

# **МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ**

◆ ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ ◆

УДК 52-12.001.575:303.094.7

**ББК В183.5**

**Ф911**

Р е ц е н з е н т

Доктор физико-математических наук, профессор ТГТУ  
С.М. Дзюба

С о с т а в и т е л и:

С.В. Фролов, А.А. Третьяков, С.Б. Путин, С.А. Скворцов

**Ф911**      **Моделирование систем : метод. указания / сост. : С.В. Фролов, А.А. Третьяков, С.Б. Путин, С.А. Скворцов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 32 с. – 100 экз.**

Содержат требования к выполнению курсовой работы по курсу "Моделирование систем", правила оформления расчетно-пояснительной записки.

Предназначены для студентов 4 курса очной и заочной форм обучения специальности 220301.

УДК 52-12.001.575:303.094.7

**ББК В183.5**

© ГОУ ВПО "Тамбовский государственный  
технический университет" (ТГТУ), 2007

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ГОУ ВПО "Тамбовский государственный технический университет"

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ

Методические указания к выполнению курсовой работы  
для студентов 4 курса очной и заочной форм обучения  
специальности 220301



---

**ТАМБОВ**  
Издательство ТГТУ  
2007

Учебное издание

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ

Методические указания

**С о с т а в и т е л и:**

**ФРОЛОВ Сергей Владимирович,  
ТРЕТЬЯКОВ Александр Александрович,  
ПУТИН Сергей Борисович,  
СКВОРЦОВ Сергей Александрович**

Редактор Т.М. Г л и н к и н а  
Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Р ы ж к о в а

Подписано к печати 07.05.2007  
Формат 60 × 84/16. 1,86 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 337

Издательско-полиграфический центр  
Тамбовского государственного технического университета  
**392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14**

## 1. ВВЕДЕНИЕ

По дисциплине "Моделирование систем" студенты специальности 220300 дневного отделения в 8-м семестре должны выполнить курсовую работу.

Целью курсовой работы является приобретение навыков исследования объектов управления и автоматических систем регулирования (АСР) на основе их математических моделей.

В качестве объектов моделирования в заданиях к курсовой работе выступают типовые процессы и аппараты химической, пищевой и других технологий.

В зависимости от варианта объекты работают как в периодическом, так и в непрерывном режиме.

Исходными данными для курсовой работы являются: конструкция технологического аппарата с заданием материальных и тепловых потоков, виды возмущающих и управляющих воздействий, теплофизические константы, характеристики датчиков, тип регулятора.

Требуется получить и проанализировать статические, динамические характеристики системы (объект и АСР), переходные процессы в системе. Выходной переменной процесса, которая должна быть стабилизирована, является температура в технологическом аппарате.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

Результаты проведенных в курсовой работе исследований отражаются в расчетно-пояснительной записке, оформленной в соответствии со стандартом предприятия [1].

Представлять графический материал в записке следует компактно, текст должен быть логичным, а выводы обоснованными. Ниже перечислены и кратко прокомментированы разделы расчетно-пояснительной записки.

**Задание.** Здесь приводятся краткое описание системы – аппарата и АСР, исходные данные, необходимые константы, постановка задачи исследования. Под системой понимается технологический аппарат и система управления этим аппаратом (АСР).

**Анализ технологического аппарата как объекта управления.** Здесь переменные состояния, характеризующие технологический процесс, делятся на входные и выходные, выбираются основные возмущающие и регулирующие воздействия.

**Математическое описание статики и динамики системы.** Выводятся в соответствии с обоснованно принятой системой допущений уравнения математического описания, отражающие связь входных и выходных переменных в статических и динамических режимах работы объекта. Для системы с аппаратом периодического действия записывается только математическая модель динамики.

**Исследование статики системы (для аппаратов непрерывного действия).** Выбирается метод и разрабатывается алгоритм решения уравнений математического описания статики. Составляется программа для решения системы уравнений на компьютере и приводятся полученные с ее помощью статические характеристики. Дается анализ этих характеристик. Здесь исследуется влияние входных переменных на выходные (оценивается чувствительность по каналам).

При расчете статической характеристики соответствующую входную переменную следует варьировать в диапазоне  $\pm (15...20)$  % относительно значения в заданном номинальном статическом режиме при постоянных значениях остальных входных переменных для номинального режима. Шаг варьирования входной переменной необходимо выбирать так, чтобы построение статической характеристики велось не менее чем по шести точкам.

**Исследование динамики системы.** Выбирается метод и разрабатывается алгоритм решения уравнений математического описания динамики системы. Составляется программа для расчетов на компьютере и приводятся полученные с ее помощью переходные характеристики для заданных входных воздействий. Проводится анализ характеристик.

Для получения переходной характеристика системы по какому-либо каналу передачи воздействия при ступенчатом изменении соответствующей входной переменной, последнюю необходимо увеличить на 5 % относительно ее значения в номинальном режиме.

**Исследование переходных процессов в системе.** Математическое описание системы в общем случае включает описание объекта регулирования, датчика регулируемой величины, регулятора со всеми атрибутами промышленного регулятора, исполнительного механизма и регулирующего органа. На основе математического описания составляются алгоритм и компьютерная программа для имитационных исследований системы. Приводятся полученные с помощью программы, требуемые переходные характеристики для различных параметров настройки используемого в системе регулятора. Проводится анализ переходных характеристик.

Заметим, что в реальных условиях эксплуатации АСР должна иметь наилучшие, в некотором смысле, динамические показатели. Это обеспечивается оптимальными настройками регуляторов, расчет которых осуществляется по известным методикам, например [2, 3].

**Заключение.** В нем излагаются основные выводы и результаты работы.

**Список использованных литературных источников.**

**Приложение.** Приводятся тексты и краткое описание разработанных программ.

## 3. ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Ниже представлены аппараты периодического и непрерывного действия. Аппарат является объектом исследования конкретного варианта курсовой работы. В аппаратах, представленных в курсовой работе, мешалки обеспечивают гидродинамический режим идеального смешения. Трубчатый реактор характеризуется гидродинамическим режимом идеального вытеснения.

### 3.1. Химический реактор с мешалкой и змеевиком

Реактор (рис. 1) представляет собой сферическую усеченную емкость диаметром  $D$ , м и высотой  $H$ , м, снабженную мешалкой. На входном и выходном трубопроводах реактора установлены клапаны с пропускной способностью  $K_{v1}$  и  $K_{v2}$  соответственно. Вследствие перепада давлений на входе  $P^{BX}$  и на дне емкости  $P$  в реактор поступает жидкая смесь веществ А и В температурой  $t^{BX}$ , концентраций  $C_A^{BX}$  и  $C_B^{BX}$  соответственно. Выходит жидкость из реактора вследствие перепада давлений на дне  $P$  и на выходе  $P^{BXX}$  ( $P^{BX} = 230\ 000$  Па,  $P^{BXX} = 101\ 325$  Па). Давление  $P$  складывается из атмосферного  $P_a$  ( $P_a = 101\ 325$  Па) и давления столба жидкости высотой  $h$ . В реакторе протекает химическая реакция по схеме  $A + B \xrightarrow{r} C$  со скоростью реакции  $r = K \exp(-E / (RT)) C_A C_B$ , моль/(м<sup>3</sup>·с). Здесь множитель  $K = 30$  м<sup>3</sup>/(моль·с), энергия активации  $E = 25\ 000$  Дж/моль, универсальная газовая постоянная  $R = 8,31$  Дж/(моль·К) и температура смеси в реакторе  $T$ , К. Тепловой эффект эндотермической химической реакции  $-\Delta H$ , Дж/моль. Для поддержания необходимых условий протекания реакции

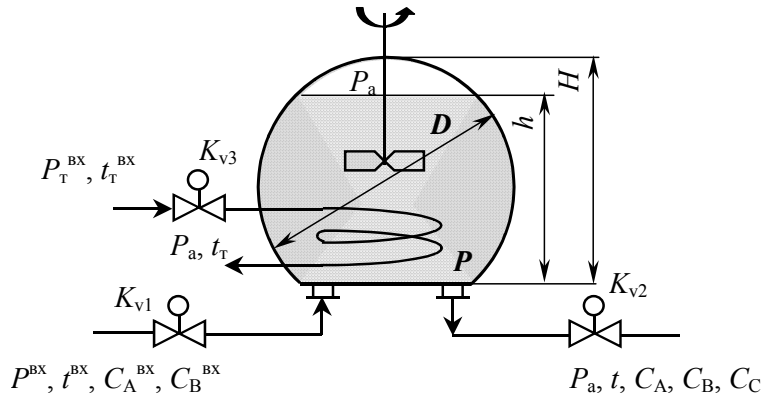


Рис. 1. Химический реактор с мешалкой и змеевиком

в змеевик, который характеризуется поверхностью теплообмена  $S$  и внутренним диаметром трубы  $d$ , подают теплоноситель температурой  $t_r^{BX} = 90$  °С. Коэффициент теплопередачи от теплоносителя к реакционной массе  $K_T = 1000$  Дж/(м<sup>2</sup>·с·К). На входе в змеевик установлен клапан с пропускной способностью  $K_{v3}$ . Давление теплоносителя перед клапаном равно  $P_T = 230\ 000$  Па. Давление теплоносителя в змеевике равно  $P_a = 101\ 325$  Па. Теплоемкости и плотности реакционной массы и теплоносителя считаются постоянными и равны соответственно  $c_p$ , Дж/(кг·К),  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>;  $c_{pT} = 4100$  Дж/(кг·К),  $\rho_T = 1000$  кг/м<sup>3</sup>.

Номинальный статический режим соответствует таким расходам реакционной массы и теплоносителя, при которых в реакторе поддерживается температура реакционной массы равная 50 °С.

### 3.2. Химический реактор периодического действия с мешалкой и рубашкой

В снабженный мешалкой химический реактор (рис. 2) с постоянным объемом реакционной смеси, внутренним диаметром  $d$ , внешним диаметром  $D$  и высотой  $H$ , м, загружается жидкая смесь веществ А и В температурой  $t^{BX}$ , концентраций  $C_A^{BX}$  и  $C_B^{BX}$  соответственно. В реакторе протекает химическая реакция по схеме  $A + B \xrightarrow{r} C$  со скоростью реакции  $r = K \exp(-E / (RT)) C_A C_B$ , моль/(м<sup>3</sup>·с). Здесь множитель  $K = 30$  м<sup>3</sup>/(моль·с), энергия активации  $E = 43000$  Дж/моль, универсальная газовая постоянная  $R = 8,31$  Дж/(моль·К) и температура смеси в реакторе  $T$ , К. Тепловой эффект экзотермической химической реакции  $\Delta H$ , Дж/моль. Для поддержания необходимых условий протекания реакции в рубашку для нагрева подается теплоноситель температурой  $t_{T1}^{BX} = 90$  °С, для охлаждения  $t_{T2}^{BX} = 15$  °С. Коэффициент теплопередачи от теплоносителя к реакционной

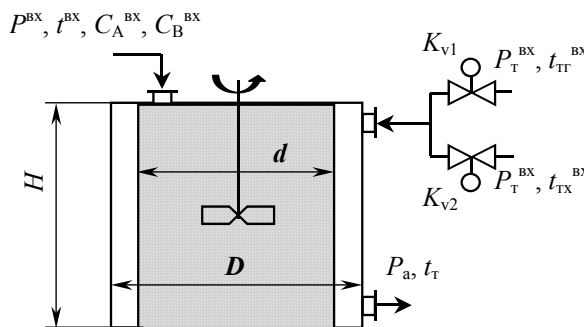


Рис. 2. Химический реактор периодического действия с мешалкой и рубашкой

массе  $K_T = 1000$  Дж/(м<sup>2</sup>·с·К). На входе в рубашку установлены клапаны для подачи горячего и холодного теплоносителя с пропускной способностью  $K_{v1}$  и  $K_{v2}$  соответственно. Давление теплоносителя перед клапаном равно  $P_T = 230\ 000$  Па. Давление теплоносителя в рубашке равно  $P_a = 101\ 325$  Па. Теплоемкости и плотности реакционной массы и теплоносителя считаются постоянными и равны соответственно  $c_p$ , Дж/(кг·К),  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>;  $c_{pT} = 4100$  Дж/(кг·К),  $\rho_T = 1000$  кг/м<sup>3</sup>.

### 3.3. Химический реактор трубчатого типа с рубашкой

Реактор (рис. 3) представляет собой цилиндрическую емкость с внутренним диаметром  $d$ , внешним диаметром  $D$  и высотой  $H$ , м. В реактор поступает жидкая смесь веществ А и В температурой  $t^{\text{BX}}$ , концентраций  $C_A^{\text{BX}}$  и  $C_B^{\text{BX}}$  соответственно ( $P^{\text{BX}} = 230\,000$  Па,  $P_a = 101\,325$  Па). На входе в реактор установлен клапан с пропускной способностью  $K_{v1}$ . Давление смеси перед клапаном равно  $P^{\text{BX}} = 230\,000$  Па. Давление смеси в реакторе равно  $P_a = 101\,325$  Па. В реакторе протекает химическая реакция по схеме  $A + B \xrightarrow{r} C$  со скоростью реакции  $r = K \exp(-E / (RT)) C_A C_B$ , моль/(м<sup>3</sup>·с). Здесь множитель  $K = 30$  м<sup>3</sup>/(моль·с), энергия активации  $E = 30\,000$  Дж/моль, универсальная газовая постоянная  $R = 8,31$  Дж/(моль·К) и температура смеси в реакторе  $T$ , К. Тепловой эффект эндотермической химической реакции  $-\Delta H$ , Дж/моль. Для поддержания необходимых условий протекания реакции в рубашку для нагрева реакционной массы подается теплоноситель температурой  $t^{\text{BX}} = 90$  °С. На входе теплоносителя в реактор установлен клапан с пропускной способностью  $K_{v2}$ . Давление теплоносителя перед клапаном

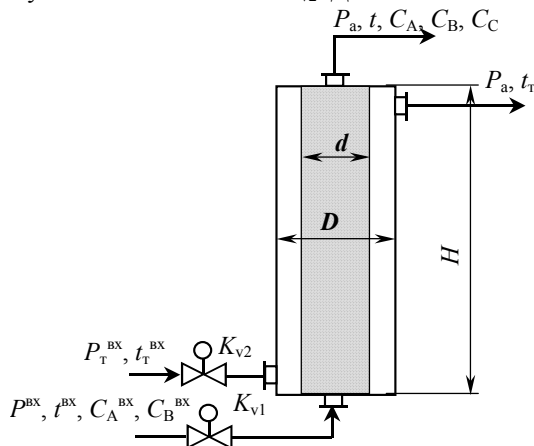


Рис. 3. Химический реактор трубчатого типа с рубашкой

равно  $P^{\text{BX}} = 230\,000$  Па. Давление теплоносителя после клапана равно  $P_a$  ( $P_a = 101\,325$  Па). Коэффициент теплопередачи от теплоносителя к реакционной массе  $K_T = 1000$  Дж/(м<sup>2</sup>·с·К). Теплоемкости и плотности реакционной массы и теплоносителя считаются постоянными и равны соответственно  $c_p$ , Дж/(кг·К),  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>;  $c_{pT} = 4100$  Дж/(кг·К),  $\rho_T = 1000$  кг/м<sup>3</sup>. Номинальный статический режим соответствует таким расходам реакционной массы и теплоносителя, при которых на выходе из реакторе поддерживается температура реакционной массы равная 55 °С.

### 3.4. Горизонтальный химический реактор с мешалкой и змеевиком

Реактор (рис. 4) представляет собой горизонтальную цилиндрическую емкость диаметром  $D$ , м и длиной  $H$ , м, снабженную мешалками. На входном и выходном трубопроводах реактора установлены клапаны с пропускной способностью  $K_{v1}$  и  $K_{v2}$  соответственно. Вследствие перепада давлений на входе  $P^{\text{BX}}$  и на дне емкости  $P$  в реактор поступает жидкая смесь веществ А и В температурой  $t^{\text{BX}}$ , концентраций  $C_A^{\text{BX}}$  и  $C_B^{\text{BX}}$  соответственно. Выходит жидкость из реактора вследствие перепада давлений на дне  $P$  и на выходе  $P^{\text{ВЫХ}}$  ( $P^{\text{BX}} = 230\,000$  Па,  $P^{\text{ВЫХ}} = 101\,325$  Па). Давление  $P$  складывается из атмосферного  $P_a$  ( $P_a = 101\,325$  Па) и давления столба жидкости высотой  $h$ . В реакторе протекает химическая реакция по схеме  $A + B \xrightarrow{r} C$  со скоростью реакции  $r = K \exp(-E / (RT)) C_A C_B$ , моль/(м<sup>3</sup>·с). Здесь множитель  $K = 30$  м<sup>3</sup>/(моль·с), энергия активации  $E = 25000$  Дж/моль, универсальная газовая постоянная  $R = 8,31$  Дж/(моль·К) и температура смеси в реакторе  $T$ , К. Тепловой эффект эндотермической химической реакции  $-\Delta H$ , Дж/моль. Для поддержания необходимых условий протекания реакции в змеевик, который характеризуется поверхностью теплообмена  $S$  и внутренним

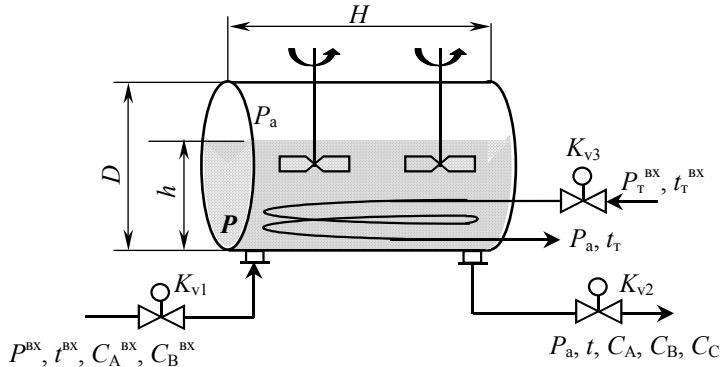


Рис. 4. Горизонтальный химический реактор с мешалкой и змеевиком

диаметром трубы  $d$ , подает теплоноситель температурой  $t^{\text{BX}} = 90$  °С. Коэффициент теплопередачи от теплоносителя к реакционной массе  $K_T = 1000$  Дж/(м<sup>2</sup>·с·К). На входе в змеевик установлен клапан с пропускной способностью  $K_{v3}$ . Давление теплоносителя перед клапаном равно  $P_T = 230\,000$  Па. Давление теплоносителя в змеевике равно  $P_a = 101\,325$  Па. Теплоемкости и плотности реакционной массы и теплоносителя считаются постоянными и равны соответственно  $c_p$ , Дж/(кг·К),  $\rho$ ,

$\text{кг/м}^3$ ;  $c_{\text{рт}} = 4100 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ,  $\rho_{\text{т}} = 1000 \text{ кг/м}^3$ . Номинальный статический режим соответствует таким расходам реакционной массы и теплоносителя, при которых в реакторе поддерживается температура реакционной массы равная  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### 4. ЗАДАНИЕ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ

Варианты задания представлены в прил. (табл. 1 – 3). В колонке 1 таблиц указан номер варианта, в колонке 2 – тип аппарата. В колонках 3 – 7 приведены варианты конструктивных параметров аппаратов, параметры исходной смеси, параметры системы регулирования, временные интервалы для задания регулятору представлены на рис. 5, 6. Необходимые исходные данные для заданного варианта выбираются из прил. (табл. 1 – 11). Типовой ряд для пропускной способности клапана представлен в прил. (табл. 12).

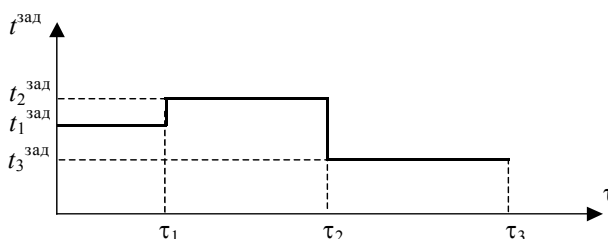


Рис. 5. Программа изменения температуры реакционной массы для аппаратов непрерывного действия

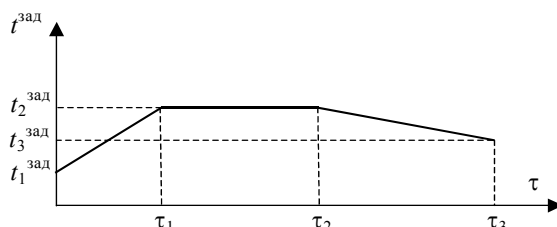


Рис. 6. Программа изменения температуры реакционной массы для аппарата периодического действия

Задание на курсовую работу, например, для варианта 1 группы 1 следует понимать следующим образом.

На вход объекта 1 – химического реактора с мешалкой и змеевиком, приведенного на рис. 1, размерами:  $D = 0,8 \text{ м}$ ,  $d = 0,02 \text{ м}$ ,  $H = 0,6 \text{ м}$ ,  $S = 4 \text{ м}^2$ , поступают исходные вещества с концентрациями  $C_{\text{А}}^{\text{вх}} = 100 \text{ моль/м}^3$  и  $C_{\text{В}}^{\text{вх}} = 30 \text{ моль/м}^3$  и температурой  $t^{\text{вх}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ . В реакторе происходит химическая реакция с тепловым эффектом  $\Delta H = -440\,000 \text{ Дж/моль}$ . Теплофизические параметры реакционной массы  $c_p = 2000 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ,  $\rho = 1500 \text{ кг/м}^3$ . Необходимо получить и проанализировать: а) статические характеристики вида  $t(\mathbf{x})$ , где  $t$  – температура реакционной массы,  $^\circ\text{C}$ ;  $\mathbf{x}$  – вектор входных параметров; б) динамические характеристики  $t(\tau)$ ; в) переходные процессы в АСР.

#### 5. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

##### 5.1. Задание

Дан химический реактор с мешалкой и змеевиком (рис. 7), который представляет собой цилиндрическую емкость диаметром  $D = 2,2 \text{ м}$  и высотой  $H = 3,055 \text{ м}$ , снабженную мешалкой.

На входном и выходном трубопроводах реактора установлены клапаны с пропускной способностью  $K_{v1}$  и  $K_{v2}$  соответственно.

Вследствие перепада давлений на входе  $P^{\text{вх}}$  и на дне емкости  $P$  в реактор поступает жидкая смесь веществ А и В температурой  $t^{\text{вх}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ , концентраций  $C_{\text{А}}^{\text{вх}} = 60 \text{ моль/м}^3$  и  $C_{\text{В}}^{\text{вх}} = 60 \text{ моль/м}^3$  соответственно. Выходит реакционная масса из реактора вследствие перепада давлений на дне  $P$  и на выходе  $P^{\text{вых}}$  ( $P^{\text{вх}} = 230\,000 \text{ Па}$ ,  $P^{\text{вых}} = 101\,325 \text{ Па}$ ). Давление  $P$  складывается из атмосферного  $P_{\text{а}}$  ( $P_{\text{а}} = 101\,325 \text{ Па}$ ) и давления столба реакционной массы высотой  $h$ .



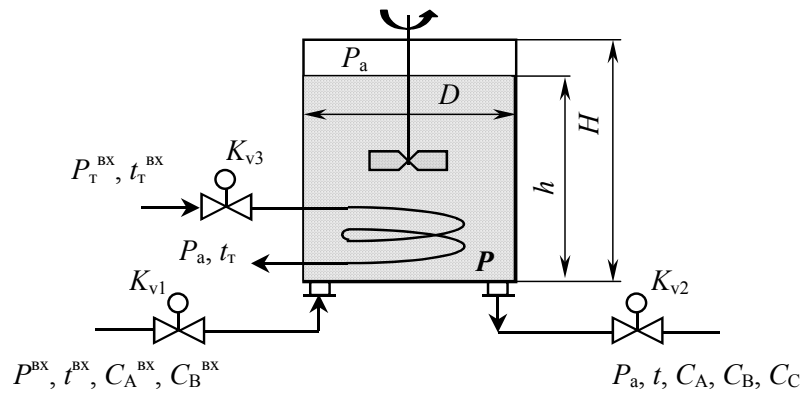
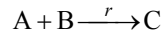


Рис. 7. Химический реактор с мешалкой и змеевиком

В реакторе протекает химическая реакция по схеме:



со скоростью реакции:  $r = K \exp(-E / (RT)) C_A C_B$ , моль/(м<sup>3</sup>·с).

Здесь множитель  $K = 30 \text{ м}^3/(\text{моль} \cdot \text{с})$ ; энергия активации  $E = 30\,000 \text{ Дж/моль}$ ; универсальная газовая постоянная  $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$  и температура реакционной массы в реакторе  $T$ , К.

Тепловой эффект эндотермической химической реакции  $\Delta H = -557\,500 \text{ Дж/моль}$ .

Для поддержания необходимых условий протекания реакции в змеевик, который характеризуется поверхностью теплообмена  $S = 11,1 \text{ м}^2$  и внутренним диаметром трубы  $d = 0,08 \text{ м}$ , подают теплоноситель температурой  $t_T^{BX} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплопередачи от теплоносителя к реакционной массе  $K_T = 1000 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К})$ .

На входе в змеевик установлен клапан с пропускной способностью  $K_{V3}$ . Давление теплоносителя перед клапаном равно  $P_T^{BX} = 230\,000 \text{ Па}$ . Давление теплоносителя в змеевике равно  $P_a = 101\,325 \text{ Па}$ . Теплоемкости и плотности реакционной массы и теплоносителя считаются постоянными и равны соответственно  $c_p = 2800 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$ ;  $c_T = 4100 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ,  $\rho_T = 1000 \text{ кг/м}^3$ .

Номинальный статический режим соответствует таким расходам реакционной массы и теплоносителя, при которых в реакторе поддерживается температура равная  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Требуется для объекта – химического реактора с мешалкой и змеевиком получить и проанализировать: а) статические характеристики вида  $t(\mathbf{x})$ , где  $t$  – температура реакционной массы,  $^\circ\text{C}$ ;  $\mathbf{x}$  – вектор входных параметров; б) динамические характеристики  $t(\tau)$ .

Для АСР выходной переменной  $t$  получить и проанализировать протекающие в ней переходные процессы, если температуру реакционной массы необходимо изменять по программе представленной на рис. 8.

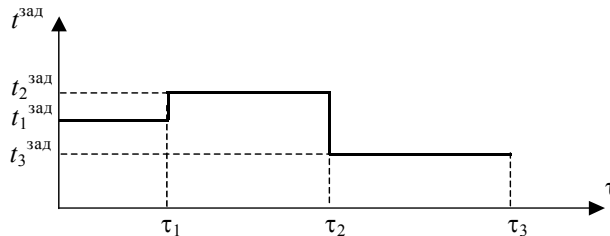


Рис. 8. Программа изменения температуры реакционной массы

Параметры системы регулирования: тип регулятора – ПИ; зона нечувствительности  $\Delta = 0 \%$ ; инерционность датчика  $T_d = 20 \text{ с}$ ; диапазон измерения  $-50 \dots 260 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Временные интервалы:  $\tau_1 = 20\,000 \text{ с}$ ,  $\tau_2 = 40\,000 \text{ с}$ ,  $\tau_3 = 70\,000 \text{ с}$ .

Значения температур  $t_1^{\text{зад}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_2^{\text{зад}} = 55 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_3^{\text{зад}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## 5.2. Анализ технологического аппарата как объекта управления

Рассмотрим химический реактор с мешалкой и змеевиком как объект управления. Входными переменными объекта следует считать те переменные, значения которых можно непосредственно изменять на объекте. Они могут быть выбраны в качестве управляющих (регулирующих) воздействий. К входным относятся и такие переменные, значения которых определяются внешними по отношению к объекту условиями. Такие входные переменные есть возмущающие воздействия.

В первую группу входных переменных необходимо включить степени открытия клапанов  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  и  $\mu_3$  (каждая из них может быть регулирующим воздействием в АСР температуры реакционной массы в емкости), а во вторую –  $P^{BX}$ ,  $P_T^{BX}$ ,  $P_a$ ,  $C_A^{BX}$  и  $C_B^{BX}$ ,  $t^{BX}$ ,  $t_T^{BX}$ .

Выходные переменные объекта – это те, значения которых меняются вследствие изменения входных переменных. В нашем случае таковыми являются температуры  $t$ ,  $t_T$ , концентрации реагентов  $C_A$ ,  $C_B$ ,  $C_C$ ,  $P$ , расходы реакционной массы на входе  $G^{BX}$  и выходе  $G^{BXX}$ , объем реакционной массы  $V$ .

Таким образом, химический реактор с мешалкой и змеевиком как объект управления может быть проиллюстрирован на рис. 9.

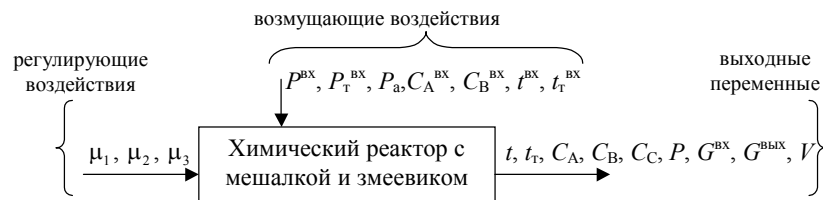


Рис. 9. Химический реактор с мешалкой и змеевиком как объект управления

### 5.3. Математическое описание статики и динамики объекта управления

Поскольку статику можно рассматривать как частный случай динамики, то запишем уравнения динамических режимов исследуемого объекта. Составим соответствующие уравнения для каждой из выходных переменных [9].

При построении математической модели примем следующие допущения:

1. Емкость с реакционной массой и змеевик рассматриваем как объект идеального смешения;
2. Теплофизические характеристики реакционной массы и теплоносителя постоянны;
3. Теплопотери в окружающую среду отсутствуют.

Общий материальный баланс объекта по реакционной массе в динамическом режиме отражается уравнением:

$$\frac{dV}{d\tau} = G^{\text{BX}} - G^{\text{ВЫХ}}, \quad (1)$$

где  $V$  – объем реакционной массы в аппарате,  $\text{м}^3$ ;  $G^{\text{BX}}$  – расход реакционной массы на входе в аппарат,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $G^{\text{ВЫХ}}$  – расход реакционной массы на выходе из аппарата,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Для переменной  $V$ , стоящей в (1) под знаком производной, требуется задать начальное условие:

$$V(0) = V^0, \quad (2)$$

где  $V(0)$  – значение объема реакционной массы  $V$  в емкости в момент времени  $\tau = 0$ ,  $\text{м}^3$ .

Уровень реакционной массы можно выразить из соотношения:

$$V = hS_{\text{сеч}} - V_{\text{зм}}, \quad (3)$$

где  $V_{\text{зм}}$  – объем змеевика,  $\text{м}^3$ ;  $V_{\text{зм}} = Sd/4$ ;  $S_{\text{сеч}}$  – площадь поперечного сечения аппарата,  $\text{м}^2$ ;  $S_{\text{сеч}} = \pi D^2/4$ .

Тогда уровень реакционной массы будет определяться по формуле:

$$h = \frac{4V + Sd}{\pi D^2}. \quad (4)$$

Поскольку давление на дне емкости  $P$  является суммой атмосферного давления  $P_a$  и давления столба реакционной массы высотой  $h$ , то получим:

$$P = P_a + \rho gh, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ .

Будем считать, что расход жидкости через клапан при фиксированном коэффициенте  $K_v$ , характеризующем максимальную пропускную способность клапана, пропорционален квадратному корню от перепада давлений на этом клапане и обратно пропорционален плотности жидкости. Тогда выходные переменные  $G^{\text{BX}}$  и  $G^{\text{ВЫХ}}$  определяются следующим образом:

$$G^{\text{BX}} = \frac{0,01\mu_1 K_{v1}}{3600} \sqrt{\frac{P^{\text{BX}} - P}{\rho}}; \quad (6)$$

$$G^{\text{ВЫХ}} = \frac{0,01\mu_2 K_{v2}}{3600} \sqrt{\frac{P - P_a}{\rho}}, \quad (7)$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – степень открытия клапанов на входе и на выходе реакционной массы соответственно.

Уравнения покомпонентного материального баланса имеют вид:

$$\frac{d(V C_A)}{d\tau} = G^{\text{BX}} C_A^{\text{BX}} - G^{\text{ВЫХ}} C_A - rV; \quad (8)$$

$$\frac{d(V C_B)}{d\tau} = G^{\text{BX}} C_B^{\text{BX}} - G^{\text{ВЫХ}} C_B - rV; \quad (9)$$

$$\frac{d(V C_C)}{d\tau} = -G^{\text{ВЫХ}} C_C + rV, \quad (10)$$

где  $C_A, C_B, C_C$  – концентрации веществ А, В и С соответственно, моль/м<sup>3</sup>;  $r$  – скорость химической реакции, моль/(м<sup>3</sup>·с).

$$r = K \exp\left(-\frac{E}{R(273+t)}\right) C_A C_B; \quad (11)$$

$$C_A(0)V(0) = C_A^0 V^0; \quad (12)$$

$$C_B(0)V(0) = C_B^0 V^0; \quad (13)$$

$$C_C(0)V(0) = C_C^0 V^0. \quad (14)$$

Уравнение энергетического (теплового) баланса для реакционной массы имеет вид:

$$\rho c_p \frac{d(Vt)}{d\tau} = G^{\text{BX}} \rho c_p t^{\text{BX}} - G^{\text{ВЫХ}} \rho c_p t + K_T S(t_T - t) + rV\Delta H, \quad (15)$$

$$t(0)V(0) = t^0 V^0, \quad (16)$$

где  $t_T$  – температура теплоносителя, °С.

Уравнение материального баланса для теплоносителя имеет вид:

$$\frac{dV_{\text{ЗМ}}}{d\tau} = G_T^{\text{BX}} - G_T^{\text{ВЫХ}}, \quad (17)$$

где  $G_T^{\text{BX}}, G_T^{\text{ВЫХ}}$  – расходы теплоносителя на входе и на выходе из змеевика, м<sup>3</sup>/с.

Вследствие того, что объем змеевика  $V_{\text{ЗМ}}$  постоянный уравнение (17) можно переписать в виде:

$$G_T^{\text{BX}} = G_T^{\text{ВЫХ}} = G_T, \quad (18)$$

$$G_T = \frac{0,01\mu_3 K_{\text{V3}}}{3600} \sqrt{\frac{P_T^{\text{BX}} - P_a}{\rho_T}}, \quad (19)$$

где  $\mu_3$  – степень открытия клапана на входе теплоносителя в змеевик.

Уравнение энергетического (теплового) баланса для теплоносителя имеет вид:

$$V_{\text{ЗМ}} \rho_T c_T \frac{dt_T}{d\tau} = G_T \rho_T c_T (t_T^{\text{BX}} - t_T) - K_T S(t_T - t), \quad (20)$$

$$t_T(0) = t_T^0. \quad (21)$$

На уровень реакционной массы в реакторе накладывается ограничение, которое следует из условия физической реализуемости:

$$h = \begin{cases} \frac{Sd}{\pi D^2}, & \text{если } h \leq \frac{Sd}{\pi D^2}; \\ \frac{4V + Sd}{\pi D^2}, & \text{если } \frac{Sd}{\pi D^2} < h \leq H; \\ H, & \text{если } H < h. \end{cases} \quad (22)$$

Таким образом, математическое описание динамики реактора с мешалкой и змеевиком представляет собой систему дифференциальных уравнений с начальными условиями, алгебраических уравнений (1), (2), (4) – (16), (18) – (21) и ограничения (22).

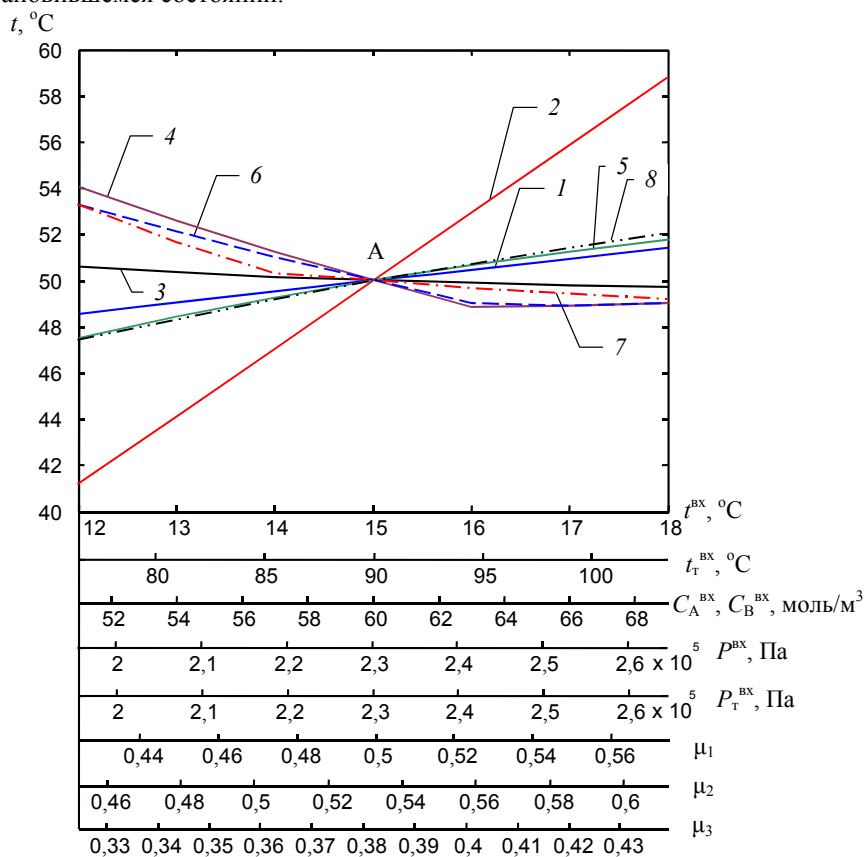
Математическое описание статических режимов объекта получается из математического описания динамики приравнением левых частей дифференциальных уравнений системы (1), (2), (4) – (16), (18) – (22) к нулю.

#### 5.4. Исследование статики объекта управления

Для получения статических характеристик объекта необходимо решать систему алгебраических уравнений, описывающую статику.

Решение этой системы можно провести несколькими методами: классическими методами решения систем нелинейных алгебраических уравнений (методы простых итераций, Зейделя, Ньютона); сведением задачи решения системы нелинейных алгебраических уравнений к задаче параметрической оптимизации введением целевой функции.

Статические характеристики можно получить, используя математическую модель динамики и определяя значения выходных параметров в установившемся состоянии.



**Рис. 10. Статические характеристики:**  
 1 –  $t(t^{BX})$ ; 2 –  $t(t_T^{BX})$ ; 3 –  $t(C_A^{BX}), t(C_B^{BX})$ ; 4 –  $t(P^{BX})$ ; 5 –  $t(P_T^{BX})$ ; 6 –  $t(\mu_1)$ ;  
 7 –  $t(\mu_2)$ ; 8 –  $t(\mu_3)$

Этот метод наиболее прост, но требует значительных ресурсов вычислительной техники.

Были получены статические характеристики "входная переменная – температура смеси  $t$  в аппарате". Соответствующая входная переменная изменялась от  $-15$  до  $+15$  % от значения в номинальном режиме. При этом остальные входные переменные оставались равными значениям в номинальном режиме.

Результаты расчета статических режимов реактора с мешалкой и змеевиком представлены на рис. 10 и пронумерованы цифрами от 1 до 8. Их построение на одном графике делает возможным сравнение чувствительности выходной переменной  $t$  к различным входным переменным.

Отметим, что точка А на рисунке, являющаяся точкой пересечения характеристик, соответствует номинальному статическому режиму объекта, определяемому заданием:  $P^{BX} = P_T^{BX} = 230\,000$  Па,  $P_a = P^{BYX} = 101\,325$  Па,  $\mu_1 = 0,5$ ,  $\mu_2 = 0,5325$ ,  $\mu_3 = 0,3822$ ,  $C_A = 3,98$  моль/м<sup>3</sup>,  $C_B = 3,98$  моль/м<sup>3</sup>,  $C_C = 56,01$  моль/м<sup>3</sup>,  $t = 50$  °С,  $t_T = 66,63$  °С,  $K_{v1} = 100$ ,  $K_{v2} = K_{v3} = 160$ . При этом значение уровня жидкости в емкости в этом режиме  $h = 2,8$  м.

Анализируя статические характеристики, можно сказать, что они монотонно возрастают (1, 2, 5, 8) или монотонно убывают (3, 7), линейны (2) или практически линейны (1, 3, 5, 8). Выходная переменная  $t$  наиболее чувствительна к входной переменной  $t_T^{BX}$  (2). В качестве регулирующего воздействия выбираем степень открытия клапана на линии подачи теплоносителя  $\mu_3$  (8), так как статическая характеристика  $t(\mu_3)$  наиболее близка к линейной, и объект по отношению к  $\mu_3$  обладает высокой чувствительностью. Наименьшее влияние на температуру в реакторе оказывают концентрации веществ на входе в реактор  $t(C_A^{BX}), t(C_B^{BX})$ .

### 5.5. Исследование динамики объекта управления

Для получения переходных характеристик объекта необходимо каждый раз решать систему уравнений (1), (2), (4) – (16), (18) – (22), описывающую его динамику.

Переходные характеристики были получены для наиболее влияющего на объект возмущения  $t_T^{BX}$  и для регулирующего воздействия  $\mu_3$  при ступенчатом изменении на 5 % от их значения в номинальном режиме.

Переходные характеристики по каналам  $t_T^{BX} \rightarrow t$ ,  $\mu_3 \rightarrow t$  представлены на рис. 11 и обозначены цифрами 1 и 2 соответственно.

Из анализа характеристик можно сделать следующие выводы: объект обладает самовыравниванием и близок к апериодическому звену первого порядка; времена перехода объекта из одного статического режима в другой при ступенчатых входных сигналах соизмеримы и примерно равны 30 000 с.

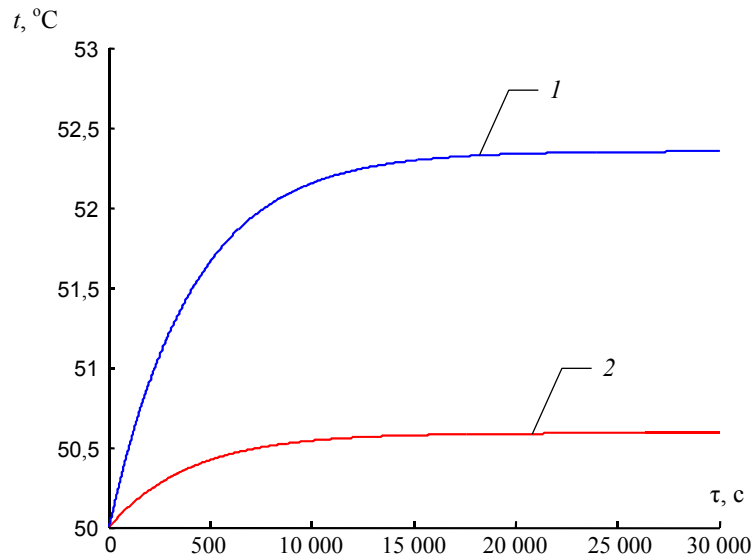


Рис. 11. Переходные характеристики  $t(\tau)$  объекта при ступенчатом изменении входных переменных

### 5.6. Исследование переходных процессов в автоматической системе регулирования

#### Выбор структуры АСР

Для регулирования температуры  $t$  реакционной массы в реакторе будем изменять степень открытия клапана  $\mu_3$  на линии подачи теплоносителя.

Структурная схема этой АСР представлена на рис. 12.

#### Математическое описание АСР

Для моделирования переходных процессов в АСР температуры реакционной массы необходимо иметь математическое описание этой системы регулирования.

Рассматриваемый в данном примере чувствительный элемент (датчик) инерционен, следовательно, к системе уравнений необходимо добавить дифференциальное уравнение, описывающее динамическую характеристику чувствительного элемента:

$$T_d \frac{dt_{чэ}}{d\tau} + t_{чэ} = t, \quad (23)$$

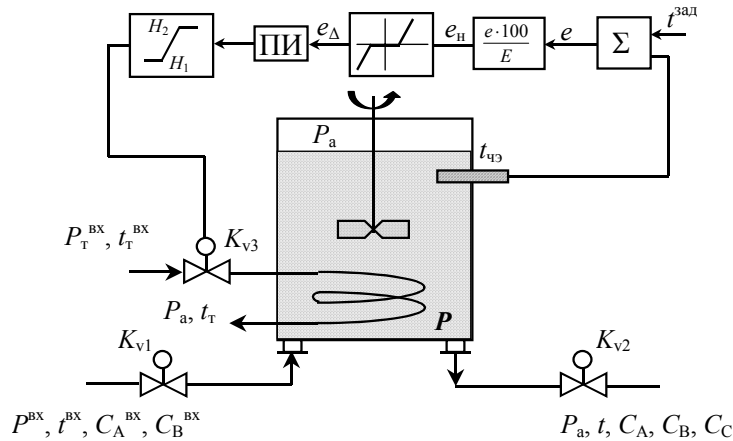


Рис. 12. Схема АСР температуры реакционной массы

$$t_{чэ}(0) = t^0, \quad (24)$$

где  $t_{чэ}$  – температура, измеряемая датчиком, °С.

Ошибка регулирования определяется как разность между текущим значением температуры  $t_{чэ}$  реакционной массы и заданной температуры  $t^{зад}$ :

$$e = t_{чэ} - t^{зад}. \quad (25)$$

Полученное значение ошибки регулирования необходимо нормировать в диапазоне от 0 до 100 %:

$$e_n = \frac{e}{\hat{E}} \cdot 100 \%, \quad (26)$$

где  $e_n$  – нормированное значение ошибки регулирования;  $\hat{E}$  – диапазон измерения датчика, °С.

$$\hat{E} = \bar{t} - \underline{t}, \quad (27)$$

где  $\bar{t}$  – верхнее значение измеряемого диапазона, °С;  $\underline{t}$  – нижнее значение измеряемого диапазона, °С.

Используемый ПИ-регулятор имеет зону нечувствительности  $\Delta$ , следовательно, ошибка регулирования с учетом зоны нечувствительности  $e_\Delta$  будет иметь вид:

$$e_\Delta = \begin{cases} \left( |e_n| - \Delta/2 \right) \text{sign}(e_n), & \text{если } |e_n| > \Delta/2; \\ 0, & \text{если } |e_n| < \Delta/2, \end{cases} \quad (28)$$

$$\text{где } \text{sign}(e_n) = \begin{cases} 1, & \text{если } e_n > 0; \\ 0, & \text{если } e_n = 0; \\ -1, & \text{если } e_n < 0. \end{cases}$$

Уравнение ПИ-регулятора выглядит следующим образом [3]:

$$\mu_3 = \mu_3^{\text{ном}} + K_p \left[ e_\Delta + \frac{1}{T_i} \int_0^\tau e_\Delta d\tau \right], \quad (29)$$

где  $\mu_3^{\text{ном}}$  – значение  $\mu_3$  в номинальном статическом режиме;  $K_p$  – коэффициент передачи регулятора, 1/%;  $T_i$  – время изодрома, с.

Значение  $\mu_3$ , рассчитанное по формуле, следует ограничивать, так как в действительности степень открытия регулирующего клапана может изменяться в пределах от некоторого минимального  $H_1$  до определенного максимального значения  $H_2$ . В нашем случае они имеют следующие значения:  $H_1 = 0$ ;  $H_2 = 1$ .

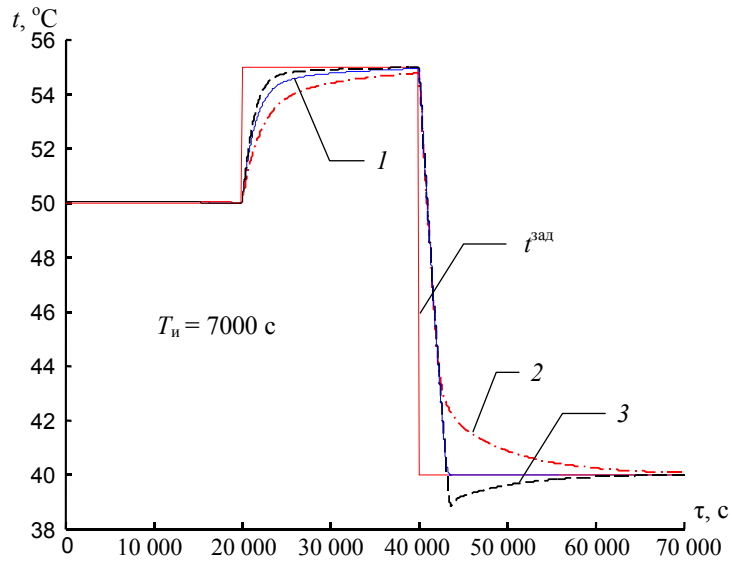
В процессе вычислений значение  $\mu_3$  ограничивается в соответствии с соотношением:

$$\mu_3 = \begin{cases} H_1, & \text{если } \mu_3 \leq H_1; \\ \mu_3^{\text{ном}} + K_p \left[ e_\Delta + \frac{1}{T_i} \int_0^\tau e_\Delta dt \right], & \text{если } H_1 < \mu_3 \leq H_2; \\ H_2, & \text{если } \mu_3 > H_2. \end{cases} \quad (30)$$

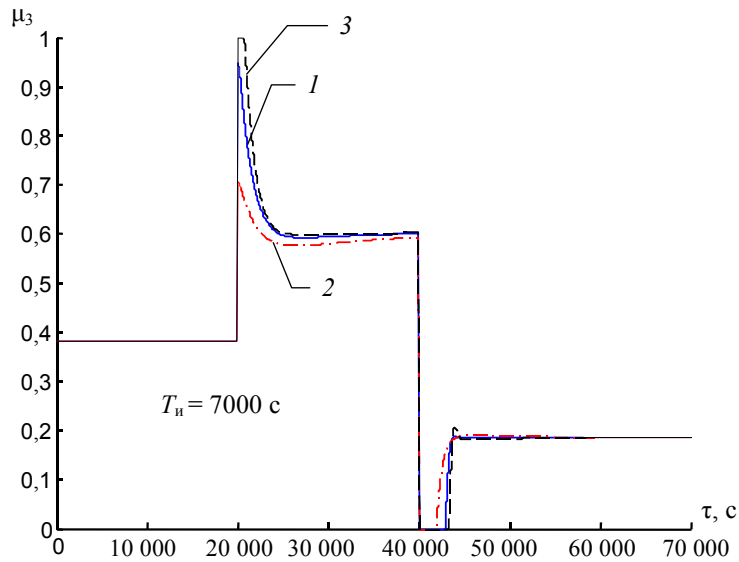
Таким образом, математическое описание АСР температуры реакционной массы в реакторе будет представлено системой (1), (2), (4) – (16), (18) – (30) (в курсовой работе эту систему рекомендуется переписать еще раз).

Для того, чтобы рассчитать переходной процесс в АСР температуры реакционной массы в реакторе при смене задания регулятора  $t^{\text{зад}}$  решалась система (1), (2), (4) – (16), (18) – (30). При этом переменная  $t^{\text{зад}}$  во времени изменялась в соответствии с программой (см. рис. 8), а значения остальных входных переменных и начальных условий задавались согласно номинальному режиму.

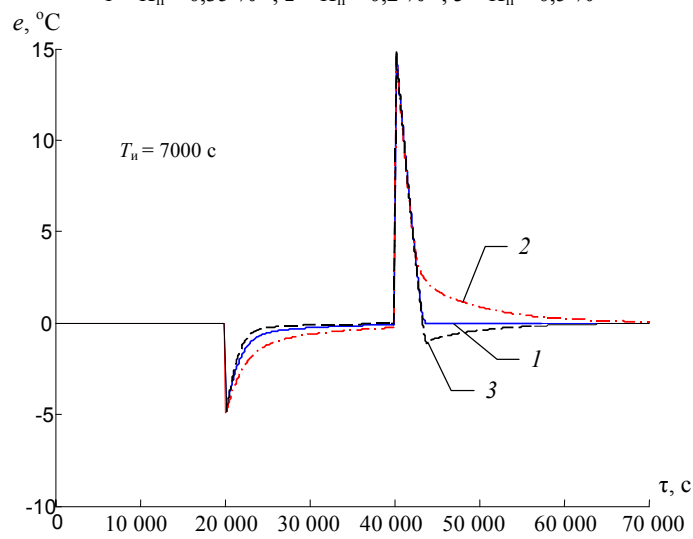
На рис. 13 представлены переходные процессы в исследуемой АСР с ПИ-регулятором при различных параметрах настройки  $K_p$ , при этом  $T_i$  задавалось равным 7000 с.



**Рис. 13. Переходные процессы в АСР:**  
 $1 - K_{п} = 0,35 \%^{-1}$ ;  $2 - K_{п} = 0,2 \%^{-1}$ ;  $3 - K_{п} = 0,5 \%^{-1}$

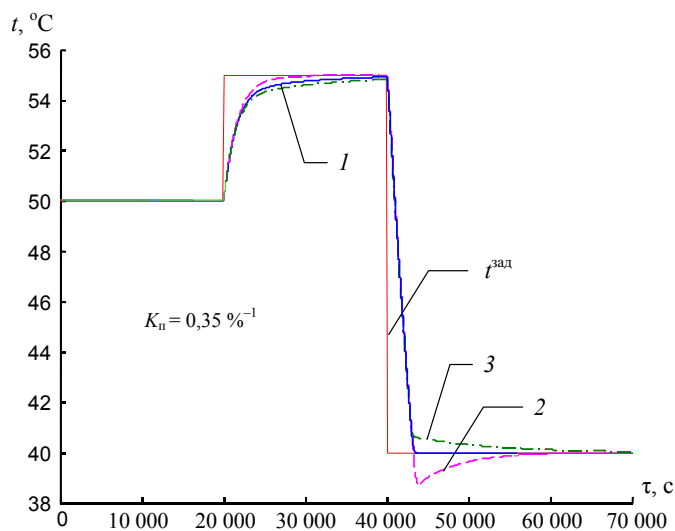


**Рис. 14. Степень открытия клапана:**  
 $1 - K_{п} = 0,35 \%^{-1}$ ;  $2 - K_{п} = 0,2 \%^{-1}$ ;  $3 - K_{п} = 0,5 \%^{-1}$



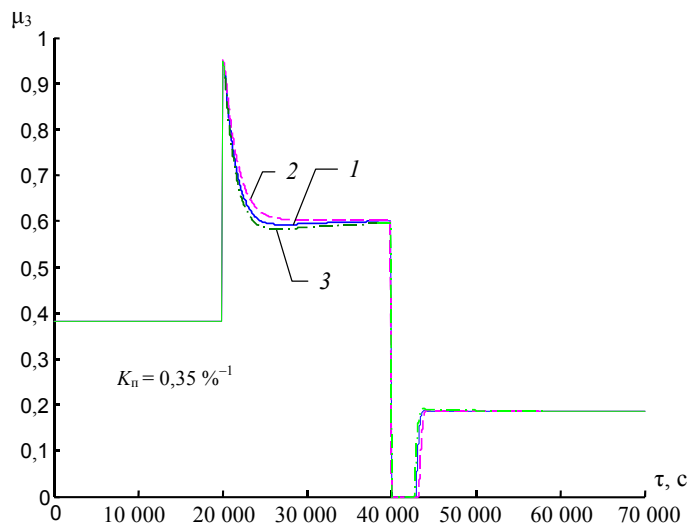
**Рис. 15. Ошибка регулирования:**  
 $1 - K_{п} = 0,35 \%^{-1}$ ;  $2 - K_{п} = 0,2 \%^{-1}$ ;  $3 - K_{п} = 0,5 \%^{-1}$

На рис. 14 и 15 представлены графики изменения степени открытия клапана и ошибки регулирования соответственно при отработке задания в исследуемой АСР с ПИ-регулятором при различных параметрах настройки.

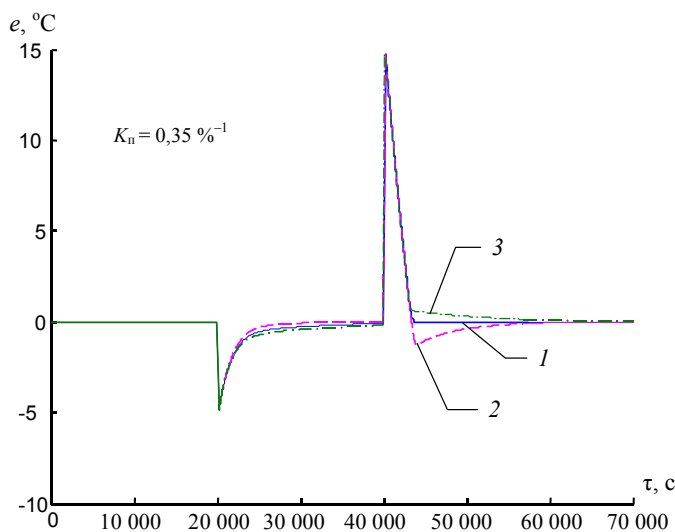


**Рис. 16. Переходные процессы в АСР:**  
 1 –  $T_{и} = 7000$  с; 2 –  $T_{и} = 5000$  с; 3 –  $T_{и} = 9000$  с

На рис. 16 представлены переходные процессы в исследуемой АСР с ПИ-регулятором при различных параметрах настройки  $T_{и}$ , при этом  $K_{п}$  задавался равным  $0,35 \text{ \%}^{-1}$ .



**Рис. 17. Степень открытия клапана:**  
 1 –  $T_{и} = 7000$  с; 2 –  $T_{и} = 5000$  с; 3 –  $T_{и} = 9000$  с



**Рис. 18. Ошибка регулирования:**  
 1 –  $T_{и} = 7000$  с; 2 –  $T_{и} = 5000$  с; 3 –  $T_{и} = 9000$  с

На рис. 17 и 18 представлены графики изменения степени открытия клапана и ошибки регулирования соответственно при отработке задания в исследуемой АСР с ПИ-регулятором при различных параметрах настройки  $T_{и}$ .



Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

1. С уменьшением  $K_n$  происходит увеличение статической ошибки регулирования.
2. Уменьшение  $T_n$  приводит к увеличению динамической ошибки регулирования.
3. Из предложенных параметров настроек регулятора наиболее предпочтительны параметры  $K_n = 0,35 \%^{-1}$ ,  $T_n = 7000$  с.

Таким образом, исследованы динамические режимы АСР температуры реакционной массы в реакторе при разных параметрах настройки регулятора. Это дало определенную информацию о работоспособности системы регулирования и позволило выявить ее характерные свойства.

## 5.7. Заключение

Основные результаты проведенных в курсовой работе исследований состоят в следующем:

- проанализирован реактор с мешалкой и змеевиком как объект управления;
- разработано математическое описание динамики объекта;
- получены и проанализированы статические характеристики;
- получены и проанализированы динамические характеристики объекта;
- сделан вывод о линейности объекта при изменении регулирующего воздействия в окрестности  $\pm 15\%$  от его значения в номинальном статическом режиме;
- получены и проанализированы переходные характеристики объекта по каналам передачи воздействия  $t_r^{BX} \rightarrow t$ ,  $\mu_3 \rightarrow t$  при ступенчатых входных воздействиях;
- определены времена перехода объекта в новые установившиеся состояния в результате воздействия на объект ступенчатых возмущений по различным каналам передачи воздействий;
- предложена структура АСР температуры реакционной массы в реакторе;
- получены и проанализированы переходные процессы, протекающие в АСР с различными параметрами настроек ПИ-регулятора, при изменении задания регулятору по программе в виде кусочно-постоянной функции.

В конце работы приводится список использованной литературы.

## 6. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Стандарт предприятия. Проекты дипломные и курсовые. Правила оформления / ТГТУ. – Тамбов, 1997. – 38 с.
2. Ротач, В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования / В.Я. Ротач. – М. : Энергия, 1973. – 440 с.
3. Ротач, В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами : учебник для вузов / В.Я. Ротач. – М. : Энергоиздат, 1985. – 296 с.
4. Фрэнкс, Р. Математическое моделирование в химической технологии / Р. Фрэнкс ; под ред. В.С. Торопцова. – М. : Химия, 1971. – 272 с.
5. Закгейм, А.Ю. Введение в моделирование химико-технологических процессов / А.Ю. Закгейм. – М. : Химия, 1982. – 287 с.
6. Автоматическое управление в химической промышленности : учебник для вузов / под ред. Е.Г. Дудникова. – М. : Химия, 1987. – 386 с.
7. Анисимов, И.В. Математическое моделирование ректификационных установок / И.В. Анисимов, В.И. Бодров, В.Б. Покровский. – М. : Химия, 1975. – 216 с.
8. Бояринов, А.И. Методы оптимизации в химической технологии / А.И. Бояринов, В.В. Кафаров. – М. : Химия, 1969. – 564 с.
9. Жоров, Ю.М. Моделирование физико-химических процессов нефтепереработки и нефтехимии / Ю.М. Жоров. – М. : Химия, 1978. – 376 с.
10. Заев, А.В. Математическое описание процессов в химических реакторах : учебное пособие / А.В. Заев. – М. : МИХМ, 1977. – 75 с.
11. Измерения в промышленности : справ. изд. В 3 кн. Кн. 2. Способы измерения и аппаратура / пер. с нем. ; под ред. П. Профоса. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1990. – 384 с.
12. Кафаров, В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии : учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. / В.В. Кафаров. – М. : Химия, 1985. – 448 с.
13. Кафаров, В.В. Математическое моделирование основных процессов химических производств : учебное пособие для вузов / В.В. Кафаров, М.Б. Глебов. – М. : Высшая школа, 1991. – 400 с.
14. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1984. – 832 с.

**ПРИЛОЖЕНИЕ**

**1. Задание группы № 1**

№	Тип апп.	T4, T5, T6, T7	T8	T9	T10	T11
1	1	4	2	2	5	6
2	2	8	5	8	4	9
3	3	1	1	8	4	7
4	4	4	6	5	1	3
5	1	2	1	9	1	5
6	2	8	8	9	1	6
7	3	5	5	2	8	4
8	4	2	3	8	3	9
9	1	1	9	3	2	4
10	2	7	3	8	4	4
11	3	7	8	8	1	5
12	4	6	6	8	3	3
13	1	6	3	9	2	6
14	2	5	3	9	7	5
15	3	4	1	3	1	5
16	4	5	1	8	8	4
17	1	4	7	9	7	9
18	2	2	6	1	4	9
19	3	9	2	5	3	6
20	4	2	9	6	1	1
21	1	2	5	6	1	8
22	2	5	4	2	7	4
23	3	9	4	2	4	6
24	4	2	8	2	6	2
25	1	4	3	7	5	1
26	2	1	8	3	7	2
27	3	5	1	9	9	1
28	4	8	2	3	2	3
29	1	4	6	8	4	6
30	2	7	1	3	9	3

**2. Задание группы № 2**

№	Тип апп.	T1, T2, T3, T4	T5	T6	T7	T8
1	1	7	6	6	4	1
2	2	8	1	4	1	9
3	3	2	5	5	7	9
4	4	1	3	2	9	9
5	1	1	5	1	7	8
6	2	5	8	1	7	2
7	3	9	5	2	3	4
8	4	7	9	8	3	2
9	1	7	6	6	4	8
10	2	3	5	8	9	6
11	3	4	9	2	9	6
12	4	9	9	4	8	1
13	1	9	1	5	2	5
14	2	9	5	7	5	8

15	3	8	9	6	9	5
16	4	6	7	3	8	3
17	1	5	6	7	6	1
18	2	7	3	7	5	1
19	3	8	2	7	1	6
20	4	7	8	8	7	9
21	1	1	8	9	2	3
22	2	1	5	2	6	1
23	3	5	2	1	3	3
24	4	1	4	2	5	8
25	1	7	3	9	3	7
26	2	8	1	8	3	4
27	3	9	9	4	3	9
28	4	9	3	8	8	9
29	1	1	6	2	9	4
30	2	5	8	4	6	4

### 3. Задание группы № 3

№	Тип апп.	T1, T2, T3, T4	T5	T6	T7	T8
1	1	1	2	8	5	4
2	2	6	7	9	1	3
3	3	1	5	4	2	7
4	4	1	3	8	6	1
5	1	8	3	7	9	5
6	2	8	1	6	3	6
7	3	4	1	2	5	3
8	4	4	8	7	5	6
9	1	7	7	8	7	4
10	2	4	7	1	6	1
11	3	6	7	2	9	5
12	4	7	8	9	6	5
13	1	1	4	3	6	7
14	2	3	4	3	4	5
15	3	7	8	5	8	8
16	4	7	7	2	6	3
17	1	7	7	7	3	5
18	2	8	4	1	3	7
19	3	3	7	4	1	4
20	4	6	5	5	4	4
21	1	4	6	9	9	5
22	2	1	7	8	9	5
23	3	5	1	1	8	1
24	4	1	2	9	2	1
25	1	7	1	1	5	9
26	2	7	3	8	9	7
27	3	2	1	2	5	7
28	4	8	1	6	9	8
29	1	3	5	1	7	4
30	2	8	6	7	9	6

#### 4. Химический реактор с мешалкой и змеевиком

№	$D, \text{ м}$	$H, \text{ м}$	$S, \text{ м}^2$	$d, \text{ м}$
1	0,8	0,6	4	0,02
2	0,9	0,7	4,5	0,02
3	1	0,8	5	0,02
4	1,1	0,9	5	0,025
5	1,2	1	5,5	0,025
6	1,3	1,1	5,5	0,025
7	1,4	1,2	6	0,03
8	1,5	1,3	6	0,03
9	1,6	1,4	6,5	0,035

#### 5. Химический реактор с мешалкой и рубашкой

№	$D, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$H, \text{ м}$
1	1,1	1	1,5
2	1,2	1	1,6
3	1,2	1,1	1,9
4	1,4	1,3	2,1
5	1,6	1,5	2,3
6	1,7	1,6	2,5
7	1,8	1,7	2,6
8	2	1,8	2,8
9	2,2	2	3

#### 6. Химический реактор трубчатого типа с рубашкой

№	$D, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$H, \text{ м}$
1	0,2	0,09	1,5
2	0,2	0,1	1,6
3	0,3	0,1	1,8
4	0,3	0,2	2
5	0,4	0,2	2,3
6	0,4	0,3	2,5
7	0,5	0,3	2,6
8	0,5	0,4	2,8
9	0,6	0,4	3

#### 7. Горизонтальный химический реактор с мешалкой и змеевиком

№	$D, \text{ м}$	$H, \text{ м}$	$S, \text{ м}^2$	$d, \text{ м}$
1	0,3	0,6	2	0,015
2	0,3	0,7	2,3	0,015
3	0,4	0,8	3	0,015
4	0,4	0,9	3	0,015
5	0,5	1	4	0,02
6	0,5	1,1	4,5	0,02
7	0,6	1,2	5	0,02
8	0,7	1,3	5,5	0,025
9	0,8	1,4	5,5	0,025

#### 8. Параметры исходной смеси

№	$C_A^{\text{вх}}, \text{ моль/м}^3$	$C_B^{\text{вх}}, \text{ моль/м}^3$	$t^{\text{вх}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$c_p, \text{ Дж/(кг К)}$	$\Delta H, \text{ Дж/моль}$
1	20	100	15	800	3500	475 000
2	30	80	20	900	3350	425 000
3	40	90	25	1000	3200	450 000
4	50	70	30	1100	3000	400 000

5	60	60	15	1200	2800	500 000
6	70	40	20	1300	2600	410 000
7	80	50	25	1350	2400	465 000
8	90	20	30	1400	2200	490 000
9	100	30	15	1500	2000	440 000

### 9. Параметры системы регулирования

№	Тип регулятора	Зона нечувствительности $\Delta$ , %	Инерционность датчика $T$ , с	Диапазон измерения, °C
1	ПИ	0	20	-50...260
2	ПИ	2	60	-50...120
3	ПИ	4	90	-50...180
4	ПИ	0	120	-50...260
5	ПИ	2	160	-50...120
6	ПИ	4	200	-50...180
7	ПИ	0	130	-50...260
8	ПИ	2	170	-50...120
9	ПИ	4	70	-50...180

### 10. Временные интервалы

№	$\tau_1$ , с	$\tau_2$ , с	$\tau_3$ , с
1	8000	22 000	40 000
2	9000	17 000	40 000
3	9500	21 000	40 000
4	13 000	23 000	40 000
5	11 000	19 000	40 000
6	12 000	20 000	40 000
7	10 000	25 000	40 000
8	7000	15 000	40 000
9	9000	18 000	40 000

### 11. Задание регулятору

№	$t_1$ , °C	$t_2$ , °C	$t_3$ , °C
1	50	40	30
2	50	55	40
3	50	60	30
4	50	60	40
5	50	55	30
6	50	60	40
7	50	40	30
8	50	55	40
9	50	60	30

### 12. Типовой ряд для пропускной способности клапана

$K_v$	0,1-0,16 0,25-0,4	0,63	1,0	1,6	2,5	4,0	6,3	10	16	25	63	100
$K_v$	160	250	360	630	1000	1500	2500					

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ .....	3
2. СОДЕРЖАНИЕ РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ .....	3
3. ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АППАРАТОВ .....	5
3.1. Химический реактор с мешалкой и змеевиком .....	5
3.2. Химический реактор периодического действия с мешалкой и рубашкой .....	6
3.3. Химический реактор трубчатого типа с рубашкой .....	7
3.4. Горизонтальный химический реактор с мешалкой и змеевиком .....	8
4. ЗАДАНИЕ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ .....	9
5. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ .....	10
5.1. Задание .....	10
5.2. Анализ технологического аппарата как объекта управления .....	12
5.3. Математическое описание статики и динамики объекта управления .....	12
5.4. Исследование статики объекта управления .....	16
5.5. Исследование динамики объекта управления .....	17
5.6. Исследование переходных процессов в автоматической системе регулирования .....	18
5.7. Заключение .....	24
6. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА .....	25
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	26