного элемента термопреобразователя, его температура отстает от температуры регулируемой среды. характеризует тепловую инерционность чувствительного элемента.

Номинальное значение сопротивления при равно 100 Ом. Технические характеристики термопреобразователя приведены в таблице 5.

*Таблица 5 – Технические характеристики ТСМ 100М*

|  |  |
| --- | --- |
| Рабочий диапазон измеряемых температур | -50…+150 |
| Выходной токовый сигнал, мА | 4 … 20 |
| Показатель тепловой инерции, с | 15 |



*=*15c.

Подставив числовые значения, получим:

***Нормирующий преобразователь.***

Нормирующие преобразователи температуры предназначены для преобразования сигнала датчиков термосопротивления или термоЭДС термопар в стандартный выходной токовый сигнал 0…5, 0…20 или 4…20 мА. Необходимость применения нормирующих преобразователей связана с тем, что в некоторых случаях измеренное значение температуры требуется передать на несколько вторичных приборов. Сделать это, имея выходной сигнал термоЭДС и, особенно, термосопротивления весьма проблематично.

Так же целесообразно применять нормирующий преобразователь в случае, если термопара существенно удалена от вторичного прибора. Ведь при этом материальные затраты на приобретение компенсационного провода могут быть очень велики. Выгоднее использовать встроенный в головку термопары нормирующий преобразователь (так называемую токовую таблетку (см. рисунок 4.6)) и выполнить подключение к вторичному прибору обычным медным кабелем [7].



*Рисунок 4.6 – Токовая таблетка, встроенная в термопару.*

Передаточная функция представляет собой отношение выхода, т.е. , к входу = 20мА. Тогда

## Компьютерное моделирование системы регулирования температуры УРК

На основе функциональной схемы и разработанных передаточных функциях объектов была построена компьютерную модель системы регулирования средствами MATLAB/Simulink (рисунок 4.7).

ИУ

ИИС



*Рисунок 4.7 – Компьютерная модель системы регулирования температуры УРК*

В данной схеме блок OU представляет собой объект управления, компьютерная модель (схема подключения) которого изображена на рисунке 4.8.



*Рисунок 4.8 – Компьютерная модель объекта управления в среде MATLAB/Simulink*

Для регулирования процессов в системе был взят типовой П-регулятор, который имеет передаточную функцию вида:

где – коэффициент усиления регулятора.

При подборе коэффициента усиления не были использованы известные методики его настройки. Это связано с тем, что модель объекта является нелинейной. Поэтому настройка регулятора осуществляется подбором коэффициента пропорциональности . При коэффициенте усиления система представляет оптимальные результаты. Отклонение от данного значения приводит к расхождению процессов.

Произведем моделирование процесса при номинальном режиме. Шаг выбран 0.01. В итоге получили следующие результаты (рисунок 4.9):

t, c



*Рисунок 4.9 – Температура флегмы на выходе системы.*

Установившаяся ошибка при этом составляет не более 5% (рисунок 4.10):



*Рис. 4.10. Статическая ошибка системы.*

Подадим возмущающее воздействие на вход пара равное . При этом переходные процессы будут выглядеть следующим образом (рисунок 4.11):



t, c

*Рисунок 4.11 – Переходный процесс на выходе системы (слева) и ошибка системы (справа).*

Результаты моделирования системы регулирования температуры флегмы показали, что система способна за конечное время приходить в заданное состояние. При этом при использовании П-регулятора установившаяся ошибка не превышает 5%.

# Заключение

В ходе выполнения работы, были достигнуты следующие результаты:

1. На основе непрерывных моделей с распределенными параметрами разработаны дискретно-непрерывные модели массообменного и теплообменного процессов, которые легли в основу разработки структурных схем и построения компьютерных моделей систем.
2. Исследование устойчивости процессов показало, что положения равновесия систем массообмена и теплообмена устойчивы. Анализ управляемости теплообменного процесса подтвердил возможность перевода системы из одного состояния в другое за конечное время.
3. Разработаны компьютерные модели массообменного и теплообменного процессов на основе полученных дискретно-непрерывных моделей. Нужно отметить, что результаты моделирования, полученные с помощью метода установления и подтвержденные использованием команды trim программного средства MATLAB, соответствуют натурным измерениям на выходах укрепляющей секции РК. При подаче возмущающего воздействия графики переходных процессов по флегме и пару показали, что влияние пара на флегму достаточно слабое.
4. Введение контура регулирования в управление температурой флегмы позволило добиться того, что при возмущающем воздействии внешней среды на систему температура устанавливается в заданное значение за время, отвечающее поставленным требованиям. С помощью П-регулятора удалось добиться установившегося значения температуры флегмы с ошибкой не более 5%.

# Список использованных источников.

1. Абрамкин С.Е. Анализ технологического процесса абсорбционной осушки газа как объекта управления //Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», серия «Информатика, управление и компьютерные технологии», Вып. 3.2007. С. 24-31.
2. Багатуров С.А. Основы теории и расчета перегонки и ректификации. М.: Химия, 1974. 440с.
3. Фарамазов С.А. Оборудование нефтеперерабатывающих заводов и его эксплуатация / М.: Химия, 1978. 352с.
4. Анисимов И.В. Автоматическое регулирование процесса ректификации. М.: Гостоптехиздат, 1961. 180с.
5. Беспалов А.В., Харитонов Н.И. Системы управления химико-технологическими процессами: Учеб. пособие для вузов. М.: ИКЦ "Академкнига", 2007. 696с.
6. Крамарухин К.Е Приборы для измерения температуры. М.: Машиностроение, 1990. 208с.
7. <http://knowkip.ucoz.ru/publ/vtorichnye_pribory/normirujushhie_preobrazovateli/normirujushhie_preobrazovateli_temperatury/11-1-0-18> - нормирующие преобразователи температуры.
8. Душин С.Е., Зотов Н.С., Имаев Д.Х., Кузьмин Н.Н. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов. М.: Высшая школа, 2003. 567 с.
9. Душин С.Е., Красов А.В., Кузьмин Н.Н. Моделирование систем управления: Учеб. пособие для вузов. М.: Студент, 2012. 348с.
10. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. М.: Наука, 1975. С.768
11. Абрамкин С.Е., Душин С.Е. Разработка математической модели технологического комплекса «Абсорбция – Десорбция» // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 1. С. 29–33.
12. Абрамкин С.Е., Душин С.Е. Динамическая модель подсистемы «РЕКТИФИКАЦИЯ» в системе «ДЕСОРБЦИЯ абсорбента» // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: труды Международной научно-технической конференции (г.Пенза, 19-22 апреля 2011 г.): в 2 т. / под ред. д.т.н., проф. М.А. Щербакова. – Пенза; Изд-во ПГУ, 2011. – 2 т. – С. 174-177.