

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

М. В. Хомякова

ДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины для студентов,
обучающихся в бакалавриате по направлению подготовки
15.03.02 Технологические машины и оборудование

Калининград
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
2023

УДК 621.798

Рецензент

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии продуктов питания
ФГБОУ ВО «КГТУ» М. Н. Альшевская

Хомякова, М. В.

Динамика процессов пищевых производств: учеб.-метод. пособие по изучению дисциплины для студ. бакалавриата по напр. подгот. 15.03.02 Технологические машины и оборудование / М. В. Хомякова. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2022. – 41 с.

В учебно-методическом пособии по изучению дисциплины «Динамика процессов пищевых производств» представлены учебно-методические материалы по освоению тем лекционного курса, включающие подробный план лекций по каждой изучаемой теме, вопросы для самоконтроля, материалы по подготовке к практическим занятиям, отражены рекомендации для выполнения контрольной работы студентами заочной формы обучения.

Табл. 6, рис. 9, список лит. – 6 наименований

Учебное пособие рассмотрено и рекомендовано к опубликованию кафедрой инжиниринга технологического оборудования 21 апреля 2022 г., протокол № 3

Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины рекомендовано к изданию в качестве локального электронного методического материала для использования в учебном процессе методической комиссией института агроинженерии и пищевых систем ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» 30 апреля 2023 г., протокол № 4

УДК 621.798

© Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Калининградский государственный
технический университет», 2023 г.
© Хомякова М. В., 2023 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....	7
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ.....	14
3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	35
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	38
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	39

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Динамика процессов пищевых производств» предназначена для подготовки обучающихся в области технологических машин и оборудования.

Целью освоения дисциплины является формирование знаний в области динамических характеристик основных процессов пищевых производств.

Дисциплина «Динамика процессов пищевых производств» относится к элективному модулю «Машины и аппараты пищевых производств» части ОПОП ВО по направлению подготовки 15.03.02 Технологические машины и оборудование, формируемой участниками образовательных отношений.

Целью освоения дисциплины является формирование знаний в области переходных процессов пищевой промышленности и характера изменения их параметров.

Задачи изучения дисциплины:

-освоение навыков составления дифференциальных уравнений переходных процессов, связанных с движением жидкости, перемешиванием, теплообменом.

-формирование представления о математическом описании переходных процессов, использовании результатов решения дифференциальных уравнений для анализа работы аппаратов, используемых в пищевой промышленности.

- умение определять динамические характеристики аппаратов, необходимые для задания основных параметров их работы.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен знать:

- характер изменения параметров технологических процессов в пусковой период, а также при переходе работы аппарата с одного режима работы на другой;

- роль динамических характеристик аппаратов в составлении уравнений, определяющих работу аппаратов в переходном периоде;

уметь:

- составлять дифференциальные уравнения переходных процессов, связанных с перемешиванием, с теплообменом, с сушкой;

- решать дифференциальные уравнения с целью описания работы аппаратов при использовании их динамических характеристик;

владеть:

- основными понятиями о подобии физических явлений, теории тепло- и массообмена.

Знания, умения и навыки, полученные при освоении данной дисциплины, используются в дальнейшей профессиональной деятельности.

При реализации дисциплины «Динамика процессов пищевых производств» организуется практическая подготовка путем проведения практических занятий, предусматривающих участие обучающихся в

выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

Для успешного освоения дисциплины «Динамика процессов пищевых производств», студент должен активно работать на лекционных и практических занятиях, организовывать самостоятельную внеаудиторную деятельность.

Для оценивания поэтапного формирования результатов освоения дисциплины (текущий контроль) предусмотрены практические задания. Решение практических задач, обучающимися проводится на практических занятиях после изучения соответствующих тем.

Промежуточная аттестация по завершению курса проводится в виде зачета, к которому допускаются студенты очной формы обучения, освоившие темы курса и выполнившие практические работы и студенты заочной формы обучения, освоившие темы курса, выполнившие практические и контрольную работы.

Для оценки результатов освоения дисциплины используются:

- оценочные средства поэтапного формирования результатов освоения;
- оценочные средства для промежуточной аттестации по дисциплине.

К оценочным средствам поэтапного формирования результатов освоения дисциплины относятся:

- задания и контрольные вопросы к практическим работам;
- задания к контрольной работе (заочная форма обучения).

Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в форме зачета, который выставляется по результатам прохождения всех видов текущего контроля успеваемости.

К зачету допускаются студенты:

- положительно аттестованные по результатам освоения дисциплины;
- получившие положительную оценку при выполнении контрольной работы (для заочной формы обучения).

Универсальная система оценивания результатов обучения включает в себя системы оценок: 1) «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно»; 2) «зачтено», «не зачтено»; 3) 100-балльную (процентную) систему и правило перевода оценок в пятибалльную систему.

Таблица 1 – Система оценок и критерии выставления оценки

Критерий	Система оценок		2	3	4	5
			0–40 %	41–60 %	61–80 %	81–100 %
			«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
			«не зачтено»	«зачтено»		
1. Системность и полнота знаний в отношении изучаемых объектов	Обладает частичными и разрозненными знаниями, которые не может научно- корректно		Обладает минимальным набором знаний, необходимым для системного	Обладает набором знаний, достаточным для системного взгляда на	Обладает полнотой знаний и системным взглядом на изучаемый объект	

Система оценок Критерий	2	3	4	5
	0–40 %	41–60 %	61–80 %	81–100 %
	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
	«не зачтено»	«зачтено»		
	связывать между собой (только некоторые из которых может связывать между собой)	взгляда на изучаемый объект	изучаемый объект	
2. Работа с информацией	Не в состоянии находить необходимую информацию, либо в состоянии находить отдельные фрагменты информации в рамках поставленной задачи	Может найти необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, интерпретировать и систематизировать необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, систематизировать необходимую информацию, а также выявить новые, дополнительные источники информации в рамках поставленной задачи
3. Научное осмысление изучаемого явления, процесса, объекта	Не может делать научно корректных выводов из имеющихся у него сведений, в состоянии проанализировать только некоторые из имеющихся у него сведений	В состоянии осуществлять научно корректный анализ предоставленной информации	В состоянии осуществлять систематический и научно корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные задачи данные	В состоянии осуществлять систематический и научно-корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные поставленной задаче данные, предлагает новые ракурсы поставленной задачи
4. Освоение стандартных алгоритмов решения профессиональных задач	В состоянии решать только фрагменты поставленной задачи в соответствии с заданным алгоритмом, не освоил предложенный алгоритм, допускает ошибки	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом, понимает основы предложенного алгоритма	Не только владеет алгоритмом и понимает его основы, но и предлагает новые решения в рамках поставленной задачи

При необходимости для обучающихся-инвалидов или обучающихся с ОВЗ предоставляется дополнительное время для подготовки ответа с учетом их индивидуальных психофизических особенностей.

Для успешного освоения дисциплины «Динамика процессов пищевых производств» в учебно-методическом пособии по изучению дисциплины

приводится краткое содержание каждой темы занятия, перечень вопросов для подготовки к практическим занятиям и организации самостоятельной работы студентов. Материал пособия содержит рекомендации по написанию контрольной работы для студентов заочной формы обучения.

1 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Осваивая курс «Динамика процессов пищевых производств», студент должен научиться работать на лекциях, практических занятиях и организовывать самостоятельную внеаудиторную деятельность. В начале лекции необходимо уяснить цель, которую лектор ставит перед собой и студентами. Важно внимательно слушать, отмечать наиболее существенную информацию и кратко ее конспектировать; сравнивать то, что услышано на лекции с прочитанным и усвоенным ранее материалом, укладывать новую информацию в собственную, уже имеющуюся, систему знаний. По ходу лекции необходимо подчеркивать новые термины, определения, устанавливать их взаимосвязь с изученными ранее понятиями.

Основными видами учебной деятельности в ходе изучения курса являются лекции и практические занятия.

При чтении лекций преподаватель имеет право самостоятельно выбирать формы и методы изложения материала, которые будут способствовать качественному его усвоению. При этом преподаватель в установленном порядке может использовать технические средства обучения, имеющиеся на кафедре и в университете.

Вместе с тем, всякий лекционный курс является в определенной мере авторским, представляет собой творческую переработку материала и неизбежно отражает личную точку зрения лектора на предмет и методы его преподавания. В этой связи представляется целесообразным привести некоторые общие методические рекомендации по построению лекционного курса и формам его преподавания.

Лекции составляют основу теоретической подготовки и посвящены основным динамическим характеристикам процессов и аппаратов пищевой промышленности. При проведении лекций необходимо использовать технические средства обучения, ЭИОС, применять методы, способствующие активизации познавательной деятельности слушателей. На лекциях целесообразно теоретический материал иллюстрировать рассмотрением различных примеров и конкретных задач. Имеет смысл привлекать студентов к обсуждению как рассматриваемого вопроса в целом, так и отдельных моментов рассуждений и доказательств. Необходимо также использовать возможности

проблемного изложения, дискуссии с целью активизации деятельности студентов.

Практические занятия проводятся для закрепления основных теоретических положений курса и реализации их в практических расчетах, формирования и развития у студентов мышления в рамках будущей профессии.

На практических занятиях следует добиваться точного и адекватного владения теоретическим материалом и его применения для решения задач.

Важным звеном во всей системе обучения является самостоятельная работа обучающихся. В широком смысле под ней следует понимать совокупность всей самостоятельной деятельности студентов, как в отсутствии преподавателя, так и в контакте с ним. Она является одним из основных методов поиска и приобретения новых знаний, работы с литературой, а также выполнения предложенных заданий. Преподаватель призван оказывать в этом методическую помощь студентам и осуществлять руководство их самостоятельной работой.

Необходимо контролировать степень усвоения студентами текущего материала, а также уровень остаточных знаний по уже изученным темам.

При изучении курса предусмотрены следующие формы текущего контроля:

- опросы по теоретическому материалу;
- контроль на практических занятиях;
- выполнение и защита контрольной работы (заочная форма обучения);

С целью формирования мотивации и повышения интереса к предмету особое внимание при чтении курса необходимо обратить на темы, которые можно проиллюстрировать примерами из практической сферы, связывая теоретические положения с будущей профессиональной деятельностью студентов.

Тематический план лекционных занятий представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Объем (трудоемкость освоения) и структура ЛЗ

Номер темы	Содержание лекционного занятия
1	Введение. Основные понятия и определения
2	Динамика процесса перемешивания
3	Динамика тепловых процессов
4	Динамика процесса сушки

Если лектор приглашает студентов к дискуссии, то необходимо принять в ней активное участие. Если на лекции студент не получил ответа на возникшие у него вопросы, он может в конце лекции задать эти вопросы лектору курса дисциплины.

Тема 1. Введение. Основные понятия и определения

Ключевые вопросы темы

1. Емкость.
2. Самовыравнивание.
- 3 Система с самовыравниванием.
4. Запаздывание.

Ключевые понятия: емкость, самовыравнивание, запаздывание

Литература: [6, с. 6–17]

Методические рекомендации

В данной теме необходимо ознакомиться с основными понятиями курса «Динамика процессов пищевых производств». Параметры, определяющие конечное состояние обрабатываемого продукта, в динамике процессов называются регулируемыми. В качестве регулируемых параметров в аппаратах пищевой промышленности могут приниматься уровень жидкости в емкости, расход жидкости или газа, давление в аппарате, температура, плотность, влажность или концентрация готового продукта.

Практически процесс никогда не протекает в стабильных условиях. В системе непрерывно возникают возмущения, т. е. отклонения параметров на входе или на выходе из аппарата от номинальных значений, которые вызывают непредусмотренные изменения регулируемого параметра, что приводит к изменению качества готового продукта. Возмущения могут возникать вследствие того, что сырье подводится в систему партиями различного качества. Возможно также внезапное изменение свойств сырья или параметров рабочего агента, используемого в аппарате (греющего пара, воздуха, других теплоносителей).

Для поддержания режима работы аппарата на заданном уровне необходимо компенсировать нанесенные возмущения посредством управляющих воздействий, которые могут быть приложены к объекту регулирования, как и возмущения, извне или изнутри.

Для разработки схем автоматического регулирования технологического процесса необходимо знать особенности, соответствующие стационарным и нестационарным условиям его протекания, и затем определить характер изменения регулируемого параметра в переходном периоде процесса, возникающем в системе после нанесения возмущения, т. е. динамические характеристики процесса и соответствующего аппарата. Динамические характеристики большинства процессов можно оценить количественно и качественно в виде формул и графиков. Для этого изменяющиеся во времени переменные, характеризующие процесс, описываются с помощью дифференциальных уравнений, решение которых в пределах переходного периода процесса и позволяет подойти к аналитическому или графическому представлению динамических характеристик.

При рассмотрении динамики переходных процессов учитываются такие свойства системы, как емкость аппарата, самовыравнивание, время запаздывания, которые вместе с динамическими характеристиками являются объектом изучения в дисциплине «Динамика процессов пищевых производств».

Вопросы для самоконтроля

1. Переходные (нестационарные) процессы как составная часть технологических процессов.
2. Изменение регулируемых параметров процесса в зависимости от возмущений, наносимых на аппарат в пусковой период.
3. Изменение регулируемых параметров процесса в зависимости от возмущений при переходе работы аппарата с одного режима на другой.
4. Основные параметры переходных процессов.
5. Емкость. Самовыравнивание.
6. Емкостное и транспортное запаздывание.

Тема 2. Динамика процесса перемешивания

Ключевые вопросы темы

1. Динамика процесса перемешивания

Ключевые понятия: перемешивание, переходный период, постоянная времени

Литература: [6, с. 18–19]

Методические рекомендации

В данной теме необходимо изучить динамику процесса перемешивания. Процесс перемешивания применяется, например, при приготовлении рассола, используемого для посола рыбы. Если подача компонентов сохраняется постоянной, то концентрация раствора на выходе будет оставаться неизменной.

При переходе к новому технологическому режиму появляется необходимость изменить концентрацию используемого раствора. Для этого в переходном периоде необходимо составить уравнение материального баланса, из которого можно получить уравнение динамической характеристики аппарата, в котором проводится растворение соли в воде при идеальном перемешивании.

Данное уравнение характеризует изменение концентрации в переходном периоде. Вводится понятие постоянной времени, которая определяет продолжительность переходного периода, возникающего после нанесения возмущения. Данная постоянная имеет большое значение в теории автоматического регулирования, при расчете переходных процессов, при подборе регуляторов.

Вопросы для самоконтроля

1. Динамика процесса перемешивания.
2. Растворение твердых материалов при идеальном перемешивании.

Динамические характеристики процесса.

3. Постоянная времени аппарата, ее физический смысл и применение при расчете динамических характеристик процесса перемешивания.

Тема 3. Динамика тепловых процессов

Ключевые вопросы темы

1. Переходный процесс при нагревании цилиндра.
2. Переходный процесс в теплообменнике смешения.
3. Динамика процесса в поверхностном теплообменнике.

Ключевые понятия: тепловые процессы, теплообмен, постоянная времени, переходный процесс

Литература: [6, с. 20–30]

Методические рекомендации

Отличительной особенностью тепловых процессов является наличие теплообмена между теплоносителями, которое осуществляется через разделяющую их стенку или путем непосредственного смешения. В ряде случаев существенное значение имеет теплообмен между нагретой поверхностью и окружающей средой.

При анализе тепловых процессов и последующем расчете теплообменных аппаратов составляется энергетический (тепловой) баланс, который в общем случае можно представить как: Приход тепла – Расход тепла = Накопление.

В реальном теплообменном аппарате часто наблюдается отклонения различных параметров на входе или выходе из аппарата от номинальных значений (возмущения), которые обуславливают переход аппарата к работе в нестационарных условиях и отклонение регулируемого параметра от заданного. Следовательно, при анализе работы аппарата и при создании современных автоматизированных технологических систем необходимо иметь количественные зависимости, характеризующие как стационарные, так и нестационарные режимы работы теплообменников.

В динамике процессов рассматриваются переходные процессы, возникающие в аппарате после нанесения возмущения, когда изменение параметров происходит и по координатам, и по времени. Ввиду сложности математического описания переходных процессов их анализ проводится

отдельно для различных групп аппаратов. Для примера рассматривается переходный процесс, наблюдаемый при нагревании трубы, расположенной в неограниченном пространстве, т.е. теплообмен между нагреваемой поверхностью и окружающей средой.

Вопросы для самоконтроля

1. Задачи и способы тепловой обработки пищевых продуктов.
2. Дифференциальное уравнение переходного процесса в теплообменнике смещения и его решение.
3. Продолжительность переходного периода в зависимости от постоянной времени.
4. Динамика переходного процесса при теплообмене нагреваемого тела с окружающей средой.
5. Графическое определение постоянной времени по экспериментальным данным.
6. Динамика процесса в поверхностном теплообменнике.
7. Динамические характеристики аппарата при линейном изменении температур теплоносителей по его длине.
8. Динамические характеристики тепловых процессов при различных формах возмущающих воздействий, их графическое представление.
9. Динамика тепловых процессов при нагревании и охлаждении тел правильной формы при различных граничных условиях.
10. Решение дифференциального уравнения теплопроводности для неограниченной пластины.
11. Распределение температуры внутри твердого тела при нестационарных условиях теплообмена.
12. Использование теории теплопроводности при расчете процессов тепловой обработки пищевых продуктов.
13. Фазовое равновесие.

Тема 4. Динамика процесса сушки

Ключевые вопросы темы

1. Структурная динамическая схема процесса сушки

Ключевые понятия: сушка, динамическая схема процесса сушки

Литература: [6, с. 35–39]

Методические рекомендации

К массообменным процессам относятся процессы, основанные на законах массопередачи, характеризующих переход вещества из одной участвующей в

процессе фазы в другую. Массопередача характеризуется такими показателями как скорость протекания процесса обмена веществом между фазами и характер изменения состава этих фаз.

При разработке технологии, схем контроля и автоматизации процессов массопередачи определяющими факторами могут быть как количественные, так и качественные показатели. В частности, производительность аппарата связана со скоростью массопередачи, обусловленной соответствующими движущими силами. Физическая сущность этих сил и их величина определяются только свойствами системы веществ, для которой рассматривается тот или иной массообменный процесс, например, абсорбция, десорбция, перегонка, кристаллизация, сушка.

Общие уравнения, описывающие процессы массопередачи почти всегда являются нелинейными. Массообмен через поверхность раздела фаз характеризуется распределенными параметрами. Поэтому для выражения скорости массопередачи в пространстве и времени требуются дифференциальные уравнения в частных производных. Однако для практических целей удовлетворительные результаты могут быть получены путем линеаризации уравнений и использования обыкновенных дифференциальных уравнений, при решении которых определяется характер изменения регулируемых (одного или нескольких) параметров после нанесения возмущения по каналам входа или выхода обрабатываемого материала из аппарата.

Очевидно, что вследствие инерции, которой обладают неотделимые от массопередачи процессы перемещения определенных компонентов через границы фаз, а также процессы теплопередачи, установление процесса массопередачи происходит через некоторое время после начала процесса (или возмущения). Следовательно, при изучении массообменных процессов важно выяснить степень влияния параметров процессов перемещения материалов и теплопередачи на динамику массопередачи.

Из всех массообменных процессов в данной теме необходимо рассмотреть процесс сушки, широко используемый в пищевой промышленности.

Вопросы для самоконтроля

1. Материальный баланс массообменных процессов. Рабочие диаграммы.
2. Классификация способов сушки.
3. Период постоянной и переменной скорости процесса сушки.
4. Равновесие при сушке. Материальный и тепловой баланс сушки.
5. Кинетика и динамика процесса сушки.
6. Графическое представление изменения основных параметров рабочего агента и объекта сушки.
7. Определение скорости процесса и его продолжительности с учетом динамических характеристик сушилки.

2 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Практические занятия проводятся с целью формирования у студентов умений и навыков в области процессов и аппаратов пищевых производств.

Практические занятия по дисциплине «Динамика процессов пищевых производств» являются важной составной частью учебного процесса изучаемого курса, поскольку помогают лучшему усвоению курса дисциплины, закреплению знаний.

В ходе самостоятельной подготовки студентов к практическому занятию необходимо не только воспользоваться литературой, рекомендованной преподавателем, но и проявить самостоятельность в отыскании новых источников, связанных с темой практического занятия.

Тематический план практических (ПЗ) занятий представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Объем (трудоемкость освоения) и структура ПЗ

Номер темы	Содержание практического (семинарского) занятия
1	Определение динамических характеристик аппарата для перемешивания
2	Изучение переходного процесса при теплообмене в неограниченном пространстве. Графическое определение постоянной времени и динамических характеристик теплообменника
3	Определение динамических характеристик теплообменника смещения
4	Определение динамических характеристик поверхностного теплообменника
5	Определение динамических характеристик выпарных установок
6	Определение продолжительности процесса сушки с использованием кинетической теории массообменных процессов

Практическое задание № 1: Определение динамических характеристик аппарата для перемешивания

1. Цель работы: формирование умений и навыков определения динамических характеристик солеконцентратора.

2. Задание: изучить краткие теоретические сведения, составить отчет по практическому занятию. В отчете необходимо указать название и цель работы, изложить краткие теоретические сведения по определению важнейших

динамических характеристик аппарата для перемешивания соли. Составить дифференциальное уравнение переходного процесса перемешивания и изобразить графическое представление его решения.

3. Краткие теоретические сведения

При переходе к новому технологическому режиму (например, при переходе на другую рыбу) появляется необходимость изменить концентрацию используемого раствора. Для этого обычно скачком изменяют соотношение между количеством растворителя и соли на входе в аппарат, которое обеспечило бы получение раствора новой заданной концентрации (c_1). При этом концентрация раствора в аппарате и, соответственно, на выходе из него, изменяется не мгновенно, она по некоторому закону постепенно приближается к величине c_1 . Если принять, что за время $d\tau$ концентрация изменяется на величину dc , то процесс в переходном периоде может быть описан уравнением материального баланса:

$$V_{\Pi}c_1d\tau = V_pcd\tau + Vdc, \quad (1)$$

где c – текущее значение концентрации раствора на выходе из аппарата, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

При условии постоянства уровня жидкости в аппарате получаем дифференциальное уравнение:

$$V_{\Pi}(c_1 - c)d\tau = Vdc, \quad (2)$$

где V – объем жидкости в аппарате, м^3 ; V_{Π} – производительность аппарата по приход и по расходу ($V_{\Pi} = V_p$), $\text{м}^3/\text{с}$.

После разделения переменных и последующего интегрирования получаем:

$$\int_0^{\tau} d\tau = \frac{V}{V_{\Pi}} \int_{c_0}^c \frac{dc}{c_1 - c}$$

$$\tau = -\frac{V}{V_{\Pi}} \ln \frac{c_1 - c}{c_1 - c_0}.$$

Дробь $\frac{V}{V_{\Pi}}$ имеет размерность времени, она обозначается через T_0 ($T_0 = \frac{V}{V_{\Pi}}$) и называется постоянной времени. Учитывая это, имеем:

$$\frac{c_1 - c}{c_1 - c_0} = e^{-\tau/T_0}$$

и окончательно:

$$c = c_1 - (c_1 - c_0)e^{-\tau/T_0}. \quad (3)$$

Это есть уравнение динамической характеристики аппарата, в котором проводится растворение соли в воде при идеальном перемешивании. Оно характеризует изменение концентрации c в переходном периоде, которая в момент нанесения возмущения, т.е. при ступенчатом изменении концентрации на входе в аппарат, равна c_0 (при $\tau = 0$); далее она изменяется по закону экспоненты и приближается к величине c_1 (при $\tau \rightarrow \infty$). Практически уже через

$\tau = 4T_0$ концентрация c достигает своего предельного значения (разница между ними в этот момент менее 2 %).

Постоянная времени T_0 определяет продолжительность переходного периода, возникающего после нанесения возмущения; она имеет большое значение в теории автоматического регулирования, при расчете переходных процессов, при подборе регуляторов.

4. Вопросы для самоподготовки

1. Солеконцентраторы. Применение. Производительность.
2. Типы солеконцентраторов.
3. Принцип работы солеконцентраторов.
4. Установки для приготовления солевого раствора переливного типа

Практическое задание № 2: Изучение переходного процесса при теплообмене в неограниченном пространстве. Графическое определение постоянной времени и динамических характеристик теплообменника

1. Цель работы: формирование умений и навыков определения постоянной времени и динамических характеристик теплообменника.

2. Задание: изучить краткие теоретические сведения, составить отчет по практическому занятию. В отчете необходимо указать название и цель работы, изложить краткие теоретические сведения по определению важнейших динамических характеристик теплообменного аппарата.

3. Краткие теоретические сведения

Основным элементом установки, схема которой представлена на рис. 1, является вертикально расположенная металлическая труба, нагреваемая электрическим током, непосредственно подаваемым на материал трубы (она играет электрического сопротивления). Измерительные системы позволяют фиксировать значения электрической мощности, а также температуру нагреваемой поверхности.

Труба 1 нагревается электрическим током, проходящим через регулятор напряжения 2, его параметры фиксируются вольтметром (U) и амперметром (I). По их показаниям определяется мощность N (Вт), получаемая материал трубы.

Температура стенки измеряется в различных точках по высоте трубы с помощью термопар, ЭДС которых фиксируется потенциометром 3. Далее в наших рассуждениях используется температура стенки $t_{ст}$, которая является средней величиной от температур, измеренных с помощью всех термопар (их 12 шт.).

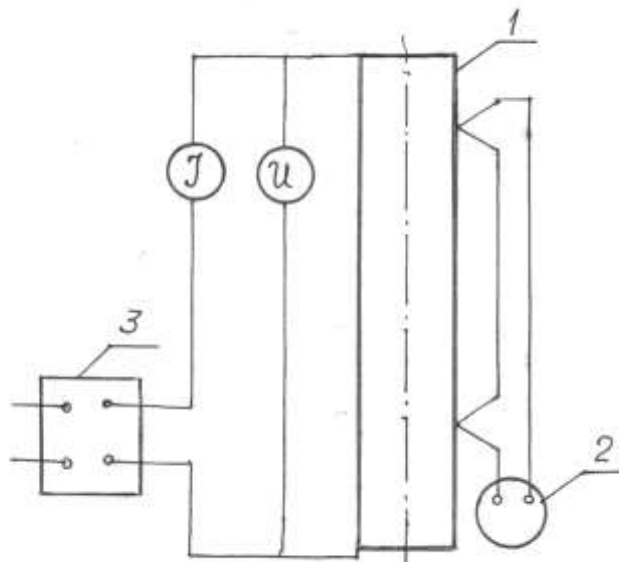


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – труба нагреваемая; 2 – регулятор напряжения; 3 – потенциометр

Так как нагретое тело находится в неограниченном пространстве, то с его поверхности отдается тепло окружающей среде в количестве Q (Вт):

$$Q = \alpha(t_{ст} - t_{в})F, \quad (4)$$

где $t_{в}$ – температура окружающей среды (воздуха), $^{\circ}\text{C}$; F – поверхность боковой поверхности трубы, м^2 ; $\alpha = \alpha_{к} + \alpha_{л}$ – общий коэффициент теплоотдачи, равный сумме коэффициентов теплоотдачи при свободной конвекции ($\alpha_{к}$) и при лучеиспускании ($\alpha_{л}$), $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$.

При включении электрической цепи на некоторую мощность N_1 труба нагревается, температура ее поверхности $t_{ст}$ растет, благодаря чему постепенно увеличивается количество тепла, отдаваемого в окружающую среду (4). При достижении некоторой температуры $t'_{ст}$ количество теряемого в окружающую среду тепла становится равным количеству получаемого тепла, в системе наступает стационарный режим, характеризующийся тем, что далее температура поверхности трубы не изменяется, пока не будет нанесено какого-либо нового возмущения. Из условия равенства тепловых потоков определяется – по результатам эксперимента – общий коэффициент теплоотдачи α от поверхности трубы к воздуху.

С точки зрения динамики процессов важное значение имеет переходный период, возникающий после нанесения возмущения, включения тока или увеличения мощности после достижения очередного стационарного режима теплообмена к другому. Для оценки переходного периода составляется дифференциальное уравнение, характеризующее процесс теплообмена, которое решается при соответствующих начальных и граничных условиях.

После включения электрической цепи в материале трубы за время dt выделяется тепло $Q_{п}$ (Дж):

$$Q_{п} = UIdt. \quad (5)$$

Это тепло идет на нагревание трубы, ее температура повышается, возникает теплоотдача от стенки трубы в окружающую среду, осуществляемая за счет конвекции и лучеиспускания. В соответствии с уравнением (4) количество отдаваемого от стенки трубы тепла Q_p (Дж) равно:

$$Q_p = \alpha F(t - t_B) d\tau, \quad (6)$$

где t – текущее значение температуры трубы, °С.

Если приход тепла больше расхода ($Q_n > Q_p$), то происходит накопление тепла материалом трубы, за счет которого и происходит повышение температуры ее поверхности. Количество накапливаемого за время $d\tau$ тепла Q_H равно:

$$Q_H = Mc dt, \quad (7)$$

где Mc – полная теплоемкость трубы, Дж/К; dt – приращение температуры за время $d\tau$, °С.

Объединяя уравнения (5)–(7), получаем дифференциальное уравнение переходного процесса при нагревании трубы электрическим током:

$$UI d\tau - \alpha F(t - t_B) d\tau = Mc dt$$

или

$$[UI - \alpha F(t - t_B)] d\tau = Mc dt. \quad (8)$$

Уравнение (8) решается классическим методом: разделяются переменные и проводится интегрирование в определенных пределах. В нашем случае момент нанесения возмущения (включение тока или увеличение мощности скачком) принято считать началом процесса ($\tau = 0$), этому моменту соответствует начальная температура стенки трубы t_0 . Далее текущему времени τ соответствует текущее значение температуры стенки t , затем изменения которой во времени определяется решением полученного выше дифференциального уравнения.

Итак:

$$\int_0^\tau d\tau = Mc \int_{t_0}^t \frac{dt}{UI - \alpha F(t - t_B)}.$$

Принимаем $t_0 = t_B$, тогда:

$$\tau = -\frac{Mc}{\alpha F} \ln \frac{UI - \alpha F(t - t_0)}{UI}; \quad (9)$$

$$\ln \frac{UI - \alpha F(t - t_0)}{UI} = -\tau / \frac{Mc}{\alpha F}. \quad (10)$$

Обозначим:

$$T_0 = \frac{Mc}{\alpha F}. \quad (11)$$

Величина T_0 имеет разность времени (с) и называется постоянной времени. Выделим из (10) величину t в явном виде:

$$\frac{UI - \alpha F(t - t_0)}{UI} = e^{-\frac{\tau}{T_0}};$$

$$t = t_0 + \frac{UI}{\alpha F} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_0}} \right). \quad (12)$$

Из уравнения (12) можно сделать следующие выводы. Во-первых, подтверждается принятое нами начальное условие: при $\tau = 0$ $t = t_0$. Во-вторых, из уравнения видно, что переходный процесс осуществляется при экспоненциальном законе изменения температуры стенки t . Теоретически

переходный процесс затухает при достижении величиной t постоянного предельного значения, когда слагаемое $e^{-\frac{\tau}{T_0}}$ становится равным нулю, что возможно лишь при $\tau = \infty$. Очевидно, новое установившееся значение температуры $t_{уст}$ оказывается равным

$$t_{уст} = t_0 + \frac{UI}{\alpha F}. \quad (13)$$

Следовательно, величина $\frac{UI}{\alpha F} = \Delta t$, имеющая размерность температуры, соответствует полному приращению температуры в переходном процессе, возникающем после нанесения на систему ступенчатого возмущения.

Наглядное представление об изменении температуры стенки в переходном периоде дает график, построенный по уравнению (12). Для удобства построения и анализа графика вычислим значения t , через промежутки времени, кратные постоянной времени T_0 ($T_0, 2T_0, 3T_0$ и т.д.). Получаем:

$$\tau = T_0 \quad t = t_0 + \frac{UI}{\alpha F} (1 - e^{-1}) = t_0 + 0,63\Delta t.$$

$$\tau = 2T_0 \quad t = t_0 + \frac{UI}{\alpha F} (1 - e^{-2}) = t_0 + 0,87\Delta t.$$

$$\tau = 3T_0 \quad t = t_0 + 0,95\Delta t.$$

$$\tau = 4T_0 \quad t = t_0 + 0,99\Delta t.$$

Отсюда видно, что, хотя переходный период теоретически заканчивается через бесконечно большое время, практически можно считать, что тепловой процесс переходит к новому стационарному режиму через промежуток времени, равный $\tau_{пл} = 4T_0$. Здесь отклонение температуры t от установившегося значения составляет менее 2 % от его максимально возможного приращения Δt .

С учетом полученных значений t на рис. 2 построен график $t=f(\tau)$, который вместе с уравнением (12) представляет собой динамическую характеристику рассматриваемой тепловой системы (теплообменника).

Из анализа динамических характеристик видно, что при изучении переходных процессов важное значение имеет величина T_0 – постоянная времени, физический смысл которой можно представить как меру инерционности аппарата при нанесении возмущений, при переходе от одного стационарного режима к другому. В принципе постоянная времени пропорциональна отношению запаса (накоплению) вещества или энергии к интенсивности их перемещения, отдачи, т.е. производительности аппарата. Именно постоянная времени определяет продолжительность переходного периода ($4T_0$), в частности, пускового периода, в работе любого аппарата. Необходимо обратить внимание, что величина постоянной времени (формула для ее расчета) определяется индивидуально для каждого типа аппарата в ходе составления и последующего решения дифференциального уравнения, описывающего переходный процесс в данном аппарате. В технологических объектах, для которых регулируемым параметром является уровень жидкости в аппарате, постоянная времени T_0 равна отношению объема аппарата (V , м³) к объему жидкости ($V_{п}$, м³/с), пропускаемой через него в единицу времени.

Постоянную времени можно также определить графически по кривым переходного процесса, как показано на рис. 3. В качестве постоянной времени

принимается отрезок (в масштабе времени) ВС, от пересечения касательной к кривой разгона в точке перегиба с линией начального установившегося значения до точки ее пересечения с линией нового установившегося значения. Это есть условное время перехода регулируемого параметра от одного установившегося значения к другому при условии, что его изменение проходит с постоянной максимальной скоростью в течение всего переходного периода.

Более точно определится величина T_0 , если использовать всю кривую разгона. Для этого в нескольких точках построенного по экспериментальным данным графика проводятся касательные к кривой (рис. 2). Проекции этих касательных численно равны постоянной времени, в качестве которой окончательно принимается средняя арифметическая величина между всеми найденными значениями T_{0i} .

Уравнение (12) и график на рис.2 соответствуют характеристике процесса при нанесении возмущения ступенчатой формы. В дополнение к этому в таблице 1 Приложения Б приведены динамические характеристики теплового процесса в зависимости от возмущающих воздействий различного вида: ступенчатой формы (1), прямоугольного импульса (2), пилообразного импульса (3).

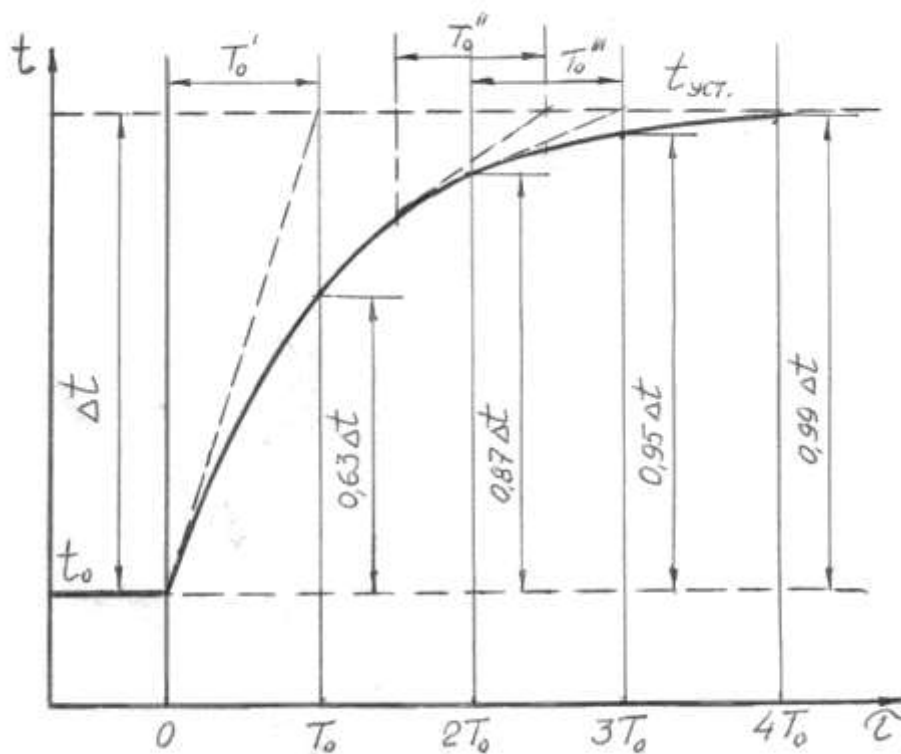


Рис. 2. Характеристика переходного процесса при нагревании трубы

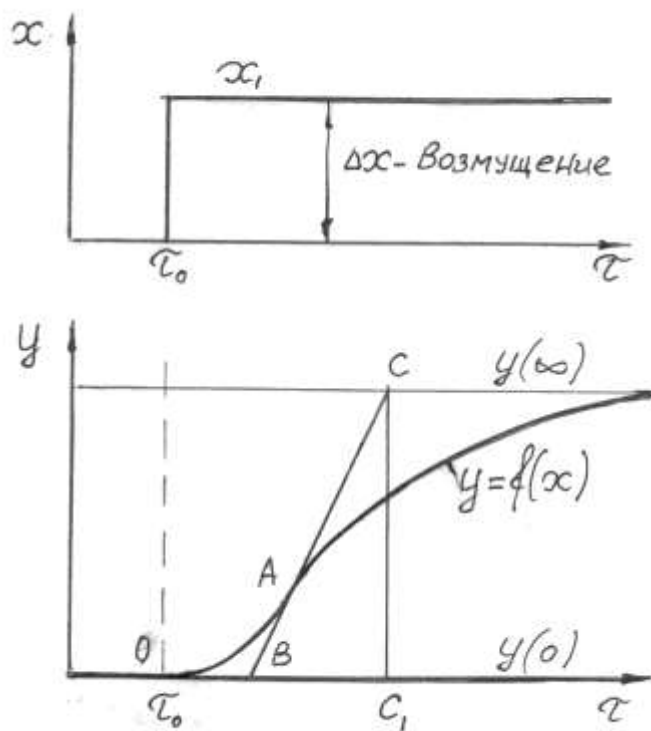


Рис. 3. Кривая переходного процесса при ступенчатом возмущении.

4. Вопросы для самоподготовки

1. Физическая сущность процесса конвективного теплообмена.
2. В чем состоит принципиальная разница между процессом конвективного теплообмена и процессом теплопроводности.
3. Что такое постоянная времени?

Практическое задание № 3: Определение динамических характеристик теплообменника смешения

1. Цель работы: формирование умений и навыков определения динамических характеристик теплообменника смешения.

2. Задание: изучить краткие теоретические сведения, составить отчет по практическому занятию. В отчете необходимо указать название и цель работы, изложить краткие теоретические сведения по определению важнейших динамических теплообменника смешения.

3. Краткие теоретические сведения

Простейшим тепловым аппаратом является теплообменник смешения, в котором смешиваются две жидкости с различными температурами t_1 и t_2 , при этом из аппарата выходит жидкость с промежуточной температурой t . При стационарном режиме работы аппарата, когда суммарное количество подводимого тепла сохраняется неизменным, температура жидкости на выходе t_0 равна:

$$t_0 = \frac{1}{G_0 c_0} (G_1 c_1 t_1 + G_2 c_2 t_2) = \frac{(\sum Q)_0}{G_0 c_0}, \quad (14)$$

где G_1, G_2 – приход первой и второй жидкостей, соответственно, кг/с; c_1, c_2 – теплоемкость жидкостей, Дж/(кг К); $G_0 = G_1 + G_2$ – количество жидкости на выходе из аппарата, кг/с; c_0 – теплоемкость жидкости на выходе, равная теплоемкости жидкости, находящейся в аппарате (при идеальном перемешивании), Дж/(кг К).

Если на входе аппарата нанести некоторое возмущение, например, увеличить суммарное подведенное тепло до величины $(\sum Q)_1$, то в нем возникает переходный процесс, обуславливающий соответствующее изменение регулируемого параметра t – температуры жидкости на выходе. По аналогии с предыдущими для определения динамических характеристик данного аппарата составляется дифференциальное уравнение переходного процесса, в котором учитывается, что за счет накопления тепла температура жидкости в аппарате за время dt изменяется на величину dt :

$$(\sum Q)_1 - G_0 c_0 t = G c_0 \frac{dt}{dt}, \quad (15)$$

где G – количество жидкости в аппарате, кг.

После разделения переменных, интегрирования и последующих преобразований получается уравнение, характеризующее изменение температуры t в течение переходного периода:

$$t = \frac{(\sum Q)_1}{G c_0} - \left(\frac{(\sum Q)_1}{G c_0} - t_0 \right) e^{-\frac{\tau}{T_0}} = G c_0 \frac{dt}{dt}. \quad (16)$$

В этом уравнении $T_0 = G/G_0$ – постоянная времени данного аппарата, по величине которой определяется продолжительность переходного периода ($\tau_{пл} = 4T_0$). Регулируемый параметр t приближается по экспоненциальному закону к своему предельному значению, соответствующему новому стационарному режиму: $t_{01} = \frac{(\sum Q)_1}{G c_0}$. Таким образом, для теплообменника смешения динамическая характеристика описывается уравнением (16), графическое изображение которого представлено на рис. 4.

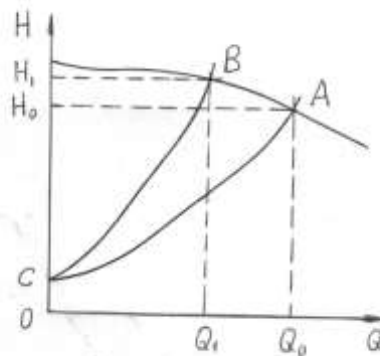


Рис. 4. Характеристика теплообменника смешения

4. Вопросы для самоподготовки

1. Принцип действия теплообменников смешения.
2. Динамические характеристики теплообменника смешения.
3. Переходные тепловые процессы в теплообменниках смешения.

Практическое задание № 4: Определение динамических характеристик поверхностного теплообменника

1. **Цель работы:** формирование умений и навыков определения динамических характеристик поверхностного теплообменника.

2. **Задание:** изучить краткие теоретические сведения, составить отчет по практическому занятию. В отчете необходимо указать название и цель работы, изложить краткие теоретические сведения по определению важнейших динамических характеристик поверхностного теплообменника.

3. Краткие теоретические сведения

В поверхностном теплообменнике тепло от горячего теплоносителя передается через стенку к холодному. При стационарных условиях приход тепла равен расходу, и температуры во всех точках аппарата, включая стенку, во времени не изменяется. При нанесении возмущения баланс тепла нарушается, вследствие чего температура стенки $t_{ст}$ изменяется так, что в течение некоторого времени система переходит к новому стационарному режиму при достижении нового установившегося значения регулируемого параметра, в качестве которого будем считать конечную температуру нагреваемой жидкости.

Для анализа переходного процесса в теплообменнике используем схему, представленную на рис. 5.

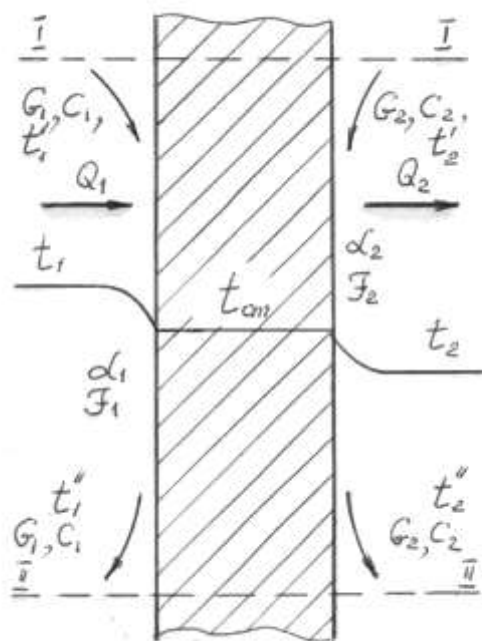


Рис. 5. Схема тепловых потоков в поверхностном теплообменнике

Эта схема характерна для поверхностного аппарата, в котором происходит теплообмен между двумя жидкостями, движущимися в одном направлении (прямоток), причем первая жидкость (горячий теплоноситель) охлаждается от температуры t'_1 до t''_2 , а вторая (холодный теплоноситель) – нагревается от t'_2 до t''_2 . Расход жидкостей, соответственно, G_1 и G_2 (кг/с), их теплоемкости c_1 и c_2 (Дж/кг К). Коэффициенты теплоотдачи со стороны горячего и холодного теплоносителей равны, соответственно, α_1 и α_2 (Вт/м²К). Поверхности теплообмена F_1 и F_2 (м²), они могут быть в общем случае различными.

В рассматриваемом теплообменнике температуры жидкостей в общем случае изменяются по длине аппарата не линейно, и стенка имеет переменную температуру по ее толщине (градиент температуры в ней обеспечивает поток тепла теплопроводностью). Для некоторого упрощения уравнений, описывающих процессы теплообмена между двумя теплоносителями через стенку, принимаем, что их температуры изменяются по длине аппарата линейно. Тогда в качестве определяющих температур горячего и холодного теплоносителей можно принять их средние значения: $t_1 = 0,5(t'_1 + t''_2)$ и $t_2 = 0,5(t'_2 + t''_2)$. Кроме того, примем, что температура стенки по ее толщине не изменяется и равна $t_{ст}$; практически это условие близко к истине в случае тонкостенных металлических поверхностей теплообмена.

С учетом принятых допущений процесс теплообмена между двумя жидкостями через стенку описывается рядом частых уравнений.

Тепло, отдаваемое горячим теплоносителем при его охлаждении:

$$Q_1 = G_1 c_1 (t'_1 - t''_2). \quad (17)$$

Тепло, воспринимаемое стенкой:

$$Q_1 = \alpha_1 F_1 (t_1 - t_{ст}). \quad (18)$$

Тепло, отдаваемое стенкой холодному теплоносителю:

$$Q_1 = \alpha_2 F_2 (t_{ст} - t_2). \quad (19)$$

Тепло, получаемое второй жидкостью:

$$Q_2 = G_2 c_2 (t''_2 - t'_2). \quad (20)$$

При нанесении возмущения, т.е. нарушении стационарного режима теплообмена, происходит накопление тепла стенкой:

$$Q_1 - Q_2 = G_{ст} c_{ст} \frac{dt_{ст}}{d\tau}, \quad (21)$$

где $G_{ст}$ – масса стенки на рассматриваемом участке, кг; $c_{ст}$ – теплоемкость материала стенки, Дж/кг К.

При этом температура стенки начнет изменяться ($\frac{dt_{ст}}{d\tau} \neq 0$), что вызывает изменение регулируемого параметра t''_2 .

Найдем из уравнений (19) и (20) зависимость между температурой стенки и регулируемым параметром:

$$t_{ст} = \left(\frac{G_2 c_2}{\alpha_2 F_2} + 0,5 \right) t''_2 - \left(\frac{G_2 c_2}{\alpha_2 F_2} - 0,5 \right) t'_2. \quad (22)$$

Дифференцируем (22) по времени:

$$\frac{dt_{ст}}{d\tau} = \left(\frac{G_2 c_2}{\alpha_2 F_2} + 0,5 \right) \frac{dt''_2}{d\tau}. \quad (23)$$

Переходный процесс в теплообменнике, возникающий в нем после нанесения возмущения, описывается уравнением (21). Подставляя в него производную $\frac{dt_{ст}}{d\tau}$ из (23) и учитывая уравнения (17)–(20), после простейших математических преобразований получаем дифференциальное уравнение переходного процесса в поверхностном теплообменнике:

$$R \frac{dt_2^{//}}{d\tau} + Lt_2^{//} = M. \quad (24)$$

Здесь для сокращения записи все параметры, входящие в исходные уравнения, сведены к трем комплексным коэффициентам:

$$R = G_{ст}c_{ст} \left(\frac{G_2c_2}{\alpha_2F_2} + 0,5 \right), \text{ Дж/К}; \quad (25)$$

$$L = \frac{2G_1c_1\alpha_1F_1}{2G_1c_1 + \alpha_1F_1} \left(\frac{G_2c_2}{\alpha_2F_2} + 0,5 \right) + G_{ст}c_{ст}, \text{ Вт/К}; \quad (26)$$

$$M = \frac{2G_1c_1\alpha_1F_1}{2G_1c_1 + \alpha_1F_1} \left(t_1' + \left(\frac{G_2c_2}{\alpha_2F_2} - 0,5 \right) \cdot t_2' \right) + G_2c_2t_2', \text{ Вт}. \quad (27)$$

Решаем уравнение (24) при условии, что коэффициенты R, L, M известны для некоторого начального стандартного режима работы аппарата:

$$\int_0^\tau d\tau = R \int_{t_2(0)^{//}}^{t_2^{//}} \frac{dt_2^{//}}{M - Lt_2^{//}} \quad (28)$$

Если отсчитывать значение регулируемого параметра t_2 от начального стационарного режима ($t_2(0)^{//} = 0$), то после интегрирования уравнения (28) получаем:

$$\tau = -\frac{R}{L} \ln \frac{M - Lt_2^{//}}{M};$$

$$\frac{M - Lt_2^{//}}{M} = e^{-\tau/L}.$$

И окончательно:

$$t_2^{//} = \frac{M}{L} (1 - e^{-\tau/T_0}), \quad (29)$$

где $T_0 = \frac{R}{L}$ – постоянная времени, с.

Из полученного решения (29) видно, что конечная температура холодного теплоносителя (регулируемый параметр) после нанесения ступенчатого возмущения изменяется по экспоненциальному закону и при $\tau \rightarrow \infty$ приближается к новому установившемуся значению $t_{2(уст)}^{//} = \frac{M}{L}$, которое зависит от всех параметров, входящих в коэффициенты L и M (26) и (27), в частности, от начальных температур как горячего (t_1'), так и холодного (t_2') теплоносителей. Фактически величины M/L равны предельному приращению регулируемого параметра по отношению к его начальному значению:

$$t_{2(уст)}^{//} = t_{2(0)}^{//} + \frac{M}{L}.$$

Практически продолжительность переходного периода $\tau_{пп}$ может быть принята равной четырем постоянным времени ($\tau_{пп} = 4T_0$), так как к этому моменту

отклонение регулируемого параметра от нового установившегося значения не превышает 2 % от его полного приращения за время переходного процесса. Формально постоянная времени поверхностного теплообменника $T_0 = \frac{R}{L}$ может быть вычислена при известных коэффициентах R и L (25) и (26), в которых учитываются емкости теплоносителей (G_1c_1 и G_2c_2) и разделяющей их стенки ($G_{ст}c_{ст}$), а также условия теплообмена с обеих сторон стенки (α_1 и α_2).

Так как вычисление введенных нами комплексных коэффициентов представляет собой сложную задачу, постоянную времени T_0 целесообразно определять графически путем обработки кривой разгона, получаемой при экспериментальном измерении регулируемого параметра в течение переходного периода, наступающего после нанесения возмущения, например, изменением расхода или температуры одного из теплоносителей (или обоих одновременно).

Таким образом, определив аналитически или экспериментально постоянную времени, можно провести анализ характера изменения регулируемого параметра в течение переходного периода.

4. Вопросы для самоподготовки

1. Зависимость процесса нагревания и охлаждения от формы и размеров тела.
2. Теплопередача через плоскую стенку.
3. Определение постоянной времени и динамических характеристик теплообменника.

Практическое задание № 5: Определение динамических характеристик выпарной установки

1. Цель работы: формирование умений и навыков определения динамических характеристик выпарной установки.

2. Задание: изучить краткие теоретические сведения, составить отчет по практическому занятию. В отчете необходимо указать название и цель работы, изложить краткие теоретические сведения по определению важнейших динамических характеристик выпарных установок.

3. Краткие теоретические сведения

Задачи изучения динамики выпарных установок (ВУ) возникают в связи с тем, что в условиях эксплуатации меняются параметры пара и раствора, поступающего на выпаривание, нагрузки потребителей (для многокорпусных ВУ с пароотбором), температуры и расхода воды, подаваемой в барометрический конденсатор, и др. Вследствие значительной инерционности объекта он зачастую не успевает войти в установившийся режим до воздействия нового возмущения, поэтому выпарные установки работают практически в переходном режиме. Изучение переходного периода работы ВУ представляет большой интерес при оценке влияния его на производительность, экономичность установки и качество готовой продукции.

Необходимость исследования и расчета переходных процессов возникает также в связи с рассмотрением задач управления процессом выпаривания, что требует знания статических и динамических характеристик выпарных установок. Исследование динамических свойств, характера возмущений и математическое описание аппарата как объекта регулирования являются предпосылками для решения задачи выбора системы автоматического управления технологическим процессом и совершенствования самого технологического аппарата.

Рассмотрим некоторые вопросы, связанные с динамикой процесса, на примере двухкорпусной выпарной установки, технологическая схема которой представлена на рис. 6.

Все параметры, характеризующие выпарную установку, можно разделить на три группы: регулируемые, возмущающие, регулирующие. К регулируемым относятся параметры, определяющие качество готового продукта: концентрация сгущенного раствора x ; температура кипения раствора по корпусам t_1, t_2 ; уровень жидкости по корпусам h_1, h_2 . Возмущающие параметры – это изменение концентрации x_0 и расхода S_0 поступающего на выпаривание раствора, изменение давления греющего пара P_0 , изменение температуры поступающего раствора t_0 , изменение условий теплопередачи по корпусам (например, вследствие накипеобразования). Регулирующие воздействия способствуют поддержанию заданного режима работы аппаратов, они компенсируют влияние наносимых возмущений; к ним относятся давление пара в греющей камере первого корпуса выпарной установки P_0 , давление (обычно величина вакуума) в последнем корпусе P_n (в нашем случае P_2), степень разрежения в барометрическом конденсаторе (давление P_k), сток (расход) раствора между корпусами S_1, S_2 . Анализ работы выпарной установки при наличии возмущений заключается в решении дифференциальных уравнений, описывающих процесс как при стационарных условиях, так и в переходном периоде, возникающем в аппарате после нанесения того или иного возмущения.

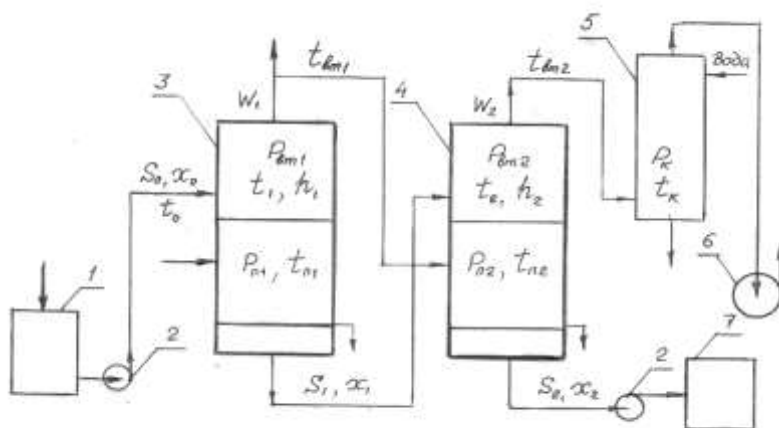


Рис. 6. Технологическая схема двухкорпусной выпарной установки:
 1 – сборник исходного раствора; 2 – насос; 3, 4 – выпарные аппараты (первый и второй); 5 – конденсатор барометрический;
 6 – сборник сгущенного раствора

Так как при выпаривании основным регулируемым параметром является концентрация раствора на выходе из аппарата или на выходе из последнего корпуса многоступенчатой выпарной установки, в основе дифференциальных уравнений лежит закон сохранения вещества, который для переходного периода работы аппарата соответствует общему правилу:

Приход вещества – Расход вещества = Накопление.

Дифференциальные уравнения, описывающие концентрации раствора по корпусам выпарной установки, можно получить, исходя из материального баланса сухих веществ в растворе за бесконечно малый промежуток времени $d\tau$. Так, для первого корпуса (или однокорпусной выпарной установки) при стационарных условиях имеем:

$$S_0 x_0 d\tau - S_1 x_1 d\tau = G_{\text{ж}} dx_1, \quad (30)$$

где S_0 и S_1 – базисные значения притока раствора в аппарат и стока из него; $G_{\text{ж}}$ – масса раствора в аппарате; x_0 – начальная концентрация раствора; x_1 – концентрация раствора на выходе из аппарата (регулируемый параметр), она принимается равной концентрации раствора, находящегося в аппарате, и определяется из материального баланса процесса выпаривания при стационарных условиях.

Из перечисленных выше возможных видов возмущений выделим один: ступенчатое изменение концентрации подаваемого на выпаривание раствора на величину Δx_0 . Если параметры греющего пара не изменяются (его расход, давление и температура), то количество удаляемого в единицу времени растворителя остается неизменным. Следовательно, из аппарата будет выводиться неизменное количество сгущенного раствора (S_1), концентрация которого будет постепенно изменяться, достигая конечного значения $x_1 + \Delta x_1$. Для любого момента времени материальный баланс для переходного периода представляется в виде дифференциального уравнения:

$$S_0(x_0 + \Delta x_0) d\tau - S_1(x_1 + \Delta x) d\tau = G_{\text{ж}} d(x_1 + \Delta x). \quad (31)$$

Вычитая почленно уравнение (30) из (31), получим дифференциальное уравнение, описывающее характер изменения приращения концентрации раствора Δx на выходе из аппарата:

$$S_0(\Delta x_0) d\tau - S_1(\Delta x) d\tau = G_{\text{ж}} d(\Delta x). \quad (32)$$

Разделим переменные и проинтегрируем в пределах времени $0 - \tau$, в течение которого приращение концентрации изменится от нуля до некоторого (текущего) значения Δx :

$$\int_0^{\tau} d\tau = G_{\text{ж}} \int_0^{\Delta x} \frac{d(\Delta x)}{S(\Delta x_0) - S_1(\Delta x)}.$$

Получаем:

$$\tau = -\frac{G_{\text{ж}}}{S_1} \ln \frac{S_0(\Delta x_0) - S_1(\Delta x)}{S_0(\Delta x_0)}. \quad (33)$$

Обозначим: $T_0 = \frac{G_{\text{ж}}}{S_1}$. Эта величина имеет размерность времени (с) и является постоянной времени аппарата.

Учитывая это, имеем:

$$\frac{S_0(\Delta x_0) - S_1(\Delta x)}{S_0(\Delta x_0)} = e^{-\frac{\tau}{T_0}}. \quad (34)$$

Отсюда:

$$\Delta x = \frac{S_0 \Delta x_0}{S_1} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_0}} \right). \quad (35)$$

Полученное уравнение является динамической характеристикой выпарного аппарата при возмущении по концентрации поступающего раствора. Анализ этого уравнения дает возможность проследить характер изменения регулируемого параметра (концентрации раствора) на выходе из аппарата. Так, в момент нанесения возмущения ($\tau = 0$) приращение концентрации готового продукта равно нулю ($\Delta x = 0$), следовательно она равна номинальной величине, рассчитанной для стационарных условий:

$$X_1 = \frac{S_0 x_0}{S_0 - W} = \frac{S_0 x_0}{S_1}, \quad (36)$$

где W – количество удаляемого растворителя $W = S_0 \left(1 - \frac{x_0}{x_1} \right)$, которое обеспечивается за счет определенного расхода тепла (греющего пара), сохраняемого неизменным и после нанесения возмущения.

С течением времени величина Δx изменяется по экспоненциальному закону, достигая максимальной величины Δx_1 при $\tau = \infty$:

$$\Delta x_1 = S_0 \Delta x_0 / S_1. \quad (37)$$

Численно изменение концентрации готового продукта больше нанесенного возмущения (в случае $\Delta x_0 > 0$), так как дополнительное количество компонента распределяется в готовом продукте, содержащем меньшее количество растворителя, ибо часть его удалена в виде вторичного пара.

Интенсивность приближения регулируемого параметра к предельному значению хорошо просматривается при подстановке в формулу (35) текущего времени τ . Для удобства анализа переходного процесса и построения графика $\Delta x = f(\tau)$ определяем значения Δx через отрезки времени, пропорциональные постоянной времени T_0 .

Так, при $\tau = T_0$ $\Delta x = 0,63 \Delta x_1$ и $x = x_1 + 0,63 \Delta x_1$;
 при $\tau = 2T_0$ $\Delta x = 0,87 \Delta x_1$ и $x = x_1 + 0,87 \Delta x_1$;
 при $\tau = 3T_0$ $\Delta x = 0,95 \Delta x_1$ и $x = x_1 + 0,95 \Delta x_1$;
 при $\tau = 4T_0$ $\Delta x = 0,98 \Delta x_1$ и $x = x_1 + 0,98 \Delta x_1$.

Таким образом, через время $\tau = 4T_0$ после нанесения возмущения аппарат переходит к новым стационарным условиям, которым соответствует новая концентрация сгущенного раствора $x = x_1 + 0,98 \Delta x_1 = x_1 + 0,98 \frac{S_0}{S_1} \Delta x_0$.

Приращение концентраций отличается от предельного примерно на 2 %, что вполне допустимо при рассмотрении процессов в реальных условиях.

На рис. 7 приведено графическое представление динамической характеристики выпарного аппарата при возмущении, нанесенном по каналу концентрации сгущаемого раствора.

График $\Delta x = f(\tau)$ построен в соответствии с формулой (35) с учетом выше приведенных расчетов.

В заключение отметим, что тепловые процессы в выпарном аппарате описываются сложными многопараметрическими зависимостями. Определение динамических характеристик по различным каналам затруднено вследствие различного рода внутренних и внешних помех (возмущений), поэтому во многих случаях более доступным является экспериментальный метод исследования динамики процесса.

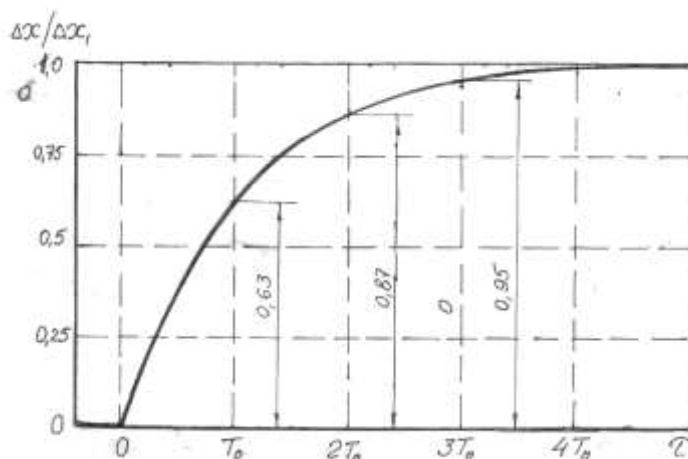


Рис. 7. Динамическая характеристика выпарного аппарата по каналу концентрации сгущаемого раствора

4. Вопросы для самоподготовки

1. Выпаривание. Сущность процесса.
2. Период постоянной и переменной скорости процесса выпаривания.
3. Динамические характеристики выпарного аппарата.

Практическое задание № 6: Определение продолжительности процесса сушки с использованием кинетической теории массообменных процессов

1. Цель работы: формирование умений и навыков определения динамических характеристик сушилки.

2. Задание: изучить краткие теоретические сведения, составить отчет по практическому занятию. В отчете необходимо указать название и цель работы, изложить краткие теоретические сведения по определению важнейших динамических характеристик сушилки.

3. Краткие теоретические сведения

Сушка представляет собой процесс удаления влаги из пористого влажного материала. В качестве промышленной операции она применяется в различных производствах: сушка пищевых твердых и жидких продуктов, штучных изделий, бумаги, целлюлозы, тканей и т.п. При этом подвергаемый сушке объект может находиться в покое на стеллажах сушильного аппарата, распределяться в виде тонкого слоя на нагретой поверхности или перемещаться непрерывно с помощью

транспортера. При сушке влага никогда не удаляется полностью из объекта, некоторая часть ее остается в материале. Целью сушки является удаление из влажного материала достаточного количества влаги с тем, чтобы он мог затем поступать на дальнейшую переработку или на хранение.

Скорость сушки продукта зависит от величины движущей силы, она в первую очередь определяется интенсивностью массообмена между влажным материалом и окружающей средой. Управление процессом сушки может быть, как внешним, так и внутренним по отношению к сушильному материалу.

В свою очередь скорость массопередачи при сушке зависит от разности парциальных давлений, характеризующих среднее содержание влаги в высушиваемом объекте (P_M) и в окружающей среде ($P_{вн}$). Среднее парциальное давление пара в материале изменяется с температурой. Так как температура любого тела не может возрастать мгновенно, то динамика массопередачи будет тесно связана с динамикой теплопередачи между сушимым материалом и окружающей средой.

Если внешнее парциальное давление водяного пара $P_{вн}$ остается постоянным, то скорость сушки, под которой понимается количество влаги, удаляемой из материала в единицу времени, равна

$$\frac{dM}{dt} = R = K(P_M - P_{вн}), \quad (38)$$

где M – количество влаги, удаленной из материала за время t ; R – скорость сушки; K – коэффициент массопередачи.

Величина $P_{вн}$ может оставаться постоянной в случае, если сушка осуществляется продувкой сушильной камеры сухим газом, который нагревается в калорифере до постоянной температуры (без изменения его влагосодержания), поглощает образующийся в процессе сушки пар и непрерывно выносит его из сушилки.

Если в газе, окружающем объект сушки, изменяется концентрация влаги, то с течением времени парциальное давление пара $P_{вн}$ является функцией количества влаги, удаленной из материала, тогда

$$P_{вн} = f(M) \approx K'/M. \quad (39)$$

Скорость сушки в этом случае равна:

$$\frac{dM}{dt} = R = K(P_M - K'/M) = KP_M - K_2M, \quad (40)$$

где $K_2 = KK'$ – приведенный коэффициент массопередачи.

Скорость сушки влажного материала лимитируется, с другой стороны, скоростью движения влаги внутри материала к его поверхности. Эта скорость зависит от градиента концентрации влаги $\frac{\partial M}{\partial n}$, от гидравлического градиента $\frac{\partial H}{\partial n}$ или градиента парциального давления $\frac{\partial P}{\partial n}$.

Управление процессом сушки осуществляется внешним воздействием, обеспечивающим создание температурного градиента путем подвода тепла к объекту сушки. В результате в системе устанавливаются определенные градиенты массы и давления, способствующие перемещению влаги внутри материала, т.е. проведению процесса сушки независимо от конкретного способа подвода тепла. Один из методов сушки материала заключается в продувке его сухим газом

(воздухом). Другой способ состоит в перемещении высушиваемого материала через сушильную печь, в которой объект контактирует с горячим сухим газом, который поддерживается в сухом состоянии и нагнетается при помощи вентилятора. При этом для того, чтобы влага удалялась из материала, парциальное давление пара $P_{вн}$ должно быть достаточно малым. Наконец, сушку материала проводят путем его нагревания за счет контакта с нагретой поверхностью. В этом случае отвод влаги осуществляется за счет повышения давления пара P_m самой удаляемой влаги (внутри продукта).

Очевидно, динамика процесса сушки неразрывно связана с динамикой тепловых процессов, проходящих как внутри объекта сушки, так и вне его. Взаимное влияние этих процессов рассмотрим на примере сушилки, в которой влажный материал непосредственно нагревается источником тепла (рис. 8). Здесь движущая сила процесса обеспечивается за счет изменения парциального давления пара, образующегося при испарении влаги внутри продукта

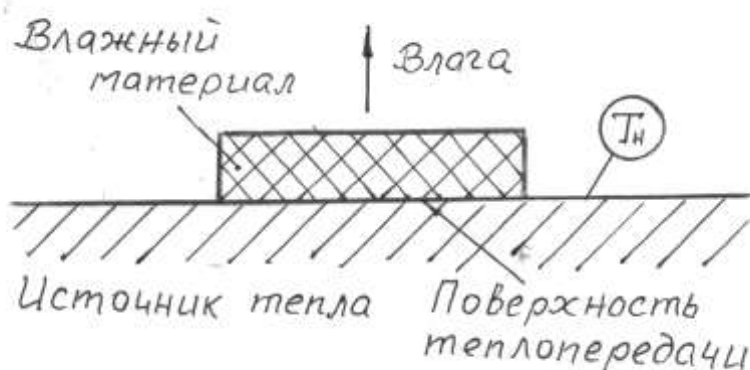


Рис. 8. Анализ процесса сушки

При подводе тепла к материалу его температура T растет. Вследствие этого возрастает парциальное давление пара P_m в фазе, содержащей влагу. При переходе водяных паров в окружающую среду изменяется его парциальное давление $P_{вн}$ вне материала. Изменение парциальных давлений P_m и $P_{вн}$ оказывает влияние на скорость сушки R .

При сушке всегда наблюдается движение влаги как в виде жидкости, так и в виде пара, следовательно, поток влаги участвует в переносе тепла, что, в свою очередь, влияет на скорость сушки. Для наглядного представления взаимного влияния процессов тепло- и массообмена при сушке влажного материала составляется структурная схема потоков тепла и массы, которая дает возможность выбора методов регулирования параметров процесса сушки с использованием его динамических характеристик.

На рис. 9 приведена структурная схема рассматриваемого нами варианта сушилки (рис. 8), с помощью которой физическую сущность процесса сушки можно представить следующим образом. От поверхности, нагретой до температуры T_n , влажный материал воспринимает тепло Q_T за счет проводимости λ/δ поверхности контакта между источником тепла и материала. Это тепло

является положительной движущей силой процесса; оно подводится к точке суммирования (Σ), к которой также подводится тепло Q_0 , удаляемое от влажного объекта за счет сушки, т.е. с паром испаряющейся влаги. Интегрирующий поток тепла и деля результат на тепловую емкость материала C_m , определяют среднюю температуру $T_{об}$ влажного объекта. Цепь обратной связи, замыкаемая через проводимость λ/δ , охватывает тепловую емкость материала.

При колебаниях температуры $T_{об}$ влажного материала изменяется интегральное парциальное давление P_m , которое в принципе является функцией частной производной $\frac{\partial P_m}{\partial T_{об}}$, при изменении количества влаги, отведенной в окружающую среду, изменяется и давление $P_{вн}$. Разность этих давлений $\Delta P = P_m - P_{вн}$, умноженная на коэффициент массопередачи K , дает скорость сушки R . Полное количество удаленной влаги находят интегрированием по времени величины R ($\int R dt$). Удаляемая из материала влага (в виде пара) оказывает влияние на величину внешнего парциального давления ($P_{вн} = K/M$). Таким образом, имеет место второй эффект отрицательной связи, которая отражена в структурной схеме (рис. 9).

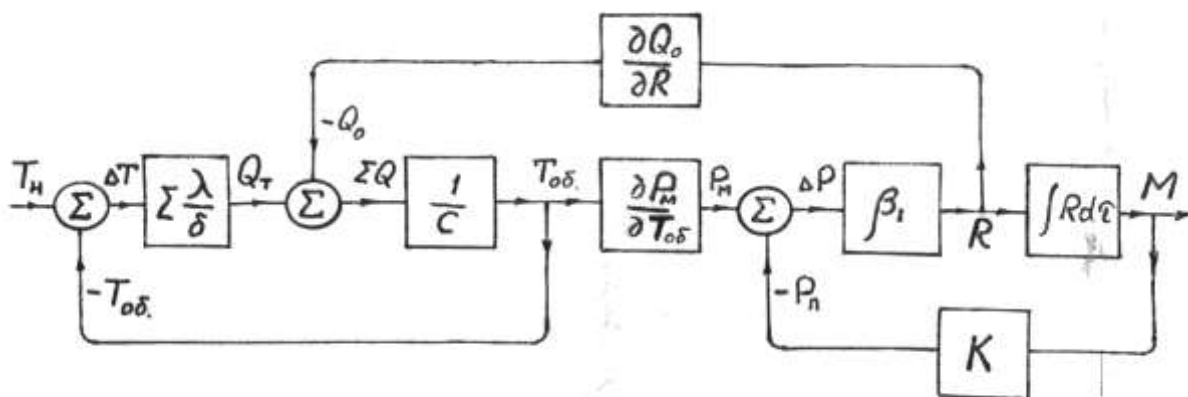


Рис. 9. Структурная динамическая схема процесса сушки

Поскольку вместе с влагой отводится тепло, то скорость сушки также дает начало обратной связи в системе регулирования теплового процесса. Для поддержания определенной скорости сушки подводят некоторое количество тепла, необходимое для испарения жидкости. Таким образом, возникает еще одна отрицательная обратная связь, контур которой направлен от переменной R к точке суммирования тепла, причем количество тепла, отводимого от материала (на структурной схеме оно показано со знаком минус), пропорционально интегралу от частой производной $\frac{\partial Q_0}{\partial R}$.

В целом процесс сушки характеризуется тремя контурами обратной связи, но всего двумя интегрирующими звеньями. Следовательно, общее соотношение между количеством удаленной влаги M и температурой T_n нагревателя, при помощи которого осуществляется сушка, представляется в виде многофункциональной разветвленной структурной схемы (рис. 9). Частные

производные $\frac{\partial H_0}{\partial R}$ и $\frac{\partial P_M}{\partial T_{об}}$, влияющие на величину потоков тепла и массы, не являются постоянными и лишь для простейших видов сушки возможна их линеаризация.

В разделах учебного пособия, рассмотренных выше, показано, что при нанесении возмущения на термодинамическую систему переход ее к новому стационарному режиму зависит от динамических характеристик системы, составной частью которых является постоянная времени того или иного аппарата. По отношению к процессу сушки можно отметить следующее.

Для качественного регулирования процесса сушки необходимо конструировать сушилки, обладающие минимальными постоянными времени и оказывающие протеканию процесса минимальное транспортное запаздывание. При использовании в сушилках горячего сухого воздуха, движущегося с большой скоростью в турбулентном режиме, достигается высокая скорость сушки влажного материала. Динамические характеристики сушилки могут быть улучшены, если весь процесс обезвоживания разделить на несколько стадий: нагрев материала, предварительная сушка, основная сушка при максимальной скорости движения воздуха через высушиваемый материал.

4. Вопросы для самоподготовки

1. Сушка. Сущность процесса.
2. Период постоянной и переменной скорости процесса сушки.
3. Графики процесса и скорости сушки.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Согласно учебному плану дисциплины «Динамика процессов пищевых производств» направления подготовки 15.03.02 Технологические машины и оборудование, студенты заочной формы обучения закрепляют изучаемый материал, самостоятельно в виде выполнения контрольной работы.

Все студенты выбирают варианты контрольной работы в зависимости от номера зачетной книжки. При выполнении контрольной работы необходимо:

1. Ответить на вопросы, выбранные из табл. 4 по предпоследней цифре шифра зачетной книжки.

2. Дать описание переходного процесса в электронагревательной трубе при теплообмене в неограниченном пространстве, показать сущность и применение постоянной времени при изучении переходных процессов.

3. По экспериментальным данным, приведенным в табл. 5 (вариант исходных данных выбирается по последней цифре зачетной книжки), построить график изменения регулируемого параметра (температуры стенки нагреваемой трубы) в переходном процессе, возникающем в системе после нанесения возмущения – ступенчатого увеличения мощности нагревателя. Графическим способом определить постоянную времени T_0 ; с использованием полученной величины T_0 построить расчетную кривую нагревания трубы и сопоставить (в %) полученный график с экспериментальным.

4. Принимая достигнутую в переходном процессе температуру стенки трубы $t_{уст}$ в качестве начальной и сохраняя неизменной величину постоянной времени T_0 , построить динамическую характеристику – график $t = f(\tau)$ – нагреваемой трубы при нанесении нового возмущения: увеличения напряжения электрического тока на спирали в k раз. Коэффициент k выбрать из табл. 4 (по предпоследней цифре зачетной книжки).

Структура контрольной работы:

- титульный лист (Приложение А)
- содержание
- ответы на вопросы по заданию

Контрольная работа должна быть оформлена в соответствии с общими требованиями, предъявляемыми к контрольным работам:

- текст должен быть отпечатан на компьютере;
- основной текст подразделяется на озаглавленные части в соответствии с содержанием работы. Заглавия не подчеркиваются, в конце заголовка точка не ставится, переносы допускаются;
- страницы текста пронумерованы арабскими цифрами в правом верхнем углу без точек. Титульный лист считается первым и не нумеруется;

- на каждой странице оставлены поля для замечаний рецензента;

Стиль и язык изложения материала контрольной работы должны быть четкими, ясными и грамотными. Грамматические и синтаксические ошибки недопустимы. Выполненная контрольная работа представляется для регистрации на кафедру, затем поступает на рецензирование преподавателю.

Положительная оценка («зачтено») выставляется в зависимости от полноты и правильности решения задач, объема предоставленного материала в контрольной работе, а также степени его усвоения, которая выявляется при ее защите (умение использовать при ответе на вопросы научную терминологию, лингвистически и логически правильно отвечать на вопросы). Студент, получивший контрольную работу с оценкой «зачтено», знакомится с рецензией и с учетом замечаний преподавателя дорабатывает отдельные вопросы с целью углубления своих знаний.

Контрольная работа с оценкой «не зачтено» возвращается студенту с рецензией, выполняется студентом вновь и сдается вместе с не зачтенной работой на проверку преподавателю. Контрольная работа, выполненная не по своему варианту, возвращается без проверки и зачета.

Задания для контрольной работы

Таблица 4 – Вариант выбора контрольных вопросов и коэффициента k

Исходные данные	Предпоследняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Вопросы	1	2	3	4	5	7	11	12	4	11
	10	5	8	16	9	13	6	14	12	15
Коэффициент k	1,2	1,4	1,5	1,8	2,0	1,9	1,7	1,6	1,5	1,3

Таблица 5 – Изменение температуры стенки трубы в переходном процессе (экспериментальные данные)

Время τ , мин	Последняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	20	25	50	75	0	20	25	50	75
2	30	43	46	75	118	33	36	53	88	117
3	41	53	55	85	136	46	42	64	96	133
4	52	61	63	94	152	58	49	73	109	148
5	59	68	70	101	164	69	54	81	119	159
10	85	94	97	126	208	106	74	106	156	196
15	96	109	115	138	230	127	85	117	177	213
20	101	117	125	144	239	138	91	121	188	219
25	103	121	131	147	245	144	95	123	194	223
30	104	123	134	148	248	147	97	124	197	224
35	105	124	137	149	249	148	98	124	198	225

Контрольные вопросы к контрольной работе

1. Какие параметры характеризуют работу аппарата в переходном периоде?
2. Емкость аппарата, коэффициент емкости. Одно- и многоёмкостные аппараты.
3. Самовыравнивание аппаратов (по приходу, по расходу, по приходу и расходу).
4. Динамика процесса перемешивания. Вывод дифференциального уравнения переходного периода процесса.
5. Решение дифференциального уравнения процесса перемешивания. Постоянная времени и ее роль при рассмотрении переходных процессов.
6. Динамические характеристики процесса перемешивания в зависимости от вида возмущений.
7. Составьте дифференциальное уравнение переходного процесса при нагревании трубы в неограниченном пространстве.
8. Решить дифференциальное уравнение переходного процесса при нагревании трубы электрическим током. Графическая характеристика процесс.
9. Постоянная времени теплового аппарата, ее роль при анализе переходного процесса.
10. Динамические характеристики тепловых процессов при различных формах возмущающих воздействий. Их графическое представление.
11. Динамика теплового процесса в теплообменнике смешения. Постоянная времени и ее применение. График $t = f(\tau)$.
12. Графическое определение постоянной времени по экспериментальным данным.
13. В чем заключается процесс сушки влажных материалов?
14. Какие существуют формы энергетической связи влаги с материалом?
15. Как изменяется влагосодержание материала в процессе сушки?
16. Как определяются скорость сушки влажного материала и продолжительность процесса?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цветков, Ф. Ф. Тепломассообмен: учебник для вузов / Ф. Ф. Цветков, Б. А. Григорьев. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2011. – 558 с.
2. Процессы и аппараты пищевых производств: в 2 кн.: учеб. / А. Н. Остриков, Ю. В. Красовицкий, А. А. Шевцов; под ред. А. Н. Острикова. – Санкт-Петербург: ГИОРД, 2007. – Кн. 2. – 605 с.
3. Процессы и аппараты рыбообработывающих производств: учеб. пособие / под ред. Н. В. Стефановская. – Москва: Легк. и пищ. пром-сть, 1984. – 236 с.
4. Попов, В. В. Динамика тепловых процессов при нагревании и охлаждении тел правильной формы: учеб. пособие для студ. спец. 170600 "Машины и аппараты пищевых производств" / В. В. Попов. – Калининград: КГТУ, 1996. – 42 с.
5. Попов, В. В. Лабораторный практикум по процессам и аппаратам пищевых производств: учеб. пособие для студ. вузов спец. 260601.65 Машины и аппараты пищ. пр-в, 260602.65 Пищ. инженерия мал. предприятий, 220100.62 Технология продуктов питания, 240902.65 Пищ. биотехнология, 220301.65 Автоматизация технологич. процессов и пр-в / В. В. Попов, Н. В. Захаркив. – Калининград: КГТУ, 2005. – 92 с.
6. Хомякова, М. В. Динамика процессов пищевых производств: учеб. пособие для студ. бакалавриата по направлению подготовки 15.03.02 Технологические машины и оборудование / М. В. Хомякова, А. Э. Суслов. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2022. – 40 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО РЫБОЛОВСТВУ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Институт агроинженерии и пищевых систем
Кафедра инжиниринга технологического оборудования

Контрольная работа
допущена к защите:
должность (звание), ученая степень
_____ Фамилия И. О.
«__» _____ 202__ г.

Контрольная работа
защищена
должность (звание), ученая степень
_____ Фамилия И. О.
«__» _____ 202__ г.

Контрольная работа № _____

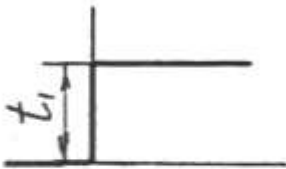
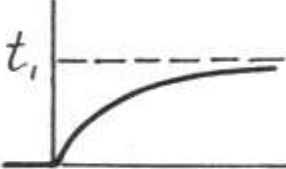
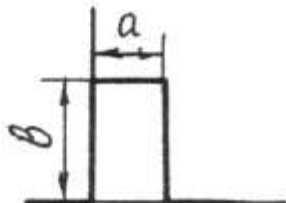
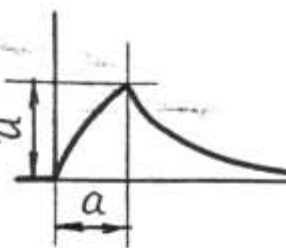
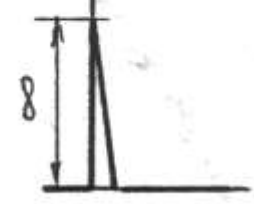
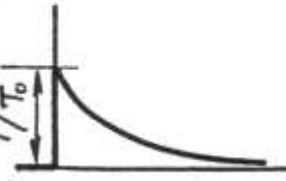
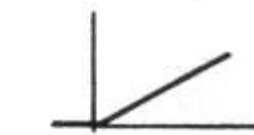

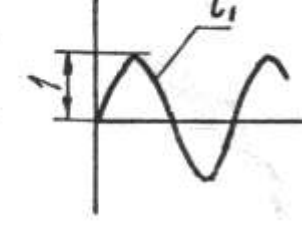
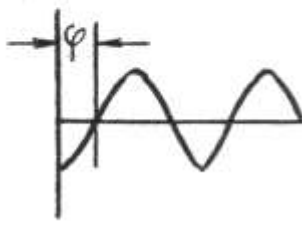
по дисциплине
«ДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ»

Шифр студента _____
Вариант № _____

Работу выполнил:
студент гр. _____
_____ Фамилия И. О.
«__» _____ 202__ г.

Калининград - 20__

Динамические характеристики переходных процессов

Возмущение	Динамическая характеристика	
<p>1. </p>		$t_1 = u\tau / \Delta F$ $t = t_1 (1 - e^{-\tau/\tau_0})$
<p>2. </p>		<p>При $0 \leq \tau \leq a$</p> $t = b(1 - e^{-\tau/\tau_0})$ $u = b(1 - e^{-a/\tau_0})$ <p>При $a \leq \tau < \infty$</p> $t = u e^{-\tau/\tau_0}$
<p>3. </p>		$t = \frac{1}{\tau_0} e^{-\tau/\tau_0}$
<p>4. </p>		$t = \tau_0 \left(e^{-\tau/\tau_0} + \frac{\tau}{\tau_0} - 1 \right)$
<p>5. </p>		$t_1 = \sin(\omega\tau)$ $t = \frac{\sin(\omega\tau + \varphi)}{\sqrt{1 + \omega^2\tau_0^2}}$

Локальный электронный методический материал

Мария Вячеславовна Хомякова

ДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Редактор Е. Билко

Уч.-изд. л. 3,0. Печ. л. 2,6

Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Калининградский государственный технический университет»,
236022, Калининград, Советский проспект, 1