

Г.В. Волкова, А.Н. Лабутин, В.Ю. Невиницын

**ПРАКТИКУМ ПО ОСНОВАМ АНАЛИЗА
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
КАК ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ**

Учебное пособие



Иваново 2018

Министерство образования и науки Российской Федерации
Ивановский государственный химико-технологический университет

Г.В. Волкова, А.Н. Лабутин, В.Ю. Невиницын

**ПРАКТИКУМ ПО ОСНОВАМ АНАЛИЗА
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
КАК ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ**

Учебное пособие

Иваново 2018

УДК 681.5

Волкова, Г.В.

Практикум по основам анализа технологических процессов как объектов управления: учеб. пособие / Г.В. Волкова, А.Н. Лабутин, В.Ю. Невиницын; Иван. гос. хим.-технол. ун-т –Иваново, 2018.– 121с.

В учебном пособии изложены задачи анализа технологических процессов как объектов управления с использованием математического моделирования, их содержание и методы решения. Сформулированы темы практических и лабораторных занятий, порядок выполнения заданий по каждой теме, вопросы для самостоятельной работы.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров: «Управление в технических системах», «Автоматизация технологических процессов и производств», а также магистрантов по магистерской программе «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» очной и заочной форм обучения.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Ивановского государственного химико-технологического университета.

Рецензенты:

кафедра прикладной математики Ивановского государственного энергетического университета; кандидат технических наук П.В. Гриневич (ООО «Индасофт»)

© Волкова Г.В., Лабутин А.Н.,
Невиницын В.Ю., 2018

© ФГБОУ ВО «Ивановский государственный
химико-технологический университет», 2018

Введение

Целями изучения дисциплин "Технологические процессы и производства" и "Технологические процессы автоматизированных производств" являются: освоение закономерностей функционирования технологических процессов и производств отрасли; принципов и методов их анализа как объектов автоматизации и управления; формирование навыков исследования статических и динамических свойств технологических объектов автоматизации на ЭВМ.

Анализ производства или отдельного типового технологического процесса как объекта управления может проводиться как на стадии проектирования, так и для действующего производства. В обоих случаях анализ объекта заключается в построении его математической модели, исследовании динамических и статических свойств на модели и переносе результатов моделирования на объект с целью формулировки рекомендаций по автоматизации и управлению.

При описании и анализе химического производства необходимо различать следующие понятия: *технологическая операция*, *технологический процесс* и *производственный процесс*.

Технологическая операция (ТОп) это механическое, гидромеханическое, электромеханическое, физическое, химическое воздействие на исходные вещества и материалы с целью изменения их формы, физических свойств, состава, превращения одних веществ в другие.

Технологический процесс (ТП) – совокупность технологической операции и оборудования, на котором она осуществляется.

Под **производственным процессом (ПП)** понимают совокупность технологических процессов, связанных между собой

материальными, энергетическими и информационными потоками и осуществляемых для производства конечного продукта из исходного сырья.

Химическое производство представляет собой последовательность технологических процессов переработки сырья в необходимые продукты с обязательным использованием технологической операции химического превращения, изменяющего состав, свойства и структуру веществ. Поэтому, чтобы подчеркнуть отраслевую принадлежность технологического процесса, используют термин *химико-технологический процесс* или **ХТП**.

Процессы, протекающие в аппаратах химических производств, представляют собой сложное переплетение физико-химических явлений и эффектов, описываемых законами механики твердых тел, гидромеханики, теплообмена, термодинамики, массообмена, химической кинетики и др. Таким образом, аппарат химической технологии представляет собой сложную физико-химическую систему (ФХС). Анализ и исследование ФХС проводятся методами моделирования.

Метод моделирования широко применяется в науке и технике. Сущность построения модели заключается в том, что реальный физический объект (прообраз) упрощается и заменяется некоторым другим физическим или мысленным, абстрактным объектом (образом). Модели ХТП условно можно подразделить на концептуальные, физические и математические.

Под математическим моделированием понимают построение математической модели и изучение свойств объекта на математической модели. Его целью является определение оптимальных условий протекания процесса, исследование статических и динамических свойств и формулировка рекомендаций для построения систем управления (СУ).

Основные этапы анализа химико-технологических процессов как объектов автоматизации и управления и их содержание приведены ниже.

1 этап. Разработка концептуальной модели, предполагающая решение следующих задач:

- содержательное описание конструкции аппарата и протекающих в нем процессов, наглядное представление ХТП в форме рисунка, эскиза, принципиальной схемы;
- формулировка назначения и цели функционирования объекта;
- деление множества технологических параметров на входные переменные и переменные состояния;
- формулировка ограничений на переменные, исходя из требований к качеству продукта и условий безопасного ведения процесса;
- формулировка показателей эффективности и запись критерия эффективности (оптимальности) ХТП.

2 этап. Построение математической модели объекта аналитическим способом:

- формулировка упрощающих допущений;
- запись уравнений материальных и энергетических балансов, выражающих законы сохранения вещества и энергии, на базе модельных уравнений, описывающих гидродинамическую структуру потоков;
- параметрическая идентификация модели, проверка адекватности.

3 этап. Исследование математической модели одним из возможных способов:

3.1. Исследование исходной нелинейной модели с использованием численных методов решения уравнений; определение оптимальных условий проведения процесса; построение

статических и динамических характеристик по различным каналам; аппроксимация объекта по различным каналам типовыми линейными динамическими звеньями.

3.2. Линеаризация исходной нелинейной модели в окрестности рабочей точки аналитическим способом. Построение алгоритмической структурной схемы объекта и исследование статических и динамических свойств объекта.

3.3. Определение регулируемых переменных и соответствующих регулирующих воздействий, выявление статически независимых регулирующих воздействий и регулируемых переменных.

Конечной целью анализа ХТП как объекта управления является *получение (создание) математической модели* в форме передаточной функции по тому или иному каналу или в форме системы линейных обыкновенных дифференциальных уравнений. Анализ ХТП как объектов управления является первым этапом в решении общей задачи построения АСУТП.

I. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

Цель занятий: закрепление знаний, приобретение умений и навыков в вопросах построения математических моделей типовых технологических процессов, линеаризации уравнений математических моделей, разработки структурных схем объектов управления.

Тема 1. Разработка концептуальных моделей.

**Формулировка показателей и критериев эффективности,
классификация переменных**

Теоретическое введение

Концептуальная модель представляет собой содержательное описание функционирования ХТП. В этой модели в виде наглядного чертежа и словесного описания раскрывается сущность явлений и процессов, происходящих в исследуемой системе, устанавливаются взаимосвязи между технологическими параметрами. На основе концептуальной модели производят содержательную постановку задачи моделирования.

Основной целью разработки концептуальной модели является установление (выявление) явлений и элементарных процессов, протекающих в объекте, и содержательное описание взаимосвязей между ними. Каждое такое явление представляется как элемент сложной ФХС.

Содержательное описание ХТП является основой для последующей формализации объекта и разработки математической модели. Поэтому необходимо обстоятельное изучение моделируемого объекта, т.к. без достаточно полного содержательного базиса математическая модель зачастую оказывается непригодной к использованию.

Прежде всего, исходя из общих задач производства (или ХТС), формулируется *назначение* исследуемого ХТП и *цель* его функционирования. Задается цель в форме требований к показателям результативности, ресурсоемкости, оперативности функционирования ХТП либо к траектории достижения заданного результата. Как правило, цель для исследуемого ХТП определяется старшей системой, а именно ХТС.

На основе содержательного анализа определяется исходное множество характеристик ХТП – конструктивных и технологических параметров и выделяются наиболее существенные. Ввиду того, что численные значения технологических параметров в процессе функционирования ХТП изменяются во времени, их называют переменными.

Все технологические параметры подразделяются на две группы: 1) *параметры (переменные) состояния*; 2) *входные параметры (переменные)*.

В качестве *переменных состояния* выбирают те технологические параметры, которые в наибольшей степени отражают назначение ХТП и цель его функционирования. Обычно это физико-химические параметры выходных потоков и параметры, характеризующие количество вещества и энергии в аппарате. Среди подмножества переменных состояния выделяют подгруппу *выходных (регулируемых) переменных* – это переменные, которые измеряются и регулируются. Их изменение свидетельствует о нарушении теплового и материального балансов в аппарате. К ним относятся: уровень жидкости в аппарате – характеризует материальный баланс по жидкой фазе; давление – показатель баланса по газовой фазе; температура – показатель теплового баланса; концентрация – показатель материального баланса по компоненту.

Вторая группа – *входные переменные* – это технологические параметры, изменение которых приводит к изменению состояния, т.е. к изменению значений переменных состояния. Входные переменные влияют на ход технологического процесса. К данной группе относятся параметры, характеризующие приход количества вещества и энергии в аппарат или их расход. Значения входных переменных не зависят от условий функционирования объекта, а определяют его работу. Изменение входных переменных приводит к изменению количества вещества и энергии в аппарате, т.е. к изменению состояния объекта.

Среди входных переменных выделяют подгруппу *регулирующих (управляющих) переменных*. Это переменные, целенаправленно изменяемые по определенным законам системой регулирования (управления). Все остальные входные переменные, изменения которых отражают влияние на исследуемый объект внешней среды или предшествующих стадий, называют *возмущениями*. В свою очередь, возмущения могут быть контролируемыми и неконтролируемыми, детерминированными и случайными. Изменения случайных возмущающих переменных стихийны и оказывают дестабилизирующее влияние на ход технологического процесса.

Таким образом, исследуемый объект формально может быть представлен в виде схемы, изображенной на рис.1.

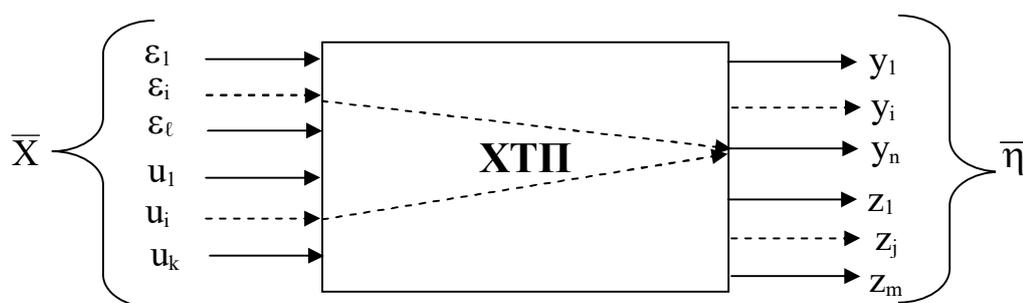


Рис. 1. Формальное представление объекта моделирования и управления

На рис. 1 обозначено:

- $\bar{\mathbf{X}} = \{\bar{\mathbf{U}}, \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}\}^T$ – вектор входных переменных;
- $\bar{\boldsymbol{\eta}} = \{\bar{\mathbf{Z}}, \bar{\mathbf{Y}}\}^T$ – вектор переменных состояния;
- $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}} = (\varepsilon_1 \dots \varepsilon_\ell)^T$ – вектор возмущающих переменных;
- $\bar{\mathbf{U}} = (\mathbf{u}_1 \dots \mathbf{u}_k)^T$ – вектор управляющих переменных;
- $\bar{\mathbf{Y}} = (\mathbf{y}_1 \dots \mathbf{y}_m)^T$ – вектор регулируемых выходных переменных;
- $\bar{\mathbf{Z}} = (\mathbf{z}_1 \dots \mathbf{z}_n)^T$ – вектор нерегулируемых выходных переменных.

Дальнейшие действия связаны с наложением ограничений на переменные, выражающие требования к качеству продукции и безопасному ведению процесса, а также с формулировкой **показателей качества и показателей эффективности исследуемого ХТП.**

Необходимо различать понятия "качество" и "эффективность" ХТП. *Качество* – это свойство или совокупность свойств системы, обуславливающих ее пригодность для использования по назначению. Показателями качества, как правило, выступают общесистемные и структурные свойства объектов: устойчивость, управляемость, динамичность, связность, сложность, масштабность, надёжность. *Эффективность* – это операционное свойство процесса функционирования объекта, характеризующее его приспособленность к достижению цели функционирования объекта. Эффективность характеризуется степенью соответствия результатов функционирования объекта с целью функционирования.

Показателями эффективности выступают функциональные (поведенческие) свойства объекта – результативность, ресурсоемкость, оперативность, работоспособность, активность, мощность, производительность, точность, экономичность и др.

Критерий эффективности ХТП отражает один или несколько показателей эффективности. Он оценивает результат технологической операции и процесс (алгоритм), обеспечивающий

получение этого результата. Математическое выражение критерия эффективности называют целевой функцией или *критерием оптимальности*.

Необходимо отметить, что формулировка цели функционирования ХТП и формирование критерия эффективности – наиболее важные задачи содержательного описания объекта.

Конструирование критерия эффективности на основе показателей эффективности является нетривиальной задачей и должно учитывать назначение и особенности конкретного ХТП в производственном процессе в целом. Критерий эффективности должен быть функцией (функционалом) выходных переменных и иметь "подходящую" форму $R=R(Y)$. Последнее означает, что он должен иметь экстремум. Одним из приемов (способов) конструирования критерия эффективности, обладающего этим свойством, является использование квадратичной функции, отражающей близость текущего значения показателя эффективности к заданному значению.

Пример

На рис. 2 представлена принципиальная схема емкостного реактора с мешалкой, работающего в изотермическом режиме.

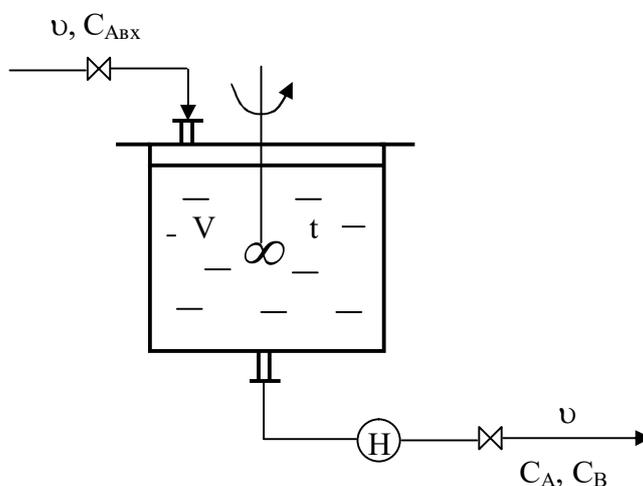


Рис. 2. Принципиальная схема объекта

Краткая характеристика объекта

В реакторе емкостного типа с перемешивающим устройством (рис.2) осуществляется реакция превращения исходного вещества **A** в продукт **B**: $A \rightarrow B$. Реакция протекает в изотермическом режиме ($t=\text{const}$). Рабочий объем аппарата не изменяется ($V=\text{const}$). Исходное вещество **A** подается в аппарат с расходом v и концентрацией $C_{A_{\text{вх}}}$. Образующийся продукт **B** покидает реактор в потоке с тем же расходом v и концентрацией C_B .

Назначение реактора – проведение химической реакции.

Целью функционирования объекта является получение вещества **B** в заданном количестве.

Классификация переменных

1. *Переменные состояния*: исходя из цели функционирования, основной переменной состояния является концентрация компонента **B** на выходе из аппарата C_B . Объем и температура в данном случае стабилизированы ($V=\text{const}$, $t=\text{const}$), т.е. не являются переменными.

2. *Входные переменные* или параметры, влияющие на состояние технологического процесса. Это концентрация исходного вещества **A**, подаваемого в аппарат $C_{A_{\text{вх}}}$, т.к. от нее зависит количество образующегося продукта **B**. При установившемся режиме работы объекта расходы входящего и выходящего потоков численно равны и не меняются в процессе функционирования реактора, т.е. не являются переменными.

Обеспечение заданного значения концентрации компонента в выходном потоке $C_B^{\text{зад}}$ – основная цель функционирования объекта. В этом случае показателем эффективности объекта является значение C_B . Критерий эффективности ХТП можно записать в форме:

$$R = (C_B^{\text{зад}} - C_B)^2 \quad (1.1)$$

Задача управления реактором заключается в обеспечении минимума величины R , т.е. система управления должна поддерживать режим работы аппарата, при котором $R \rightarrow \min$ (в пределе $R=0$), путем изменения управляющих (регулирующих) переменных.

В качестве показателя эффективности часто используют величину выхода продукта:

$$\psi_B = \frac{C_B - C_{B_{\text{вх}}}}{C_{A_{\text{вх}}}}, \quad (1.2)$$

где $C_{B_{\text{вх}}}$ – концентрация компонента B во входном потоке (если она есть). В этом случае критерий эффективности можно представить в виде:

$$R = (\psi_B^{\text{зад}} - \psi_B)^2 \rightarrow \min. \quad (1.3)$$

В силу того, что переменные состояния зависят от входных переменных (рис. 1), варьирование последних приводит к изменению значения критерия эффективности.

Задание по теме 1

Разработать концептуальную модель объекта (вариант объекта выдает преподаватель) с краткой характеристикой его работы, назначения и цели функционирования. Провести классификацию технологических параметров на переменные состояния и входные переменные. Сформулировать показатели эффективности и критерий эффективности для данного объекта. Выбрать входные параметры, которые могли бы использоваться в качестве регулирующих для решения задачи управления данным объектом.

Вопросы по теме 1

1. Цель и задачи анализа ХТП как объекта автоматизации и управления. Основные этапы анализа.
2. Что такое концептуальная модель? Основная цель разработки концептуальной модели.
3. Классификация технологических параметров (переменных).
Формальное представление объекта управления.
4. Дать определение параметров состояния, привести примеры.
5. Дать определение входных переменных, привести примеры.
6. Какие переменные входят в подгруппу регулирующих (управляющих) переменных ?
7. Раскрыть понятия "качество" и "эффективность" ХТП. Привести примеры показателей качества и показателей эффективности.
8. Что такое критерий эффективности ХТП ?

Тема 2. Составление математических моделей, описывающих гидродинамические структуры потоков

Теоретическое введение

На тепловые, массообменные и химические процессы, большое влияние оказывает гидродинамическая структура потоков в аппарате.

В реальных условиях частицы потока в аппарате движутся по очень сложным криволинейным траекториям, иногда в противоположном по отношению к движению основного потока направлении (рис. 3). Они подвержены столкновениям между собой под действием мешалок, перегородок и т.п. Это приводит к тому, что одни частицы могут быстрее пройти через аппарат, другие, наоборот, дольше задерживаются в аппарате, т.е. *время пребывания* частиц жидкости в аппарате различно. При этом может оказаться, что для частиц, наиболее быстро проходящих аппарат, время пребывания в нем недостаточно для достижения заданной полноты процесса, а для частиц, попавших в застойные зоны, время пребывания слишком велико, и поэтому данные участки аппарата используются неэффективно.

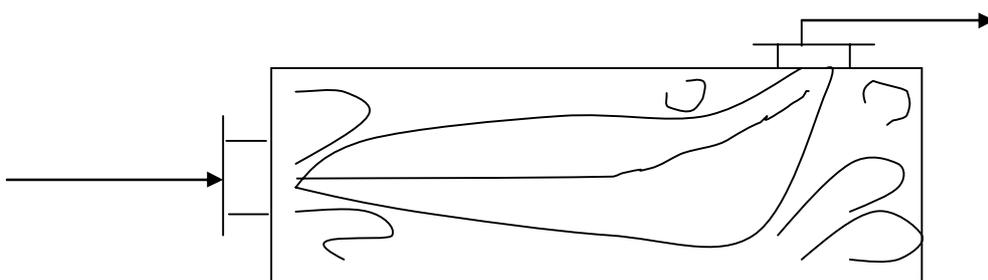


Рис. 3. Примеры движения потоков

Среднее время $\bar{\tau}$ пребывания всех частиц потока жидкости в аппарате определяется простым соотношением:

$$\bar{\tau} = \frac{V_a}{v}, \quad (2.1)$$

где V_a – объем рабочей зоны аппарата; v – объемный расход потока.

Наиболее полную информацию о гидродинамической структуре потоков можно получить экспериментальным путем при непосредственном измерении скоростей элементов движущейся среды во многих точках внутри аппарата. Однако выполнение таких измерений для аппаратов сложной конструкции представляет собой весьма трудную и дорогостоящую, а часто и практически неосуществимую задачу. Поэтому на практике используют не непосредственную, а косвенную информацию о поле скоростей путем изучения *распределения частиц жидкости по времени их пребывания в аппарате*. Следует отметить, что при одном и том же среднем времени пребывания всех частиц в аппарате, определяемом по выражению (2.1), гидродинамическая структура потоков (поле скоростей) может существенно различаться в зависимости от конструкции аппарата.

Для получения косвенной информации о поле скоростей в поток, поступающий в аппарат, вводят примесь какого-либо нейтрального вещества – *индикатора (трассера)* и анализируют во времени содержание данного вещества в выходящем из аппарата потоке. Кривая изменения концентрации индикатора в выходном потоке называется *функцией отклика*. Она характеризует неравномерность распределения элементов жидкости по времени пребывания в аппарате. В качестве индикатора используется вещество, которое легко количественно определяется в жидкости, не реагирует с ней и материалом аппарата (краситель, раствор соли, радиоактивный препарат и т.д.), т.е. является нейтральным.

Источниками неравномерности распределения элементов по времени пребывания являются:

- неравномерность профиля скоростей потока;
- турбулизация потоков;
- наличие застойных зон в объеме аппарата;

- каналообразование, байпасные и перекрестные токи.

Индикатор на входе потока в аппарат вводят в виде стандартных сигналов: *импульсного, ступенчатого, гармонического*. Наиболее часто используют первые два способа.

Форма тестовых сигналов представлена на рис. 4. Реакция объекта на импульсное изменение концентрации трассера во входном потоке носит название $C(\tau)$ -кривой; на ступенчатое изменение $F(\tau)$ -кривой.

Проведя эксперимент на физическом объекте и получив экспериментальную $C(\tau)$ или $F(\tau)$ -кривую необходимо интерпретировать вид этих кривых на основе представлений о соотношении конвективного и диффузионного потоков переноса вещества в движущейся среде. Это возможно сделать, располагая рядом **типовых математических моделей структуры потоков** в рабочей зоне аппарата. Решение уравнений математических моделей при заданной форме входного сигнала $C_{вх}(\tau)$ позволяет получить набор теоретических кривых отклика. Путем сравнения экспериментальной кривой отклика с теоретическими выбирают подходящую модель структуры потоков.

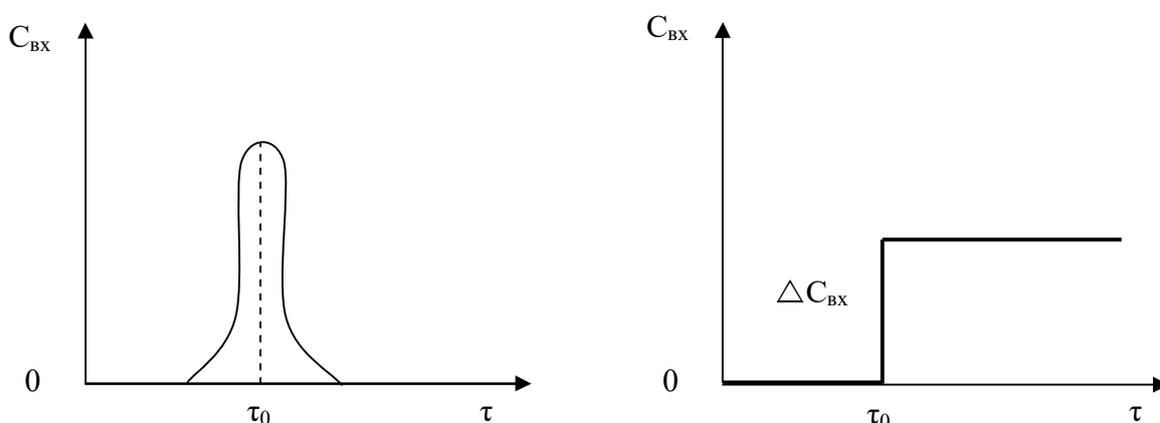


Рис. 4. Тестовые сигналы: импульсный и ступенчатый

Типовые математические модели, описывающие гидродинамическую структуру потоков

Существует четыре типовые модели гидродинамических структур потоков: диффузионная, модель идеального вытеснения, модель идеального смешения (перемешивания), ячеечная модель.

Диффузионная модель

Рассмотрим проточный трубчатый аппарат, в котором изменение концентрации индикатора происходит только под действием конвективного и диффузионного переноса (рис. 5), а массообмен и химические реакции отсутствуют. Схема потоков представлена ниже.

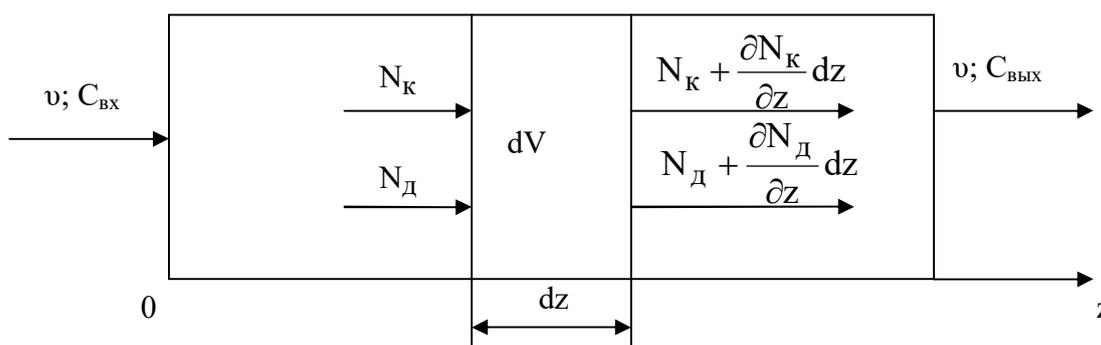


Рис. 5. Схема потоков в аппарате:

N_k, N_d – конвективный и диффузионный потоки; v – объемный расход;
 $C_{вх}, C_{вых}$ – концентрация трассера во входном и выходном потоке

Допущения

1. Течение жидкости близко к турбулентному, и профиль линейной скорости u близок к плоскому. Считаем $v = \text{const}$, а следовательно, u также не зависит от времени.

2. Так как радиальное перемешивание очень интенсивно, то в каждом сечении аппарата по длине реактора концентрация не изменяется по радиусу.

3. В аппарате присутствует обратное перемешивание по направлению движения, что ведет к неравномерности концентрации по длине и обуславливает наличие турбулентной диффузии.

Коэффициент турбулентной диффузии в продольном направлении постоянен.

На основании принятых допущений концентрация трассера, конвективный и диффузионный потоки будут зависеть только от τ и z .

Для получения уравнений математической модели, отражающих структуру гидродинамических потоков, необходимо записать закон сохранения вещества для выделенного элементарного объема аппарата dV . В общем виде этот закон записывается следующим образом:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Накопление вещества} \\ \text{в единицу времени} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Сумма приходных} \\ \text{потоков} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Сумма расходных} \\ \text{потоков} \end{array} \right]$$

Накопление вещества представляет собой скорость изменения его количества в выделенном объеме $[\partial(dV C)/\partial \tau]$. Таким образом, для выделенного объема уравнение баланса по трассеру запишется:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} [dV C] = [N_k + N_d] - \left[N_k + \frac{\partial N_k}{\partial z} dz + N_d + \frac{\partial N_d}{\partial z} dz \right]. \quad (2.2)$$

С учетом выражений для конвективного и диффузионного потоков при условии $v = \text{const}$ и $dV = S dz$ будем иметь:

$$\frac{\partial N_k}{\partial z} = v \frac{\partial C}{\partial z}, \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial N_d}{\partial z} = -D_{\text{эф}} S \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}. \quad (2.4)$$

После подстановки выражений для потоков вещества в уравнение баланса и с учетом $u = v/S$ получим:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = -u \frac{\partial C}{\partial z} + D_{\text{эф}} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}. \quad (2.5)$$

Начальное условие для уравнения (2.5) при отсутствии трассера в аппарате до начала опыта запишется:

$$C(0, z) = 0. \quad (2.6)$$

Для вывода краевых условий рассматривают баланс вещества в сечении $z = 0$ и $z = L$.

$$\text{При } z = 0 \quad C(\tau, 0) = C_{\text{вх}} + \frac{D_{\text{эф}}}{u} \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=0}; \quad (2.7)$$

$$\text{При } z = L \quad \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=L} = 0. \quad (2.8)$$

Математическая модель аппарата, включающая уравнения (2.5)÷(2.8), носит название *диффузионной модели*, т.к. она учитывает турбулентную диффузию в направлении движения потока.

Модель идеального вытеснения (ИВ)

В проточных аппаратах всегда совместно существуют два потока – конвективный и диффузионный. Однако при определенных условиях диффузионным потоком в направленном движении можно пренебречь и соответствующий член исключить из уравнения модели ($D_{\text{эф}}=0$).

Условия эти таковы:

- течение жидкости характеризуется невысоким значением критерия Рейнольдса;
- рассматриваемый аппарат имеет большое отношение длины к диаметру ($L/d_a \geq 10 \div 20$).

Движение жидкости в аппарате напоминает в этом случае движение поршня в цилиндре, когда отсутствует обмен частицами вещества между двумя соседними сечениями аппарата. При этих условиях $D_{\text{эф}}=0$ и уравнение (2.5) принимает вид:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = -u \frac{\partial C}{\partial z}. \quad (2.9)$$

Эту модель принято называть *моделью идеального вытеснения (ИВ)*.

Модель идеального смешения (ИС)

Теоретический и практический интерес представляет собой второй крайний случай, характеризующийся стремлением диффузионного потока к бесконечности: $D_{эф} \rightarrow \infty$. Это означает, что аппарат характеризуется наличием турбулентной диффузии бесконечной интенсивности, за счет чего концентрация трассера становится одинаковой во всех точках аппарата, т.е. осуществляется идеальное перемешивание жидкости по всему объему. В этом случае накопление вещества в реакторе обусловлено разностью между конвективным потоком вещества, входящего в аппарат, и конвективным потоком, выходящим из аппарата:

$$\begin{aligned} N_{КВХ} &= \nu C_{ВХ}; \\ N_{КВЫХ} &= \nu C_{ВЫХ}, \end{aligned} \quad (2.10)$$

т.к. концентрация трассера одинакова по всему объему и равна $C_{ВЫХ}$, то накопление вещества запишется $d(V C_{ВЫХ})/d\tau$. Уравнение материального баланса примет вид:

$$\frac{d(V C_{ВЫХ})}{d\tau} = \nu C_{ВХ} - \nu C_{ВЫХ}, \quad (2.11)$$

где V – объем аппарата.

Если $V = \text{const}$, то будем иметь:

$$\bar{\tau} \frac{dC_{ВЫХ}}{d\tau} = C_{ВХ} - C_{ВЫХ}; \quad C_{ВЫХ} \Big|_{\tau=0} = 0, \quad (2.12)$$

где $\bar{\tau} = V/\nu$ – среднее время пребывания элементов жидкости в аппарате.

Уравнение (2.12) можно получить, найдя решение уравнения диффузионной модели (2.5) при $D_{эф} \rightarrow \infty$. Модель вида (2.12) называется *моделью идеального смешения (ИС)*. Она используется для описания аппаратов с мешалками, вращающимися с большой скоростью, аппаратов с псевдооживленным слоем зернистого материала и барботажных аппаратов. Так как в действительности $D_{эф}$ никогда не может быть бесконечным, то использование модели ИС

для описания гидродинамики аппаратов возможно лишь в том случае, если отношение продольного размера к поперечному близко к единице.

Ячеечная модель (ЯМ)

С помощью этой модели можно описать структуру потоков в последовательно соединенных аппаратах с идеальным перемешиванием субстанции или секционированном аппарате. При этом предполагается отсутствие перемешивания между ячейками.

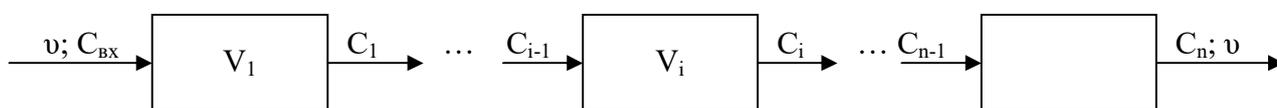


Рис. 6. Структура ячейечной модели

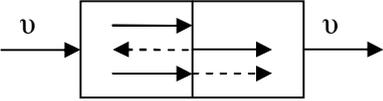
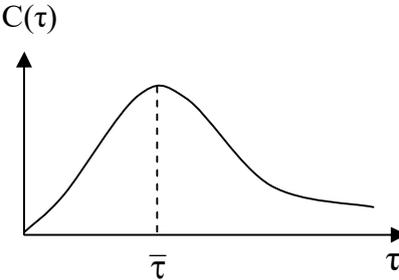
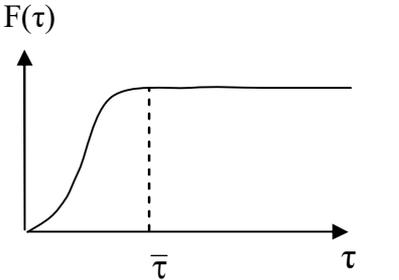
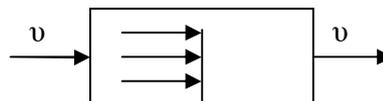
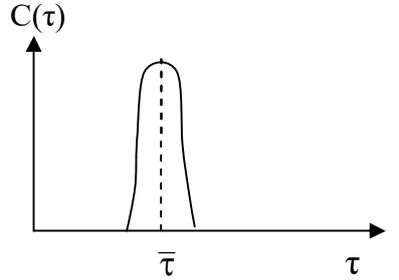
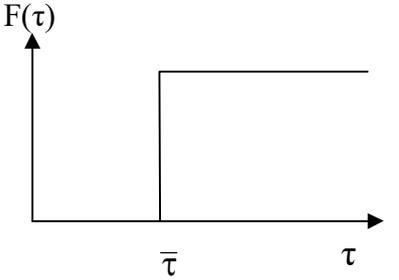
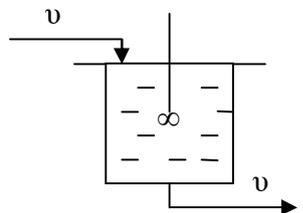
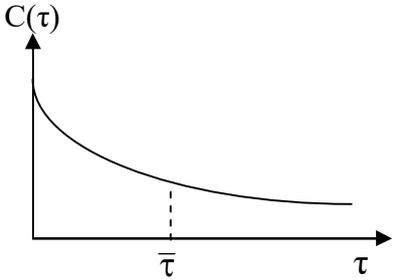
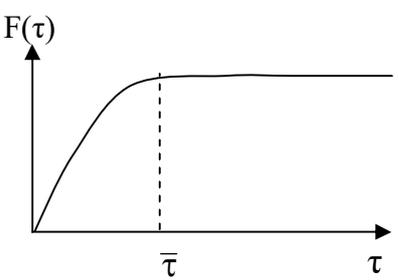
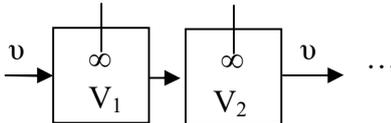
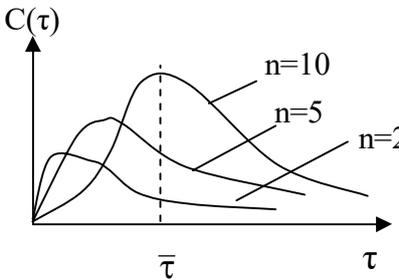
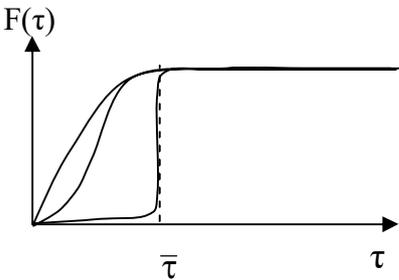
Уравнение материального баланса по трассеру записывается для каждой ячейки:

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_1 \frac{dC_1}{d\tau} &= C_{вх} - C_1; \\ \bar{\tau}_i \frac{dC_i}{d\tau} &= C_{i-1} - C_i; \\ \bar{\tau}_n \frac{dC_n}{d\tau} &= C_{n-1} - C_n; \quad C_i|_{\tau=0} = 0, \end{aligned} \quad (2.13)$$

где $\bar{\tau}_i = V_i/v$ – среднее время пребывания в i -й ячейке; $\bar{\tau}_{общ} = \bar{\tau}_i n$ – общее время пребывания.

При заданном объеме системы – V и объемном расходе субстанции – v можно подобрать такое число ячеек идеального смешения – n , что при заданном виде – $C_{вх}$ решение системы (2.13) и уравнения (2.5) будут идентичны. Это означает, что **вместо диффузионной модели формально можно использовать ячейечную модель структуры потоков.**

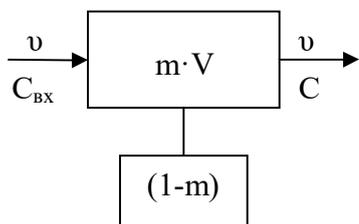
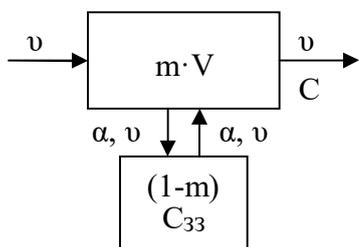
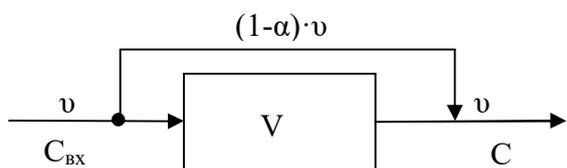
Таблица 1

Динамические характеристики типовых моделей		
Диффузионная модель		
Схема потока	Отклик на импульс	Отклик на ступеньку
		
Идеальное вытеснение		
Схема потока	Отклик на импульс	Отклик на ступеньку
		
Идеальное смешение		
Схема потока	Отклик на импульс	Отклик на ступеньку
		
Ячеечная модель		
Схема потока	Отклик на импульс	Отклик на ступеньку
		

Комбинированные модели

Уравнения типовых моделей были получены при допущении, что интенсивность турбулентной диффузии постоянна по всему объему аппарата ($D_{эф} = \text{const}$). Как правило, различные зоны аппарата характеризуются различной степенью интенсивности турбулентной диффузии и, следовательно, могут быть аппроксимированы различными моделями. Часто в аппаратах имеются байпасные и циркуляционные потоки, а также застойные зоны. В этом случае модель аппарата в целом строится как комбинация моделей отдельных зон. Структура комбинированной модели зависит от способа разбиения объема на различные зоны, вида принимаемых для них идеализированных моделей (ИВ, ИС) и способа соединения зон между собой обменивающимися потоками субстанции. Примеры комбинированных моделей приведены табл. 2.

Таблица 2

Структурная схема модели	Уравнение модели
<p>ИС с застойной зоной</p> 	<p>(1-m) – доля объема, занимаемая застойной зоной</p> $\frac{dC}{d\tau} = \frac{1}{m\tau} (C_{\text{вх}} - C),$ $\bar{\tau} = V/v$
<p>ИС с застойной зоной с обменом</p> 	<p>α – доля общего потока, поступающего с ЗЗ</p> $\frac{dC}{d\tau} = \frac{1}{m\tau} [C_{\text{вх}} - (1 + \alpha)C + \alpha C_{33}],$ $\frac{dC_{33}}{d\tau} = \frac{\alpha}{(1-m)\tau} (C - C_{33})$
<p>ИС с байпасом</p> 	<p>λ – доля байпасного потока</p> $\frac{dC}{d\tau} = \frac{\lambda^2}{\tau} \left(C_{\text{вх}} - \frac{1}{\lambda} C \right)$

Пример

На рис. 7 изображена структурная схема комбинированной модели, включающая в себя две последовательно соединенные зоны: 1) зона идеального смешения с рециклом объемом V_1 ; 2) зона идеального смешения объемом V_2 .

Считаем, что $V_1 = \text{const}$ и $V_2 = \text{const}$.

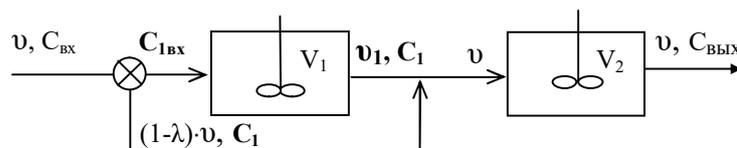


Рис.7. Структурная схема модели:

v – расход потока; $C_{\text{ВХ}}$, $C_{\text{ВЫХ}}$ – входная и выходная концентрации компонента;
 $(1-\lambda)$ – доля потока, возвращающегося по рециклу

Введем дополнительные обозначения: v_1 – расход потока на выходе из первой зоны; $C_1^{\text{ВХ}}$ – концентрация компонента в потоке на входе в первую зону; C_1 – концентрация компонента на выходе из первой зоны.

Запишем общий материальный баланс для сумматора:

$$v_1 = v + (1 - \lambda)v. \quad (2.14)$$

Материальный баланс по компоненту для сумматора:

$$v C_{\text{ВХ}} + (1 - \lambda)v C_1 = v_1 C_1^{\text{ВХ}}. \quad (2.15)$$

Отсюда определим концентрацию $C_1^{\text{ВХ}}$:

$$C_1^{\text{ВХ}} = \frac{v}{v + (1 - \lambda)v} [C_{\text{ВХ}} + (1 - \lambda)C_1] = \frac{1}{2 - \lambda} [C_{\text{ВХ}} + (1 - \lambda)C_1]. \quad (2.16)$$

Раскроем скобки, получим:

$$C_1^{\text{ВХ}} = \frac{1}{2 - \lambda} C_{\text{ВХ}} + \frac{1 - \lambda}{2 - \lambda} C_1. \quad (2.17)$$

Запишем общий материальный баланс для первой зоны:

$$V_1 \frac{dC_1}{dt} = v_1 C_1^{\text{ВХ}} - v_1 C_1.$$

Отсюда концентрация на выходе из первой зоны:

$$\frac{dC_1}{d\tau} = \frac{v_1}{V_1} (C_1^{\text{BX}} - C_1) = \frac{1}{\bar{\tau}_1} (C_1^{\text{BX}} - C_1), \quad (2.18)$$

где $\bar{\tau}_1$ – среднее время пребывания частиц вещества в первой зоне.

Концентрация на выходе из второй зоны равна общей выходной концентрации ($C_2 = C_{\text{ВЫХ}}$) и определяется:

$$\frac{dC_{\text{ВЫХ}}}{d\tau} = \frac{v}{V_2} (C_1 - C_{\text{ВЫХ}}) = \frac{1}{\bar{\tau}_2} (C_1 - C_{\text{ВЫХ}}). \quad (2.19)$$

где $\bar{\tau}_2$ – среднее время пребывания частиц вещества во второй зоне.

Совместное решение уравнений (2.17)÷(2.19) позволит определить концентрацию компонента на выходе.

Ниже приведен листинг программы и результаты численного моделирования в виде кривых отклика при ступенчатом входном воздействии.

Исходные данные:

объем первой зоны $V_1=7 \text{ м}^3$,

объем второй зона $V_2=5 \text{ м}^3$,

объемный расход потока $v=0,01 \text{ м}^3/\text{с}$,

доля рецикла $\lambda=0,5$,

входное ступенчатое воздействие $C_{\text{ВХ}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3$.

Задание по теме 2

1) Составить математическое описание для указанных моделей гидродинамики и записать передаточную функцию по каналу $C_{\text{ВХ}} \rightarrow C_{\text{ВЫХ}}$;

2) в среде Mathcad получить кривые отклика на типовые тестовые сигналы (ступенчатое и импульсное возмущение) по каналу: $C_{\text{ВХ}} \rightarrow C_{\text{ВЫХ}}$.

Таблица 3

Номер варианта	Параметры модели	Структурная схема модели
1.1	$V=10 \text{ м}^3$; $v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}$; $c_{\text{ВХ}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3$; $m=0,8$; $\lambda=0,1$	
1.2	$V=10 \text{ м}^3$; $v_c=0,1 \text{ м}^3/\text{с}$; $c_{\text{ВХ}}=10 \text{ моль}/\text{м}^3$; $m=0,8$; $\lambda=0,1$	
1.3	$V=1 \text{ м}^3$; $v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}$; $c_{\text{ВХ}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3$; $m=0,6$; $\lambda=0,1$	
1.4	$V=10 \text{ м}^3$; $v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}$; $c_{\text{ВХ}}=1000 \text{ моль}/\text{м}^3$; $m=0,8$; $\lambda=0,4$	
2.1	$V=10 \text{ м}^3$; $v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}$; $c_{\text{ВХ}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3$; $m=0,8$; $L=10 \text{ м}$	
2.2	$V=1 \text{ м}^3$; $v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}$; $c_{\text{ВХ}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3$; $m=0,8$; $L=5 \text{ м}$	
2.3	$V=10 \text{ м}^3$; $v_c=0,001 \text{ м}^3/\text{с}$; $c_{\text{ВХ}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3$; $m=0,8$; $L=10 \text{ м}$	
2.4	$V=10 \text{ м}^3$; $v_c=0,1 \text{ м}^3/\text{с}$; $c_{\text{ВХ}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3$; $m=0,5$; $L=10 \text{ м}$	
3.1	$V=10 \text{ м}^3$; $V_1=V_2=V_3=V_4$; $v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}$; $c_{\text{ВХ}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3$;	
3.2	$V=1 \text{ м}^3$; $V_1=V_2=V_3=V_4$; $v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}$; $c_{\text{ВХ}}=1000 \text{ моль}/\text{м}^3$;	
3.3	$V=10 \text{ м}^3$; $V_1=V_2=V_3=V_4$; $v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}$; $c_{\text{ВХ}}=100 \text{ моль}/\text{м}^3$;	
3.4	$V=10 \text{ м}^3$; $V_1=V_2=V_3=V_4$; $v_c=0,1 \text{ м}^3/\text{с}$; $c_{\text{ВХ}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3$;	
4.1	$V=10 \text{ м}^3$; $V_1=V_2$; $v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}$; $c_{\text{ВХ}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3$; $\lambda=0,2$	
4.2	$V=1 \text{ м}^3$; $V_1=V_2$; $v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}$; $c_{\text{ВХ}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3$; $\lambda=0,1$	
4.3	$V=10 \text{ м}^3$; $V_1=V_2$; $v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}$; $c_{\text{ВХ}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3$; $\lambda=0,5$	
4.4	$V=1 \text{ м}^3$; $V_1=V_2$; $v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}$; $c_{\text{ВХ}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3$; $\lambda=0,6$	
5.1	$V=10 \text{ м}^3$; $v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}$; $c_{\text{ВХ}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3$; $V_1=V_2$; $L=5 \text{ м}$	
5.2	$V=10 \text{ м}^3$; $v_c=0,001 \text{ м}^3/\text{с}$; $c_{\text{ВХ}}=10 \text{ моль}/\text{м}^3$; $L=5 \text{ м}$; $V_1=V_2$	
5.3	$V=10 \text{ м}^3$; $v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}$; $c_{\text{ВХ}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3$; $V_1=V_2$; $L=10 \text{ м}$	
5.4	$V=10 \text{ м}^3$; $v_c=0,1 \text{ м}^3/\text{с}$; $c_{\text{ВХ}}=100 \text{ моль}/\text{м}^3$; $V_1=V_2$; $L=5 \text{ м}$	

Номер варианта	Параметры модели	Структурная схема модели
6.1	$V=10 \text{ м}^3; v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}; c_{\text{BX}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3; V_1=V_2; L=5 \text{ м}$	
6.	$V=1 \text{ м}^3; v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}; c_{\text{BX}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3; V_1=V_2; L=10 \text{ м}$	
6.3	$V=10 \text{ м}^3; v_c=0,001 \text{ м}^3/\text{с}; c_{\text{BX}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3; V_1=V_2; L=5 \text{ м}$	
6.4	$V=10 \text{ м}^3; v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}; c_{\text{BX}}=1000 \text{ моль}/\text{м}^3; V_1=V_2; L=5 \text{ м}$	
7.1	$V=10 \text{ м}^3; v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}; c_{\text{BX}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3; m=0,5; \lambda=0,5; L=5 \text{ м}$	
7.2	$V=10 \text{ м}^3; v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}; c_{\text{BX}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3; m=0,6; \lambda=0,3; L=5 \text{ м}$	
7.3	$V=1 \text{ м}^3; v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}; c_{\text{BX}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3; m=0,5; \lambda=0,8; L=5 \text{ м}$	
7.4	$V=10 \text{ м}^3; v_c=0,001 \text{ м}^3/\text{с}; c_{\text{BX}}=100 \text{ моль}/\text{м}^3; m=0,5; \lambda=0,5; L=5 \text{ м}$	
8.1	$V=10 \text{ м}^3; v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}; c_{\text{BX}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3; \lambda=0,5$	
8.2	$V=10 \text{ м}^3; v_c=0,001 \text{ м}^3/\text{с}; c_{\text{BX}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3; \lambda=0,5$	
8.3	$V=10 \text{ м}^3; v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}; c_{\text{BX}}=10 \text{ моль}/\text{м}^3; \lambda=0,7$	
8.4	$V=1 \text{ м}^3; v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}; c_{\text{BX}}=1000 \text{ моль}/\text{м}^3; \lambda=0,5$	
9.1	$V=10 \text{ м}^3; v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}; c_{\text{BX}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3; \lambda=0,5; L=5 \text{ м}$	
9.2	$V=10 \text{ м}^3; v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}; c_{\text{BX}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3; \lambda=0,1; L=10 \text{ м}$	
9.3	$V=1 \text{ м}^3; v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}; c_{\text{BX}}=10 \text{ моль}/\text{м}^3; \lambda=0,5; L=5 \text{ м}$	
9.4	$V=10 \text{ м}^3; v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}; c_{\text{BX}}=1000 \text{ моль}/\text{м}^3; \lambda=0,2; L=5 \text{ м}$	
10.1	$V=10 \text{ м}^3; v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}; c_{\text{BX}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3; \lambda=0,2$	
10.2	$V=10 \text{ м}^3; v_c=0,1 \text{ м}^3/\text{с}; c_{\text{BX}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3; \lambda=0,5$	
10.3	$V=10 \text{ м}^3; v_c=0,001 \text{ м}^3/\text{с}; c_{\text{BX}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3; \lambda=0,3$	
10.4	$V=10 \text{ м}^3; v_c=0,1 \text{ м}^3/\text{с}; c_{\text{BX}}=1000 \text{ моль}/\text{м}^3; \lambda=0,2$	
11.1	$V=10 \text{ м}^3; v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}; c_{\text{BX}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3; \lambda=0,2; L=10 \text{ м}$	
11.2	$V=10 \text{ м}^3; v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}; c_{\text{BX}}=10 \text{ моль}/\text{м}^3; \lambda=0,2; L=10 \text{ м}$	
11.3	$V=10 \text{ м}^3; v_c=0,01 \text{ м}^3/\text{с}; c_{\text{BX}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3; \lambda=0,6; L=5 \text{ м}$	
11.4	$V=10 \text{ м}^3; v_c=0,001 \text{ м}^3/\text{с}; c_{\text{BX}}=1 \text{ моль}/\text{м}^3; \lambda=0,2; L=10 \text{ м}$	

Вопросы по теме 2

1. Дать определение среднего времени пребывания.
2. Что такое кривая отклика и как ее получить?
3. Типы стандартных входных сигналов. Какие из них наиболее часто используются при исследовании гидродинамики?
4. Классификация типовых математических моделей структур гидродинамических потоков.
5. Опишите схему потоков по диффузионной модели, кривые отклика на импульс и ступеньку.
6. Допущения, принимаемые при написании уравнений диффузионной модели. Уравнения математической модели.
7. Опишите схему потоков модели идеального смешения, кривые отклика на импульс и ступеньку.
8. Допущения, принимаемые для модели идеального смешения, уравнения математической модели.
9. Опишите схему потоков модели идеального вытеснения, кривые отклика на импульс и ступеньку.
10. Допущения, принимаемые для модели идеального вытеснения, уравнения математической модели.
11. Опишите схему потоков ячеечной модели, кривые отклика на импульс и ступеньку.
12. Допущения, принимаемые для ячеечной модели, уравнения математической модели.
13. Разновидности комбинированных моделей.
14. Для описания гидродинамики каких аппаратов используется диффузионная модель?
15. Для описания гидродинамики каких аппаратов используется модель идеального смешения?
16. Для описания гидродинамики каких аппаратов используется модель идеального вытеснения?
17. Для описания гидродинамики каких аппаратов используется ячеечная модель?

Тема 3. Математическое описание типовых ХТП

Теоретическое введение

Химико-технологический процесс – это совокупность типовых гидромеханических, физических, химических воздействий на исходные вещества (технологических операций) и оборудования для их осуществления с целью получения продуктов или полупродуктов.

Различают технологические процессы (ТП) *преобразования, транспортировки*, т.е. перемещения веществ и материалов в пространстве и времени и *хранения*.

В зависимости от основного назначения в химическом производстве выделяют следующие виды типовых (основных) процессов, для проведения которых предназначены соответствующие аппараты и машины.

Механические и гидромеханические процессы – перемещение материалов, изменение их формы и размеров, сжатие и расширение, смешение и разделение потоков. Все они протекают без изменения химического состава и фазового состояния обрабатываемого материала. Для проведения этих процессов предназначены транспортеры, питатели, дробилки, диспергаторы, компрессоры, насосы, смесители, фильтры и т.п.

Теплообменные процессы – нагрев, охлаждение, изменение фазового состояния (кипение, конденсация). Химический состав веществ в них не меняется. Они протекают в теплообменниках, кипяильниках, конденсаторах, плавилках, сублиматорах.

Массообменные процессы – растворение, кристаллизация, сушка, дистилляция, ректификация, абсорбция, экстракция, десорбция, которые представляют собой перенос вещества внутри фазы или между фазами, протекающий без изменения химического состава. Для этого служат: кристаллизаторы, сушилки, дистилляторы, ректификаторы, абсорберы, экстракторы, десорберы.

Химические процессы – процессы, вызывающие коренное изменение химического состава веществ путем реализации химических реакций, протекают в реакторах.

Математическое описание является отражением физической сущности процесса со свойственными ему особенностями и ограничениями. Исторически сложились два основных способа разработки математического описания объекта: аналитический и эмпирический (экспериментальный). Кроме того, часто используют комбинированный экспериментально-аналитический способ.

Аналитическими методами называют способы вывода уравнений статики и динамики на основе теоретического анализа физических и химических процессов, происходящих в объекте. При выводе этих уравнений используют фундаментальные законы сохранения вещества и энергии, а также кинетические закономерности процессов переноса массы и теплоты, химических превращений.

Для составления математического описания аналитическим методом не требуется проведение экспериментов на объекте. Коэффициенты (параметры) уравнений определяют расчетным путем или с помощью принципа подобия по результатам ранее выполненных исследований. Такие методы пригодны для нахождения статических и динамических характеристик вновь проектируемых объектов, физико-химические процессы в которых достаточно хорошо изучены.

К недостаткам аналитических методов можно отнести сложность решения получающейся системы уравнений при достаточно полном описании объекта и трудность определения параметров моделей для исследуемого объекта.

Экспериментальный метод составления математического описания используется для исследования объектов в узком,

"рабочем" диапазоне изменения входных и выходных переменных. Принимается допущение о линейности и сосредоточенности параметров объекта, процессы описываются алгебраическими или линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. Составление математического описания всегда требует постановки опытов непосредственно на изучаемом объекте. Результаты измерений входных и выходных переменных обрабатываются математическими методами с целью определения коэффициентов заданного типа уравнения связи входных и выходных переменных.

Достоинство экспериментального метода – простота математического описания. Основной недостаток – невозможность установления функциональной связи между входящими в уравнения числовыми параметрами и конструктивными характеристиками объекта, режимными параметрами процесса, физико-химическими свойствами веществ. Кроме того, полученные математические описания нельзя распространять на другие однотипные объекты.

Экспериментально-аналитический метод. Сущность его заключается в аналитическом составлении уравнений математического описания, проведении экспериментальных исследований с целью определения коэффициентов (параметров) уравнений. Данный подход объединяет многие положительные свойства экспериментального и аналитического методов.

*Методика построения математического описания ХТП
аналитическим способом*

При составлении математического описания общим приемом является *блочный принцип*. Согласно этому принципу сначала исследуют гидродинамическую модель процесса как основу структуры математического описания. Далее изучают кинетику химических реакций, процессов массо- и теплопередачи с учетом

гидродинамических условий и составляют математическое описание каждого из этих процессов. Заключительным этапом является объединение описаний в единую систему уравнений математического описания объекта моделирования. Процедура построения аналитической модели является итерационной.

Все многообразие математических моделей можно классифицировать по различным признакам. Прежде всего, необходимо выделить два класса моделей, определяемые режимом работы объекта: *статические модели* – описывают статический режим работы объекта, когда входные и выходные переменные не изменяются во времени; *динамические модели* – переменные являются функциями времени.

Потоки субстанции

Под действием процессов, протекающих в объекте, происходит изменение удельного количества субстанции в рассматриваемом объеме, т.е. изменение концентрации компонентов, температуры, уровня, давления сред.

В целом в ХТП можно выделить четыре группы потоков субстанций:

- **конвективный поток.** В объектах химической технологии происходит перемещение сред под действием силы тяжести, центробежных сил, вращающейся мешалки, под действием насосов и компрессоров. Вместе с движущейся средой происходит перенос субстанции. Этот способ переноса субстанции называется конвективным. Конвективный поток субстанции определяется произведением объемного расхода на объемную плотность субстанции:

$$N_{kj} = v C_j - \text{конвективный поток } j\text{-го компонента, кмоль/с;}$$

$$Q_k = v H_v - \text{конвективный поток энергии, кДж/с.}$$

При отсутствии в среде фазовых превращений и постоянной удельной теплоемкости: $Q_k = v \rho c_p T$ кДж/с.

В приведенных выражениях обозначено:

v – объемный расход, м³/с; C_j – концентрация компонента, кмоль/м³;

$H_v = \rho c_p T$ – объемная энтальпия среды, кДж/кг; c_p – удельная теплоемкость, кДж/(кг·К); ρ – плотность среды, кг/м³; u – линейная скорость, м/с; m – массовый поток среды, кг/с;

- **диффузионный поток.** Если плотность субстанции в пространстве неравномерна, то возникает диффузионный поток, приводящий к выравниванию субстанции по объему. Величина диффузионного потока пропорциональна градиенту плотности субстанции, и направлен поток в сторону уменьшения плотности субстанции.

$N_{dj} = -DS \text{ grad } C_j$ – диффузионный поток компонента, кмоль/с;

$Q_d = -a S \text{ grad } H_v$ – диффузионный поток энергии, кДж/с.

Диффузионный поток энергии обуславливает теплопроводность среды. Если объемная энтальпия $H_v = \rho c_p T$, то поток энергии, обусловленный теплопроводностью, пропорционален градиенту температуры: $Q_d = -\lambda S \text{ grad } T$.

В приведенных выражениях обозначено:

D – коэффициент диффузии, м²/с; S – площадь сечения, перпендикулярного к направлению потока, м²; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; H_v – объемная энтальпия; λ – коэффициент теплопроводности, кДж/(м²·с·К);

- **поверхностные потоки.** Среда, находящаяся в рабочей зоне аппарата, всегда ограничена некоторой поверхностью, через которую может осуществляться передача субстанции. Во всех

случаях поверхностный поток субстанции определяется произведением удельной скорости ее передачи на поверхность.

$N_{Fj} = W_{Fj} F_M$ – поток j -го компонента через поверхность, разделяющую две взаимодействующие среды – массообменный поток, кмоль/с;

$Q_F = W_{FQ} F_T$ – поток энергии через ограничивающую поверхность – теплообменный поток, кДж/с.

В приведенных выражениях обозначено:

W_{Fj} – удельная скорость массообмена, кмоль/($m^2 \cdot c$); F_M – поверхность фазового контакта, m^2 ; W_{FQ} – скорость теплообмена, кДж/($m^2 \cdot c$), F_T – поверхность теплообмена, m^2 ;

- **объемные потоки** в химико-технологических процессах, как правило, связаны с химическими реакциями. Величина объемного потока определяется произведением скорости процесса на объем.

$N_{rj} = V W_{rj}$ – поток j -го компонента, обусловленный химическим превращением с его участием, кмоль/с;

$Q_r = V \sum_{i=1}^n |W_{ri}| \Delta H_i$ – поток энергии, обусловленный протеканием в объеме n - химических реакций, кДж/с.

В приведенных выражениях обозначено:

W_{rj} – скорость изменения концентрации j -го компонента, кмоль/($m^3 \cdot c$); V – объем, m^3 ; W_{ri} – скорость i -й реакции, кмоль/($m^3 \cdot c$); ΔH_i – тепловой эффект i -й химической реакции, кДж/кмоль.

Объемный поток энергии возникает также вследствие наличия внутреннего трения в движущейся среде. Он определяет переход механической энергии трения в тепловую энергию.

Типовые допущения

Практика показывает, что часто вполне приемлемую по точности аналитическую модель можно получить, если исключить из рассмотрения малозначимые явления и процессы, сформулировав систему допущений, облегчающих как процедуру построения модели, так и работу с ней.

Принимаемые допущения можно объединить в несколько групп:

- ***ранжирование процессов*** по степени их влияния на выходные переменные. На основании ранжирования из модели исключаются незначимые процессы;

- ***допущение о стационарности объекта***. Изменение кинетических параметров во времени является причиной нестационарности объектов. Вместе с тем скорость изменения параметров обычно бывает невысокой, что дает основание считать их постоянными и рассматривать объект как стационарный на ограниченном отрезке времени;

- ***допущение о постоянстве теплофизических свойств веществ***. Известно, что такие теплофизические свойства, как теплоемкость, плотность, вязкость и другие зависят от температуры. Часто формулируется допущение о постоянстве этих свойств в объеме объекта. Основанием для принятия такого допущения может быть узкий диапазон изменения температуры в объекте;

- ***допущение о постоянстве параметров модели***. Выражения, определяющие скорости кинетических процессов, содержат коэффициенты тепло- и массопередачи, энергию активации химических реакций. Коэффициенты тепло- и массопередачи зависят от гидродинамической обстановки в объекте. Эти коэффициенты принимаются постоянными в случае, если изменением гидродинамической обстановки в объеме объекта можно пренебречь.

Составление уравнений балансов аналитической модели

Уравнения материальных и энергетических (тепловых) балансов имеют следующий вид:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Сумма приходных} \\ \text{потоков субстанции} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Сумма расходных} \\ \text{потоков субстанции} \end{array} \right] = \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\begin{array}{c} \text{количество} \\ \text{субстанции} \end{array} \right].$$

В правой части этого уравнения стоит производная по времени от количества субстанции в рассматриваемом объеме. Так как она представляет собой разность приходного и расходного потоков, то ее можно назвать скоростью накопления субстанции. В *динамических условиях* скорость накопления субстанции всегда не равна нулю.

Если рассматривается *статическое состояние* объекта, то правая часть уравнения закона сохранения субстанции всегда обращается в нуль. Уравнение статики объекта принимает вид:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Сумма приходных} \\ \text{потоков субстанции} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Сумма расходных} \\ \text{потоков субстанции} \end{array} \right] = 0.$$

Идентификация аналитической модели, проверка адекватности

Для аналитических моделей возможно два способа идентификации. В первом способе определение параметров модели производится по экспериментальным данным, полученным на объекте. Вторым способом идентификации аналитических моделей является проведение экспериментов в специальных лабораторных установках и обработка экспериментальных данных с учетом модели, описывающей исследуемый процесс.

Следует отметить, что большое число параметров, входящих в состав аналитической модели, обычно не идентифицируются, а берутся из справочников или рассчитываются по различным формулам и соотношениям, широко представленным в справочной литературе.

Проверка адекватности модели проводится различными методами.

Пример

Рассмотрим составление математического описания объекта аналитическим способом. В качестве объекта выберем *теплообменник смешения со свободным истечением жидкости*.

На рис. 8 представлена принципиальная схема теплообменника смешения емкостного типа с механической мешалкой.

Краткая характеристика объекта

В аппарат поступают и смешиваются два потока жидкости. Первый поток, нагретый до температуры t_1 , подается с расходом v_1 , второй поток имеет температуру t_2 и расход v_2 . В процессе смешения потоков среда приобретает температуру t и с расходом v путем свободного истечения удаляется из аппарата.

Назначение и цель функционирования данного объекта – получение смеси заданной температуры $t^{\text{зад}}$.

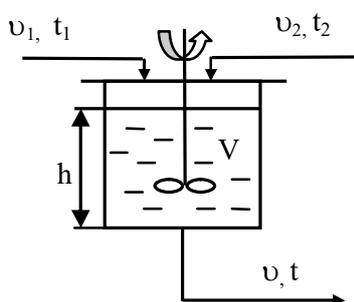


Рис. 8. Принципиальная схема теплообменника смешения

Формулировка упрощающих допущений

Как было сказано ранее, математическое описание объекта необходимо начать с формулировки упрощающих допущений. В первую очередь, необходимо проанализировать возникающую в аппарате гидродинамическую картину потоков и выбрать типовую математическую модель, описывающую данную гидродинамику.

В силу высокой турбулизации потока при работе механической мешалки и при допущении $D/h \approx 1$, считаем, что в аппарате возникают

условия идеального смешения. Для описания гидродинамики выбираем модель идеального смешения (МИС).

Остальные допущения будут учитывать постоянство теплофизических свойств веществ и параметров модели, отсутствие материальных и тепловых потерь.

Таким образом, принимаем следующие **упрощающие допущения**:

- 1) принимаем модель идеального смешения. Параметры выходного потока совпадают с параметрами жидкости внутри аппарата;
- 2) теплофизические свойства входных потоков, выходного потока и жидкости внутри аппарата совпадают и не зависят от температуры ($\rho, \mu, c_p = \text{const}$);
- 3) потери вещества и энергии во внешнюю среду отсутствуют.

Составление уравнений материальных и тепловых балансов

Для условий динамики уравнения материальных и энергетических балансов записываются:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Скорость накопления} \\ \text{субстанции} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Сумма приходных} \\ \text{потоков субстанции} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Сумма расходных} \\ \text{потоков субстанции} \end{array} \right]$$

Общий материальный баланс по рабочему объему V запишется:

$$\frac{dV}{d\tau} = v_1 + v_2 - v, \quad (3.1)$$

где v_1, v_2, v – объемные расходы поступающих в аппарат потоков и расход выходящего потока, $\text{м}^3/\text{с}$; V – рабочий объем аппарата, м^3 .

Для аппаратов цилиндрической формы $V = S_a h$, где S_a – площадь поперечного сечения аппарата ($S_a = \text{const}$); h – уровень жидкости в аппарате ($h = f(\tau)$). Уравнение материального баланса теплообменника запишется:

$$S_a \frac{dh}{d\tau} = v_1 + v_2 - v. \quad (3.2)$$

В условиях свободного истечения расход на выходе зависит от текущего уровня жидкости h в аппарате и сечения отверстия (трубопровода) f_o , т.е. является функцией этих величин: $v = f(h, f_o)$.
Расход жидкости определяется:

$$v = \alpha f_o \sqrt{2gh},$$

где g – ускорение свободного падения ($g=9,81 \text{ м/с}^2$); α – коэффициент расхода (для насадков $\alpha=0,95 \div 0,97$, для трубопроводов $\alpha=0,6 \div 0,8$).

Тогда уравнение материального баланса примет вид:

$$S_a \frac{dh}{d\tau} = v_1 + v_2 - \alpha f_o \sqrt{2gh}. \quad (3.3)$$

Уравнение теплового баланса для условий динамики в общем виде запишется:

$$\frac{dQ}{d\tau} = q_1 + q_2 - q, \quad (3.4)$$

где q_1, q_2, q – тепловые потоки, поступающие в аппарат в единицу времени с входящими потоками жидкостей и тепловой поток, выходящий из аппарата в единицу времени соответственно; Q – количество тепла, накопившееся в течение времени внутри аппарата.

Тепловые потоки определяются:

$$\begin{aligned} q_1 &= v_1 t_1 c_p \rho, \\ q_2 &= v_2 t_2 c_p \rho, \\ q &= v t c_p \rho, \\ Q &= V c_p \rho t = S_a h c_p \rho t, \end{aligned} \quad (3.5)$$

где t_1, t_2, t – температуры соответствующих потоков; c_p, ρ – удельная теплоемкость и плотность сред (в соответствии с допущением 2 являются константами); V – рабочий объем среды, определяется как $V = S_a h$.

Подставим выражения тепловых потоков в уравнение (3.4), проведем сокращения, получим:

$$S_a \frac{d(ht)}{d\tau} = v_1 t_1 + v_2 t_2 - v t. \quad (3.6)$$

Таким образом, **математическая модель** рассматриваемого объекта для **условий динамики** запишется:

$$\begin{aligned} S_a \frac{dh}{d\tau} &= v_1 + v_2 - \alpha f_o \sqrt{2gh}, \\ S_a \frac{d(ht)}{d\tau} &= v_1 t_1 + v_2 t_2 - vt. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Начальные условия: $h|_{\tau=0} = h^0$, $t|_{\tau=0} = t^0$,

где h^0 , t^0 – значения уровня и температуры в состоянии статики, т.е. в условиях установившегося режима.

Уравнения (3.7) представляют собой нелинейную систему обыкновенных дифференциальных уравнений.

Математическую модель статики легко получить из уравнений динамики, приравняв производные нулю ($\frac{dh}{d\tau} = 0$; $\frac{dt}{d\tau} = 0$)

и добавив нулевые индексы переменным.

$$\begin{aligned} 0 &= v_1^0 + v_2^0 - \alpha f_o^0 \sqrt{2gh^0}, \\ 0 &= v_1^0 t_1^0 + v_2^0 t_2^0 - v^0 t^0. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Уравнения (3.8) – система нелинейных алгебраических уравнений.

Задание по теме 3

Разработать аналитическим способом математическое описание технологического объекта. Вариант объекта выдается преподавателем (см. прил. 6).

Вопросы по теме 3

1. Классификация основных (типовых) технологических операций, протекающих в ХТП.
2. Типовые допущения, принимаемые при разработке математических моделей объектов.
3. Раскройте основное содержание блочного принципа построения математических моделей ХТП.
4. Классификация потоков субстанции, условия их возникновения, численное определение величин материальных и энергетических потоков.
5. Составление материальных и тепловых балансов для условий статики и динамики.

Тема 4. Освоение процедуры аналитической линеаризации путем разложения переменных в ряд Тейлора в окрестности рабочей точки

Расчет и проектирование систем управления объектами базируется на теории линейных систем. Динамические свойства объекта описываются при этом линейными дифференциальными уравнениями или системой линейных уравнений. Получить такие уравнения можно двумя способами. Первый заключается в том, что объект формально аппроксимируется набором типовых динамических звеньев. Второй способ – это разработка формализованных моделей путем линеаризации исходных аналитических уравнений в окрестности статического положения (или в окрестности "рабочей" точки).

Пример 1

Линеаризуем математическую модель теплообменника смешения со свободным истечением (см. тему 3).

Математическая модель объекта для условий динамики:

$$\begin{aligned} S_a \frac{dh}{d\tau} &= v_1 + v_2 - \alpha f_o \sqrt{2gh}; \\ S_a \frac{d(ht)}{d\tau} &= v_1 t_1 + v_2 t_2 - vt. \end{aligned} \quad (4.1)$$

Начальные условия: $h_{\tau=0} = h^0$, $t|_{\tau=0} = t^0$.

Математическую модель статики:

$$\begin{aligned} 0 &= v_1^0 + v_2^0 - \alpha f_o^0 \sqrt{2gh^0} \\ 0 &= v_1^0 t_1^0 + v_2^0 t_2^0 - v^0 t^0 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Рассмотрим подробно первое уравнение математической модели – уравнение материального баланса.

Входные и выходные переменные, входящие в уравнение и являющиеся функциями времени, разложим в ряд Тейлора в

окрестности стационарных значений, ограничившись линейными членами разложения.

$$h = h^0 + \Delta h; \quad v_1 = v_1^0 + \Delta v_1; \quad v_2 = v_2^0 + \Delta v_2;$$

$$v(h, f_o) = v(h^0, f_o^0) + \left. \frac{\partial v}{\partial h} \right|_{h^0, f_o^0} \Delta h + \left. \frac{\partial v}{\partial f_o} \right|_{h^0, f_o^0} \Delta f_o;$$

$$v = \alpha f_o \sqrt{2gh} = \alpha f_o \sqrt{2g} \sqrt{h^0} + \frac{1}{2} \alpha f_o^0 \sqrt{\frac{2g}{h^0}} \cdot \Delta h + \alpha \sqrt{2gh^0} \Delta f_o = v^0 + \Delta v.$$

Индексом "0" помечены значения переменных в статике.

Процедура линеаризации

Шаг 1. Подставим разложенные функции в уравнение (4.1):

$$S_a \frac{d(h^0 + \Delta h)}{d\tau} = (v_1^0 + \Delta v_1) + (v_2^0 + \Delta v_2) - \left[\alpha f_o \sqrt{2gh^0} + \frac{\alpha f_o^0}{2} \sqrt{\frac{2g}{h^0}} \Delta h + \alpha \sqrt{2gh^0} \Delta f_o \right].$$

Выполним алгебраические преобразования:

$$S_a \frac{dh^0}{d\tau} + S_a \frac{d\Delta h}{d\tau} = v_1^0 + v_2^0 - \alpha f_o \sqrt{2gh^0} + \Delta v_1 + \Delta v_2 - \frac{\alpha f_o^0}{2} \sqrt{\frac{2g}{h^0}} \Delta h - \alpha \sqrt{2gh^0} \Delta f_o.$$

Шаг 2. Вычтем из полученного уравнения соответствующее уравнение статики (4.2). Учтем, что $S_a \frac{dh^0}{d\tau} = 0$, в результате получим:

$$S_a \frac{d\Delta h}{d\tau} = \Delta v_1 + \Delta v_2 - \frac{\alpha f_o^0}{2} \sqrt{\frac{2g}{h^0}} \Delta h - \alpha \sqrt{2gh^0} \Delta f_o.$$

Шаг 3. Сгруппируем переменные. Слева от равенства выходная переменная, справа – входные переменные (вых.пер.=вх.пер.):

$$S_a \frac{d\Delta h}{d\tau} + \frac{\alpha f_o^0}{2} \sqrt{\frac{2g}{h^0}} \Delta h = \Delta v_1 + \Delta v_2 - \alpha \sqrt{2gh^0} \Delta f_o.$$

Обозначим $\psi = \frac{\alpha f_o^0}{2} \sqrt{\frac{2g}{h^0}}$; $\beta = \alpha \sqrt{2gh^0}$. Тогда

$$S_a \frac{d\Delta h}{d\tau} + \psi \Delta h = \Delta v_1 + \Delta v_2 - \beta \Delta f_o.$$

Шаг 4. Поделим левые правые части уравнения на коэффициент ψ при Δh :

$$\frac{S_a}{\psi} \frac{d\Delta h}{d\tau} + \Delta h = \frac{1}{\psi} \Delta v_1 + \frac{1}{\psi} \Delta v_2 - \frac{\beta}{\psi} \Delta f_o.$$

Пусть $T_1 = \frac{S_a}{\psi}$, $K_{11} = K_{12} = \frac{1}{\psi}$, $K_{13} = \frac{\beta}{\psi} = \frac{2\alpha\sqrt{2gh^0}\sqrt{h^0}}{\alpha\sqrt{2g}f_o^0} = \frac{2h^0}{f_o^0}$.

Получим

$$T_1 \frac{d\Delta h}{d\tau} = K_{11}\Delta v_1 + K_{12}\Delta v_2 - K_{13}\Delta f_o. \quad (4.3)$$

Начальное условие: $\Delta h|_{\tau=0} = 0$.

Уравнение (4.3) представляет собой линеаризованное дифференциальное уравнение материального баланса в отклонениях.

Рассмотрим второе уравнение математической модели – тепловой баланс аппарата.

$$S_a \frac{d(ht)}{d\tau} = v_1 t_1 + v_2 t_2 - vt.$$

Разложим переменные:

$$h = h^0 + \Delta h; \quad v_1 = v_1^0 + \Delta v_1; \quad v_2 = v_2^0 + \Delta v_2; \quad v = v^0 + \Delta v;$$

$$t_1 = t_1^0 + \Delta t_1; \quad t_2 = t_2^0 + \Delta t_2; \quad t = t^0 + \Delta t.$$

Процедура линеаризации аналогична.

Шаг 1. Подставим разложенные функции в уравнение (4.4):

$$S_a \frac{d[(h^0 + \Delta h)(t^0 + \Delta t)]}{d\tau} = (v_1^0 + \Delta v_1)(t_1^0 + \Delta t_1) + (v_2^0 + \Delta v_2)(t_2^0 + \Delta t_2) - (v^0 + \Delta v)(t^0 + \Delta t).$$

В соответствии с правилами дифференцирования, производная от произведения переменных разложится:

$$S_a \frac{d[(h^0 + \Delta h)(t^0 + \Delta t)]}{d\tau} = S_a h^0 \frac{d\Delta t}{d\tau} + S_a t^0 \frac{d\Delta h}{d\tau}. \quad (4.4)$$

Заменим в уравнении (4.4) второе слагаемое с учетом уравнения материального баланса, считая $v(h, f_o) = v^0 + \Delta v$:

$$S_a \frac{d\Delta h}{d\tau} = v_1^0 + \Delta v_1 + v_2^0 + \Delta v_2 - v^0 - \Delta v.$$

Раскроем скобки:

$$\begin{aligned} S_a h^0 \frac{d\Delta t}{d\tau} + t^0 (v_1^0 + \Delta v_1 + v_2^0 + \Delta v_2 - v^0 - \Delta v) = \\ = v_1^0 t_1^0 + \Delta v_1 t_1^0 + v_1^0 \Delta t_1 + \Delta v_1 \Delta t_1 + v_2^0 t_2^0 + \Delta v_2 t_2^0 + v_2^0 \Delta t_2 + \Delta v_2 \Delta t_2 - \\ - v^0 t^0 - \Delta v t^0 - v^0 \Delta t - \Delta v \Delta t. \end{aligned}$$

Выполним алгебраические преобразования. Величинами второго порядка малости ($\Delta \cdot \Delta$) пренебрегаем. Учитывая, что $S_a h^0 = V^0$, $v^0 = (v_1^0 + v_2^0)$, уравнение запишется:

$$\begin{aligned} V^0 \frac{d\Delta t}{d\tau} = v_1^0 t_1^0 + v_2^0 t_2^0 + \Delta v_1 t_1^0 + v_1^0 \Delta t_1 + \Delta v_2 t_2^0 + v_2^0 \Delta t_2 - t^0 (v_1^0 + v_2^0) - \\ - t^0 (\Delta v_1 + \Delta v_2) - (v_1^0 + v_2^0) \Delta t. \end{aligned}$$

Шаг 2. Вычтем соответствующее уравнение статики:

$$V^0 \frac{d\Delta t}{d\tau} = \Delta v_1 t_1^0 + v_1^0 \Delta t_1 + \Delta v_2 t_2^0 + v_2^0 \Delta t_2 - t^0 (\Delta v_1 + \Delta v_2) - (v_1^0 + v_2^0) \Delta t.$$

Шаг 3. Сгруппируем переменные:

$$V^0 \frac{d\Delta t}{d\tau} + (v_1^0 + v_2^0) \Delta t = \Delta v_1 (t_1^0 - t^0) + \Delta v_2 (t_2^0 - t^0) + v_1^0 \Delta t_1 + v_2^0 \Delta t_2.$$

Шаг 4. Поделим левые и правые части уравнения на $(v_1^0 + v_2^0)$ при Δt . Получим

$$\frac{V^0}{(v_1^0 + v_2^0)} \frac{d\Delta t}{d\tau} + \Delta t = \frac{(t_1^0 - t^0)}{(v_1^0 + v_2^0)} \Delta v_1 + \frac{(t_2^0 - t^0)}{(v_1^0 + v_2^0)} \Delta v_2 + \frac{v_1^0}{(v_1^0 + v_2^0)} \Delta t_1 + \frac{v_2^0}{(v_1^0 + v_2^0)} \Delta t_2.$$

Обозначим $T_2 = \frac{V^0}{(v_1^0 + v_2^0)}$;

$$K_{21} = \frac{(t_1^0 - t^0)}{(v_1^0 + v_2^0)}; \quad K_{22} = \frac{(t_2^0 - t^0)}{(v_1^0 + v_2^0)}; \quad K_{23} = \frac{v_1^0}{(v_1^0 + v_2^0)}; \quad K_{24} = \frac{v_2^0}{(v_1^0 + v_2^0)}.$$

Уравнение примет вид:

$$T_2 \frac{d\Delta t}{d\tau} + \Delta t = K_{21} \Delta v_1 + K_{22} \Delta v_2 + K_{23} \Delta t_1 + K_{24} \Delta t_2 \quad (4.5)$$

Начальное условие: $\Delta t|_{\tau=0} = 0$.

Уравнение (4.5) представляет собой линеаризованное дифференциальное уравнение в отклонениях.

Таким образом, уравнения (4.3) и (4.5) представляют собой **линеаризованную математическую модель** теплообменника смешения с нулевыми начальными условиями.

Пример 2

Рассмотрим вариант линеаризации математической модели объекта по заданному каналу.

Используем в качестве объекта емкостной теплообменник смешения со свободным истечением, математическая модель которого разработана в материалах темы 3. Уравнения модели для условий динамики:

$$S_a \frac{dh}{d\tau} = v_1 + v_2 - \alpha f_o \sqrt{2gh};$$

$$S_a \frac{d(ht)}{d\tau} = v_1 t_1 + v_2 t_2 - vt.$$

Начальные условия: $h_{\tau=0} = h^0$, $t|_{\tau=0} = t^0$.

Необходимо линеаризовать модель ХТП как объекта регулирования температуры. В качестве регулирующей переменной принять расход первого потока v_1 . Получить передаточную функцию по этому каналу.

Расход первого потока v_1 является входной переменной, изменение которой приведет к изменению температуры жидкости на выходе из теплообменника t и уровню жидкости в теплообменнике h . Таким образом, возникают динамические связи: $v_1 \rightarrow t$ и $v_1 \rightarrow h$.

Разложим входные и выходные переменные динамических каналов в ряд Тейлора в окрестности стационарной точки, ограничившись линейными членами разложения:

$$v_1 = v_1^0 + \Delta v_1; \quad t = t^0 + \Delta t; \quad h = h^0 + \Delta h.$$

Остальные переменные равны значениям в стационарной точке:

$$v_2 = v_2^0; \quad t_1 = t_1^0; \quad t_2 = t_2^0; \quad v(h, f_o^0) = v^0 + \Delta v = \alpha f_o^0 \sqrt{2gh^0} + \frac{1}{2} \alpha f_o^0 \sqrt{\frac{2g}{h^0}} \Delta h.$$

Шаг 1. Подставим разложенные функции в уравнения модели:

$$S_a \frac{d(h^0 + \Delta h)}{d\tau} = v_1^0 + \Delta v_1 + v_2^0 - \alpha f_o \sqrt{2gh^0} - \frac{1}{2} \alpha f_o^0 \sqrt{\frac{2g}{h^0}} \Delta h;$$

$$S_a \frac{d[(h^0 + \Delta h)(t^0 + \Delta t)]}{d\tau} = (v_1^0 + \Delta v_1)t_1^0 + v_2^0 t_2^0 - \left(\alpha f_o \sqrt{2gh^0} + \frac{1}{2} \alpha f_o^0 \sqrt{\frac{2g}{h^0}} \Delta h \right) (t^0 + \Delta t). \quad (4.6)$$

В соответствии с правилами дифференцирования производная от произведения переменных во втором уравнении разложится:

$$S_a \frac{d[(h^0 + \Delta h)(t^0 + \Delta t)]}{d\tau} = S_a h^0 \frac{d\Delta t}{d\tau} + S_a t^0 \frac{d\Delta h}{d\tau}. \quad (4.7)$$

Выполним алгебраические преобразования, сократим малые величины и заменим второе слагаемое в уравнении (4.7) на уравнение материального баланса.

Уравнение теплового баланса запишется:

$$S_a h^0 \frac{d\Delta t}{d\tau} + t^0 \left(v_1^0 + \Delta v_1 + v_2^0 - \alpha f_o \sqrt{2gh^0} - \frac{1}{2} \alpha f_o^0 \sqrt{\frac{2g}{h^0}} \Delta h \right) =$$

$$= (v_1^0 + \Delta v_1)t_1^0 + v_2^0 t_2^0 - \left(\alpha f_o \sqrt{2gh^0} + \frac{1}{2} \alpha f_o^0 \sqrt{\frac{2g}{h^0}} \Delta h \right) (t^0 + \Delta t).$$

Раскрыв скобки и выполнив необходимые преобразования, получим:

$$S_a h^0 \frac{d\Delta t}{d\tau} = v_1^0 t_1^0 + v_2^0 t_2^0 - (v_1^0 + v_2^0) t^0 + (t_1^0 - t^0) \Delta v_1 - \alpha f_o^0 \sqrt{2gh^0} \Delta t. \quad (4.8)$$

Шаг 2. Вычтем соответствующее уравнение статики с учетом, что $v_1^0 + v_2^0 = v^0 = \alpha f_o^0 \sqrt{2gh^0}$:

$$S_a h^0 \frac{d\Delta t}{d\tau} = (t_1^0 - t^0) \Delta v_1 - v^0 \Delta t.$$

Шаг 3. Сгруппируем переменные:

$$S_a h^0 \frac{d\Delta t}{d\tau} + v^0 \Delta t = (t_1^0 - t^0) \Delta v_1.$$

Шаг 4. Поделим левые правые части уравнения на (v^0) при Δt .

Получим

$$\frac{S_a h^0}{v^0} \frac{d\Delta t}{d\tau} + \Delta t = \frac{(t_1^0 - t^0)}{v^0} \Delta v_1.$$

Обозначим
$$T = \frac{S_a h^0}{v^0}; \quad K = \frac{(t_1^0 - t^0)}{v^0}.$$

Уравнение примет вид:

$$T \frac{d\Delta t}{d\tau} + \Delta t = K \Delta v_1. \quad (4.9)$$

Начальное условие: $\Delta t|_{\tau=0} = 0$.

Уравнение (4.9) представляет собой линеаризованное дифференциальное уравнение в отклонениях, связывающее входную и выходную переменные по каналу регулирования $v_1 \rightarrow t$.

Преобразуем уравнение (4.9) по Лапласу:

$$T p \hat{\Delta t} + \hat{\Delta t} = K \Delta \hat{v}_1 \quad \text{или} \\ (T p + 1) \hat{\Delta t} = K \Delta \hat{v}_1, \quad (4.10)$$

где p – комплексная переменная; $\hat{\Delta t}$, $\Delta \hat{v}_1$ – изображения переменных.

Определим передаточную функцию по каналу $v_1 \rightarrow t$:

$$W(p) = \frac{\hat{\Delta t}}{\Delta \hat{v}_1} = \frac{K}{T p + 1}. \quad (4.11)$$

Полученная передаточная функция соответствует передаточной функции апериодического звена. *Параметры звена:* коэффициент K – это коэффициент усиления (или передачи); коэффициент T – это постоянная времени, характеризующая инерционность объекта по данному каналу.

Задание по теме 4

Провести аналитическую линеаризацию уравнений математической модели объекта. Вариант объекта выдается преподавателем (см.прил. 6).

Вопросы по теме 4

1. Перечислите, какие способы линеаризации исходных нелинейных математических моделей Вы знаете?
2. Зачем необходимо линеаризовывать математические модели объектов при расчете и проектировании систем управления объектами?
3. В чем заключается линеаризация уравнений при использовании разложения переменных в ряд Тейлора?
4. Какие члены ряда Тейлора учитываются при разложении переменных?

Тема 5. Структурно-алгоритмические схемы объектов управления и их анализ

Структурно-алгоритмические схемы объектов управления позволяют наглядно представить взаимосвязи между входными параметрами и переменными состояниями. Структурные схемы могут изображаться в упрощенном и развернутом виде. Используя развернутые структурные схемы, можно выразить передаточную функцию по любому динамическому каналу и проанализировать, какому звену или комбинации звеньев она соответствует.

Пример. Разработаем структурно-алгоритмическую схему объекта (теплообменник смешения со свободным истечением жидкости), рассматриваемого в предыдущих темах.

Используем линеаризованную математическую модель (см. тему 4):

$$T_1 \frac{d\Delta h}{d\tau} + \Delta h = K_{11}\Delta v_1 + K_{12}\Delta v_2 - K_{13}\Delta f_0; \quad (5.1)$$

$$T_2 \frac{d\Delta t}{d\tau} + \Delta t = K_{21}\Delta v_1 + K_{22}\Delta v_2 + K_{23}\Delta t_1 + K_{24}\Delta t_2. \quad (5.2)$$

Начальные условия: $\Delta h|_{\tau=0} = 0$, $\Delta t|_{\tau=0} = 0$.

Обозначим правые части уравнений (5.1, 5.2) Δf_i :

$$\begin{aligned} \Delta f_1(\tau) &= K_{11} \Delta v_1 + K_{12} \Delta v_2 - K_{13} \Delta f_0; \\ \Delta f_2(\tau) &= K_{21} \Delta v_1 + K_{22} \Delta v_2 + K_{23} \Delta t_1 + K_{24} \Delta t_2, \end{aligned}$$

тогда система уравнений (5.1, 5.2) запишется:

$$\begin{aligned} T_1 \frac{d\Delta h}{d\tau} + \Delta h &= \Delta f_1(\tau), \\ T_2 \frac{d\Delta t}{d\tau} + \Delta t &= \Delta f_2(\tau). \end{aligned} \quad (5.3)$$

Преобразуем исходную систему (5.3) по Лапласу:

$$\begin{aligned} T_1 p \Delta \hat{h} + \Delta \hat{h} &= \Delta \hat{f}_1(p), \\ T_2 p \Delta \hat{t} + \Delta \hat{t} &= \Delta \hat{f}_2(p). \end{aligned} \quad (5.4)$$

где p – комплексная переменная; $\Delta \hat{h}, \Delta \hat{t}, \Delta \hat{f}_i$ – изображения соответствующих переменных.

Передаточные функции объекта по каналам (вх→вых) запишутся:

$$W_1(p) = \frac{\Delta \hat{h}}{\Delta \hat{f}_1} = \frac{1}{T_1 p + 1}, \quad W_2(p) = \frac{\Delta \hat{t}}{\Delta \hat{f}_2} = \frac{1}{T_2 p + 1}. \quad (5.5)$$

В этих выражениях:

$$\begin{aligned} \Delta \hat{f}_1(p) &= K_{11} \Delta \hat{v}_1 + K_{12} \Delta \hat{v}_2 - K_{13} \hat{f}_0, \\ \Delta \hat{f}_2(p) &= K_{21} \Delta \hat{v}_1 + K_{22} \Delta \hat{v}_2 + K_{23} \Delta \hat{t}_1 + K_{24} \Delta \hat{t}_2. \end{aligned} \quad (5.6)$$

Уравнения (5.6) являются уравнениями сумматоров. С их учетом структурная схема объекта примет вид, изображенный на рис.9.

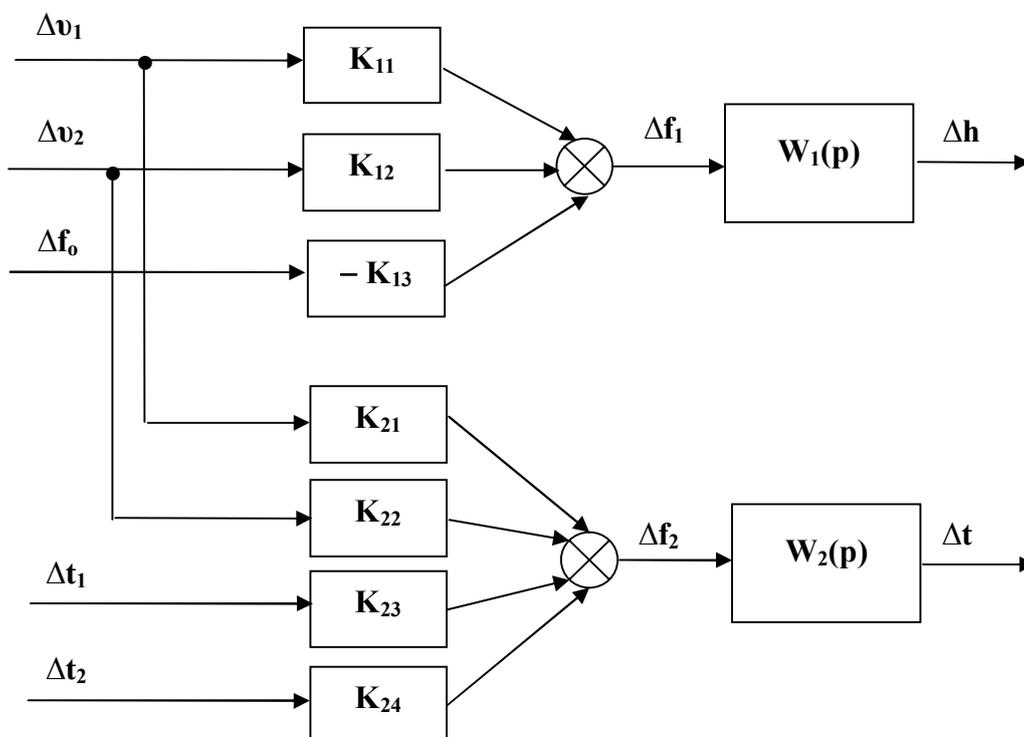


Рис. 9. Структурная схема объекта (развернутая) – теплообменник смешения со свободным истечением жидкости

Анализ структурной схемы объекта и структуры правых частей системы уравнений (5.6) показывает, что теплообменник смешения при организации стока жидкости путем свободного истечения является многомерным, связанным объектом.

Предположим, что в качестве регулирующих воздействий используются переменные Δf_0 и Δv_1 по каналам $\Delta f_0 \rightarrow \Delta h$, $\Delta v_1 \rightarrow \Delta t$. Тогда $\Delta t_1, \Delta t_2$, Δv_2 являются возмущениями. Упрощенно структура объекта представлена на рис.10.

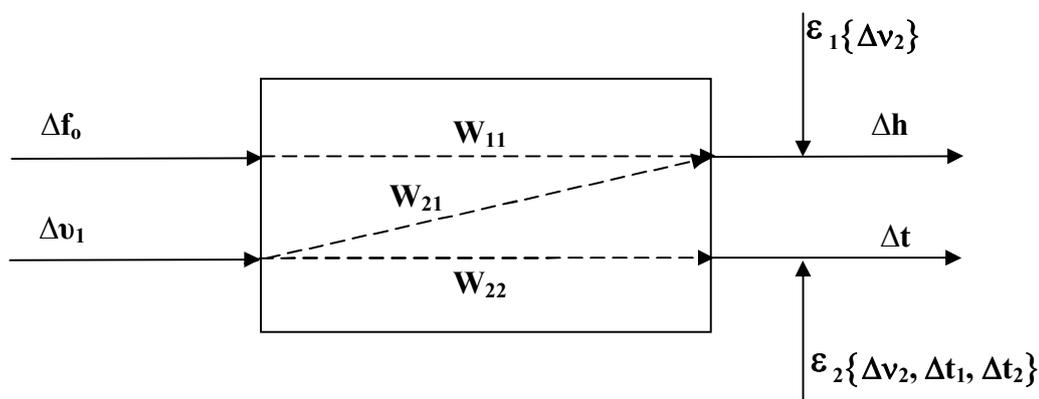


Рис. 10. Структура многомерного связанного объекта (упрощенно):

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – возмущения, приведенные к выходу

Анализ структуры объекта показывает, что регулирующее воздействие по каналу $\Delta v_1 \rightarrow \Delta t$ одновременно является возмущением для другой регулируемой переменной – Δh . Передаточные функции по динамическим каналам можно определить из развернутой структурной схемы объекта (рис.9.):

$$W_{11}(p) = -K_{13}W_1(p); \quad W_{21}(p) = K_{11}W_1(p); \quad W_{22}(p) = K_{21}W_2(p).$$

Сравнение безразмерных коэффициентов передачи по прямым и перекрестным каналам, анализ управляемости в статике и оценка динамических свойств может подтвердить правильность выбора регулирующих воздействий для соответствующих регулируемых переменных или не подтвердить. В последнем случае выбирают другие регулирующие воздействия.

Задание по теме 5

Разработать структурно-алгоритмическую схему объекта, используя линеаризованную математическую модель, полученную в соответствии с вариантом задания по теме 4. Определить выражения для передаточных функций по каналам регулирования, перекрестным связям и каналам возмущений.

Вопросы по теме 4

1. Что такое передаточная функция по динамическому каналу?
2. Перечислите и охарактеризуйте типовые динамические звенья.
3. Какими параметрами описываются динамические звенья, какие физические свойства объектов они выражают?
4. Принцип построения алгоритмических структурных схем объектов управления.
5. Как получить выражения для передаточных функций объекта по различным каналам, используя развернутую структурную схему объекта? Покажите на конкретном примере.

Тема 6. Построение и анализ статических и динамических характеристик объектов управления

Теоретическое введение

Работа большинства объектов регулирования заключается в преобразовании по определенному закону материальных и энергетических потоков. При этом возможны два принципиально различных режима работы: статический и динамический.

В статическом (установившемся) режиме объект находится в равновесии, приток вещества или энергии равен стоку. Признаком статического режима работы является сохранение постоянного во времени значения выходного сигнала объекта ($X_{\text{вых}}(\tau)=\text{const}$). В статическом режиме каждому значению сигнала на входе соответствует определенное значение выходного сигнала:

$$X_{\text{вых}} = f(X_{\text{вх}}). \quad (6.1)$$

Зависимость (6.1), которая связывает значения выходного и входного параметров объекта в установившемся режиме, называется *статической характеристикой*. Статическая характеристика может быть линейной и нелинейной.

В реальных условиях эксплуатации, когда на объект регулирования воздействуют различные возмущения, динамический режим работы объектов является характерным режимом. Поэтому определение динамической характеристики составляет главную задачу при анализе САУ.

Динамическая характеристика – кривая изменения выходного параметра во времени при изменении входной переменной.

$$\Delta X_{\text{ВЫХ}} = f(\tau) \text{ при } \Delta X_{\text{ВХ}} = f(\tau). \quad (6.2)$$

При ступенчатом входном воздействии динамическая характеристика называется кривой разгона.

Существует два метода определения статических и динамических характеристик: аналитический и экспериментальный.

При использовании аналитического метода определения характеристик за основу берут уравнения математической модели объекта.

Построение статических характеристик многомерного объекта управления может осуществляться путем решения системы уравнений, описывающих статику объекта или методом "стационарирования" с использованием динамической модели объекта. Суть метода заключается в моделировании на ЭВМ режима запуска и вывода аппарата на стационарный режим. Для этого необходимо: значения входных переменных зафиксировать на заданном уровне и решить систему уравнений модели при начальных условиях, соответствующих значениям переменных состояния перед запуском аппарата. Процесс расчета уравнений прекращается, когда переменные состояния выйдут на установившиеся значения. Затем одной из переменных, соответствующей исследуемому каналу, присваивается новое значение и вновь производится решение уравнений динамики при заданных ранее начальных условиях. Переменные состояния выйдут при этом на новые установившиеся значения. Для построения статической характеристики необходимо рассчитать не менее пяти точек из выбранного интервала, причем центральной будет являться "рабочая" точка, соответствующая установившемуся режиму при заданных исходных данных, либо решению задачи оптимизации.

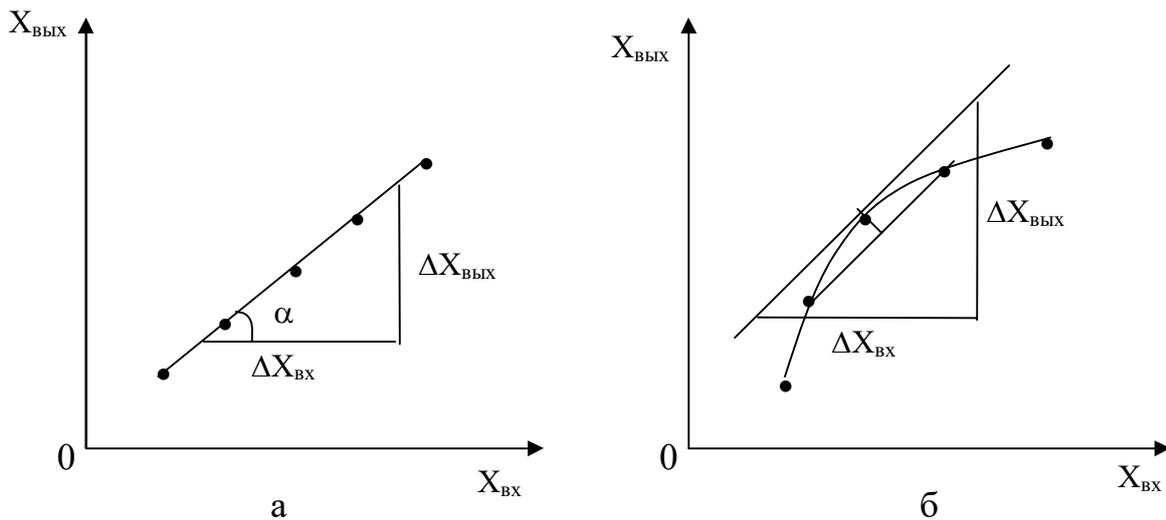


Рис. 11. Статические характеристики объектов:
а – линейная; б – нелинейная

По статической характеристике определяют значение коэффициента передачи по данному каналу. **Коэффициент передачи** или коэффициент усиления выражает отношение изменения выходной переменной к изменению входной переменной (рис.11) и является размерной величиной:

$$K_{\text{пер}}^{\text{разм}} = \frac{\Delta X_{\text{ВЫХ}}}{\Delta X_{\text{ВХ}}} = \text{tg}\alpha. \quad (6.3)$$

Для объективного сравнения коэффициентов передачи по различным каналам удобнее оперировать безразмерными величинами. Для этого необходимо помножить числитель и знаменатель на соответствующие значения величин в "рабочей" точке. Например:

$$\text{если } K_{\text{пер}}^{\text{разм}} = \frac{\Delta t}{\Delta t_1}, \text{ тогда } K_{\text{пер}}^{\text{безр}} = \frac{\Delta t}{\Delta t_1} \frac{t_1^0}{t^0}.$$

Динамические свойства объекта изучаются путем построения и анализа реакции объекта на изменение входных переменных по заданному закону. Для решения этой задачи используется модель динамики. В качестве начальных условий выступают значения

переменных состояния в "рабочей" точке. Динамические характеристики строятся при мгновенном изменении входной переменной от "рабочей" точки на некоторую величину $\Delta X_{вх}$ в положительном и отрицательном направлении, другими словами при положительной и отрицательной ступеньке. При линейной статической характеристике по данному каналу динамическая характеристика при $\pm \Delta X_{вх}$ получается симметричной; при нелинейной – несимметричной.

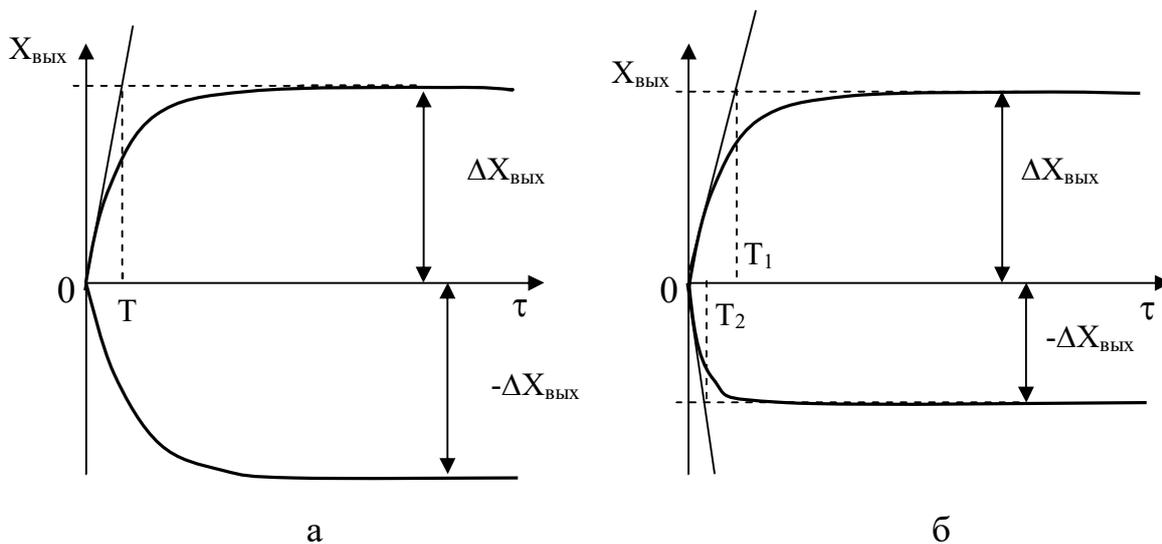


Рис. 12. Динамические характеристики объектов при $\pm \Delta X_{вх}$:
а – симметричная; б – несимметричная

Анализ динамической характеристики позволяет сделать вывод о том, какому динамическому звену соответствует кривая разгона (пропорциональное, интегральное, апериодическое, комбинация звеньев и т.д.); определить основные параметры данного звена, например, коэффициент передачи, постоянную времени (рис.12).

$$K_{разм}^+ = \frac{\Delta X_{ВЫХ}}{\pm \Delta X_{ВХ}}; \quad K_{разм}^- = \frac{-\Delta X_{ВЫХ}}{\pm \Delta X_{ВХ}}; \quad K_{разм}^{ср} = \frac{K_{разм}^+ + K_{разм}^-}{2}; \quad K_{безр}^{ср} = K_{разм}^{ср} \cdot \frac{X_{ВХ}^0}{X_{ВЫХ}^0};$$

$$T = \frac{T_1 + T_2}{2}.$$

Таким образом, по данным, полученным по статическим и динамическим характеристикам объекта по различным каналам, мы

можем представить математическую модель объекта в виде системы передаточных функций, а по величине безразмерных коэффициентов передачи рекомендовать регулирующие переменные по основным каналам управления.

Вопросы по теме 6

1. Что такое статическая характеристика ? Какого вида она бывает ?
2. Что такое динамическая характеристика?
3. Каким образом определяют средний коэффициент передачи по каналу $v_x \rightarrow v_{yx}$, используя график статической характеристики?
4. Каким образом определяют средний коэффициент передачи по каналу $v_x \rightarrow v_{yx}$, используя графики динамической характеристики при положительном и отрицательном изменении входной величины?
5. О чем говорит несимметричный характер динамической характеристики при подаче положительной и отрицательной входной ступеньки, одинаковой по абсолютному значению?
6. Изобразить динамические характеристики типовых динамических звеньев. Какие параметры звеньев можно определить по графикам переходных процессов?

Тема 7. Топологический синтез системы автоматизации и управления

Теоретическое введение

Под топологическим синтезом системы автоматизации и управления (САиУ) будем понимать определение регулируемых параметров технологического процесса и выбор регулирующих воздействий, т.е. определение мест отбора импульсов и формирования сигналов о состоянии процесса и мест приложения регулирующих воздействий.

Необходимо отметить, что в качестве регулирующих воздействий всегда выступают технологические параметры, изменение которых вызывает изменение притока (стока) вещества или энергии в аппарат.

Число регулируемых параметров и их выбор определяются характером (физико-химической сущностью) технологического процесса, назначением и целью функционирования.

Основными задачами САиУ являются поддержание общего материального баланса по газовой и жидкой фазам в аппарате и стабилизация на оптимальном уровне технологических параметров, характеризующих эффективность работы объекта.

Исходя из вышесказанного, в качестве регулируемых переменных выбирают те технологические параметры, изменение которых свидетельствует о нарушении материального баланса по газовой и жидкой фазам, и параметры, значение которых определяет эффективность работы объекта. Как правило, к таким параметрам относятся:

- *уровень жидкости в аппарате* – изменение его свидетельствует о нарушении материального баланса по жидкой фазе;
- *давление или перепад давления* – показатель материального баланса по газовой фазе;
- *температура* в различных фазах – изменение ее свидетельствует о нарушении теплового баланса;
- *концентрация какого-либо компонента* в фазе или некоторый косвенный показатель (плотность фазы, рН и т.п.) – изменение ее свидетельствует о нарушении материального баланса по целевому компоненту, что приводит к ухудшению показателя эффективности процесса, например, к ухудшению качества продукции.

Определение регулирующих воздействий – нетривиальная задача и требует исследования статических и динамических свойств объекта по различным каналам.

При определении количества регулирующих воздействий и выборе их из совокупности входных переменных, необходимо руководствоваться следующими *правилами*:

1) число независимых регулирующих воздействий не должно быть меньше числа регулируемых параметров;

2) в качестве регулирующих воздействий выбираются те входные переменные, целенаправленное изменение которых практически реализуемо в исследуемом технологическом процессе и экономически целесообразно.

На *первом этапе* решения задачи выбора регулирующих воздействий определяются безразмерные коэффициенты передачи по всем динамическим каналам: $x_{\text{ВХ } i} \rightarrow y_{\text{ВЫХ } j}$, $i=1, \dots, m$; $j=1, \dots, n$; m, n – число входных и регулируемых переменных.

На *втором этапе* определяется множество претендентов на регулирующие воздействия с учетом второго правила:

$\bar{u} = (u_1, u_2, \dots, u_\ell)^T$. Формируется матрица коэффициентов передачи:

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1\ell} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2\ell} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{n\ell} \end{bmatrix}, \quad (7.1)$$

где n – число регулируемых переменных; ℓ – число регулирующих воздействий; $\ell \geq n$. $K_{i,j}$ при $i \neq j$ – коэффициент передачи по перекрестному каналу.

На *третьем этапе* производится анализ статической управляемости объекта. Суть его заключается в том, чтобы определить, действительно ли влияние прямого канала управления превышает влияние перекрестных каналов (связей).

В качестве регулируемых переменных нельзя выбирать одновременно технологические параметры, которые линейно-зависимы в статике. Например, процесс смешения (разбавления) двух жидкостей с различным содержанием какого-либо компонента характеризуется изменением концентрации этого компонента в смеси и одновременно изменением плотности раствора. В этом случае нельзя в качестве регулируемых переменных выбирать одновременно и концентрацию и плотность смеси. Необходимо выбрать одну из

указанных величин, чтобы регулируемые переменные были статически независимы.

Рассмотрим случай 2^x -мерной модели объекта, структурная схема которой представлена на рис.13.

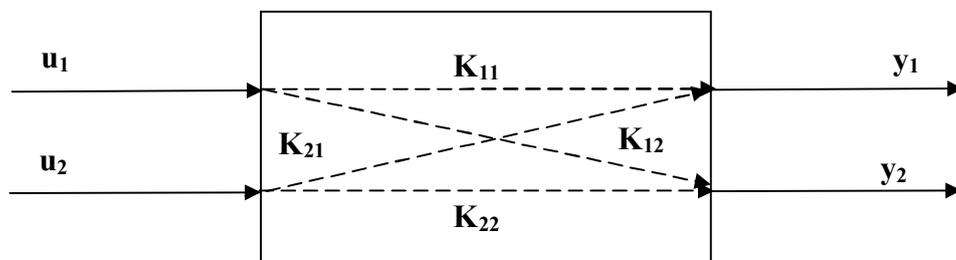


Рис.13. Структура объекта

Матрица коэффициентов передачи определена:

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 2 & 6 \end{bmatrix}. \quad (7.2)$$

Устанавливается вырожденность матрицы K : $\det K = 6 - 6 = 0$, следовательно матрица K – вырождена. Запишем уравнения статики:

$$y_1 = K_{11}u_1 + K_{12}u_2 = u_1 + 3u_2, \quad (7.3)$$

$$y_2 = K_{21}u_1 + K_{22}u_2 = 2u_1 + 6u_2. \quad (7.4)$$

При такой зависимости имеем, что $\Delta y_1 / \Delta y_2 = 0,5$. При любом соотношении управляющих воздействий u_1 и u_2 – **объект в статике неуправляем.**

Рассмотрим случай объекта с двумя регулируемыми переменными и тремя возможными регулирующими воздействиями:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}. \quad (7.5)$$

Необходимо из трех возможных регулирующих воздействий выбрать два, при которых объект управляем в статике.

Рассмотрим три варианта определителей матрицы K , соответствующих различным вариантам управляющих воздействий:

$$\det 1 = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} = K_{11}K_{22} - K_{21}K_{12}, \quad \bar{u} = (u_1, u_2)^T, \quad (7.6)$$

$$\det 2 = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{13} \\ K_{21} & K_{23} \end{bmatrix} = K_{11}K_{23} - K_{21}K_{13}, \quad \bar{u} = (u_1, u_3)^T, \quad (7.7)$$

$$\det 3 = \begin{bmatrix} K_{12} & K_{13} \\ K_{22} & K_{23} \end{bmatrix} = K_{12}K_{23} - K_{22}K_{13}, \quad \bar{u} = (u_2, u_3)^T. \quad (7.8)$$

Если какой-либо $\det i = 0$, то соответствующий набор регулирующих воздействий *использовать нельзя* – матрица K имеет неполный ранг. Среди возможных вариантов управлений необходимо выбрать тот, которому соответствует максимальное значение определителя (детерминанта).

Задание по теме 7

Система управления имеет две выходные регулируемые переменные и три возможных регулирующих воздействия. Необходимо из трех возможных регулирующих воздействий выбрать два, при которых объект управляем в статике.

Вариант	Матрица коэффициентов передачи	Вариант	Матрица коэффициентов передачи
1	$K = \begin{bmatrix} 3 & 8 & 1 \\ 4 & 7 & 2 \end{bmatrix}$	11	$K = \begin{bmatrix} 7 & -5 & 1 \\ 2 & 5 & 9 \end{bmatrix}$
2	$K = \begin{bmatrix} -2 & 5 & 8 \\ 1 & -3 & -2 \end{bmatrix}$	12	$K = \begin{bmatrix} -4 & 1 & 8 \\ 3 & 9 & -7 \end{bmatrix}$
3	$K = \begin{bmatrix} 6 & -2 & -3 \\ 9 & 7 & -5 \end{bmatrix}$	13	$K = \begin{bmatrix} 6 & 8 & -7 \\ -4 & 5 & 6 \end{bmatrix}$
4	$K = \begin{bmatrix} 7 & 1 & -9 \\ -5 & 8 & 2 \end{bmatrix}$	14	$K = \begin{bmatrix} -8 & 3 & 1 \\ -4 & -5 & 2 \end{bmatrix}$
5	$K = \begin{bmatrix} 1 & -5 & 8 \\ 3 & 7 & -6 \end{bmatrix}$	15	$K = \begin{bmatrix} 8 & 2 & 9 \\ 4 & 3 & 7 \end{bmatrix}$
6	$K = \begin{bmatrix} 4 & -2 & 1 \\ -3 & 5 & 7 \end{bmatrix}$	16	$K = \begin{bmatrix} 7 & -8 & 2 \\ 9 & 1 & 8 \end{bmatrix}$
7	$K = \begin{bmatrix} -3 & 8 & 2 \\ 1 & 2 & -7 \end{bmatrix}$	17	$K = \begin{bmatrix} 5 & 9 & 4 \\ -3 & 2 & 6 \end{bmatrix}$
8	$K = \begin{bmatrix} 2 & 4 & -7 \\ 1 & 9 & 2 \end{bmatrix}$	18	$K = \begin{bmatrix} 4 & 9 & -1 \\ -2 & 3 & 4 \end{bmatrix}$
9	$K = \begin{bmatrix} -9 & 1 & 5 \\ -5 & 8 & -2 \end{bmatrix}$	19	$K = \begin{bmatrix} -7 & -8 & 3 \\ 5 & 1 & -2 \end{bmatrix}$
10	$K = \begin{bmatrix} 2 & -4 & 5 \\ 5 & -3 & -1 \end{bmatrix}$	20	$K = \begin{bmatrix} 3 & -2 & 5 \\ -9 & 8 & 4 \end{bmatrix}$

Вопросы по теме 7

1. Что понимают под топологическим синтезом системы управления?
2. Какие задачи решает система управления?
3. Какие переменные называют регулируемыми?
4. Какими правилами руководствуются при выборе регулируемых переменных?
5. Что понимают под регулирующими воздействиями?
6. Какие требования предъявляются к регулирующим воздействиям?
7. Поясните суть анализа статической управляемости объекта.

Тема 8. Режимно-технологическая оптимизация ХТП

Цель: определение значений конструктивных, режимных и технологических параметров объекта, обеспечивающих экстремум критерия (показателя) эффективности.

Исходная информация об объекте:

- критерий эффективности как функция переменных состояния;
- уравнения математической модели технологического процесса, дающие взаимосвязь между входом и выходом;
- ограничения на конструктивные, режимные, технологические параметры (входные и переменные состояния).

Критерий (показатель) эффективности формулируется исходя из цели функционирования объекта. Он отражает такие свойства объекта, как результативность, т.е. степень достижения цели, оперативность, энерго- и материалоемкость. Данные показатели определяются переменными состояния, которые, в свою очередь, зависят от входных переменных. В явном виде получить зависимость критерия эффективности от входных переменных не удастся. Эта зависимость определяется опосредованно через нелинейные уравнения математической модели технологического процесса.

Для решения задачи оптимизации необходимо выбрать метод решения уравнений математической модели, разработать алгоритм и программно реализовать его на ЭВМ. Кроме того, необходимо разработать алгоритм поиска экстремума (min и max) самого критерия эффективности (оптимизации) и общую процедуру решения задачи.

Рассмотрим процедуру решения задачи оптимизации на примере емкостного реактора (рис.14) для проведения экзотермической реакции последовательного типа $A \xrightarrow{k_1} P_1 \xrightarrow{k_2} P_2$. Исходный реагент А подается основным потоком с параметрами $\{v_1, C_{A_{вх}}, t_1\}$. Для

разбавления смеси в аппарат подается поток разбавителя а параметрами $\{v_2, t_2\}$. Реакционная смесь удаляется из аппарата насосом с параметрами потока $\{v, C_A, C_{P1}, C_{P2}, t\}$. В рубашку поступает хладагент с параметрами $\{v_{хл}, t_{хл\text{ вх}}\}$ и покидает аппарат с параметрами $\{v_{хл}, t_{хл}\}$.

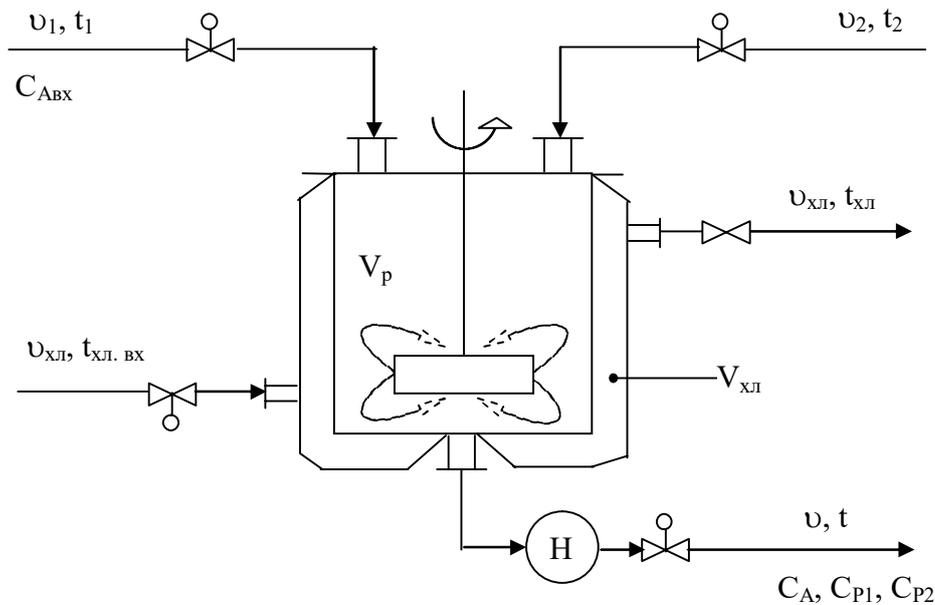


Рис. 14. Принципиальная схема емкостного реактора

Пусть математическая модель объекта в статике имеет вид:

$$\begin{aligned}
 f_1(\cdot) &= v_1 C_{A\text{вх}} - V k_1 C_A - v C_A = 0; \\
 f_2(\cdot) &= V (k_1 C_A - k_2 C_{P1}) - v C_{P1} = 0; \\
 f_3(\cdot) &= V k_2 C_{P1} - v C_{P2} = 0; \\
 f_4(\cdot) &= v_1 t_1 + v_2 t_2 - v t + |k_1 C_A| \frac{\Delta H}{\rho C_p} - \frac{K_T F_T}{\rho C_p} (t - t_{хл}) = 0; \\
 f_5(\cdot) &= v_{хл} t_{хл\text{ вх}} - v_{хл} t_{хл} + \frac{K_T F_T}{\rho_{хл} C_{хл}} (t - t_{хл}) = 0,
 \end{aligned} \tag{8.1}$$

где V – объем реактора; $k_i = k_{i0} \exp(-E_i/R(273+t))$; $i = \overline{1,2}$ – константа скорости i -й реакции; E_i – энергия активации i -й реакции; $\rho, \rho_{хл}$ – плотность реакционной смеси и хладагента соответственно; $C_p, C_{хл}$ – удельная теплоемкость смеси и хладагента соответственно; ΔH –

тепловой эффект реакции; K_T, F_T – коэффициент и поверхность теплопередачи соответственно.

Первые три уравнения системы $f_1(\cdot) = 0, f_2(\cdot) = 0, f_3(\cdot) = 0$ – уравнения материального баланса по веществам А, Р₁, Р₂ соответственно, $f_4(\cdot) = 0$ – уравнение теплового баланса реакционной смеси; $f_5(\cdot) = 0$ – уравнение теплового баланса для хладагента.

Заданы численные значения входных переменных $\{v_1, v_2, C_{A_{вх}}, t_1, t_2, t_{хл\ вх}\}$, физико-химические параметры $\{k_{0i}, E_i, R, C_p, C_{хл}, \rho, \rho_{хл}, K_T, \Delta H\}$, ограничения на температуру в реакторе: $70^\circ\text{C} \leq t \leq 90^\circ\text{C}$ и условие $v_1 + v_2 - v = 0$, т.е. ($V = \text{const}$).

Цель функционирования объекта: при определенных значениях входных переменных получить реакционную смесь с максимально возможным значением концентрации целевого компонента Р₁ – C_{P1} . По другому можно сказать так: реализовать процесс, который обеспечивает максимальную селективность по целевому веществу:

$$\sigma_{P1} = \frac{v C_{P1}}{v_1 C_{A_{вх}} - v C_A}.$$

Таким образом, в качестве критерия эффективности можно использовать величину σ :

$$R(C_{P1}, C_A) = \frac{v C_{P1}}{v C_{A_{вх}} - v C_A}. \quad (8.2)$$

Значения C_{P1}, C_A зависят от входных переменных, режимного параметра – t и конструктивного параметра – V . Следовательно, R является функцией температуры t и объема V : $R = R[C_{P1}(t, V); C_A(t, V)] = R(t, V)$.

Содержательная формулировка задачи оптимизации: при заданных значениях входных переменных необходимо определить значения температуры процесса из интервала $[70^\circ\text{C} \div 90^\circ\text{C}]$ и объем аппарата V , обеспечивающие максимальное значение селективности по целевому веществу P_1 , $R \rightarrow \max$.

Математическая формулировка выглядит следующим образом:

$$\{t^*, V^*\} = \arg \max_{t, V} R(C_{P1}, C_A) = \arg \max_{t, V} \left(\frac{\nu C_{P1}}{\nu C_{A_{\text{ВХ}}} - \nu C_A} \right) \quad (8.3)$$

при ограничениях в форме уравнений модели

$$f_1(\cdot) = 0, f_2(\cdot) = 0, f_3(\cdot) = 0 \quad (8.4)$$

и ограничении на температуру в реакторе

$$\varphi_1 = 70^\circ\text{C} \leq t \leq 90^\circ\text{C}. \quad (8.5)$$

Для *решения задачи оптимизации* можно предложить процедуру, состоящую из 2^x этапов.

1 этап. Определение оптимальных значений t^*, V^* с использованием уравнений математической модели, отражающих материальный баланс по компонентам (8.4), ограничений (8.5) и температурной зависимости констант скоростей $k_i = f(t)$.

Алгоритм поиска $\{t^*, V^*\}$ может быть различным. В частности, можно использовать простейший метод сканирования по оптимизирующим переменным в заданной области.

1. Определяются интервалы изменения и шаг варьирования переменных. Например, $70^\circ\text{C} \leq t \leq 90^\circ\text{C}$ с шагом $\Delta t = 10^\circ\text{C}$, $200\text{л} \leq V \leq 1500\text{л}$ с шагом $\Delta V = 100$ л.

2. Задаются начальные значения температуры $t^1 = 70^\circ\text{C}$ и объема $V^1 = 100$ л.

3. Решается система нелинейных алгебраических уравнений (8.4) при заданных t и V . Определяется значение критерия оптимальности по (8.2) - $R^{t, V}$.

4. Значение объема увеличивается на величину ΔV

$$V^{i+1} = V^i + \Delta V, \quad i = 1, 2, \dots$$

5. Проверяется условие

$$V^{i+1} < V^{\max}, \quad \text{где } V^{\max} = 1500 \text{ л.}$$

Если условие выполняется – реализуется п.3. Если не выполняется – переходим к п.6.

6. Строится зависимость R от объема V при постоянной температуре t^j (рис.15).

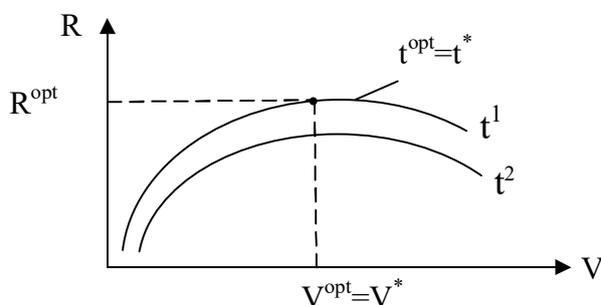


Рис. 15. Зависимость критерия эффективности от объема при различных температурах

7. Значение температуры процесса увеличивается на величину Δt :

$$t^{j+1} = t^j + \Delta t, \quad j = 1, 2, 3.$$

8. Проверяется условие

$$t^j \leq t^{\max}, \quad \text{где } t^{\max} = 90 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Если условие выполняется, то принимаем $V = V^1$ и переходим к п.3, если не выполняется - переходим к п.9.

9. По графикам рис.13 определяются оптимальные значения t^* и V^* .

2 этап. Для оптимальных значений t^* и V^* определяются технологические и конструктивные параметры – $\{v_{хл}^*, t_{хл}^*, F_T^*\}$.

Задавшись конструктивным типом реактора при известном объеме V^* , вычисляется значение поверхности теплопередачи F_T^* (например, как поверхность цилиндра заданного объема при равенстве диаметра высоте цилиндра).

Значения $\{v_{хл}^*, t_{хл}^*\}$ определяются из решения алгебраических уравнений теплового баланса:

$$f_4(\cdot) = 0 \quad f_5(\cdot) = 0. \quad (8.6)$$

Если при решении системы (8.6) получаются значения $v_{хл}^*, t_{хл}^*$, противоречащие физическому смыслу, то необходимо скорректировать некоторые входные технологические параметры, например, $t_{хл\ вх}$ или t_1, t_2 или ΔH .

Реализация изложенных этапов позволяет решить задачу оптимизации.

Другой вариант постановки задачи оптимизации.

В зависимости от заданного интервала температуры, типа реакции и соотношения констант скоростей стадий может возникнуть ситуация, когда зависимость $R(t, V)$ не имеет экстремума, а носит монотонно возрастающий характер (рис. 16).

В этом случае необходимо задаться величиной селективности $\sigma^{\text{зад}} (R^{\text{зад}})$ или величиной степени превращения исходного реагента

$$\psi_A^{\text{зад}} = \frac{v_1 C_{A\ вх} - v C_A}{v_1 C_{A\ вх}}.$$

Задача оптимизации заключается в определении температуры, обеспечивающей минимальный объем аппарата, при котором соблюдаются все ограничения ($R=R^{\text{зад}}$ или $\psi_A = \psi_A^{\text{зад}}$). Критерий оптимизации $V = V(C_A, C_P, t)$.

Математическая формулировка:

$$\{t^*\} = \arg \min_t V(C_{P1}, C_A, t) \quad (8.7)$$

при ограничениях:

$$f_1(\cdot) = 0, \quad f_2(\cdot) = 0, \quad f_3(\cdot) = 0;$$

$$\varphi_1 = 70^\circ \text{C} \leq t \leq 90^\circ \text{C};$$

$$R = R^{\text{зад}}. \quad (8.8)$$

Графическое решение задачи представлено на рис.16. Необходимо отметить, что в данном случае в качестве исходного показателя эффективности можно использовать степень превращения реагента А – ψ_A и строить зависимости $\psi_A = \psi_A(V)$ при различных температурах.

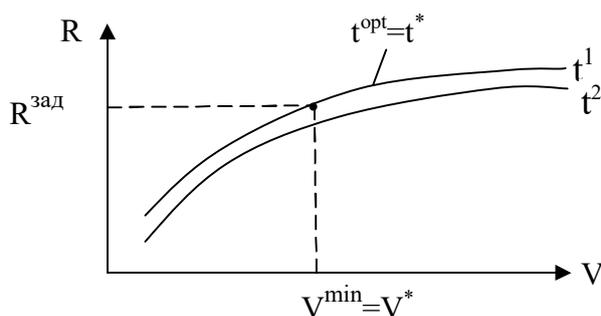


Рис. 16. Зависимость критерия эффективности от объема при различных температурах

Второй этап решения задачи аналогичен вышеизложенному (см. с. 72).

II. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Цель занятий: приобретение умений и навыков анализа технологических процессов как объектов управления с использованием методов моделирования на ЭВМ.

Основные этапы анализа химико-технологических процессов как объектов автоматизации и управления и их содержание подробно приведены в литературе, а также на страницах 5–6 данного учебного пособия.

Содержание лабораторных работ:

- 1) разработка концептуальной модели объекта;
- 2) математическое описание химико-технологического процесса;
- 3) разработка программных средств реализации математической модели;
- 4) проведение численного эксперимента с целью изучения статических и динамических свойств технологического объекта;
- 5) анализ результатов эксперимента. Выбор регулируемых параметров и соответствующих регулирующих воздействий.

Отчеты по лабораторным работам должны содержать:

- 1) цель и задачи лабораторной работы;
- 2) вариант задания (таблица исходных данных);
- 3) этапы анализа технологического процесса как объекта управления и результаты моделирования статических и динамических характеристик по различным каналам;
- 4) листинги программных средств расчета;
- 5) заключение по работе, где отметить основные результаты и выводы по каждому этапу исследования.

Рекомендации по оформлению отчетов и пример выполнения лабораторной работы см. прил. 1÷5.

Лабораторная работа №1

АНАЛИЗ ЕМКОСТНОГО СМЕСИТЕЛЯ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИИ

Цель работы: провести анализ и исследовать статические и динамические свойства смесителя как объекта управления.

Емкостной смеситель

Во многих производственных процессах для подготовки материальных потоков к последующей переработке используют операцию смешения. Часто реализуют ее в емкости с интенсивным механическим перемешиванием. Варианты организации процесса приведены на рис.17.

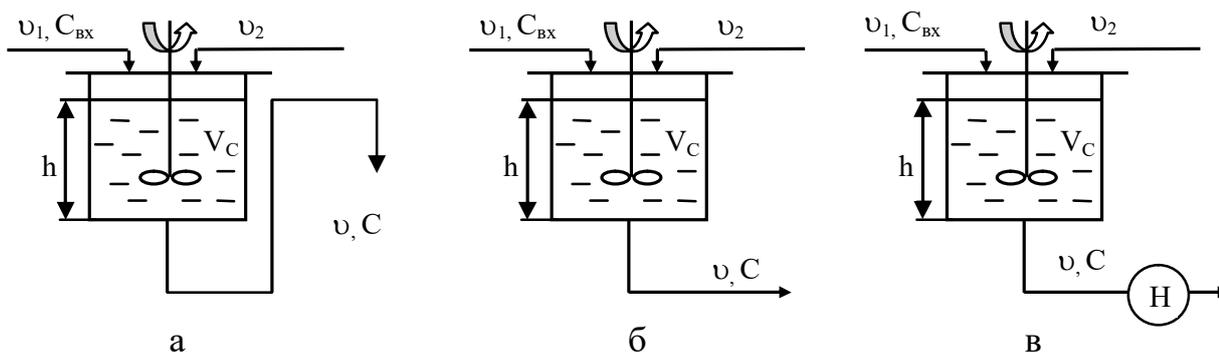


Рис. 17. Принципиальные схемы смесителей:

- а – истечение жидкости путем организации сообщающихся сосудов;
- б – свободное истечение жидкости; в – жидкость удаляется из емкости с помощью насоса

Краткая характеристика объекта

В аппарат емкостного типа с интенсивно работающей мешалкой подаются две жидкости, расходы, концентрации полезного компонента которых равны соответственно $v_1, C_{вх}$ и v_2 . Выходящий поток жидкости имеет состав C . Рабочий объем аппарата V_c . Расход выходящего потока v определяется: а) организацией сообщающихся сосудов ($h = \text{const}$); б) скоростью свободного истечения; в) расходной характеристикой насоса.

Ниже приведены таблицы исходных данных для всех трех схем (табл. 4÷6).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ к лабораторной работе №1

Смеситель с сообщающимися сосудами (рис.17, а)

Таблица 4

Номер варианта	$C_{вх}$, моль/л	v_1 , л/мин	v_2 , л/мин	V_c , л
Са1	1,33	10	5	500
Са2	1,5	15	5	600
Са3	1,33	7,5	2,5	700
Са4	1,4	15	5	400
Са5	1,6	22,5	10,5	810
Са6	1,45	12	5	360
Са7	1,2	7,5	2,5	400
Са8	1,6	20	7,5	650
Са9	1,7	22,5	7,5	810
Са10	1,5	12	8	600

Смеситель со свободным истечением (рис.17, б)

Таблица 5

Номер варианта	$C_{вх}$, моль/л	v_1 , л/мин	v_2 , л/мин	V_c , л	Да, м
Сб1	1,35	15	9	400	0,8
Сб2	1,4	20	9	1350	1,2
Сб3	1,33	17	8	575	0,9
Сб4	1,28	20	7	850	1
Сб5	1,6	20	10	2300	1,5
Сб6	1,5	17	10	785	1
Сб7	1,15	12	7	100	0,5
Сб8	1,3	15	7	270	0,7
Сб9	1,65	18	10	1200	1,2
Сб10	1,45	15	10	450	0,8

Смеситель с насосом (рис.17, в)

Таблица 6

Номер варианта	$C_{вх}$, моль/л	v_1 , л/мин	v_2 , л/мин	V_c , л
Св1	1,25	7,5	2,5	600
Св2	1,35	15	5	500
Св3	1,45	10	2,5	800
Св4	1,5	15	7	400
Св5	1,33	22,5	7,5	900
Св6	1,4	15	10	700
Св7	1,2	18	9	1200
Св8	1,3	18	7	1000
Св9	1,55	16	7	650
Св10	1,7	10	5	850

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Разработать концептуальную модель смесителя:

- изобразить принципиальную схему аппарата и дать краткое описание работы;
- сформулировать основное назначение и цель функционирования ХТП;
- провести классификацию всех технологических параметров на входные переменные и переменные состояния;
- сформулировать показатель (критерий) эффективности.

2. Записать математическую модель смесителя:

- сформулировать упрощающие допущения;
- записать уравнения материальных и тепловых балансов для условий динамики и статики.

3. Разработать программы расчета моделей статики и динамики (рекомендована среда Mathcad).

4. Провести численный эксперимент:

- рассчитать и построить статические характеристики по различным каналам вх.пер. → вых.пер. (см. тему 6);
- проанализировать статические характеристики по виду и характеру кривых; получить коэффициент передачи в области рабочей точки;
- рассчитать и построить динамические характеристики по различным каналам при ступенчатом изменении входной переменной $\pm \Delta$ вх.пер. → вых.пер. (см. тему 6);
- проанализировать динамические характеристики по виду и характеру кривых; определить, какому типовому линейному звену соответствует динамическая характеристика, и найти соответствующие параметры передаточного звена (коэффициент передачи, постоянная времени и время запаздывания);
- свести все результаты в таблицу (см. прил. 3).

5. Анализ результатов исследований

- записать математическую модель объекта в виде системы передаточных функций;

- исходя из полученных значений безразмерных коэффициентов передачи и с учетом практической целесообразности, рекомендовать регулирующие воздействия для соответствующих регулируемых параметров;

- изобразить структурную схему объекта (см. прил. 4).

6. Оформить отчет по лабораторной работе (рекомендации по оформлению отчета смотри в прил. 1÷5).

Вопросы и задания к коллоквиуму

1. Приведите примеры гидравлических объектов.

2. В чем заключается основная цель и назначение функционирования смесителей?

3. Какие упрощающие допущения принимаются при разработке математических моделей емкостных смесителей с мешалками?

4. Что такое модель статики и модель динамики?

5. Запишите математическую модель динамики смесителя в аналитической форме: а) при истечении жидкости по принципу сообщающихся сосудов; б) свободном истечении жидкости; в) использовании насоса.

6. Проведите процедуру линеаризации исходной аналитической модели и получите математическую модель динамики смесителя в отклонениях: а) при истечении жидкости по принципу сообщающихся сосудов; б) свободном истечении жидкости; в) использовании насоса.

7. Запишите математическую модель динамики смесителя в форме передаточных функций: а) при истечении жидкости по принципу сообщающихся сосудов; б) свободном истечении жидкости; в) использовании насоса.

8. Изобразите упрощенную структурную схему смесителя и обоснуйте выбор регулирующих воздействий: а) при истечении жидкости по принципу сообщающихся сосудов; б) свободном истечении жидкости; в) использовании насоса.

Лабораторная работа №2

АНАЛИЗ ЕМКОСТНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА С РУБАШКОЙ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИИ

Цель работы: провести анализ и исследовать статические и динамические свойства теплообменника как объекта управления.

Емкостной теплообменник с рубашкой

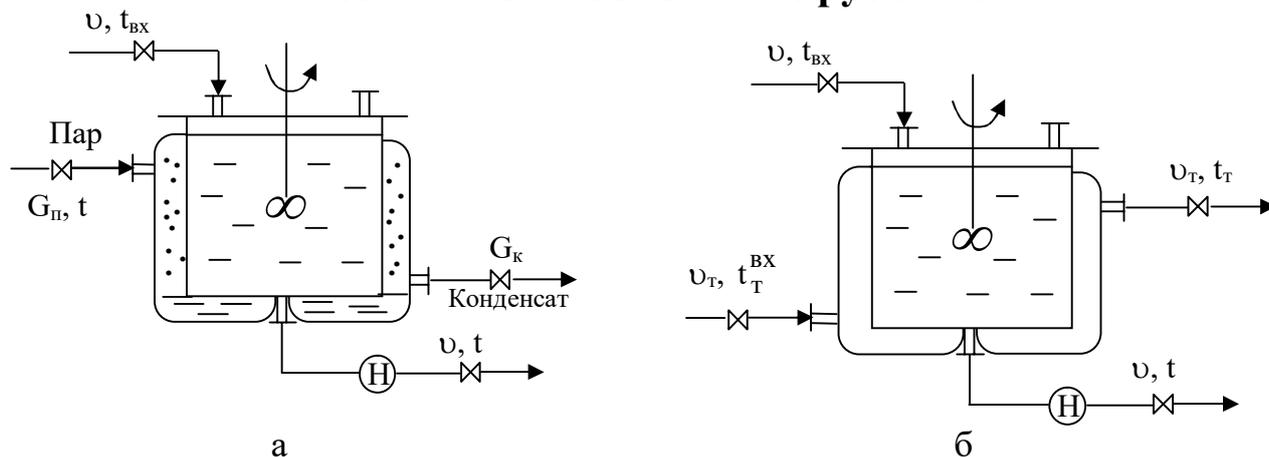


Рис.18. Емкостной теплообменник с рубашкой:

а – обогрев греющим паром; б – обогрев жидким теплоносителем

Краткая характеристика объекта

В аппарат емкостного типа с интенсивно работающей мешалкой подается жидкость, расход и температура которой равны v , $t_{вх}$ соответственно. Жидкость подогревается до температуры t путем подачи в рубашку теплоносителя: а) насыщенного пара или б) жидкого теплоносителя. Выходящий поток жидкости подается из аппарата центробежным насосом с расходом v .

Ниже, в табл. 7, 8 и 9, 10 приведены исходные данные для объектов.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ к лабораторной работе №2

ТЕПЛООБМЕННИК с жидкофазным теплоносителем

вариант без учета теплоаккумулирующей способности стенки – ТЖа

Таблица 7

Номер варианта	v , л/мин	$t_{вх}$, °С	V , л	$V_{руб}$, л	F_T , м ²	v_T , л/мин	$t_T^{вх}$, °С
1	15	22	300	120	1,68	6	80
2	20	14	700	280	3,92	10	70
3	10	47	680	272	3,81	12	95
4	12	20	400	160	2,24	8	75
5	18	22,5	400	160	2,24	15	55
6	8	17	300	120	1,68	7	85
7	25	30	850	340	4,76	9	65
8	13	35	500	200	2,8	12	90
9	30	15	800	320	4,48	17	78
10	32	18	1200	480	6,72	18	60

Коэффициент теплопередачи $K_T=45$ кДж/(м²·мин·К)

вариант с учетом теплоаккумулирующей способности стенки – ТЖб

Таблица 8

Номер варианта	v , л/мин	$t_{вх}$, °С	V , л	$V_{руб}$, л	F_T , м ²	v_T , л/мин	$t_T^{вх}$, °С
1	15	20	600	240	3,36	10	80
2	10	15	450	180	2,52	15	75
3	25	18	1000	400	5,6	20	85
4	18	30	700	280	3,92	12	65
5	20	10	400	160	2,24	20	70
6	12	15	650	260	3,64	25	80
7	8	30	500	200	2,8	15	75
8	15	10	850	340	4,76	17	80
9	25	25	900	360	5,04	10	78
10	30	15	1200	480	6,72	20	70

Коэффициенты теплоотдачи: $\alpha_1=150$, кДж/(м²·мин·К); $\alpha_2=75$, кДж/(м²·мин·К).

Масса стенки рассчитывается по поверхности теплообмена:

$$m_{ст} = F_T \delta_{ст} \rho_{ст}; \text{ где } \delta_{ст}=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м; } \rho_{ст}= 7800 \text{ кг/м}^3; \text{ } c_{ст}= 0,46 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$$

ТЕПЛООБМЕННИК с паровым обогревом

вариант без учета теплоаккумулирующей способности стенки – ТПа

Таблица 9

Номер варианта	v , л/мин	$t_{вх}$, °С	V , л	F_T , м ²	$G_{п}$, кг/мин
1	10	20	300	1,68	0,4
2	15	15	450	2,52	0,44
3	18	22	700	3,92	0,48
4	16	25	850	4,76	0,46
5	20	18	400	2,24	0,42
6	18	10	1000	5,6	0,5
7	20	16	650	3,64	0,44
8	10	20	500	2,8	0,48
9	22	15	800	4,48	0,5
10	25	25	1200	6,72	0,4

Коэффициент теплопередачи $K_T=26$ кДж/(м²·мин·К);

$$t_{п}(G_{п}) = b G_{п}, \text{ где } b=250 \text{ } ^\circ\text{С}\cdot\text{мин}/\text{кг}$$

вариант с учетом теплоаккумулирующей способности стенки – ТПб

Таблица 10

Номер варианта	v , л/мин	$t_{вх}$, °С	V , л	F_T , м ²	$G_{п}$, кг/мин
1	12	18	650	3,64	0,4
2	8	30	500	2,8	0,44
3	15	10	850	4,76	0,48
4	25	25	900	5,04	0,46
5	18	22,5	400	2,24	0,42
6	8	17	300	1,68	0,48
7	25	30	850	4,76	0,5
8	15	15	450	2,52	0,4
9	22	18	800	4,48	0,44
10	12	15	1200	6,72	0,5

Коэффициент теплоотдачи - $\alpha_2=75$, кДж/(м²·мин·К)

Масса стенки рассчитывается по поверхности теплообмена:

$$m_{ст} = F_T \delta_{ст} \rho_{ст}; \text{ где } \delta_{ст}=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \rho_{ст}=7800 \text{ кг/м}^3; c_{ст}=0,46 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

$$t_{п}(G_{п}) = b G_{п}, \text{ где } b=250 \text{ } ^\circ\text{С}\cdot\text{мин}/\text{кг}$$

r^* (удельная теплота конденсации) определяется: $r^*(t_{п}) = 2526 - 2,682 t_{п}$

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Разработать концептуальную модель теплообменника:

- изобразить принципиальную схему аппарата и дать краткое описание работы;
- сформулировать основное назначение и цель функционирования ХТП;
- провести классификацию всех технологических параметров на входные переменные и переменные состояния;
- сформулировать показатель (критерий) эффективности.

2. Записать математическую модель теплообменника:

- сформулировать упрощающие допущения;
- записать уравнения материальных и тепловых балансов для условий динамики и статики.

3. Разработать программы расчета моделей статики и динамики (рекомендована среда Mathcad).

4. Провести численный эксперимент:

- рассчитать и построить статические характеристики по различным каналам вх.пер.→вых.пер. (см. тему 6);
- проанализировать статические характеристики по виду и характеру кривых; получить коэффициент передачи в области рабочей точки;
- рассчитать и построить динамические характеристики по различным каналам при ступенчатом изменении входной переменной $\pm \Delta v_{x.пер.} \rightarrow v_{y.пер.}$ (см. тему 6);
- проанализировать динамические характеристики по виду и характеру кривых; определить, какому типовому линейному звену соответствует динамическая характеристика, и найти соответствующие параметры передаточного звена (коэффициент передачи, постоянная времени и время запаздывания);
- свести все результаты в таблицу (см. прил. 3).

5. Анализ результатов исследований

- записать математическую модель объекта в виде системы передаточных функций;

- исходя из полученных значений безразмерных коэффициентов передачи и с учетом практической целесообразности, рекомендовать регулирующие воздействия для соответствующих регулируемых параметров;

- изобразить структурную схему объекта (см. прил. 4).

6. Оформить отчет по лабораторной работе (рекомендации по оформлению отчета смотри в прил. 1÷5).

Вопросы и задания к коллоквиуму

1. Приведите примеры теплообменных процессов и объектов, в которых они реализуются.

2. В чем заключается основная цель и назначение функционирования теплообменников?

3. Какие упрощающие допущения принимаются при разработке математических моделей емкостных теплообменников с рубашками?

4. Запишите математическую модель динамики емкостного теплообменника с рубашкой в аналитической форме:

а) при использовании жидкофазного теплоносителя (с учетом и без учета теплоаккумулирующей способности стенки аппарата);

б) обогреве греющим паром (с учетом и без учета теплоаккумулирующей способности стенки аппарата).

5. Проведите процедуру линеаризации исходной аналитической модели и получите математическую модель динамики емкостного теплообменника с рубашкой в отклонениях:

а) при использовании жидкофазного теплоносителя (с учетом и без учета теплоаккумулирующей способности стенки аппарата);

б) обогреве греющим паром (с учетом и без учета теплоаккумулирующей способности стенки аппарата).

6. Запишите математическую модель динамики емкостного теплообменника с рубашкой в форме передаточных функций:

а) при использовании жидкофазного теплоносителя (с учетом и без учета теплоаккумулирующей способности стенки аппарата);

б) обогреве греющим паром (с учетом и без учета теплоаккумулирующей способности стенки аппарата).

7. Изобразите упрощенную структурную схему емкостного теплообменника с рубашкой и обоснуйте выбор регулирующих воздействий:

а) при использовании жидкофазного теплоносителя (с учетом и без учета теплоаккумулирующей способности стенки аппарата);

б) обогреве греющим паром (с учетом и без учета теплоаккумулирующей способности стенки аппарата).

Лабораторная работа №3

АНАЛИЗ ЕМКОСТНОГО РЕАКТОРА С РУБАШКОЙ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИИ

Цель работы: провести анализ и исследовать статические и динамические свойства реактора как объекта управления.

Характеристика объекта

Объект анализа – химический реактор емкостного типа, снабженный механической мешалкой и рубашкой, в которую подается теплоноситель (рис.19). В качестве теплоносителя используется вода или насыщенный пар. В последнем случае пар подается в верхнюю часть рубашки, а конденсат отводится снизу.

В аппарате проводится сложная экзо- или эндотермическая реакция. Исходный реагент или несколько компонентов реакции подаются в аппарат потоком v_1 . Второй входной поток с расходом v_2 служит для разбавления смеси. Наличие рубашки учитывается только при политропическом режиме функционирования аппарата.

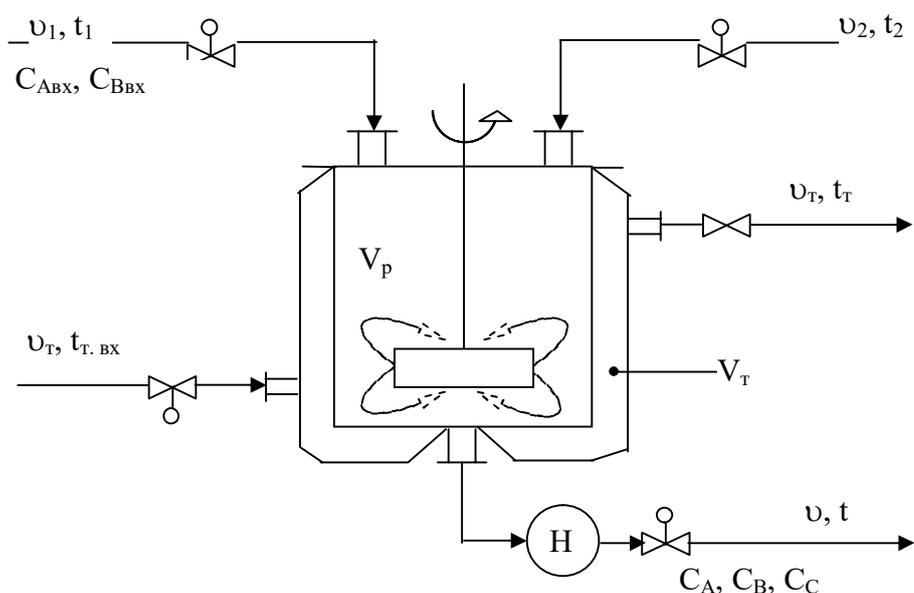


Рис. 19. Принципиальная схема объекта моделирования

Варианты заданий, исходные данные

Вариант задания определяется пятизначным числом: «a b c d e» (табл. 11).

- a – цифра, указывающая номер схемы реакции в табл. 12;
- b – цифра, указывающая тип реакции (экзо- или эндотермическая);
- c – цифра, обозначающая тепловой режим аппарата;
- d – агрегатное состояние теплоносителя;
- e – цифра, обозначающая вариант организации ввода реагентов.

Таблица 11

Номер схемы реакции по табл.12	Тип реакции	Тепловой режим аппарата	Агрегатное состояние теплоносителя	Организация ввода реагентов в реактор
a	b	c	d	e
1 2 3 4 5 6	1 – экзотермическая	1 – политропический (политермический)	1 – жидкость	1 – в потоке ν_1 содержится только исходный реагент А ($C_{Авх}$)
	2 – эндотермическая	2 – адиабатический	2 – насыщенный пар	2 – во входн. потоке ν_1 содержатся компоненты А, В ($C_{Авх}, C_{Ввх}$)

Варианты многостадийных схем реакции и численные значения параметров температурной зависимости констант скоростей стадий K_{i0}, E_i ($K_i = K_{i0} \exp(-E_i/RT)$) приведены в табл. 12. Значение универсальной газовой постоянной принять равным $R=8,315 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$.

Конструктивные параметры реактора (ориентировочные значения):

- объем реактора $V_p^0 = 500 \text{ л}$;
- диаметр аппарата $D^0 = 0,86 \text{ м}$;
- уровень жидкости $H^0 = 0,86 \text{ м}$;
- объем рубашки $V_r^0 = 200 \text{ л}$;
- поверхность теплопередачи $F^0 = 2,3 \text{ м}^2$.

Схема превращений и кинетические параметры

Номер варианта схемы реакции	Схема превращений	Предэкспоненциальный множитель k_{i0} , 1/мин	Энергия активации E_i , Дж/моль
1	$A \xrightleftharpoons[k_2]{k_1} B \xrightarrow{k_3} C$	200 120 80	25000 30000 40000
2	$A \xrightleftharpoons[k_2]{k_1} B$	200 20	20000 25000
3	$A \xrightarrow{k_1} B \xrightleftharpoons[k_3]{k_2} C$	15000 1 2	45000 20000 25000
4	$A \xrightarrow{k_1} B \xrightarrow{k_2} C$	20 1	20000 25000
5	$A \xrightarrow{k_1} B$ $A \xrightarrow{k_2} C$	350 2	32000 25000
6	$A \xrightarrow{k_1} B$ $A \xrightleftharpoons[k_3]{k_2} C$	24 2 53	22000 17000 25000

Режимно-технологические параметры процесса для различных схем и типов реакций (экзо- или эндотермическая), определяемые тепловым режимом аппарата и агрегатным состоянием теплоносителя приведены в табл. 13. Для всех вариантов заданий температуру входных потоков ν_1 и ν_2 принять равными: $t_1^0 \cong 20 \div 30$ °С; $t_2^0 \cong 30 \div 40$ °С.

При подаче в реактор в потоке ν_1 только вещества – А принять его концентрацию $C_{\text{АВХ}}^0 = 1 \div 1,2$ моль/л; если в аппарат вводятся все компоненты, их концентрации равны: $C_{\text{АВХ}}^0 = 1$ моль/л; $C_{\text{ВВХ}}^0 = 0,2$ моль/л; $C_{\text{СВХ}}^0 = 0,02$ моль/л; $C_{\text{ДВХ}}^0 = 0,0020$ моль/л.

Режимно-технологические параметры процесса

Но- мер схемы реак- ции	Тип реак- ции	Тепло- вой режим аппара- та	Агрегатное состояние теплоноси- теля	Тепловой эффект реакции, кДж/моль	Температу- ра теплоно- сителя, °С	Расход первого потока v_1^0 , л/мин	Расход второго потока v_2^0 , л/мин	Расход хладоа- гента v_T , л/мин
1	1	1	1	100	30 ÷ 35	0.75	0.25	0.5
	1	2	–	100	–			–
	2	1	1	50	90 ÷ 100			1
	2	1	2	50	100 ÷ 105			–
2	1	1	1	100	30 ÷ 35	1.5	0.5	0.5
	1	2	–	100	–			–
	2	1	1	50	90 ÷ 100			1
	2	1	2	50	100 ÷ 105			–
3	1	1	1	100	30 ÷ 35	0.75	0.25	0.5
	1	2	–	100	–			–
	2	1	1	50	90 ÷ 100			1
	2	1	2	50	100 ÷ 105			–
4	1	1	1	100	30 ÷ 35	1.5	0.5	0.5
	1	2	–	100	–			–
	2	1	1	50	90 ÷ 100			1
	2	1	2	50	100 ÷ 105			–
5	1	1	1	100	30 ÷ 35	2.25	0.75	0.5
	1	2	–	100	–			–
	2	1	1	50	90 ÷ 100			1
	2	1	2	50	100 ÷ 105			–
6	1	1	1	100	30 ÷ 35	1.5	0.5	0.5
	1	2	–	100	–			–
	2	1	1	50	90 ÷ 100			1
	2	1	2	50	100 ÷ 105			–

Коэффициент теплопередачи при использовании насыщенного пара в качестве греющего агента – $K_T = 6 \div 10$ кДж/(м²·мин·К); при использовании воды – $K_T = 10 \div 15$ кДж/(м²·мин·К).

Теплофизические свойства растворов, подаваемых в аппарат: $\rho = \rho_1 = \rho_2 = 1,2$ кг/л; $C_{p1} = C_{p2} = 4,19$ кДж/(кг·К); для теплоносителя: $\rho_T = 0,978$ кг/л; $C_{pT} = 4,19$ кДж/(кг·К). Считать плотность и теплоемкость сред независимыми от температуры и концентрации.

В целях упрощения структуры математической модели принять тепловые эффекты всех стадий реакции, кроме первой, равными

нулю. Тепловой эффект реакции ΔH определен на моль превращенного реагента.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Разработать концептуальную модель реактора:

- изобразить принципиальную схему аппарата и дать краткое описание работы;
- сформулировать основное назначение и цель функционирования ХТП;
- провести классификацию всех технологических параметров на входные переменные и переменные состояния;
- сформулировать показатель (критерий) эффективности.

2. Записать математическую модель реактора:

- сформулировать упрощающие допущения;
- разработать модель кинетики химических превращений;
- записать уравнения материальных и тепловых балансов для условий динамики и статики.

3. Разработать программы расчета моделей статики и динамики (рекомендована среда Mathcad).

4. Решить задачу режимно-технологической оптимизации (см. тему 8)

5. Провести численный эксперимент:

- рассчитать и построить статические характеристики по различным каналам вх.пер.→вых.пер. (см. тему 6);
- проанализировать статические характеристики по виду и характеру кривых; получить коэффициент передачи в области рабочей точки;

- рассчитать и построить динамические характеристики по различным каналам при ступенчатом изменении входной переменной $\pm \Delta_{\text{вх.пер.}} \rightarrow \text{вых.пер.}$ (см. тему 6);

- проанализировать динамические характеристики по виду и характеру кривых; определить, какому типовому линейному звену соответствует динамическая характеристика, и найти соответствующие параметры передаточного звена (коэффициент передачи, постоянная времени и время запаздывания);

- свести все результаты в таблицу (см. прил. 3).

6. Анализ результатов исследований

- записать математическую модель объекта в виде системы передаточных функций;

- исходя из полученных значений безразмерных коэффициентов передачи и с учетом практической целесообразности, рекомендовать регулирующие воздействия для соответствующих регулируемых параметров;

- изобразить структурную схему объекта (см. прил. 4).

7. Оформить отчет по лабораторной работе (рекомендации по оформлению отчета смотри в прил. 1÷5).

Вопросы и задания к коллоквиуму

1. Классификация массообменных процессов.
2. Приведите примеры технологического оборудования, в котором протекают массообменные процессы.
3. Химические реакторы, их классификация.
4. Моделирование кинетики химических реакций (на примере гомогенных жидкофазных реакций).
5. В чем заключается основная цель и назначение функционирования химического реактора?
6. Какие уравнения включает в себя математическая модель химического реактора емкостного типа, работающего в политропическом режиме?
7. Изобразите схему материальных и тепловых потоков, возникающих в политропическом реакторе.
8. Какие уравнения включает в себя математическая модель химического реактора емкостного типа, работающего в изотермическом режиме?
9. Какие уравнения включает в себя математическая модель химического реактора емкостного типа, работающего в адиабатическом режиме?
10. Запишите математическую модель динамики емкостного реактора с рубашкой в аналитической форме: а) при использовании в рубашке жидкого хладагента; б) обогреве рубашки греющим паром. (Пример химической реакции и режим работы реактора задает преподаватель).
11. Провести процедуру линеаризации математической модели реактора с целью получения передаточной функции по заданному каналу. (Условия работы реактора, тип реакции, исследуемый канал управления выдаются преподавателем в соответствии с вариантом задания).
12. В чем заключается основная задача управления реактором? Варианты выбора регулирующих воздействий.

Библиографический список

1. Лабутин, А.Н. Технологические процессы и производства как объекты управления: учеб. пособие / А.Н. Лабутин, Г.В. Волкова; Иван. гос. хим.-технол. ун-т.– Иваново: ИГХТУ, 2010. – 96 с.
2. Кафаров, В.В. Математическое моделирование основных процессов химических производств: учеб. пособие для хим.-технол. специальностей/ В.В. Кафаров, М.Б. Глебов – М.: Высшая школа, 1991. – 400 с.
3. Гартман, Т.Н. Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов: учеб. пособие для вузов / Т.Н. Гартман.– М.: Академкнига, 2006. – 415 с.
4. Дудников, Е.Г. Автоматическое управление в химической промышленности: учебник для вузов / Е.Г. Дудников. – М.: Химия, 1987. – 368 с.
5. Дворецкий, С.И. Моделирование систем: учеб. для вузов по специальности "Автоматизация технол. процессов и производств" направления подготовки "Автоматизированные технологии и производства" / С.И. Дворецкий.– М.: Академия, 2009. – 316 с.
6. Теория управления: учебник для вузов/ [А.А. Алексеев и др.]. – СПб.: Изд-во СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», 1999. – 435 с.
7. Бесков, В.С. Общая химическая технология: учебник для вузов / В.С. Бесков. – М.: Академкнига, 2005. – 452 с.
8. Ахназарова, С.Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии: учеб. пособие/ С.Л. Ахназарова, В.В.Кафаров – М.: Высш. шк. 1978. – 319 с.
9. Невиницын, В.Ю. Примеры и задачи по математическим основам кибернетики с решениями в Mathcad: учеб. пособие / И.Ю. Невиницын, А.Н. Лабутин; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2017. – 123 с.
10. Анализ технологических процессов как объектов управления: метод. указания к выполнению курсовой работы / сост.: А.Н.Лабутин, А.Е.Исаенков, Г.В.Волкова; Иван. гос. хим.-технол. ун-т.– Иваново: ИГХТУ, 2009. – 40 с.

Оформление отчета по лабораторной работе

Лист 1. Титульный лист (см. прил. 2).

Лист 2. Цель работы. Исходные данные, соответствующие выданному варианту.

Лист 3÷т.д. Основное содержание работы: текст, рисунки, формулы, графики и т.д.

Заключение по работе.

Приложения. В приложениях представляются листинги программ и другая дополнительная информация.

Отчет оформляется на листах формата А4 в печатном виде. Допускается рисунки и графики оформлять от руки карандашом.

Формат основного текста: Шр 14, Times New Roman, интервал 1÷1,5, выравнивание по ширине. Заголовки, разделы, важные моменты и мысли выделять жирным шрифтом.

Все рисунки и таблицы должны быть пронумерованы и подписаны.

Номера страниц (кроме первой) проставляются в нижнем правом углу.

Пример оформления основной части отчета по лабораторной работе смотри в прил. 5.

Пример оформления титульного листа

Кафедра ТКиА

Дисциплина «Технологические процессы и производства»

Лабораторная работа №1

**Тема: «Анализ емкостного смесителя с насосом
как объекта управления и автоматизации»**

Вариант Св12

Выполнил:

студент гр. 3/36 Иванов А.В.

Проверил:

доц. каф. ТКиА Волкова Г.В.

Иваново, 201__

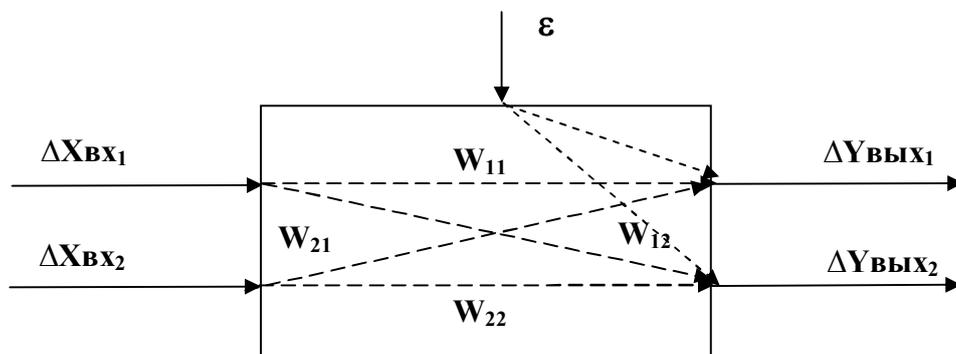
Оформление сводной таблицы результатов

Сводная таблица результатов по исследованию статических и динамических свойств объекта управления

Канал	Статика		Динамика				Средние результаты		
	$K_{пер}^{разм}$	$K_{пер}^{безр}$	$K_{разм}^+$	$K_{разм}^-$	$K_{разм}^{ср}$	$K_{безр}^{ср}$	T	$K_{об}^{разм}$	$K_{об}^{безр}$
ВХ→ВЫХ									

Оформление структурной схемы объекта

Структурная схема объекта



где $\Delta X_{ВХ1}$, $\Delta X_{ВХ2}$ – входные или регулирующие переменные; $\Delta Y_{ВЫХ1}$, $\Delta Y_{ВЫХ2}$ – регулируемые параметры; ε – вектор возмущений; W_{ij} – передаточные функции по каналам регулирования, перекрестным связям, по каналам возмущений.

Пример выполнения лабораторной работы

Анализ политропического реактора как объекта управления и автоматизации

Цель работы: провести анализ и исследовать статические и динамические свойства политропического реактора как объекта управления.

Исходные данные для моделирования объекта

Но-мер	Наименование	Единицы измерения	Численные значения	Обозначения
1	2	3	4	5
1	Объем аппарата	л	500	V_p
2	Объем рубашки	л	200	V_{xl}
3	Теплоемкость вещества в аппарате и входных потоках	кДж/кг·К	4.19	C_p
4	Теплоемкость хладагента / теплоносителя	кДж/кг·К	4.19	$C_{рхл}$
5	Плотность вещества в аппарате и входных потоках	кг/л	1.2	ρ
6	Плотность хладагента / теплоносителя	кг/л	0.978	$\rho_{хл}$
7	Коэффициент теплопередачи	кДж/м ² ·мин·К	9	K_T
8	Поверхность теплообмена	м ²	2.3	F_t
9	Тепловой эффект реакции	кДж/моль	1000	ΔH
10	Предэкспоненциальный множитель константы скорости	л·мин/моль	200	K_0
11	Энергия активации	Дж/моль	25000	E
12	Концентрация компонента А на входе		1	$C_{Авх}$
13	Концентрация компонента В на входе		0	$C_{Ввх}$
14	Расход на входе в реактор v_1	моль/л	0.75	v_1
15	Расход на входе в реактор v_2	л/мин	0.25	v_2
16	Расход хладагента	л/мин	5	$v_{хл}$
17	Температура на входе в реактор t_1	л/мин	30	t_1
18	Температура на входе в реактор t_2	°С	40	t_2
19	Температура хладагента/теплоносителя на входе	°С	30	$t_{хл. вх}$

Задание

- разработать концептуальную модель политропического реактора емкостного типа с механической мешалкой, в котором протекает экзотермическая реакция по схеме $A + A \xrightarrow{k} B$;
- разработать математическую модель статики и динамики аппарата;
- построить статические и динамические характеристики объекта с использованием исходной нелинейной модели по каналам: $v_1 \Rightarrow$ выходные переменные; $v_2 \Rightarrow$ выходные переменные; $v_{хл} \Rightarrow$ выходные переменные;
- рассчитать ориентировочные значения коэффициентов передачи по каналам: $v_1 \rightarrow C_B$; $v_1 \rightarrow t$; $v_2 \rightarrow C_B$; $v_2 \rightarrow t$; $v_{хл} \rightarrow C_B$; $v_{хл} \rightarrow t$; сформулировать рекомендации по выбору каналов регулирования.

Содержание отчета

1. Концептуальная модель объекта

Краткая характеристика реактора

В реакторе с рубашкой, снабженном механической мешалкой (рис. 1), проводится бимолекулярная экзотермическая реакция:



Исходный реагент с концентрацией $C_{Авх}$ подается в потоке v_1 . Поток v_2 служит для разбавления реакционной смеси. Смесь из реактора забирается насосом, величина потока может регулироваться клапаном. В рубашку аппарата поступает хладоагент. Благодаря интенсивному перемешиванию структура потоков в реакторе может быть описана моделью идеального смешения. Аппарат работает в политропическом режиме.

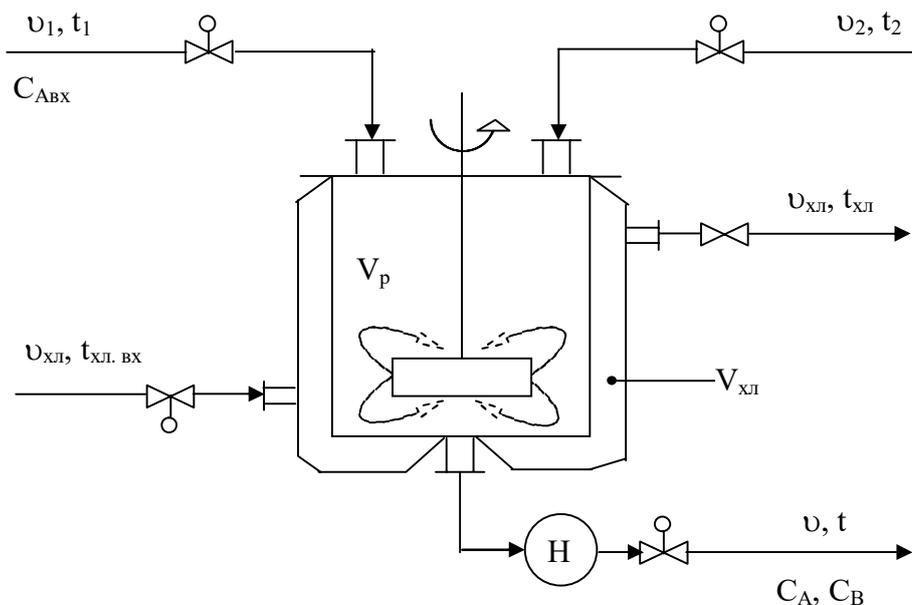


Рис. 1. Принципиальная схема объекта моделирования

Назначение реактора – проведение химической реакции.

Цель функционирования реактора – получение продукта В с заданной концентрацией $C_B^{\text{зад}}$.

Классификация технологических параметров

Переменные состояния объекта:

объем (уровень) реакционной смеси – V_p ; концентрации компонентов в выходном потоке – C_A, C_B ; температура смеси в аппарате – t ; температура хладоагента в рубашке – $t_{\text{хл}}$.

Входные переменные объекта:

расходы потоков на входе и выходе из аппарата – v_1, v_2, v ; концентрация вещества А во входном потоке – $C_{\text{АВХ}}$; температуры входных потоков – $t_1, t_2, t_{\text{хл. вх}}$; расход хладоагента на входе в рубашку – $v_{\text{хл}}$.

Критерий эффективности

При известных значениях расходов v_1, v и концентрации исходного реагента $C_{\text{АВХ}}$ в качестве **критерия эффективности** используется интегральная селективность:

$$R = \frac{vC_B}{v_1 C_{A_{\text{вх}}} - vC_A} \quad (2)$$

Величина R определяет количество образовавшегося продукта C_B на единицу превращенного исходного реагента.

2. Математическая модель объекта

Составление уравнений математической модели реактора включает:

1) стехиометрический анализ реакции и вывод кинетических уравнений;

2) математическое описание динамики и статики аппарата в целом.

Стехиометрический анализ реакции элементарен; ключевым компонентом считаем вещество A . Скорость реакции по компонентам запишется:

$$R_A = \frac{dC_A}{d\tau} = -2KC_A^2; \quad R_B = \frac{dC_B}{d\tau} = KC_A^2 \quad (3)$$

Формулировка упрощающих допущений

1) Структура потоков описывается моделью идеального перемешивания;

2) теплопотери в окружающую среду отсутствуют; теплофизические свойства жидкостей не зависят от температуры и концентрации компонентов;

3) теплоемкостью стенок пренебрегаем;

4) транспортным запаздыванием при изменении входных переменных пренебрегаем;

5) расход хладагента на входе и выходе одинаков; объем хладагента в рубашке постоянен $V_{\text{хл}} = \text{const}$.

В соответствии с классификацией переменных и принятыми допущениями математическая модель динамики объекта включает в

себя: уравнения материальных балансов по общему объему жидкости и по компонентам, уравнения тепловых балансов реакционной смеси и жидкости в охлаждающей рубашке.

$$\begin{aligned}
 \frac{dV_p}{d\tau} &= v_1 + v_2 - v; \\
 \frac{d[C_A V_p]}{d\tau} &= v_1 C_{A_{\text{вх}}} + V_p R_A - v C_A = v_1 C_{A_{\text{вх}}} - V_p 2K C_A^2 - v C_A; \\
 \frac{d[C_B V_p]}{d\tau} &= V_p R_B - v C_B = V_p K C_A^2 - v C_B; \\
 C_p \rho \frac{d[t V_p]}{d\tau} &= \rho C_p v_1 t_1 + \rho C_p v_2 t_2 + V_p |R_A| \Delta H - \rho C_p v t - K_T F_T (t - t_{\text{хл}}); \\
 \rho_{\text{хл}} C_{\text{рхл}} V_{\text{хл}} \frac{dt_{\text{хл}}}{d\tau} &= \rho_{\text{хл}} C_{\text{рхл}} v_{\text{хл}} t_{\text{хлвх}} + K_T F_T (t - t_{\text{хл}}) - \rho_{\text{хл}} C_{\text{рхл}} v_{\text{хл}} t_{\text{хл}}.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Начальные условия:

$$V_p|_{\tau=0} = V_p^0; \quad C_A|_{\tau=0} = C_A^0; \quad C_B|_{\tau=0} = C_B^0; \quad t|_{\tau=0} = t^0; \quad t_{\text{хл}}|_{\tau=0} = t_{\text{хл}}^0.$$

Система (4) – это система обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений. Для решения ее необходимо использовать какой-либо численный метод, например, метод Эйлера, метод Рунге–Кутты и др.

Модель статики записывается тривиально – путем приравнивания производных нулю, а все входные и выходные переменные, присутствующие в правых частях уравнений (4), помечаются индексом «0»:

$$\begin{aligned}
 v_1^0 C_{A_{\text{вх}}}^0 - 2V_p^0 K (C_A^0)^2 - v^0 C_A^0 &= 0; \\
 V_p^0 K (C_A^0)^2 - v^0 C_B^0 &= 0; \\
 v_1^0 + v_2^0 - v^0 &= 0; \\
 v_1^0 t_1^0 + v_2^0 t_2^0 + \frac{V_p^0 2K (C_A^0)^2}{\rho C_p} \cdot \Delta H - v^0 t^0 - \frac{K_T F_T}{\rho C_p} (t^0 - t_{\text{хл}}^0) &= 0; \\
 v_{\text{хл}}^0 t_{\text{хлвх}}^0 + \frac{K_T F_T}{\rho_{\text{хл}} C_{\text{рхл}}} \cdot (t^0 - t_{\text{хл}}^0) - v_{\text{хл}}^0 t_{\text{хл}}^0 &= 0.
 \end{aligned} \tag{5}$$

3. Построение и анализ статических и динамических характеристик объекта

В соответствии с заданием исследовались динамические каналы объекта: $v_1 \rightarrow C_A, C_B, t, t_{xл}$; $v_2 \rightarrow C_A, C_B, t, t_{xл}$; $v_{xл} \rightarrow C_A, C_B, t, t_{xл}$.

Статические характеристики получали методом "стабилизации". Использовалась нелинейная модель – система (4). При моделировании объекта предполагалось, что уровень постоянен, т.е. $V_p = \text{const}$. Программа расчета пускового режима аппарата написана в среде пакета Mathcad с использованием встроенной функции для решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений Rkadapt. Листинг программы представлен ниже. Изменение выходных переменных в процессе вывода аппарата на установившийся режим представлено на рис. 2. Статические характеристики по различным каналам представлены на рис. 2–5.

С использованием статических характеристик были определены ориентировочные значения коэффициентов передачи объекта по каналам: $v_1 \rightarrow C_B, t$; $v_2 \rightarrow C_B, t$; $v_{xл} \rightarrow C_B, t$, представленные в табл. 1.

Динамические свойства объекта исследовались путем расчета реакции объекта на ступенчатое изменение входных переменных. Пример листинга программы в среде Mathcad представлен ниже. Начальные условия интегрирования принимались равными значениям в статике. Кривые разгона по соответствующим каналам представлены на рис. 6–11.

Анализ динамических характеристик показывает, что по исследуемым каналам объект приближенно может быть аппроксимирован апериодическим звеном 1-го порядка. Следует отметить некоторое различие в коэффициентах передачи объекта при положительном и отрицательном по отношению к значению в статике изменении входных переменных (см. табл. 1). Этот факт следует также из нелинейности статических характеристик.

С использованием динамических характеристик были определены коэффициенты передачи и постоянные времени по соответствующим каналам. Результаты представлены в табл. 1.

Листинг программы моделирования вывода аппарата на статический режим

Аппарат работает в политропическом режиме,
реакция - экзотермическая (теплоноситель жидкость)

1. Исходные данные:

$V_p := 500$ объём аппарата, л
 $V_{хл} := 200$ объём рубашки, л
 $C1 := 4.19$ теплоёмкость вещества в аппарате и входных потоках, кдж/кг градК
 $C2 := 4.19$ теплоёмкость хладагента/теплоносителя, кдж/кг градК
 $\rho1 := 1.2$ плотность вещества в аппарате и входных потоках, кг/л
 $\rho2 := 0.978$ плотность хладагента/теплоносителя, кг/л
 $K := 9$ коэффициент теплопередачи, кдж / м мин градК
 $F := 2.3$ поверхность теплообмена, м
 $H := 1000$ тепловой эффект реакции, кдж/моль
 $k0 := 200$ предэкспоненциальный множитель константы скорости, 1/мин
 $E := 25000$ энергия активации, дж/моль
 $R := 8.315$ универсальная газовая постоянная, дж/моль градК
 $C_{авх} := 1.0$ концентрация компонента А на входе, моль/л
 $C_{бвх} := 0$ концентрация компонента В на входе, моль/л
 $C_{свх} := 0$ концентрация компонента С на входе, моль/л
 $C_{двх} := 0$ концентрация компонента D на входе, моль/л
 $v1 := 0.75$ расход на входе в реактор V1, л/мин
 $v2 := 0.25$ расход на входе в реактор V2, л/мин
 $v := 1$ расход на выходе из реактора V, л/мин
 $v_{хл} := 0.5$ расход хладагента, л/мин
 $t1 := 30$ температура на входе в реактор t1, градС
 $t2 := 40$ температура на входе в реактор t2, градС
 $t_{хлвх} := 30$ температура хладагента/теплоносителя на входе, градС

2. Постоянные коэффициенты

$$a := \frac{v1}{V_p} \quad b := \frac{v}{V_p} \quad c := \frac{v2}{V_p} \quad d := \frac{v_{хл}}{V_{хл}}$$

3. Константа скорости

$$k(\text{tem}) := k0 e^{\frac{-E}{R \cdot (273 + \text{tem})}}$$

4. Вектор-функция правых частей дифференциальных уравнений модели

$$F(\tau, y) := \begin{bmatrix} a \cdot C_{авх} - 2 \cdot k(y_2) \cdot (y_0)^2 - b \cdot y_0 \\ k(y_2) \cdot (y_0)^2 - b \cdot y_1 \\ a \cdot t_1 + c \cdot t_2 + \frac{H \cdot |k(y_2) \cdot (y_0)^2|}{C1 \cdot \rho_1} - b \cdot y_2 - \frac{K \cdot F \cdot (y_2 - y_3)}{C1 \cdot V_p \cdot \rho_1} \\ d \cdot t_{хлвх} + \frac{K \cdot F \cdot (y_2 - y_3)}{C2 \cdot \rho_2 \cdot V_{хл}} - d \cdot y_3 \end{bmatrix}$$

5. Начальные условия и условия интегрирования

$$y_0 := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\tau_0 := 0 \quad \tau_1 := 3000 \quad N := 1000$$

6. Решение дифференциальных уравнений модели

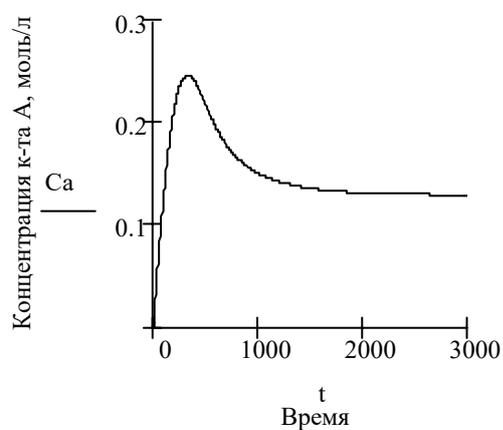
$$S := \text{Rkadapt}(y_0, \tau_0, \tau_1, N, F)$$

7. Результаты расчета

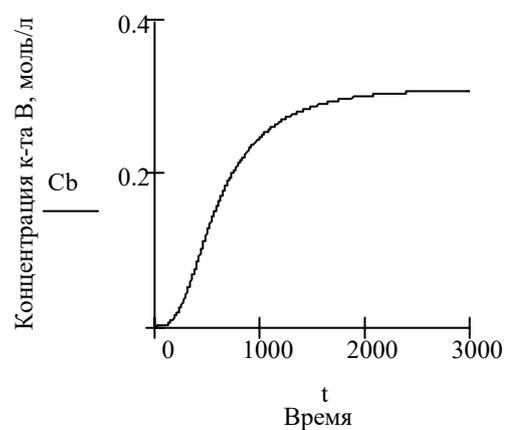
	0	1	2	3	4
985	2.955 · 10 ³	0.13	0.309	76.666	72.449
986	2.958 · 10 ³	0.13	0.309	76.667	72.45
987	2.961 · 10 ³	0.13	0.309	76.668	72.452
988	2.964 · 10 ³	0.13	0.309	76.669	72.453
989	2.967 · 10 ³	0.13	0.309	76.67	72.454
990	2.97 · 10 ³	0.13	0.309	76.671	72.455
991	2.973 · 10 ³	0.13	0.309	76.672	72.456
992	2.976 · 10 ³	0.13	0.309	76.673	72.457
993	2.979 · 10 ³	0.13	0.309	76.674	72.458
994	2.982 · 10 ³	0.13	0.309	76.676	72.459
995	2.985 · 10 ³	0.13	0.309	76.677	72.46
996	2.988 · 10 ³	0.13	0.309	76.678	72.461
997	2.991 · 10 ³	0.13	0.309	76.679	72.462
998	2.994 · 10 ³	0.13	0.309	76.68	72.463
999	2.997 · 10 ³	0.13	0.309	76.681	72.464
1000	3 · 10 ³	0.13	0.309	76.682	72.465

8. Графики

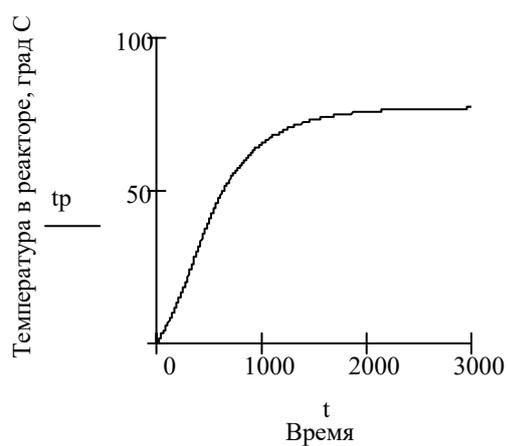
$t := S \langle 0 \rangle$ $Ca := S \langle 1 \rangle$ $Cb := S \langle 2 \rangle$ $tp := S \langle 3 \rangle$ $txл := S \langle 4 \rangle$



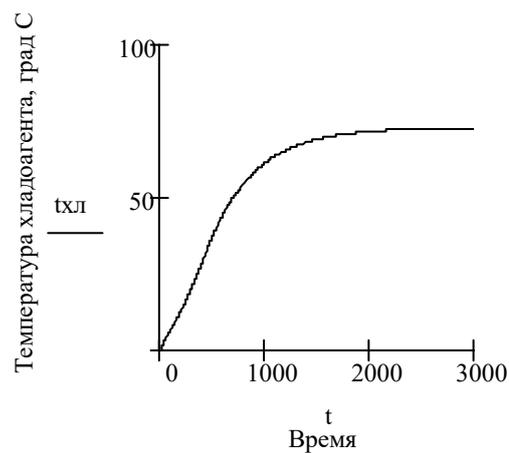
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Процесс вывода аппарата на статический режим:

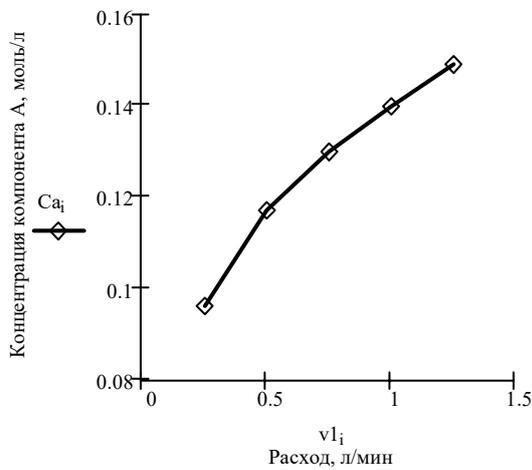
- а – изменение концентрации компонента А;
- б – изменение концентрации компонента В;
- в – изменение температуры в реакторе;
- г – изменение температуры хладоагента в рубашке

Статические характеристики по каналу v_1 -выходные переменные

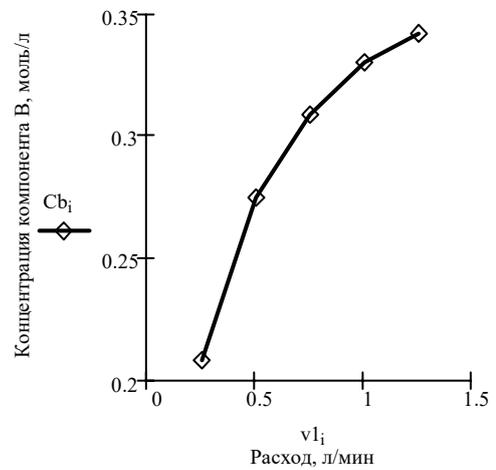
Аппарат работает в политропическом режиме, реакция - экзотермическая
(теплоноситель жидкость)

$i := 1..5$

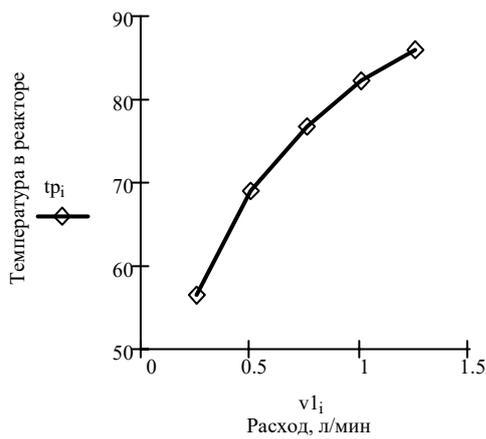
$v_{1i} :=$	$Ca_i :=$	$Cb_i :=$	$tp_i :=$	$tx_{лi} :=$
0.25	0.096	0.208	56.276	53.928
0.5	0.117	0.275	68.875	65.377
0.75	0.13	0.309	76.682	72.465
1.0	0.14	0.33	82.16	77.462
1.25	0.149	0.342	85.868	80.836



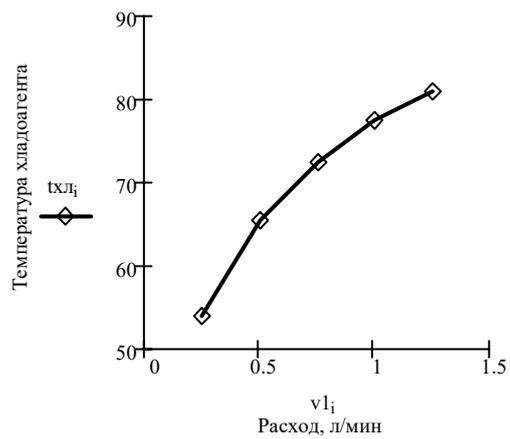
а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Статические характеристики по каналу v_1 – выходные переменные:

а – $v_1 \rightarrow Ca$; б – $v_1 \rightarrow Cb$; в – $v_1 \rightarrow t$; г – $v_1 \rightarrow tx_{л}$

Статические характеристики по каналу v_2 - выходные переменные

Аппарат работает в политропическом режиме, реакция - экзотермическая
(теплоноситель жидкость)

$i := 1..5$

$v_{2i} :=$	$Ca_i :=$	$Cb_i :=$	$tp_i :=$	$tx_{лi} :=$
0.05	0.119	0.408	85.999	80.953
0.15	0.125	0.354	81.081	76.479
0.25	0.13	0.309	76.682	72.465
0.35	0.134	0.274	73.157	69.27
0.45	0.137	0.244	69.934	66.338

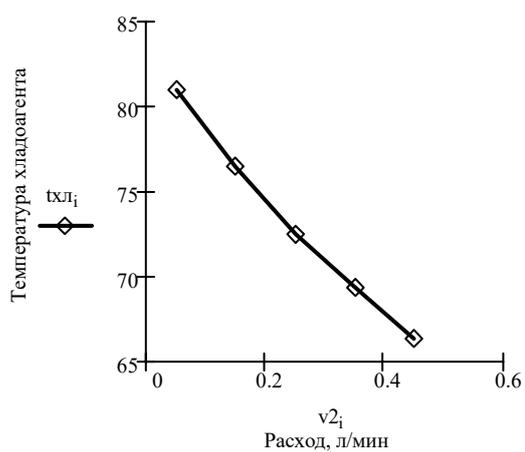
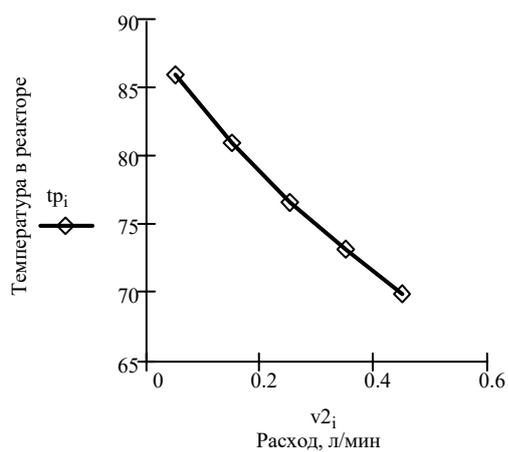
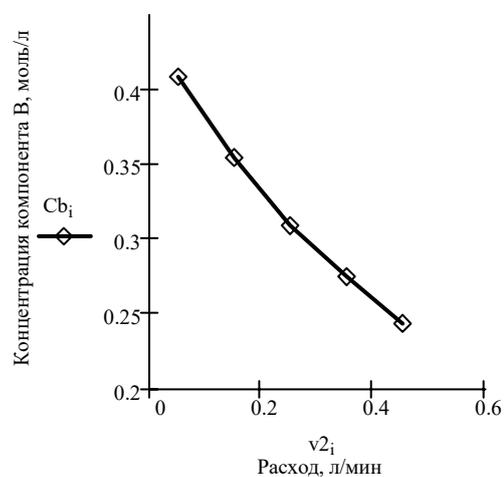
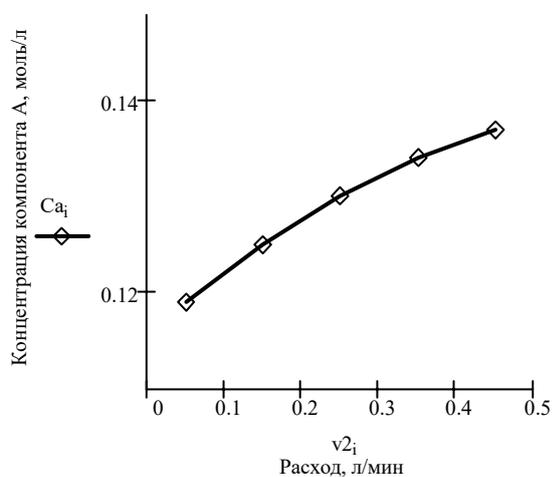


Рис. 4. Статические характеристики по каналу v_2 – выходные переменные:

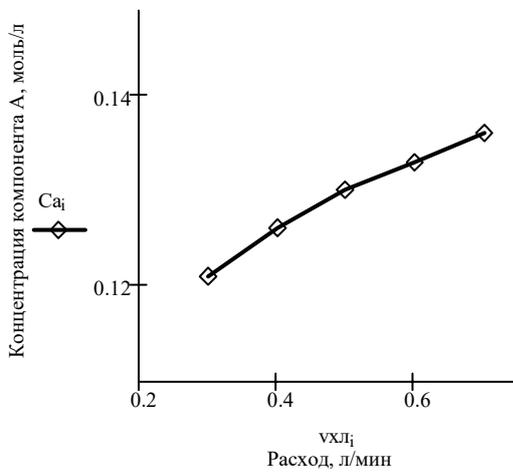
а – $v_2 \rightarrow Ca$; б – $v_2 \rightarrow Cb$; в – $v_2 \rightarrow t$; г – $v_2 \rightarrow tx_{л}$

Статические характеристики по каналу $v_{хл}$ - выходные переменные

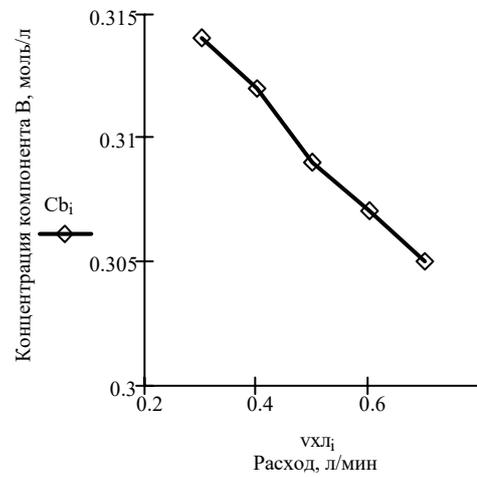
Аппарат работает в политропическом режиме, реакция - экзотермическая
(теплоноситель жидкость)

$i := 1..5$

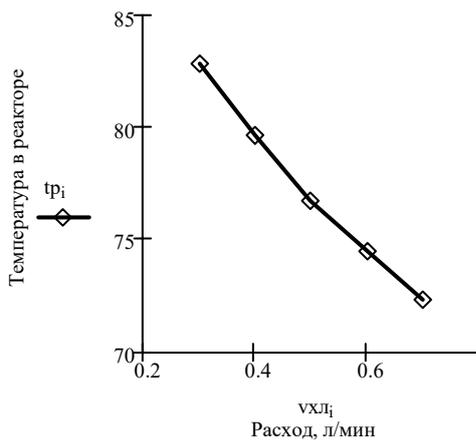
$v_{хл_i} :=$	$Ca_i :=$	$Cb_i :=$	$tp_i :=$	$tx_{л_i} :=$
0.3	0.121	0.314	82.811	79.849
0.4	0.126	0.312	79.604	75.964
0.5	0.13	0.309	76.682	72.465
0.6	0.133	0.307	74.439	69.721
0.7	0.136	0.305	72.334	67.182



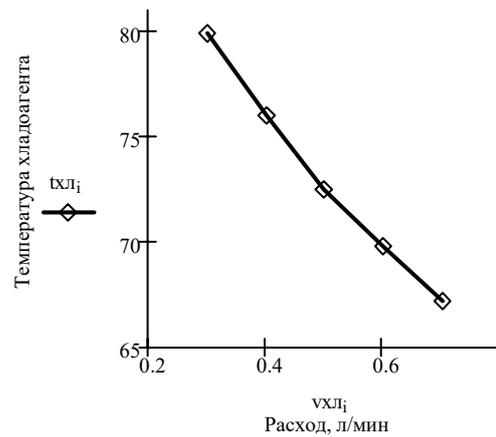
а)



б)



в)



г)

Рис. 5. Статические характеристики по каналу $v_{хл}$ – выходные переменные:

а – $v_{хл} \rightarrow Ca$; б – $v_{хл} \rightarrow Cb$; в – $v_{хл} \rightarrow t$; г – $v_{хл} \rightarrow tx_{л}$

Листинг программы расчета динамических характеристик по каналу v1 - выходные переменные

Аппарат работает в политропическом режиме, реакция - экзотермическая (теплоноситель жидкость)

1. Исходные данные:

Vp := 500	объем аппарата, л
Vхл := 200	объем рубашки, л
C1 := 4.19	теплоёмкость вещества в аппарате и входных потоках, кдж/кг градК
C2 := 4.19	теплоёмкость хладагента/теплоносителя, кдж/кг градК
ρ1 := 1.2	плотность вещества в аппарате и входных потоках, кг/л
ρ2 := 0.978	плотность хладагента/теплоносителя, кг/л
K := 9	коэффициент теплопередачи, кдж/м мин градК
F := 2.3	поверхность теплообмена, м
H := 1000	тепловой эффект реакции, кдж/моль
κ0 := 200	предэкспоненциальный множитель константы скорости, 1/мин
E := 25000	энергия активации, дж/моль
R := 8.315	универсальная газовая постоянная, дж/моль градК
Cавх := 1.0	концентрация компонента А на входе, моль/л
Cбвх := 0	концентрация компонента В на входе, моль/л
Cсвх := 0	концентрация компонента С на входе, моль/л
Cдвх := 0	концентрация компонента D на входе, моль/л
v1 := 1.0	расход на входе в реактор V1, л/мин
v2 := 0.25	расход на входе в реактор V2, л/мин
v := 1.25	расход на выходе из реактора V, л/мин
vхл := 0.5	расход хладагента, л/мин
t1 := 30	температура на входе в реактор t1, градС
t2 := 40	температура на входе в реактор t2, градС
tхлвх := 30	температура хладагента/теплоносителя на входе, градС

2. Постоянные коэффициенты

$$a := \frac{v1}{Vp} \quad b := \frac{v}{Vp} \quad c := \frac{v2}{Vp} \quad d := \frac{vхл}{Vхл}$$

3. Константа скорости

$$k(tem) := \kappa0 \cdot e^{\frac{-E}{R \cdot (273 + tem)}}$$

4. Вектор-функция правых частей дифференциальных уравнений модели

$$F(\tau, y) := \begin{bmatrix} a \cdot C_{авх} - 2 \cdot k(y_2) \cdot (y_0)^2 - b \cdot y_0 \\ k(y_2) \cdot (y_0)^2 - b \cdot y_1 \\ a \cdot t_1 + c \cdot t_2 + \frac{H \cdot |k(y_2) \cdot (y_0)^2|}{C1 \cdot \rho_1} - b \cdot y_2 - \frac{K \cdot F \cdot (y_2 - y_3)}{C1 \cdot Vp \cdot \rho_1} \\ d \cdot t_{хлвх} + \frac{K \cdot F \cdot (y_2 - y_3)}{C2 \cdot \rho_2 \cdot V_{хл}} - d \cdot y_3 \end{bmatrix}$$

5. Начальные условия и условия интегрирования

$$y_0 := \begin{pmatrix} 0.13 \\ 0.309 \\ 76.682 \\ 72.465 \end{pmatrix}$$

$$\tau_0 := 0 \quad \tau_1 := 3000 \quad N := 1000$$

6. Решение дифференциальных уравнений модели

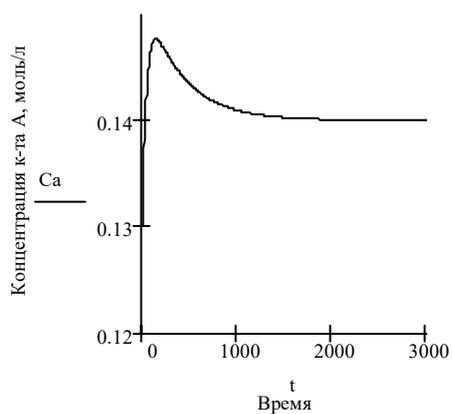
$$S := \text{Rkadapt}(y_0, \tau_0, \tau_1, N, F)$$

7. Результаты расчета

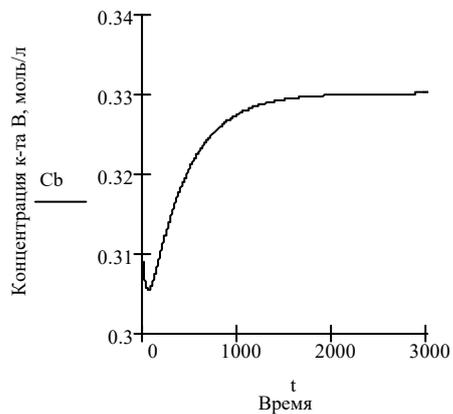
	0	1	2	3	4
985	2.955·10 ³	0.14	0.33	82.159	77.461
986	2.958·10 ³	0.14	0.33	82.159	77.461
987	2.961·10 ³	0.14	0.33	82.159	77.461
988	2.964·10 ³	0.14	0.33	82.159	77.461
989	2.967·10 ³	0.14	0.33	82.159	77.461
990	2.97·10 ³	0.14	0.33	82.159	77.461
991	2.973·10 ³	0.14	0.33	82.16	77.461
992	2.976·10 ³	0.14	0.33	82.16	77.461
993	2.979·10 ³	0.14	0.33	82.16	77.461
994	2.982·10 ³	0.14	0.33	82.16	77.461
995	2.985·10 ³	0.14	0.33	82.16	77.461
996	2.988·10 ³	0.14	0.33	82.16	77.461
997	2.991·10 ³	0.14	0.33	82.16	77.462
998	2.994·10 ³	0.14	0.33	82.16	77.462
999	2.997·10 ³	0.14	0.33	82.16	77.462
1000	3·10 ³	0.14	0.33	82.16	77.462

8. Графики

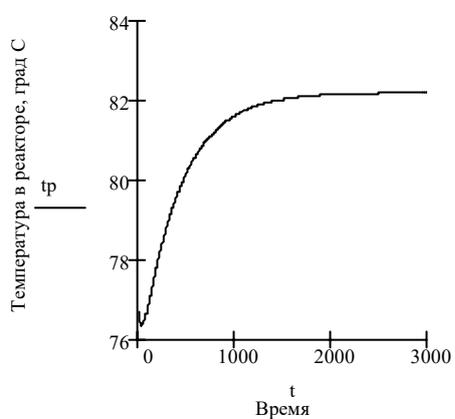
$t := S \langle 0 \rangle$ $Ca := S \langle 1 \rangle$ $Cb := S \langle 2 \rangle$ $tp := S \langle 3 \rangle$ $txл := S \langle 4 \rangle$



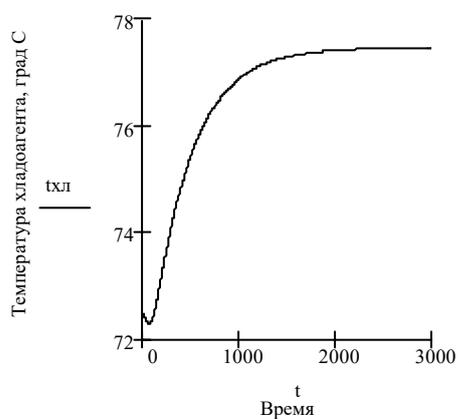
а)



б)



в)

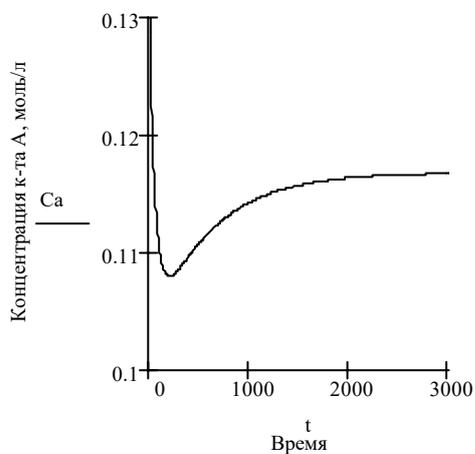


г)

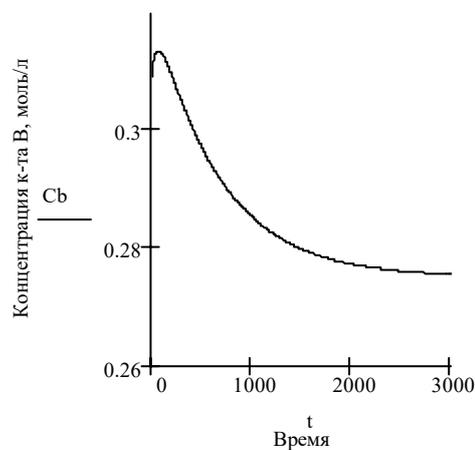
Рис. 6. Динамические характеристики по каналу v1 – выходные переменные ($v1^0=0,75$ л/мин, $\Delta v1=0,25$ л/мин):

- а – изменение концентрации компонента А;
- б – изменение концентрации компонента В;
- в – изменение температуры в реакторе;
- г – изменение температуры хладагента в рубашке

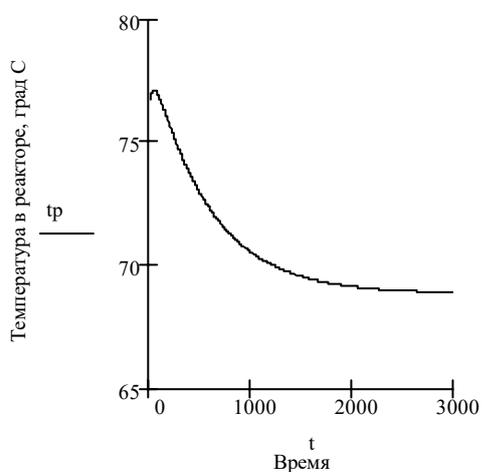
$t := S \langle 0 \rangle$ $Ca := S \langle 1 \rangle$ $Cb := S \langle 2 \rangle$ $tp := S \langle 3 \rangle$ $txл := S \langle 4 \rangle$



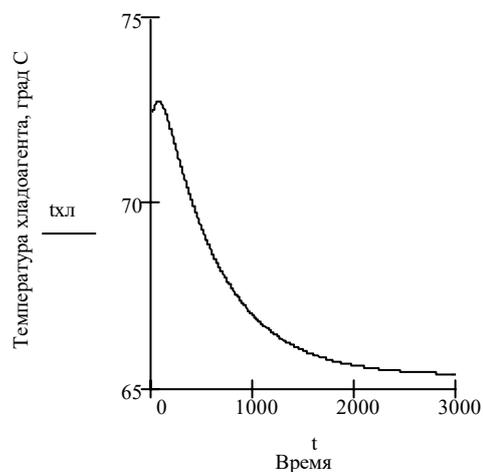
а)



б)



в)

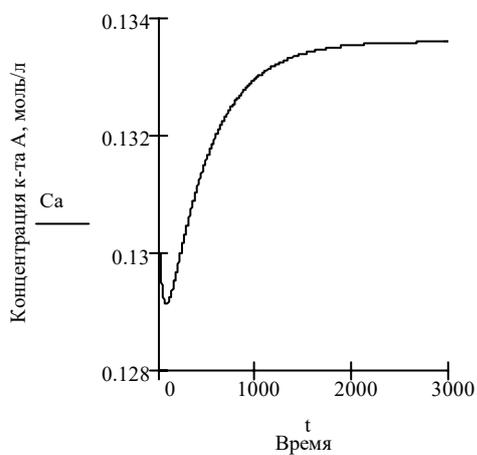


г)

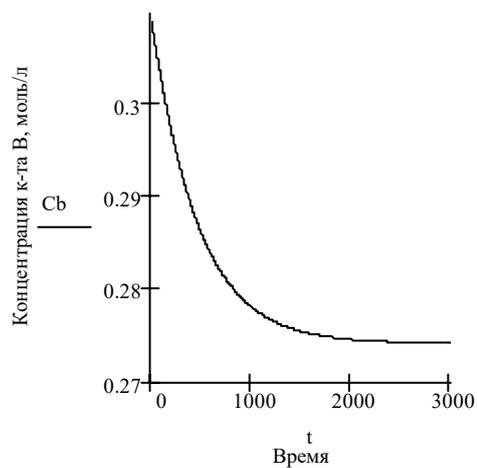
Рис. 7. Динамические характеристики по каналу v1 – выходные переменные ($v1^0 = 0,75$ л/мин, $\Delta v1 = -0,25$ л/мин):

- а – изменение концентрации компонента А;
- б – изменение концентрации компонента В;
- в – изменение температуры в реакторе;
- г – изменение температуры хладагента в рубашке

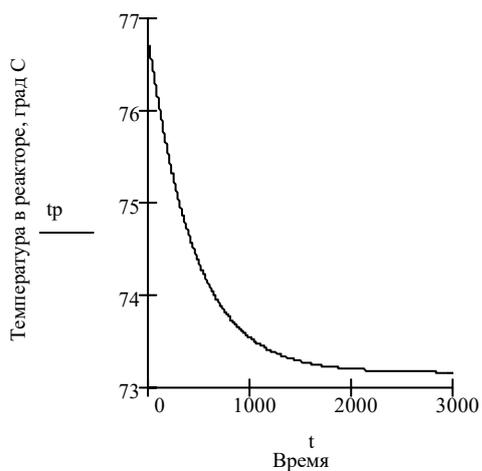
$$t := S \langle 0 \rangle \quad Ca := S \langle 1 \rangle \quad Cb := S \langle 2 \rangle \quad tp := S \langle 3 \rangle \quad txл := S \langle 4 \rangle$$



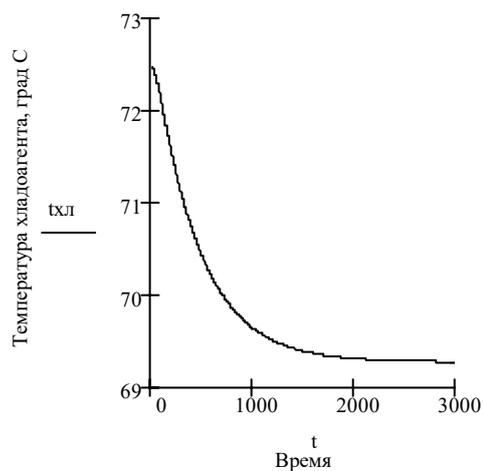
а)



б)



в)



г)

Рис. 8. Динамические характеристики по каналу $v2$ – выходные переменные ($v2^0 = 0,25$ л/мин, $\Delta v2 = +0,1$ л/мин):

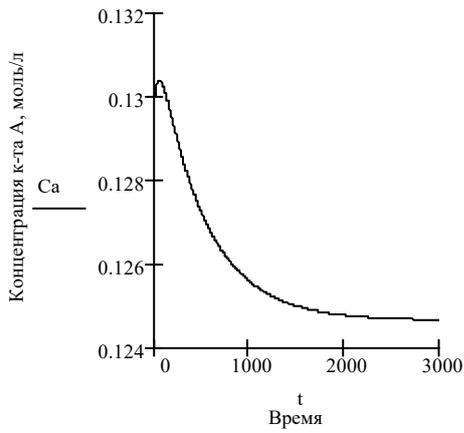
а – изменение концентрации компонента А;

б – изменение концентрации компонента В;

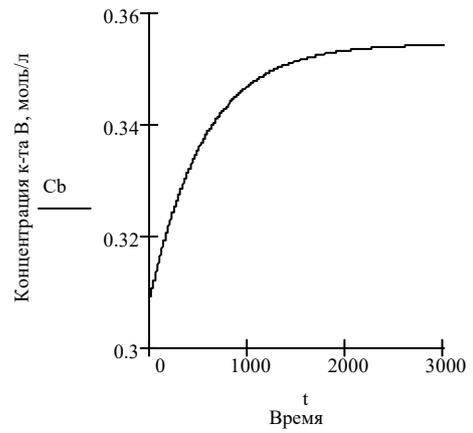
в – изменение температуры в реакторе;

г – изменение температуры хладагента в рубашке

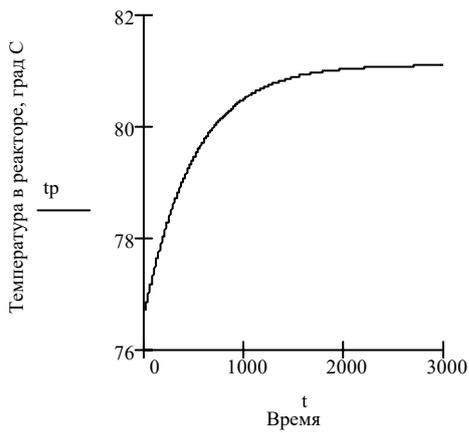
$t := S$ (0) $Ca := S$ (1) $Cb := S$ (2) $tp := S$ (3) $txл := S$ (4)



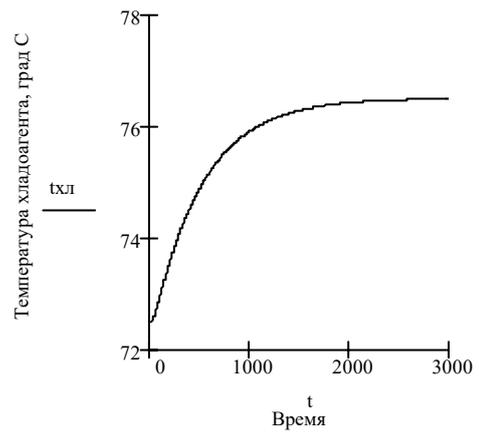
а)



б)



в)

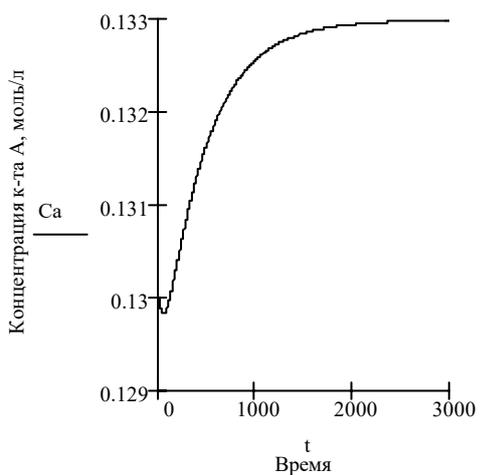


г)

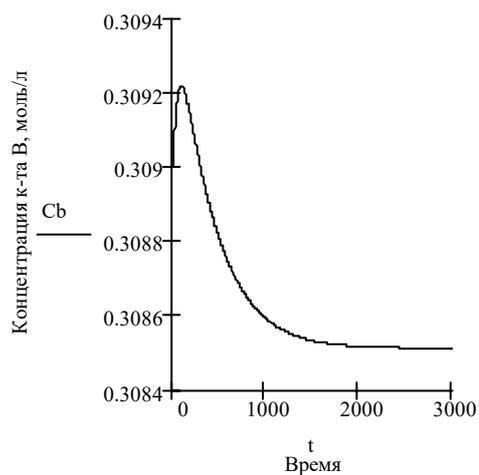
Рис 9. Динамические характеристики по каналу $v2$ – выходные переменные ($v2^0=0,25$ л/мин, $\Delta v2=-0,1$ л/мин):

- а – изменение концентрации компонента А;
- б – изменение концентрации компонента В;
- в – изменение температуры в реакторе;
- г – изменение температуры хладагента в рубашке

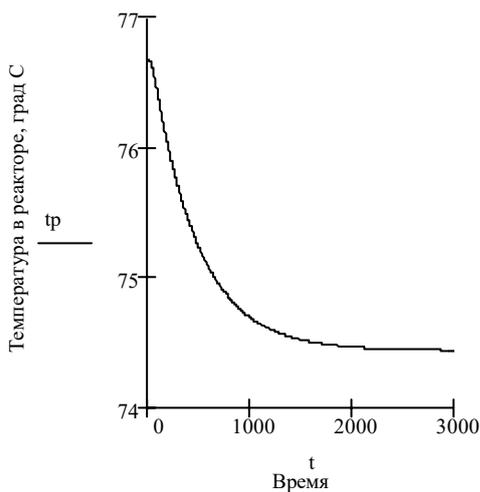
$t := S \langle 0 \rangle$ $C_a := S \langle 1 \rangle$ $C_b := S \langle 2 \rangle$ $tp := S \langle 3 \rangle$ $txл := S \langle 4 \rangle$



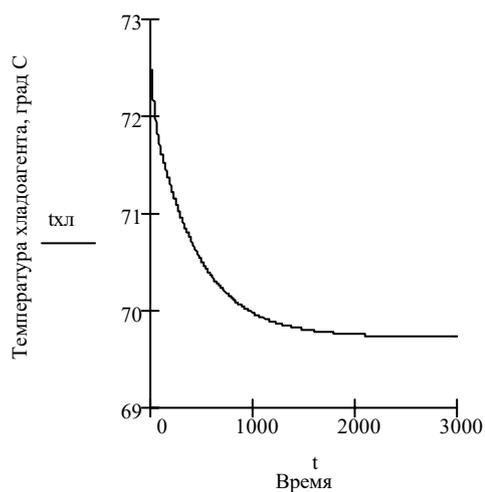
а)



б)



в)



г)

Рис. 10. Динамические характеристики по каналу $v_{хл}$ – выходные переменные ($v_{хл}^0 = 0,5$ л/мин, $\Delta v_{хл} = +0,1$ л/мин):

- а – изменение концентрации компонента А;
- б – изменение концентрации компонента В;
- в – изменение температуры в реакторе;
- г – изменение температуры хладагента в рубашке

$t := S$ ⁽⁰⁾ $Ca := S$ ⁽¹⁾ $Cb := S$ ⁽²⁾ $tp := S$ ⁽³⁾ $txл := S$ ⁽⁴⁾

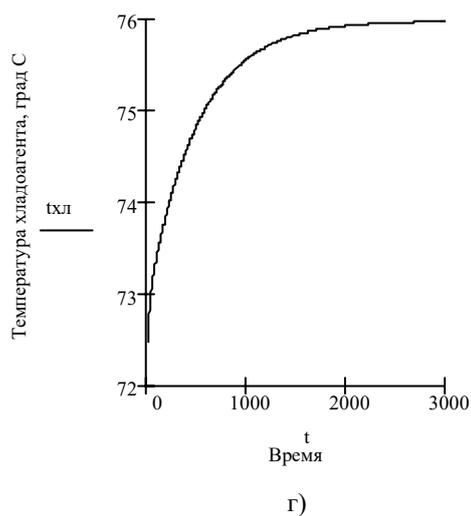
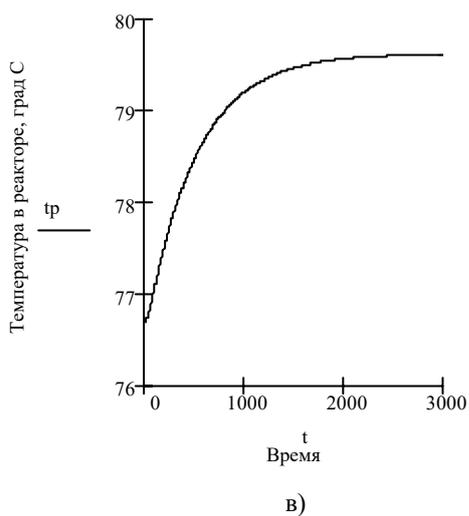
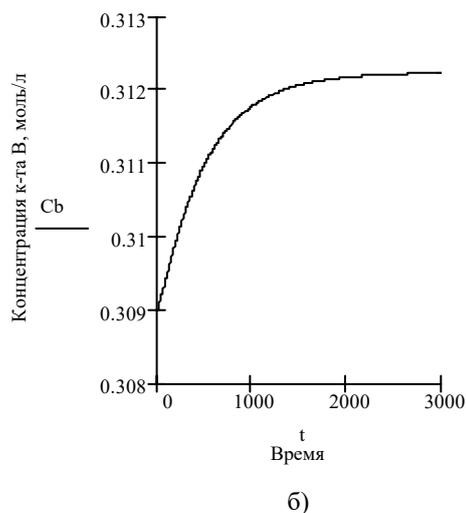
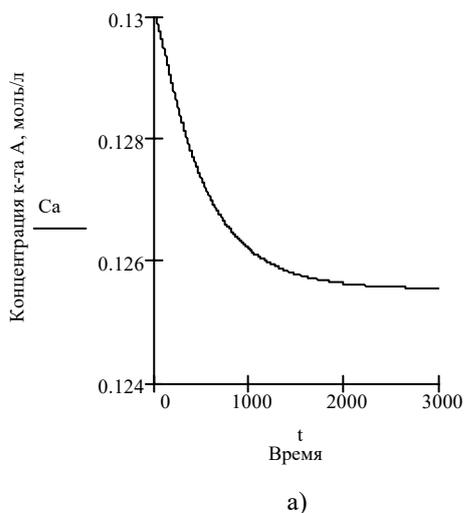


Рис. 11. Динамические характеристики по каналу $v_{хл}$ – выходные переменные ($v_{хл}^0=0,5$ л/мин, $\Delta v_{хл}=-0,1$ л/мин):

- а – изменение концентрации компонента А;
- б – изменение концентрации компонента В;
- в – изменение температуры в реакторе;
- г – изменение температуры хладагента в рубашке

Сводная таблица результатов по исследованию
статических и динамических свойств объекта управления

Канал	Статика		Динамика					Средние результаты	
	$K_{\text{пер}}^{\text{разм}}$	$K_{\text{пер}}^{\text{безр}}$	$K_{\text{разм}}^+$	$K_{\text{разм}}^-$	$K_{\text{разм}}^{\text{ср}}$	$K_{\text{безр}}^{\text{ср}}$	T, мин	$K_{\text{об}}^{\text{разм}}$	$K_{\text{об}}^{\text{безр}}$
$u_1 \rightarrow C_A$	0,046	0,265	0,04	0,052	0,046	0,265	771	0,046	0,265
$u_1 \rightarrow C_B$	0,11	0,267	0,084	0,087	0,086	0,21	812	0,098	0,24
$u_1 \rightarrow t$	26,57	0,26	21,2	30,73	25,96	0,254	770	26,27	0,257
$u_1 \rightarrow t_{\text{хл}}$	24,17	0,25	19,74	28,26	24	0,248	756	24,08	0,249
$u_2 \rightarrow C_A$	0,045	0,086	0,036	0,055	0,046	0,088	692	0,045	0,087
$u_2 \rightarrow C_B$	-0,04	-0,324	-0,348	-0,443	-0,396	-0,32	654	-0,398	-0,322
$u_2 \rightarrow t$	-39,62	-0,129	-35,15	-43,85	-39,5	-0,129	538	-39,56	-0,129
$u_2 \rightarrow t_{\text{хл}}$	-36	-0,124	-31,33	-40,67	-36	-0,124	615	-36	-0,124
$u_{\text{хл}} \rightarrow C_A$	0,035	0,135	0,03	0,044	0,037	0,142	731	0,036	0,138
$u_{\text{хл}} \rightarrow C_B$	-0,025	-0,04	-0,005	-0,031	-0,018	-0,03	615	-0,028	-0,035
$u_{\text{хл}} \rightarrow t$	-25,8	-0,168	-22,1	-29	-25,55	-0,167	615	-25,68	-0,168
$u_{\text{хл}} \rightarrow t_{\text{хл}}$	-31,2	-0,21	-26,96	-35,35	-31,15	-0,215	231	-31,18	-0,21

Вид динамических характеристик показывает, что по исследуемым каналам объект приблизительно может быть аппроксимирован апериодическим звеном 1-го порядка. Следовательно, математическая модель объекта может быть представлена как система передаточных функций по различным каналам:

$$W(p)_{\text{вх} \rightarrow \text{вых}} = \frac{K_{\text{об}}^{\text{разм}}}{T p + 1}$$

$$W_1(p)_{u_1 \rightarrow C_A} = \frac{0,046}{771 p + 1}$$

$$W_7(p)_{u_2 \rightarrow t} = \frac{-39,56}{538 p + 1}$$

$$W_2(p)_{u_1 \rightarrow C_B} = \frac{0,098}{812 p + 1}$$

$$W_8(p)_{u_2 \rightarrow t_{\text{хл}}} = \frac{-36}{615 p + 1}$$

$$W_3(p)_{u_1 \rightarrow t} = \frac{26,27}{770 p + 1}$$

$$W_9(p)_{u_{\text{хл}} \rightarrow C_A} = \frac{0,036}{731 p + 1}$$

$$W_4(p)_{u_1 \rightarrow t_{\text{хл}}} = \frac{24,08}{756 p + 1}$$

$$W_{10}(p)_{u_{\text{хл}} \rightarrow C_B} = \frac{-0,028}{615 p + 1}$$

$$W_5(p)_{u_2 \rightarrow C_A} = \frac{0,045}{692 p + 1}$$

$$W_{11}(p)_{u_{\text{хл}} \rightarrow t} = \frac{-25,68}{615 p + 1}$$

$$W_6(p)_{u_2 \rightarrow C_B} = \frac{-0,398}{654 p + 1}$$

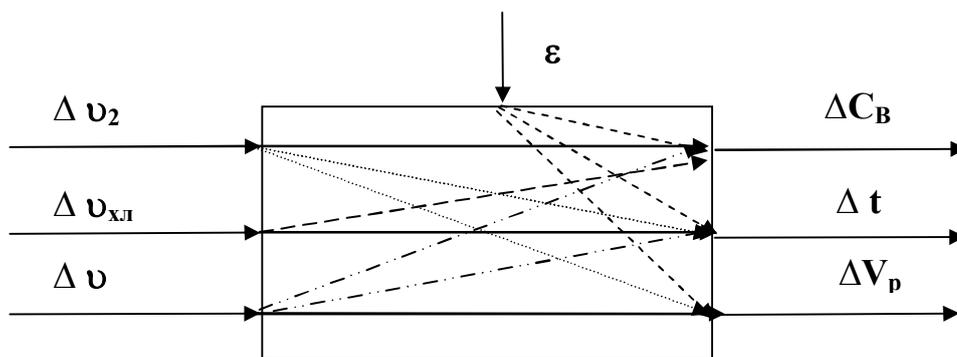
$$W_{12}(p)_{u_{\text{хл}} \rightarrow t_{\text{хл}}} = \frac{-31,18}{231 p + 1}$$

4. Выбор регулирующих воздействий.

Структурная схема объекта

С учетом режима функционирования (политропический) и того факта, что целевым является компонент **B**, можно выделить регулируемые переменные: уровень (объем) в аппарате – V_p , температура смеси – t и концентрация – C_B . В качестве регулирующих воздействий предлагается использовать соответственно: расход смеси на выходе из реактора – v или расход – v_2 , расход хладагента – $v_{хл}$, расход потока – v_1 или расход разбавителя – v_2 . В качестве возмущений могут выступать все оставшиеся входные переменные. Выбор регулирующего воздействия по каналу регулирования концентрации и уровня зависит от способа включения реактора в технологическую схему и требований предыдущей и последующей стадий. Если предшествующая стадия подготовки раствора исходного реагента предполагает постоянство расхода v_1 , то необходимо рассматривать регулирующие каналы: $\Delta v_2 \rightarrow \Delta C_B$, $\Delta v \rightarrow \Delta V_p$. Если последующая стадия предполагает постоянство нагрузки $v = \text{const}$, то необходимо рассматривать динамические каналы: $\Delta v_1 \rightarrow \Delta C_B$, $\Delta v_2 \rightarrow \Delta V_p$. В обоих случаях предполагается наличие требований: $C_B = C_{B \text{ зад}}$, $t = t_{\text{зад}}$. Если реактор должен работать при условии: $v_1 = \text{const}$ и $v = \text{const}$, то регулироваться может только – C_B или t , путем изменения подачи хладагента – $v_{хл}$.

Предположим, что регулирующие каналы $\Delta v_2 \rightarrow \Delta C_B$, $\Delta v \rightarrow \Delta V_p$, тогда структурная схема объекта может быть представлена:



где ε – вектор возмущений, включающий в себя Δv_1 , $\Delta C_{АВХ}$, Δt_1 , Δt_2 , $\Delta t_{хл \text{ вх}}$.

Заключение

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Разработана концептуальная модель объекта. Выделены входные переменные и переменные состояния.
2. Составлено математическое описание объекта, которое представляет собой систему нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений.
3. В среде Mathcad составлена программа для построения статических и динамических характеристик объекта по заданным каналам. Вид полученных характеристик свидетельствует о нелинейности объекта.
4. С использованием статических характеристик были определены ориентировочные значения коэффициентов передачи объекта по заданным каналам. С использованием динамических характеристик была проведена аппроксимация динамических свойств объекта по заданным каналам типовыми звеньями, определены коэффициенты передачи, постоянные времени. Сформулированы рекомендации по выбору каналов регулирования.

Типовые объекты химической технологии

1. Гидравлические объекты:

- напорная емкость;
- емкостной смеситель со свободным истечением жидкости.

2. Теплообменная аппаратура:

- теплообменник типа "труба в трубе";
- емкостной теплообменник смешения;
- емкостной теплообменник с паровой рубашкой;
- емкостной теплообменник с рубашкой и жидким

теплоносителем.

3. Массообменная аппаратура:

- насадочный абсорбер;
- барботажный абсорбер.

4. Химические реакторы:

- реактор с мешалкой изотермический;
- химический реактор емкостного типа, работающий в политропическом режиме;
- трубчатый реактор.

Оглавление

Введение	3
I. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ	7
Тема 1. Разработка концептуальных моделей. Формулировка показателей и критериев эффективности, классификация переменных.....	7
Тема 2. Составление математических моделей, описывающих гидродинамические структуры потоков.....	15
Тема 3. Математическое описание типовых ХТП.....	31
Тема 4. Освоение процедуры аналитической линеаризации путем разложения переменных в ряд Тейлора в окрестности рабочей точки.....	44
Тема 5. Структурно-алгоритмические схемы объектов управления и их анализ.....	52
Тема 6. Построение и анализ статических и динамических характеристик объектов управления.....	56
Тема 7. Топологический синтез системы автоматизации и управления.....	61
Тема 8. Режимно-технологическая оптимизация ХТП	67
II. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ	74
Лабораторная работа №1. Анализ емкостного смесителя как объекта управления и автоматизации	75
Лабораторная работа №2. Анализ емкостного теплообменника с рубашкой как объекта управления и автоматизации	79
Лабораторная работа №3. Анализ емкостного реактора с рубашкой как объекта управления и автоматизации	85
Библиографический список	92
Приложение 1. Оформление отчета по лабораторной работе	93
Приложение 2. Пример оформления титульного листа	94
Приложение 3. Оформление сводной таблицы результатов	95
Приложение 4. Оформление структурной схемы объекта	95
Приложение 5. Пример выполнения лабораторной работы	96
Приложение 6. Типовые объекты химической технологии	119

Учебное издание

Волкова Галина Витальевна
Лабутин Александр Николаевич
Невиницын Владимир Юрьевич

**ПРАКТИКУМ ПО ОСНОВАМ АНАЛИЗА
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
КАК ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ**

Учебное пособие

Редактор О.А. Соловьева

Подписано в печать 22.03.2018. Формат 60×84 1/16. Бумага писчая.

Усл. печ. л. 7,03. Тираж 50 экз. Заказ

ФГОУ ВО "Ивановский государственный
химико-технологический университет"
153000, г. Иваново, Шереметевский пр., 7