

УТВЕРЖДАЮ
Первый проректор, проректор
по УР

_____ А.Е. Рудин

Рабочая программа дисциплины

Б1.В.10

Численные методы в химико-технологических расчетах

Учебный план: 2025-2026 18.03.02 ИПХиЭ ТИТРПиЗОС ОО 1-1-172.plx

Кафедра: **18** Инженерной химии и промышленной экологии

Направление подготовки:
(специальность) 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической
технологии, нефтехимии и биотехнологии

Профиль подготовки:
(специализация) Техника и технология ресурсосберегающих процессов и защита
окружающей среды

Уровень образования: бакалавриат

Форма обучения: очная

План учебного процесса

Семестр (курс для ЗАО)		Контактн ая	Сам. работа	Контроль, час.	Трудоё мкость, ЗЕТ	Форма промежуточной аттестации
		Практ. занятия				
6	УП	34	35,75	2,25	2	Зачет, Курсовая работа
	РПД	34	35,75	2,25	2	
Итого	УП	34	35,75	2,25	2	
	РПД	34	35,75	2,25	2	

Рабочая программа дисциплины составлена в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии, утверждённым приказом Минобрнауки России от 07.08.2020 г. № 923

Составитель (и):

кандидат технических наук, Заведующий кафедрой

Бусыгин Николай Юрьевич

От кафедры составителя:

Заведующий кафедрой инженерной химии и
промышленной экологии

Бусыгин Николай Юрьевич

От выпускающей кафедры:

Заведующий кафедрой

Бусыгин Николай Юрьевич

Методический отдел:

Макаренко С. В.

1 ВВЕДЕНИЕ К РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЕ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1 Цель дисциплины: Сформировать и закрепить компетенции обучающегося в области использования современных специализированных программных продуктов и информационных технологий для решения конкретных прикладных задач в профессиональной сфере.

1.2 Задачи дисциплины:

- раскрыть принципы построения специализированных баз данных (БД) как основы информационного обеспечения для автоматизированных расчетов в экологии и инженерной защите окружающей среды;
- закрепить навыки применения типового программного обеспечения компьютеров и прикладных пакетов в технических расчетах;
- показать приемы работы в математической среде Mathcad;
- обучить численным методам решения уравнений и систем уравнений разного типа и практическому применению этих знаний для решения конкретных задач по специальности.

1.3 Требования к предварительной подготовке обучающегося:

Предварительная подготовка предполагает создание основы для формирования компетенций, указанных в п. 2, при изучении дисциплин:

Математика

Информационные технологии

2 КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

ОПК-4: Способен понимать принципы работы современных информационных технологий и использовать их для решения задач профессиональной деятельности
Знать: общие принципы и классификацию систем автоматизированного проектирования для различных областей техники; численные методы решения типовых уравнений и систем.
Уметь: использовать методы вычислительной математики для получения количественного результата при компьютерном моделировании; осуществлять постановку задачи решения уравнений и систем разного типа.
Владеть: навыками решения инженерных задач современными средствами пакета Mathcad; навыками численного решения уравнений и систем.
ПК-4: Способен выполнять работы по модернизации и совершенствованию технологических процессов очистки газовых выбросов, сточных вод и обработки осадков
Знать: основы анализа данных, численных методов решения уравнений разного типа, корреляционного анализа.
Уметь: выбирать программные продукты для обработки информации в профессиональной деятельности.
Владеть: навыками использования типовых программных продуктов для обработки данных, включая элементы корреляционного анализа.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Наименование и содержание разделов, тем и учебных занятий	Семестр (курс для ЗАО)	Контактная работа	СР (часы)	Инновац. формы занятий	Форма текущего контроля
		Пр. (часы)			
Раздел 1. Информационное и программное обеспечение автоматизированных технологических и проектных расчетов	6				3,
Тема 1. Специализированные базы данных в химической технологии и экологии и их использование в технических расчетах. Структура базы данных по физико-химическим свойствам веществ и смесей. СУБД и расчеты в ее среде. Использование библиотеки модулей расчета свойств в прикладных программах. Практическое занятие 1 "Банк данных по физико-химическим свойствам веществ и смесей и его использование в расчетах"		4	4	ИЛ	
Тема 2. Использование в расчетах прикладных программных продуктов общего назначения (на примере MS Excel). Встроенные средства решения уравнений и систем в MS Excel (подбор параметра, поиск решения, матричные вычисления). Практическое занятие 2 "Расширенные вычислительные возможности MS Excel"		4	4	ИЛ	
Тема 3. Системы для математических расчетов (на примере Mathcad). Рабочий лист. Вычислительные и текстовые блоки, программирование, символьные вычисления. Практическое занятие 3 "Основы работы в математической среде Mathcad".		4	2	ИЛ	
Раздел 2. Математическая постановка расчетных задач в химической технологии и экологии и программные средства для автоматизации решений уравнений и систем уравнений					
Тема 4. Задачи, приводящиеся к системам линейных алгебраических уравнений, и методы их решения. Стандартный вид системы линейных уравнений. Приведение сложной системы к стандартному виду. Матричный метод решения. Правило Крамера. Практическое занятие 4 "Решение систем линейных алгебраических уравнений"		4	6	ИЛ	3

Тема 5. Методы решения нелинейных алгебраических уравнений. Стандартный вид нелинейного алгебраического уравнения. Численные методы решения уравнений: деления отрезка пополам, итераций, секущих, касательных. Встроенные средства решения уравнений в Mathcad. Сравнение методов. Практическое занятие 5 "Решение систем нелинейных алгебраических уравнений"		8	8	ИЛ	
Тема 6. Подходы к решению систем нелинейных алгебраических уравнений. Стандартная запись системы уравнений. Итерационные методы решения. Встроенные средства решения систем уравнений в Mathcad. Практическое занятие 6 "Решение систем нелинейных алгебраических уравнений"		4	6	ИЛ	
Тема 7. Задачи, приводящиеся к системам дифференциальных уравнений. Формы результата численного решения. Методы решения на примере методов Эйлера и Рунге-Кутты разного порядка. Практическое занятие 7 "Системы дифференциальных уравнений и численные методы их решения"		6	5,75	ИЛ	
Итого в семестре (на курсе для ЗАО)		34	35,75		
Консультации и промежуточная аттестация (Зачет, Курсовая работа)		2,25			
Всего контактная работа и СР по дисциплине		36,25	35,75		

4 КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

4.1 Цели и задачи курсовой работы (проекта): Целью курсовой работы является привитие студентам навыков самостоятельной работы по решению математических задач численными методами, а также по составлению технической документации. Эти навыки необходимы при освоении последующих дисциплин учебного плана, при выполнении выпускной квалификационной работы и в предстоящей практической деятельности по специальности.

Основной задачей курсовой работы является углубление и закрепление знаний по теоретической и практической частям дисциплины «Численные методы в химико-технологических расчетах».

4.2 Тематика курсовой работы (проекта): Тематика курсовой работы ориентирована на использование изученных численных методов для практического решения конкретной вычислительной задачи (выбор метода, выполнение необходимых преобразований, разработка программного обеспечения при решении нелинейных алгебраических уравнений и их систем или систем дифференциальных уравнений).

Теоретический материал по дисциплине и индивидуальные задания к курсовой работе приведены в учебном пособии сетевого распространения:

Бусыгин, Н. Ю. Методы и средства автоматизированных расчетов в экологии. Решение задач в среде Mathcad: интерактивное учеб. пособие [Электр. издание] / Н. Ю. Бусыгин. – СПб.: СПГУТД, 2014. – 63,5 Мб.– Загл. с экрана. – Рег. № 0321400598 (Информрегистр). Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=2178, по паролю; <http://eco.sutd.ru/mathcad/START.htm>, свободный доступ.

4.3 Требования к выполнению и представлению результатов курсовой работы (проекта):

Курсовая работа состоит из расчётно-пояснительной записки объёмом до 15-20 страниц и включает краткое описание применяемых численных методов, необходимые математические преобразования исходных уравнений и систем, листинги разработанного программного и информационного обеспечения, текстовое, табличное и графическое представление результатов. Рекомендованные к использованию средства разработки программ – Borland Delphi, Mathcad и, если возможно, с приведением варианта решения задачи в MS Excel.

5. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

5.1 Описание показателей, критериев и системы оценивания результатов обучения

5.1.1 Показатели оценивания

Код компетенции	Показатели оценивания результатов обучения	Наименование оценочного средства
-----------------	--	----------------------------------

ОПК-4	<p>Грамотно оперирует базовыми понятиями построения современных автоматизированных расчетов общего и специализированного назначения; описывает подходы к решению линейных и нелинейных алгебраических уравнений и систем, систем дифференциальных уравнений, характеризует точность методов, условия их сходимости.</p> <p>Анализирует значение количественного описания процессов в инженерной деятельности; исходя из типа уравнений, выбирает численные методы решения, приводит уравнения к стандартному виду, определяет параметры выбранного метода.</p> <p>Применяет средства программного пакета Mathcad для решения инженерных задач в области оборудования и технологии; реализует на компьютере решение уравнений и систем в области энерго- и ресурсосбережения с применением соответствующих программ, анализирует результаты, оценивает точность решения.</p>	<p>Вопросы для устного собеседования</p> <p>Курсовая работа</p>
ПК-4	<p>Оценивает тип уравнений или систем уравнений, приводит их к стандартному виду для использования типовых численных методов, выбирает подходящий метод решения.</p> <p>Выбирает программные средства для решения уравнения или системы уравнений.</p> <p>Реализует расчет в выбранном программном обеспечении.</p>	<p>Вопросы для устного собеседования</p> <p>Курсовая работа</p>

5.1.2 Система и критерии оценивания

Шкала оценивания	Критерии оценивания сформированности компетенций	
	Устное собеседование	Письменная работа
5 (отлично)		<p>Обучающийся всесторонне и глубоко разработал тему на основе широкого круга источников технической литературы и нормативно-технической документации, проявил самостоятельность в разработке информационного и программного обеспечения, представил правильные расчеты и выводы, применил разнообразные методы решения, в том числе сверх оговоренных в задании; нет существенных недостатков в пояснительной записке (графической части и стиле изложения), при защите курсовой работы не допущены погрешности в интерпретации подхода к решению задачи и результатов.</p>
4 (хорошо)		<p>Обучающийся в полном объеме выполнил задание, представил решение задач разнообразными методами, проявил самостоятельность в разработке информационного и программного обеспечения, представил правильные расчеты и выводы; нет существенных недостатков в пояснительной записке (графической части и стиле изложения), при защите курсовой работы допущены небольшие погрешности в интерпретации подхода к решению задачи и результатов, допущены нарушения или небрежность в оформлении работы</p>
3 (удовлетворительно)		<p>Обучающийся в целом выполнил задание, представил решение всех задач, но проявил недостаточную самостоятельность в разработке информационного и программного обеспечения, и потребовалась существенная помощь преподавателя; пояснительная записка оформлена небрежно.</p>
2 (неудовлетворительно)		<p>Обучающимся представлена частично выполненная работа (решены не все задачи), при этом содержащая грубые</p>

		ошибки, свидетельствующие о непонимании студентом разрабатываемой им темы.
Зачтено	Обучающийся своевременно выполнил индивидуальные задания на практических занятиях, представил результаты в виде рабочих листов Mathcad, защитил работы; в соответствии с требованиями выполнил и защитил курсовую работу по дисциплине, возможно допуская несущественные ошибки в ответе на вопросы преподавателя.	
Не зачтено	Обучающийся выполнил частично индивидуальные задания на практических занятиях, не в полном объеме представил результаты в виде рабочих листов Mathcad, не защитил работы и/или в соответствии с требованиями не выполнил или не защитил курсовую работу по дисциплине, допустил существенные ошибки в ответе на вопросы преподавателя.	

5.2 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

5.2.1 Перечень контрольных вопросов

№ п/п	Формулировки вопросов
Семестр 6	
1	Численные методы решения систем дифференциальных уравнений: сущность методов и сравнений точности решения. Реализация в MS Excel.
2	Численные методы решения систем дифференциальных уравнений: сущность методов и сравнений точности решения. Реализация в Mathcad.
3	Решение дифференциального уравнения и системы таких уравнений. Форма представления результата численного решения системы дифференциальных уравнений. Возможность аналитического решения в Mathcad.
4	Матричное представление системы нелинейных алгебраических уравнений. Решение подобных систем в Mathcad
5	Методы решения систем нелинейных алгебраических уравнений.
6	Решение нелинейных алгебраических уравнений в MS Excel методом подбора параметров.
7	Итерационные методы решения нелинейного алгебраического уравнений. Методы Ньютона, секущих, итераций. Условия сходимости методов.
8	Решение нелинейного алгебраического уравнений. Метод деления отрезка пополам.
9	Понятие корня нелинейного алгебраического уравнения. Отличие точного решения и решения, полученного численным методом. Запись нелинейного алгебраического уравнения в стандартной форме
10	Решение системы линейных алгебраических уравнений в матричной форме в Mathcad и MS Excel.
11	Численные методы решения систем линейных алгебраических уравнений.
12	Системы линейных алгебраических уравнений. Запись системы в стандартной форме. Матричное представление системы.
13	Общее понятие о численных методах решения уравнений и систем уравнений, приближенный характер результата решения.
14	Mathcad. Представление данных в виде графиков разного типа.
15	Mathcad. Основные операторы и их использование.
16	Mathcad. Символьные вычисления. Вычисление интегралов, производных.
17	Mathcad как специализированная среда для решения математических задач: обзор основных возможностей.
18	MS Excel и особенности организации матричных операций.
19	MS Excel как средство создания и управления базами данных. Организация фильтрации данных.
20	Основные компоненты банка данных по физико-химическим свойствам веществ и смесей. Использование банка данных в расчетах.

21	Специализированные информационные ресурсы для автоматизации расчетов в экологии и инженерной защите окружающей среды
----	--

5.2.2 Типовые тестовые задания

Не предусмотрены.

5.2.3 Типовые практико-ориентированные задания (задачи, кейсы)

Примеры практико-ориентированных заданий приведены в приложении к программе дисциплины.

5.3 Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, владений (навыков и (или) практического опыта деятельности)

5.3.1 Условия допуска обучающегося к промежуточной аттестации и порядок ликвидации академической задолженности

Проведение промежуточной аттестации регламентировано локальным нормативным актом СПбГУПТД «Положение о проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся»

5.3.2 Форма проведения промежуточной аттестации по дисциплине

Устная + Письменная + Компьютерное тестирование Иная

5.3.3 Особенности проведения промежуточной аттестации по дисциплине

- время на подготовку ответов по вопросам составляет 30 минут;
- при защите курсовой работы демонстрация студентами работоспособных программных продуктов, представленных в пояснительной записке, обязательна.

6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

6.1 Учебная литература

Автор	Заглавие	Издательство	Год издания	Ссылка
6.1.1 Основная учебная литература				
Мокрова, Н. В., Суркова, Л. Е.	Численные методы в инженерных расчетах	Саратов: Ай Пи Эр Медиа	2018	http://www.iprbookshop.ru/71739.html
Бусыгин Н. Ю.	Методы и средства автоматизированных расчетов в экологии. Решение задач в среде Mathcad	СПб.: СПбГУПТД	2014	http://publish.sutd.ru/tp_ext_inf_publish.php?id=2178
Краюткина, Е. В.	Численные методы в научных расчетах	Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет	2019	http://www.iprbookshop.ru/99474.html
6.1.2 Дополнительная учебная литература				
Олегин, И. П., Красноруцкий, Д. А.	Введение в численные методы	Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет	2018	http://www.iprbookshop.ru/91332.html
Бусыгин Н. Ю.	Методы и средства автоматизированных расчетов в экологии. Курсовая работа	СПб.: СПбГУПТД	2015	http://publish.sutd.ru/tp_ext_inf_publish.php?id=2249

Заусаев, А. Ф., Романюк, М. А.	Дискретные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений	Самара: Самарский государственный технический университет, ЭБС АСВ	2018	http://www.iprbookshop.ru/90484.html
Щербаков, И. Н., Любченко, С. Н., Туполова, Ю. П., Бородкин, С. А.	Численные методы в физико-химическом эксперименте. Программирование в MS Excel. В 2 частях. Ч.1	Ростов-на-Дону, Таганрог: Издательство Южного федерального университета	2024	https://www.iprbookshop.ru/138030.html
Тарасенко, Е. О., Алиханов, А. А., Гладков, А. В.	Численные методы	Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет	2022	https://www.iprbookshop.ru/135776.html

6.2 Перечень профессиональных баз данных и информационно-справочных систем

Информационная система «Единое окно доступа к образовательным ресурсам. Раздел. Информатика и информационные технологии» [Электронный ресурс]. URL: http://window.edu.ru/catalog/?p_rubr=2.2.75.6

Информационная система «Единое окно доступа к образовательным ресурсам. Раздел. Вычислительная математика. Математическое моделирование. Численные методы» [Электронный ресурс]. URL: http://window.edu.ru/catalog/resources?p_rubr=2.2.74.12.57

Электронно-библиотечная система IPRbooks [Электронный ресурс]. URL: <http://www.iprbookshop.ru/>

Информационно-образовательная среда СПбГУПТД <https://portal.sutd.ru/> с образовательными ресурсами по дисциплине, в том числе видеоматериалами для практических занятий.

Информационно-образовательная среда заочного обучения СПбГУПТД <http://edu.sutd.ru/moodle/>.

6.3 Перечень лицензионного и свободно распространяемого программного обеспечения

MicrosoftOfficeProfessional

Microsoft Windows

Mathcad Education – University Edition Term

6.4 Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине

Аудитория	Оснащение
Компьютерный класс	Мультимедийное оборудование, компьютерная техника с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду
Учебная аудитория	Специализированная мебель, доска

Приложение

рабочей программы дисциплины Численные методы в химико-технологических расчетах

наименование дисциплины

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

наименование ОП (профиля): Техника и технология ресурсосберегающих процессов и защита окружающей среды

5.2.3 Типовые практико-ориентированные задания (задачи, кейсы)

Общая постановка задачи: определить тип уравнений или системы уравнений, привести при необходимости к стандартному виду, выбрать численный метод решения, программный продукт для решения и найти это решение.

Вариант 1.

Решить систему линейных алгебраических уравнений теплового баланса относительно неизвестных температур t_{11} , t_{12} , t_1^k , t_2^k , t_{22} , t_{23} .

$$\begin{cases} G_1 c_1 (t_1^0 - t_{11}) = K_1 \frac{F}{3} (t_{11} - t_2^k); \\ G_2 c_2 (t_2^k - t_{22}) = K_1 \frac{F}{3} (t_{11} - t_2^k); \\ G_2 c_2 (t_{11} - t_{12}) = K_2 \frac{F}{3} (t_{12} - t_{22}); \\ G_1 c_1 (t_{22} - t_{23}) = K_2 \frac{F}{3} (t_{12} - t_{22}); \\ G_1 c_1 (t_{12} - t_1^k) = K_3 \frac{F}{3} (t_1^k - t_{23}); \\ G_2 c_2 (t_{23} - t_2^0) = K_3 \frac{F}{3} (t_1^k - t_{23}). \end{cases}$$

Исходные данные для расчета:

$$G_1 = 2 \text{ кг/с}; G_2 = 4 \text{ кг/с}; c_1 = 3900 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}; c_2 = 2100 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$F = 24 \text{ м}^2; K_1 = 160; K_2 = 140; K_3 = 120; t_1^0 = 95^\circ\text{C}; t_2^0 = 15^\circ\text{C}.$$

Вариант 2.

Решить систему линейных алгебраических уравнений материального баланса относительно неизвестных расходов G_{ij}

$$\begin{cases} G_{01} + G_{41} = G_{12}; \\ G_{12} + G_{52} = G_{23}; \\ G_{23} + G_{63} = G_{30}; \\ G_{04} = G_{41} + G_{45}; \\ G_{45} + G_{05} = G_{52} + G_{56}; \\ G_{56} = G_{63} + G_{60}; \\ G_{45} = 0.6G_{04}; \\ G_{52} = 0.3(G_{45} + G_{05}); \\ G_{60} = 0.9G_{56}. \end{cases}$$

Исходные данные для расчета:

$$G_{01} = 5000 \text{ кг/ч}; G_{04} = 4000 \text{ кг/ч}; G_{05} = 3000 \text{ кг/ч}.$$

Вариант 3.

Решить систему уравнений теплового и материального балансов относительно неизвестных расходов D , W_1 , W_2 , W_3 :

$$Dr_1 = 1,03[G_H C_H(t_{\kappa 1} - t_H) + W_1(I_{\text{вн}1} - C_{\sigma} t_{\kappa 1}) + Q_{\kappa 1}];$$

$$W_1 r_2 = 1,03[(G_H - W_1)C_1(t_{\kappa 2} - t_{\kappa 1}) + W_2(I_{\text{вн}2} - C_{\sigma} t_{\kappa 2}) + Q_{\kappa 2}];$$

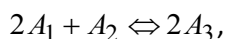
$$W_2 r_3 = 1,03[(G_H - W_1 - W_2)C_2(t_{\kappa 3} - t_{\kappa 2}) + W_3(I_{\text{вн}3} - C_{\sigma} t_{\kappa 3}) + Q_{\kappa 3}];$$

$$W = W_1 + W_2 + W_3.$$

Здесь $r_1=2024500$ Дж/кг; $r_2=2053550$ Дж/кг; $r_3=2129900$ Дж/кг;

$G_H=11.12$ кг/с; $W=9.72$ кг/с; $t_H=168.3^\circ\text{C}$; $t_{\kappa 1}=170.7^\circ\text{C}$; $t_{\kappa 2}=146.7^\circ\text{C}$; $t_{\kappa 3}=67.0^\circ\text{C}$; $C_{\sigma}=4180$ Дж/(кг·К); $C_H=3900$ Дж/(кг·К); $C_1=3770$ Дж/(кг·К); $C_2=3561$ Дж/(кг·К); $I_{\text{вн}1}=2210000$ Дж/кг; $I_{\text{вн}2}=2180000$ Дж/кг; $I_{\text{вн}3}=2116000$ Дж/кг; $Q_{\kappa 1}=240$ Вт, $Q_{\kappa 2}=220$ Вт, $Q_{\kappa 3}=200$ Вт.

Вариант 4. В аппарате непрерывного действия с интенсивным перемешиванием протекает обратимая химическая реакция



где A_1, A_2, A_3 – реагенты.

Время пребывания вещества в аппарате τ . Если обозначить начальные концентрации компонентов как C_1^0, C_2^0, C_3^0 , а конечные C_1^k, C_2^k, C_3^k , константы скорости прямой реакции k_1 , обратной k_2 , то для расчета конечных концентраций компонентов можно использовать соотношения:

$$\frac{C_2^k - C_2^0}{-1} = \frac{C_1^k - C_1^0}{-2};$$

$$\frac{C_3^k - C_3^0}{2} = \frac{C_1^k - C_1^0}{-2};$$

$$C_1^k - C_1^0 = \tau \left[-2k_1(C_1^k)^2 \cdot C_2^k + 2k_2(C_3^k)^2 \right].$$

Если из первых двух уравнений выразить C_2^k и C_3^k через C_1^k и подставить полученные выражения в последнее соотношение, то оно превращается в нелинейное уравнение с неизвестной величиной C_1^k , решить которое можно численно.

Рассчитать конечные концентрации компонентов.

Исходные данные для контрольного расчета

$$C_1^0 = 0,9; \quad C_2^0 = 0,6; \quad C_3^0 = 0;$$

$$k_1 = 0,3; \quad k_2 = 0,2; \quad \tau = 6.$$

Вариант 5. В некоторых технологических процессах перемещение жидкостей из одной емкости в другую производится перекачиванием сжатым воздухом (над поверхностью жидкости в исходном баке создается повышенное давление P_1 , за счет чего производится переток жидкости, в том числе при наличии перепада высот H между баками).

Обычно при расчете определяют расход жидкости Q по формуле

$$Q = w\pi \cdot d^2 / 4,$$

где w – скорость жидкости, м/с; d – диаметр трубопровода, м.

Скорость w определяют решением уравнения

$$H + \frac{w^2}{2g} \left[1 + \lambda(w) \frac{L}{d} + \sum \xi \right] - \frac{P_1 - P_2}{\rho \cdot g} = 0,$$

где L – длина трубопровода, м; ρ – плотность жидкости, кг/м³; P_1, P_2 – давление в исходном и приемных баках, Па; $\lambda(w)$ – коэффициент трения, который в некоторых режимах рассчитывается по формуле

$$\lambda = 0,11(k_3 / d + 68 / \text{Re})^{0,25}; \quad \text{Re} = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu}.$$

Рассчитать расход Q .

Данные для контрольного расчета:

$$H = 13 \text{ м}; \quad L = 25 \text{ м}; \quad d = 0,057 \text{ м}; \quad \sum \xi = 8;$$

$$P_1 = 250000 \text{ Па}; \quad P_2 = 100000 \text{ Па}; \quad k_3 = 0,0001 \text{ м};$$

$$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3; \quad \mu = 0,0011 \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Вариант 6*. Интенсивность передачи тепла в теплообменных аппаратах характеризуется коэффициентом теплопередачи K :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum r_{cm} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

где величины α_1, α_2 называются коэффициентами теплоотдачи, $\sum r_{cm}$ – сумма термических сопротивлений материала стенки и загрязнений на стенках. Коэффициенты теплоотдачи зависят от температуры стенки t_{cm} , величина которой обычно неизвестна, но может быть оценена из уравнения теплового баланса, записанного, например, в форме

$$\alpha_1 \Delta t_1 - \alpha_2 [t_1 - t_2 - \Delta t_1 (1 + \alpha_1 \sum r_{cm})] = 0.$$

В последнем уравнении t_1, t_2 – средние температуры теплоносителей, °С, Δt_1 – разность температур теплоносителя и стенки $\Delta t_1 = t_1 - t_{cm}$. Коэффициент теплоотдачи α_1 определяется по уравнению

$$\alpha_1 = 2,044 \sqrt{\frac{\lambda_1^3 \rho_1^2 r}{\mu \Delta t_1 H}},$$

где H – высота трубок, $\lambda_1, \rho_1, r, \mu_1$ – соответственно теплопроводность, плотность, теплота парообразования, динамическая вязкость воды и водяного пара, величины которых зависят от температуры t_1 и могут быть рассчитаны по соответствующим функциям:

$$\lambda(t) = 0,5579 + 0,001804t;$$

$$\rho(t) = 1000 [1 - \beta(t) \cdot (t - 20)]; \quad \text{где } \beta(t) = 10^{-5} \cdot (1,40773 + 0,0613214t);$$

$$r(t) = 1000 \cdot e^{7,742 - 0,055 \ln\left(\frac{t}{101}\right)}; \quad \mu(t) = \frac{1,792 \cdot 10^{-3}}{1 + 0,037t + 0,00022t^2}.$$

Решить уравнение теплового баланса относительно Δt_1 . Рассчитать и вывести в качестве результата также величины α_1, K .

Для контрольного расчета использовать исходные данные

$$t_1 = 120; t_2 = 20; H = 3; \alpha_2 = 85; \sum r_{cm} = 0,0004.$$

Вариант 7.

Решить систему нелинейных алгебраических уравнений теплового баланса относительно неизвестных температур $t_{11}, t_1^k, t_2^k, t_{21}$.

$$G_1 [c_1(t_1^0) \cdot t_1^0 - c_1(t_{11}) \cdot t_{11}] = K_1 \frac{F}{2} (t_{11} - t_{21});$$

$$G_2 [c_2(t_{21}) \cdot t_{21} - c_2(t_2^0) \cdot t_2^0] = K_1 \frac{F}{2} (t_{11} - t_{21});$$

$$G_1 [c_1(t_{11}) \cdot t_{11} - c_1(t_1^k) \cdot t_1^k] = K_2 \frac{F}{2} (t_1^k - t_2^k);$$

$$G_2 [c_2(t_2^k) \cdot t_2^k - c_2(t_{21}) \cdot t_{21}] = K_2 \frac{F}{2} (t_1^k - t_2^k)$$

Удельная теплоемкость потоков нелинейно зависит от температуры. Пусть

$$c_1(T) = 10910 - 85,316T + 0,2579T^2 - 22,495 \cdot 10^{-5} T^3;$$

$$c_2(T) = 4759 - 21,35T + 0,0424T^2.$$

Здесь T – температура, К.

Исходные данные для расчета:

$$G_1 = 2 \text{ кг/с}; G_2 = 4 \text{ кг/с}; t_1^0 = 95^\circ\text{C}; t_2^0 = 15^\circ\text{C}; F = 24 \text{ м}^2;$$

$$K_1 = 160 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}; K_2 = 140 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}.$$

Вариант 8.

Решить систему нелинейных алгебраических уравнений относительно конечных концентраций компонентов сложной химической реакции, протекающей в реакторе идеального смешения:

$$C_1^k - C_1^0 = \tau \cdot \left[-k_1 C_1^k C_2^k + k_2 (C_3^k)^2 \right]$$

$$C_2^k - C_2^0 = C_1^k - C_1^0$$

$$C_3^k - C_3^0 = \tau \cdot \left[2k_1 C_1^k C_2^k - 2k_2 (C_3^k)^2 - k_3 C_3^k + k_4 C_4^k (C_5^k)^2 \right]$$

$$C_4^k - C_4^0 = \tau \cdot \left[k_3 C_3^k - k_4 C_4^k (C_5^k)^2 \right]$$

$$C_5^k - C_5^0 = 2(C_4^k - C_4^0)$$

Исходные данные для расчета: $\tau = 5$; $C^0 = \begin{pmatrix} 0.8 \\ 0.6 \\ 0.2 \\ 0 \\ 0.4 \end{pmatrix}$; $k = \begin{pmatrix} 0.7 \\ 0.3 \\ 0.2 \\ 0.5 \end{pmatrix}$

Вариант 9. Изменение уровня h_1 и h_2 в двух последовательно соединенных проточных отстойниках во времени определяется уравнениями:

$$\frac{dh_1}{d\tau} = -\frac{K_1 \sqrt{\rho g h_1}}{S_1};$$

$$\frac{dh_2}{d\tau} = \frac{K_1 \sqrt{\rho g h_1} - K_2 \sqrt{P_0 + \rho g h_2} - P_1}{S_2};$$

Рассчитать профиль изменения уровней в диапазоне τ от 0 до 100, если сечения аппаратов

$$S_1 = S_2 = 100 \text{ м}^2; K_1 = 0,01; K_2 = 0,02; \rho = 1000 \text{ кг/м}^3,$$

начальные уровни $h_1 = 5 \text{ м}, h_2 = 7 \text{ м}$.

$$\tau_0 = 0; \tau_k = 100;$$

$$P_0 = 101300; P_1 = 70000 \text{ Па}.$$

Результаты вывести в виде таблицы и графика.

*Вариант 10**. При моделировании неизотермического химического реактора учитывается изменение в ходе реакции концентраций компонентов C_i и температуры t , причем константы скоростей реакции k_j в свою очередь являются функциями температуры. Пусть изменение параметров описывается уравнениями:

$$\begin{aligned}\frac{dC_1}{d\tau} &= -k_1 C_1 C_2^2; \\ \frac{dC_2}{d\tau} &= -2k_1 C_1 C_2^2; \\ \frac{dC_3}{d\tau} &= 2k_1 C_1 C_2^2; \\ \frac{dt}{d\tau} &= \frac{1}{\omega} \cdot \frac{dC_1}{d\tau} \cdot \frac{\Delta H}{C\rho} - \frac{KF(t-t_w)}{GCL}; \\ k_1 &= k_0 e^{-\frac{E}{RT}}.\end{aligned}$$

Решить систему уравнений на интервале $[0, \tau_k]$.

Исходные данные для контрольного расчета

$$k_0 = 0,5; \quad E = 2000; \quad R = 8,31; \quad G = 2; \quad \omega = 0,5; \quad \Delta H = -100000;$$

$$C = 3900; \quad \rho = 980; \quad K = 220; \quad F = 24; \quad L = 3; \quad t_w = 20; \quad \tau_k = 3.$$

Начальные значения параметров (функций)

$$C_1^0 = 0,85; \quad C_2^0 = 0,5; \quad C_3^0 = 0; \quad t^0 = 70.$$

Приложение 1 к РПД

Приложение

рабочей программы дисциплины Численные методы в химико-технологических расчетах

наименование дисциплины

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

наименование ОП (профиля): Техника и технология ресурсосберегающих процессов и защита окружающей среды

5.2.3 Типовые практико-ориентированные задания (задачи, кейсы)

Общая постановка задачи: определить тип уравнений или системы уравнений, привести при необходимости к стандартному виду, выбрать численный метод решения, программный продукт для решения и найти это решение.

Вариант 1.

Решить систему линейных алгебраических уравнений теплового баланса относительно неизвестных температур $t_{11}, t_{12}, t_1^k, t_2^k, t_{22}, t_{23}$.

$$\left\{ \begin{array}{l} G_1 c_1 (t_1^0 - t_{11}) = K_1 \frac{F}{3} (t_{11} - t_2^k); \\ G_2 c_2 (t_2^k - t_{22}) = K_1 \frac{F}{3} (t_{11} - t_2^k); \\ G_2 c_2 (t_{11} - t_{12}) = K_2 \frac{F}{3} (t_{12} - t_{22}); \\ G_1 c_1 (t_{22} - t_{23}) = K_2 \frac{F}{3} (t_{12} - t_{22}); \\ G_1 c_1 (t_{12} - t_1^k) = K_3 \frac{F}{3} (t_1^k - t_{23}); \\ G_2 c_2 (t_{23} - t_2^0) = K_3 \frac{F}{3} (t_1^k - t_{23}). \end{array} \right.$$

Исходные данные для расчета:

$$G_1 = 2 \text{ кг/с}; G_2 = 4 \text{ кг/с}; c_1 = 3900 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}; c_2 = 2100 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$F = 24 \text{ м}^2; K_1 = 160; K_2 = 140; K_3 = 120; t_1^0 = 95^\circ\text{C}; t_2^0 = 15^\circ\text{C}.$$

Вариант 2.

Решить систему линейных алгебраических уравнений материального баланса относительно неизвестных расходов G_{ij}

$$\begin{cases} G_{01} + G_{41} = G_{12}; \\ G_{12} + G_{52} = G_{23}; \\ G_{23} + G_{63} = G_{30}; \\ G_{04} = G_{41} + G_{45}; \\ G_{45} + G_{05} = G_{52} + G_{56}; \\ G_{56} = G_{63} + G_{60}; \\ G_{45} = 0.6G_{04}; \\ G_{52} = 0.3(G_{45} + G_{05}); \\ G_{60} = 0.9G_{56}. \end{cases}$$

Исходные данные для расчета:

$$G_{01} = 5000 \text{ кг/ч}; G_{04} = 4000 \text{ кг/ч}; G_{05} = 3000 \text{ кг/ч}.$$

Вариант 3.

Решить систему уравнений теплового и материального балансов относительно неизвестных расходов D , W_1 , W_2 , W_3 :

$$Dr_1 = 1,03[G_H C_H(t_{\kappa 1} - t_H) + W_1(I_{\text{вн}1} - C_{\text{в}} t_{\kappa 1}) + Q_{\kappa 1}];$$

$$W_1 r_2 = 1,03[(G_H - W_1)C_1(t_{\kappa 2} - t_{\kappa 1}) + W_2(I_{\text{вн}2} - C_{\text{в}} t_{\kappa 2}) + Q_{\kappa 2}];$$

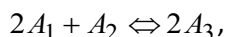
$$W_2 r_3 = 1,03[(G_H - W_1 - W_2)C_2(t_{\kappa 3} - t_{\kappa 2}) + W_3(I_{\text{вн}3} - C_{\text{в}} t_{\kappa 3}) + Q_{\kappa 3}];$$

$$W = W_1 + W_2 + W_3.$$

Здесь $r_1=2024500$ Дж/кг; $r_2=2053550$ Дж/кг; $r_3=2129900$ Дж/кг;

$G_H=11.12$ кг/с; $W=9.72$ кг/с; $t_H=168.3^\circ\text{C}$; $t_{\kappa 1}=170.7^\circ\text{C}$; $t_{\kappa 2}=146.7^\circ\text{C}$; $t_{\kappa 3}=67.0^\circ\text{C}$; $C_{\text{в}}=4180$ Дж/(кг·К); $C_H=3900$ Дж/(кг·К); $C_1=3770$ Дж/(кг·К); $C_2=3561$ Дж/(кг·К); $I_{\text{вн}1}=2210000$ Дж/кг; $I_{\text{вн}2}=2180000$ Дж/кг; $I_{\text{вн}3}=2116000$ Дж/кг; $Q_{\kappa 1}=240$ Вт, $Q_{\kappa 2}=220$ Вт, $Q_{\kappa 3}=200$ Вт.

Вариант 4. В аппарате непрерывного действия с интенсивным перемешиванием протекает обратимая химическая реакция



где A_1, A_2, A_3 – реагенты.

Время пребывания вещества в аппарате τ . Если обозначить начальные концентрации компонентов как C_1^0, C_2^0, C_3^0 , а конечные C_1^k, C_2^k, C_3^k , константы скорости прямой реакции k_1 , обратной k_2 , то для расчета конечных концентраций компонентов можно использовать соотношения:

$$\frac{C_2^k - C_2^0}{-1} = \frac{C_1^k - C_1^0}{-2};$$

$$\frac{C_3^k - C_3^0}{2} = \frac{C_1^k - C_1^0}{-2};$$

$$C_1^k - C_1^0 = \tau \left[-2k_1(C_1^k)^2 \cdot C_2^k + 2k_2(C_3^k)^2 \right].$$

Если из первых двух уравнений выразить C_2^k и C_3^k через C_1^k и подставить полученные выражения в последнее соотношение, то оно превращается в нелинейное уравнение с неизвестной величиной C_1^k , решить которое можно численно.

Рассчитать конечные концентрации компонентов.

Исходные данные для контрольного расчета

$$\begin{aligned} C_1^0 &= 0,9; & C_2^0 &= 0,6; & C_3^0 &= 0; \\ k_1 &= 0,3; & k_2 &= 0,2; & \tau &= 6. \end{aligned}$$

Вариант 5. В некоторых технологических процессах перемещение жидкостей из одной емкости в другую производится перекачиванием сжатым воздухом (над поверхностью жидкости в исходном баке создается повышенное давление P_1 , за счет чего производится переток жидкости, в том числе при наличии перепада высот H между баками).

Обычно при расчете определяют расход жидкости Q по формуле

$$Q = w\pi \cdot d^2 / 4,$$

где w – скорость жидкости, м/с; d – диаметр трубопровода, м.

Скорость w определяют решением уравнения

$$H + \frac{w^2}{2g} \left[1 + \lambda(w) \frac{L}{d} + \sum \xi \right] - \frac{P_1 - P_2}{\rho \cdot g} = 0,$$

где L – длина трубопровода, м; ρ – плотность жидкости, кг/м³; P_1, P_2 – давление в исходном и приемных баках, Па; $\lambda(w)$ – коэффициент трения, который в некоторых режимах рассчитывается по формуле

$$\lambda = 0,11(k_s / d + 68 / \text{Re})^{0,25}; \quad \text{Re} = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu}.$$

Рассчитать расход Q .

Данные для контрольного расчета:

$$H = 13 \text{ м}; \quad L = 25 \text{ м}; \quad d = 0.057 \text{ м}; \quad \sum \xi = 8;$$
$$P_1 = 250000 \text{ Па}; \quad P_2 = 100000 \text{ Па}; \quad k_3 = 0,0001 \text{ м};$$
$$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3; \quad \mu = 0,0011 \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

*Вариант б**. Интенсивность передачи тепла в теплообменных аппаратах характеризуется коэффициентом теплопередачи K :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum r_{cm} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

где величины α_1, α_2 называются коэффициентами теплоотдачи, $\sum r_{cm}$ – сумма термических сопротивлений материала стенки и загрязнений на стенках. Коэффициенты теплоотдачи зависят от температуры стенки t_{cm} , величина которой обычно неизвестна, но может быть оценена из уравнения теплового баланса, записанного, например, в форме

$$\alpha_1 \Delta t_1 - \alpha_2 [t_1 - t_2 - \Delta t_1 (1 + \alpha_1 \sum r_{cm})] = 0.$$

В последнем уравнении t_1, t_2 – средние температуры теплоносителей, °С, Δt_1 – разность температур теплоносителя и стенки $\Delta t_1 = t_1 - t_{cm}$. Коэффициент теплоотдачи α_1 определяется по уравнению

$$\alpha_1 = 2,044 \sqrt{\frac{\lambda_1^3 \rho_1^2 r}{\mu \Delta t_1 H}},$$

где H – высота трубок, $\lambda_1, \rho_1, r, \mu_1$ – соответственно теплопроводность, плотность, теплота парообразования, динамическая вязкость воды и водяного пара, величины которых зависят от температуры t_1 и могут быть рассчитаны по соответствующим функциям:

$$\lambda(t) = 0,5579 + 0,001804t;$$
$$\rho(t) = 1000 [1 - \beta(t) \cdot (t - 20)]; \quad \text{где } \beta(t) = 10^{-5} \cdot (1,40773 + 0,0613214t);$$
$$r(t) = 1000 \cdot e^{7,742 - 0,055 \ln\left(\frac{t}{101}\right)}; \quad \mu(t) = \frac{1,792 \cdot 10^{-3}}{1 + 0,037t + 0,00022t^2}.$$

Решить уравнение теплового баланса относительно Δt_1 . Рассчитать и вывести в качестве результата также величины α_1, K .

Для контрольного расчета использовать исходные данные

$$t_1 = 120; \quad t_2 = 20; \quad H = 3; \quad \alpha_2 = 85; \quad \sum r_{cm} = 0,0004.$$

Вариант 7.

Решить систему нелинейных алгебраических уравнений теплового баланса относительно неизвестных температур t_{11} , t_1^k , t_2^k , t_{21} .

$$\begin{aligned}G_1 [c_1(t_1^0) \cdot t_1^0 - c_1(t_{11}) \cdot t_{11}] &= K_1 \frac{F}{2} (t_{11} - t_{21}); \\G_2 [c_2(t_{21}) \cdot t_{21} - c_2(t_2^0) \cdot t_2^0] &= K_1 \frac{F}{2} (t_{11} - t_{21}); \\G_1 [c_1(t_{11}) \cdot t_{11} - c_1(t_1^k) \cdot t_1^k] &= K_2 \frac{F}{2} (t_1^k - t_2^k); \\G_2 [c_2(t_2^k) \cdot t_2^k - c_2(t_{21}) \cdot t_{21}] &= K_2 \frac{F}{2} (t_1^k - t_2^k).\end{aligned}$$

Удельная теплоемкость потоков нелинейно зависит от температуры. Пусть

$$\begin{aligned}c_1(T) &= 10910 - 85,316T + 0,2579T^2 - 22,495 \cdot 10^{-5}T^3; \\c_2(T) &= 4759 - 21,35T + 0,0424T^2.\end{aligned}$$

Здесь T – температура, К.

Исходные данные для расчета:

$$\begin{aligned}G_1 &= 2 \text{ кг/с}; G_2 = 4 \text{ кг/с}; t_1^0 = 95^\circ\text{C}; t_2^0 = 15^\circ\text{C}; F = 24 \text{ м}^2; \\K_1 &= 160 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}; K_2 = 140 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}.\end{aligned}$$

Вариант 8.

Решить систему нелинейных алгебраических уравнений относительно конечных концентраций компонентов сложной химической реакции, протекающей в реакторе идеального смешения:

$$\begin{aligned}C_1^k - C_1^0 &= \tau \cdot [-k_1 C_1^k C_2^k + k_2 (C_3^k)^2] \\C_2^k - C_2^0 &= C_1^k - C_1^0 \\C_3^k - C_3^0 &= \tau \cdot [2k_1 C_1^k C_2^k - 2k_2 (C_3^k)^2 - k_3 C_3^k + k_4 C_4^k (C_5^k)^2] \\C_4^k - C_4^0 &= \tau \cdot [k_3 C_3^k - k_4 C_4^k (C_5^k)^2] \\C_5^k - C_5^0 &= 2(C_4^k - C_4^0)\end{aligned}$$

Исходные данные для расчета: $\tau = 5$; $C^0 = \begin{pmatrix} 0.8 \\ 0.6 \\ 0.2 \\ 0 \\ 0.4 \end{pmatrix}$; $k = \begin{pmatrix} 0.7 \\ 0.3 \\ 0.2 \\ 0.5 \end{pmatrix}$

Вариант 9. Изменение уровня h_1 и h_2 в двух последовательно соединенных проточных отстойниках во времени определяется уравнениями:

$$\frac{dh_1}{d\tau} = -\frac{K_1\sqrt{\rho gh_1}}{S_1};$$

$$\frac{dh_2}{d\tau} = \frac{K_1\sqrt{\rho gh_1} - K_2\sqrt{P_0 + \rho gh_2 - P_1}}{S_2};$$

Рассчитать профиль изменения уровней в диапазоне τ от 0 до 100, если сечения аппаратов

$$S_1 = S_2 = 100 \text{ м}^2; K_1 = 0,01; K_2 = 0,02; \rho = 1000 \text{ кг/м}^3,$$

начальные уровни $h_1 = 5 \text{ м}$, $h_2 = 7 \text{ м}$.

$$\tau_0 = 0; \quad \tau_k = 100;$$

$$P_0 = 101300; \quad P_1 = 70000 \text{ Па}.$$

Результаты вывести в виде таблицы и графика.

Вариант 10.* При моделировании неизотермического химического реактора учитывается изменение в ходе реакции концентраций компонентов C_i и температуры t , причем константы скоростей реакции k_j в свою очередь являются функциями температуры. Пусть изменение параметров описывается уравнениями:

$$\frac{dC_1}{d\tau} = -k_1 C_1 C_2^2;$$

$$\frac{dC_2}{d\tau} = -2k_1 C_1 C_2^2;$$

$$\frac{dC_3}{d\tau} = 2k_1 C_1 C_2^2;$$

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{dC_1}{d\tau} \cdot \frac{\Delta H}{C\rho} - \frac{KF(t - t_w)}{GCL};$$

$$k_1 = k_0 e^{-\frac{E}{RT}}.$$

Решить систему уравнений на интервале $[0, \tau_k]$.

Исходные данные для контрольного расчета

$$k_0 = 0,5; \quad E = 2000; \quad R = 8,31; \quad G = 2; \quad \omega = 0,5; \quad \Delta H = -100000;$$

$$C = 3900; \quad \rho = 980; \quad K = 220; \quad F = 24; \quad L = 3; \quad t_w = 20; \quad \tau_k = 3.$$

Начальные значения параметров (функций)

$$C_1^0 = 0,85; \quad C_2^0 = 0,5; \quad C_3^0 = 0; \quad t^0 = 70.$$