

# **ІТМО**

**В.А. Кораблев, А.Б. Сулин, В.М. Шеин**

## **ТЕРМОСТАТИРОВАНИЕ И ТЕРМОСТАТЫ**



Источник: Авторская картинка (фото лабораторного стенда)

**Санкт-Петербург  
2025**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**В.А. Кораблев, А.Б. Сулин, В.М. Шеин**  
**ТЕРМОСТАТИРОВАНИЕ И ТЕРМОСТАТЫ**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО  
по направлению подготовки 16.04.03 Холодильная, криогенная техника и  
системы жизнеобеспечения  
в качестве Учебно-методического пособия для реализации основных  
профессиональных образовательных программ высшего образования  
магистратуры

**ИТМО**

Санкт-Петербург  
2025

Кораблев В.А., Сулин А.Б., Шеин В.М., Термостатирование и термостаты– СПб:  
Университет ИТМО, 2022. – 82 с.

Рецензент(ы):

Пронин Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор (квалификационная категория "ординарный профессор") образовательного центра "Энергоэффективные инженерные системы", Университета ИТМО.

Учебное пособие «Термостатирование и термостаты» предназначено для обучающихся по программам высшего образования по направлениям подготовки: 16.04.03 «Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения», 16.04.01 «Техническая физика», 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» при реализации дисциплин: «Теплофизика и теоретическая теплотехника», «Теплофизика проводящих сред», «Термостатирование и управление тепловыми процессами». В данном учебном пособии изложены основные понятия о термостатах и термостатировании, описаны достоинства и недостатки принципиальных схем с использованием данных теплообменных аппаратов, приведены примеры практического применения термостатов в зависимости от технологического процесса, рассмотрены вопросы касаемые автоматизации, регулирования и обслуживания термостатирующих систем. После каждого раздела представлен перечень вопросов/задач для самопроверки и подготовки к промежуточной аттестации.



ИТМО (Санкт-Петербург) — национальный исследовательский университет, научно-образовательная корпорация. Альма-матер победителей международных соревнований по программированию. Приоритетные направления: ИТ и искусственный интеллект, фотоника, робототехника, квантовые коммуникации, трансляционная медицина, Life Sciences, Art&Science, Science Communication. Лидер федеральной программы «Приоритет-2030», в рамках которой реализовывается программа «Университет открытого кода». С 2022 ИТМО работает в рамках новой модели развития — научно-образовательной корпорации. В ее основе академическая свобода, поддержка начинаний студентов и сотрудников, распределенная система управления, приверженность открытому коду, бизнес-подходы к организации работы. Образование в университете основано на выборе индивидуальной траектории для каждого студента. ИТМО пять лет подряд — в сотне лучших в области Automation & Control (кибернетика) Шанхайского рейтинга. По версии SuperJob занимает первое место в Петербурге и второе в России по уровню зарплат выпускников в сфере ИТ. Университет в топе международных рейтингов среди российских вузов. Входит в топ-5 российских университетов по качеству приема на бюджетные места. Рекордсмен по поступлению олимпиадников в Петербурге. С 2019 года ИТМО самостоятельно присуждает ученые степени кандидата и доктора наук.

© Университет ИТМО, 2025

© Кораблев В.А., Сулин А.Б., Шеин В.М., 2025

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Раздел 1. Основные сведения о термостатах .....	6
1.1 Классификация термостатов.....	6
1.2 Простейшая конструкция термостата.....	11
1.3 Математическая модель термостата .....	13
Вопросы для самопроверки по разделу 1 .....	17
Раздел 2. Системы автоматического регулирования. Регуляторы.....	18
2.1. Открытые и закрытые системы автоматического регулирования.....	19
2.2. Основные типы регуляторов .....	21
2.2.1 Пропорциональный (П) регулятор .....	21
2.2.2 Интегральный (И) регулятор .....	22
2.2.3 Дифференциальная составляющая (компонент дифференциального регулирования Д) .....	23
2.2.4 Пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор .....	24
2.2.5 Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор .....	24
2.2.6 Методы осуществления управления с обратной связью .....	25
2.2.7 Выходные сигналы регулятора.....	30
Вопросы для самоконтроля по разделу 2 .....	32
Раздел 3 Практические рекомендации и примеры термостатирования технологического оборудования в промышленности.....	34
3.1 Термостатирование в химической промышленности .....	34
3.2 Термостатирование в пищевой промышленности .....	36
3.3 Термостатирование валков и цилиндров в целлюлозно-бумажной промышленности.....	38
3.4 Термостатирование в приборостроении .....	39
3.5 Меры обеспечения безопасности при эксплуатации термостатов .....	41
3.5.1 Экономическая эффективность использования термостатов.....	42
Вопросы для самоконтроля по разделу 3 .....	42
Раздел 4 Расчет термостатов.....	44
Список использованных источников.....	77

## ВВЕДЕНИЕ

Неизменно основная задача производства — это выпуск качественной продукции, минимализация бракованных товаров, повышение энергетической эффективности и ресурсосбережение на предприятии. Значимость проводимых исследований в области термостатирования и термостатов обусловлена требованиями к точности и надежности контроля температуры, что, безусловно, оказывает влияние на качество выпускаемой продукции, комфорта человека в помещении и т. д.

Актуальность и важность термостатов в современном мире трудно переоценить, ведь практически в каждой сфере жизни человека, области науки, отрасли промышленности термостаты нашли свое место. Так, например, в жилищно-бытовом хозяйстве термостаты применяются в системах отопления, кондиционирования, вентиляции и прочей климатической технике (водонагреватели, радиаторы отопления, холодильники и т. д.). В промышленном секторе термостатирование активно применяется при работе систем автоматического регулирования технологических процессов, приборов и агрегатов, для которых особенно важно точное поддержание значения (диапазона) требуемой температуры. В области медицины и биологии, при проведении экспериментальных исследований и работе с микроорганизмами, тканями и т. д. термостаты обеспечивают надежность и точность поддержания параметров влажности и температуры в рабочей зоне. Также термостаты играют немаловажную роль в одном из наиболее актуальных направлений промышленности — приборостроении, при производстве различного рода и назначения электронной аппаратуры, датчиков, преобразователей, микросхем и т. д. Развитие науки, технологий и промышленности приводит к созданию более новых и точных модификаций термостатов для решения широкого спектра задач, связанных с системами автоматического регулирования и обеспечения требуемых значений температуры.

В данном учебном пособии освещаются основные понятия, связанные с термостатами и процессом термостатирования. В нем приводятся практические примеры применения термостатов в зависимости от специфики технологического процесса. Также рассматриваются вопросы автоматизации, регулирования и обслуживания систем термостатирования. После каждого раздела предлагается список вопросов и задач для самопроверки и подготовки к промежуточной аттестации. При выполнении расчетных заданий рекомендуется представлять результаты в виде отчетов, включающих таблицы, графики и письменные объяснения (при необходимости). Рекомендуется использование программных средств, таких как Excel, MATLAB или любые другие программы для выполнения вычислений и моделирования. Контроль выполнения задач и подготовка итоговых работ могут осуществляться в форме устных презентаций,

письменных отчетов, что способствует развитию коммуникативных навыков и самостоятельной исследовательской деятельности студентов.

Учебное пособие направлено на формирование и развитие навыков проектирования и эксплуатации термостатов и систем автоматизации для обучающихся по направлениям 16.04.03 «Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения», 16.04.01 «Техническая физика», 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника». Пособие «Термостатирование и термостаты», рекомендуется в качестве дополнительного информационного ресурса к циклу лекций и практических занятий по дисциплинам: «Теплофизика и теоретическая теплотехника», «Теплофизика проводящих сред», «Термостатирование и управление тепловыми процессами», конечная цель которых – подготовка специалистов в области обеспечения тепловых режимов приборов и термостатирования, востребованных в различных областях науки, техники и производства.

## Раздел 1. Основные сведения о термостатах

Обеспечение высокой точности поддержания температуры в сложных технологических процессах традиционно осуществляется при помощи специальных теплообменных аппаратов — термостатов. Рассмотрим основные понятия.

Термостат — теплообменный аппарат для нагрева или охлаждения, основной функцией которого является поддержание термостатируемой температуры объекта благодаря циркуляции теплоносителя в контуре.

Термостатирование — процесс поддержания температуры объекта в заданном диапазоне на протяжении всего технологического процесса, эксперимента или исследования объекта.

Основные задачи термостатирования и термостатов:

1. Контроль и управление температурным параметром: поддержание заданного значения температуры (диапазона температур) путем управления процессами нагрева и охлаждения в автоматическом режиме;
2. Безопасность функционирования технологического оборудования и приборов: система автоматического регулирования термостата обеспечивает безопасную эксплуатацию оборудования благодаря предотвращению чрезмерного нагрева или охлаждения, которое может снизить эффективность технологического процесса;
3. Обеспечение оптимального теплового режима и комфорта: данная задача актуальна для систем отопления, кондиционирования и вентиляции жилых, бытовых, административных зданий и сооружений;
4. Экономия энергетических ресурсов: обеспечение оптимального расхода и экономии электрической и тепловой энергии посредством точного контроля температуры и регулирования процессов нагрева и охлаждения;
5. Автоматизация технологических процессов и систем: реагирование системы в автоматическом режиме на изменяющиеся параметры, без «ручного» вмешательства персонала.

### 1.1 Классификация термостатов

Термостаты классифицируют по следующим категориям: по принципу действия, по подключению, по областям применения, по типу теплоносителя, по принципам нагрева и охлаждения. Рассмотрим каждую категорию более детально.

1. По принципу действия:

- **Механические термостаты** — основаны на применении механических элементов, например, биметаллических пластин для определения температуры и срабатывания устройства;

- **Электронные термостаты** — данный тип имеет набор электронных схем и датчиков, что дает возможность более точного контроля и управления работой термостата;
  - **Пневматические термостаты** — основаны на изменении давления в контуре в зависимости от температуры.
2. По области применения:
- **Промышленные термостаты** — применяются для контроля и управления температурой при протекании крупных технологических процессов;
  - **Бытовые термостаты** — используются в основном в бытовом хозяйстве (отопление, климат-контроль и т. д.).
  - **Лабораторные термостаты**, к которым относятся:
  - **Климатические камеры** — используются для обеспечения контроля параметров влажности температуры и т. д. при проведении экспериментальных исследований, хранении материалов и образцов;
  - **Криостаты** — используются для поддержания низких температур при проведении экспериментальных исследований в области медицины, химии, биологии и т. д.
3. По типу теплоносителя:
- **Водяные** — при данном типе теплоносителя максимальное значение температуры на выходе из термостата должно быть не более 95°C, при использовании перегретой воды 155 °C;
  - **Масляные** — в качестве теплоносителя используется высокотемпературное масло, которое позволяет обеспечить температуру 355°C.
4. По принципу нагревания:
- **Термостаты с нагреванием в ванне** — в данном типе термостатов регулирующий и управляющий органы находятся в специализированной емкости (ванне) с теплоносителем;
  - **Термостаты с принудительной циркуляцией** — в данном типе термостатов обеспечивается интенсивное движение теплоносителя для обеспечения равномерного нагрева по всей регулируемой зоне.
5. По принципу охлаждения:
- **Термостаты с прямым охлаждением** — в данном типе термостатов в конструкции предусмотрены теплообменные аппараты или радиаторы для эффективного отвода теплоты;
  - **Термостаты с косвенным охлаждением** — в данном типе термостатов используются холодильные машины и обеспечивается циркулирование охлаждающей жидкости.
6. По конструкции:



- Подогревные термостаты - (рисунок 1);
- Полупроводниковые термостаты - (рисунок 2);
- Дифенильные термостаты - (рисунок 3);
- Жидкостные термостаты - (рисунок 4).

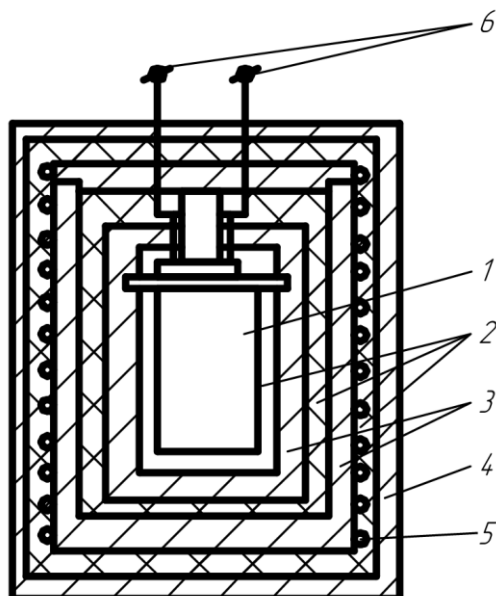


Рисунок 1 Подогревной термостат

1 – термостатируемый объект; 2 – теплоизоляционный материал; 3 – камера термостата; 4 – нагревательный/охладительный элемент; 5 – кожух; 6 – тепловая связь.

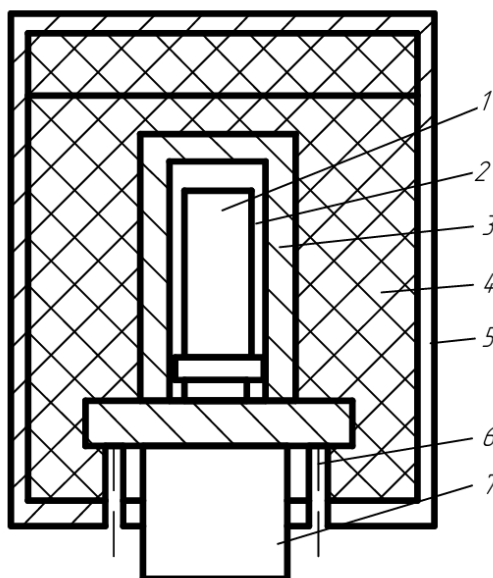


Рисунок 2 Полупроводниковый термостат

1 – термостатируемый объект; 2 – теплоизоляционный материал; 3 – камера термостата; 4 – основная прослойка теплоизоляционного материала; 5 – кожух; 6 – тепловая связь; 7 – термобатарея

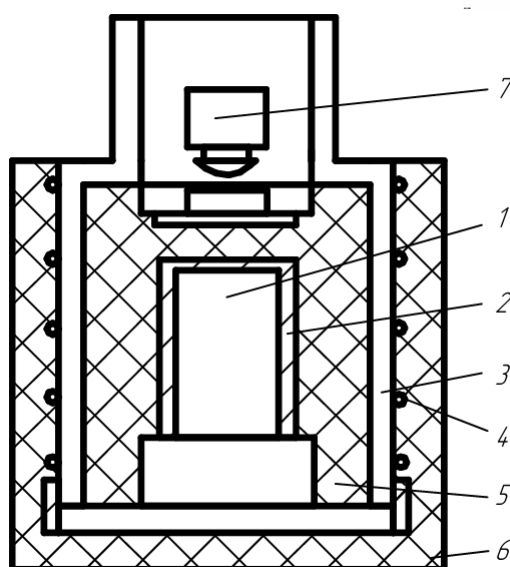


Рисунок 3 Дифференциальный термостат

1 – термостатируемый объект; 2 – камера внутренняя; 3 – камера внешняя; 4 – нагревательный/ охлаждающий элемент; 5 – теплоноситель; 6 – теплоизоляционный материал; 7 – чувствительный элемент манометрического типа

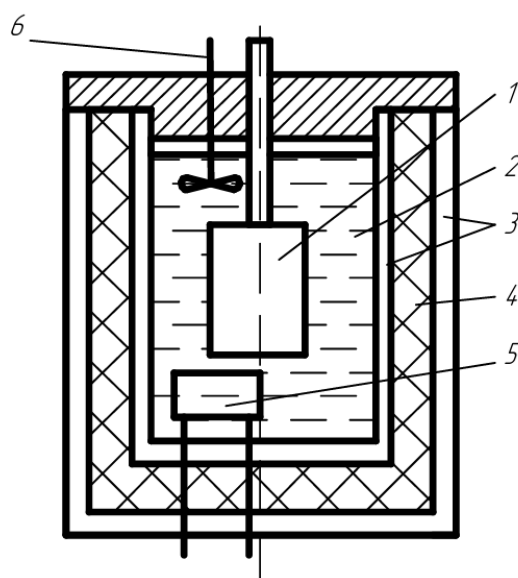


Рисунок 4 Жидкостной термостат

1 – термостатируемый объект; 2 – теплоноситель; 3 – фарфоровый котел; 4 – теплоизоляционный материал; 5 – нагревательный/ охлаждающий элемент; 6 – мешалка.

Однако, несмотря на большую классификацию термостатов по разным признакам, можно выделить основные элементы системы, которые присутствуют в большинстве теплообменных аппаратов, среди них:

1. Камера термостата – элемент, служащий для ограничения термостатируемого объема;
2. Объект термостатирования, который помещается в пространство камеры;
3. Слой тепловой изоляции, отделяющий камеру от окружающей среды (используется для снижения возмущений, поступающих от окружающей среды);
4. Внешний кожух, в который помещается вся конструкция;
5. Нагревающий или охлаждающий элемент, служащий для поддержания требуемого значения температуры объекта термостатирования;
6. Система автоматического регулирования для контроля рабочих параметров объекта;
7. Тепловые взаимодействия (связи) между элементами термостата (камера – объект - окружающая среда);
8. Вспомогательные компоненты термостата, к ним относят: опоры, стержни, провода, кабели и т. д.

Однако стоит отметить, что в зависимости от назначения или технологического процесса число компонентов может быть разным, но при этом их принципиальное назначение остается неизменным. Исходя из конструктивных особенностей термостата, были сформулированы основные методические рекомендации для разработки конструкции теплообменных аппаратов:

1. В случае, если термостат имеет многокомпонентную структуру с большим количеством источников тепловыделений в объекте, и одновременно необходимо поддержание высокой точности термостатирования абсолютно каждого компонента системы, следует на начальных стадиях проекта максимально обеспечить равномерное распределение источников тепловыделений по объекту;
2. Для минимизации тепловых потоков (подвод или отвод теплоты) к объекту необходимо использовать материалы, обладающие низким значением теплопроводности, или обеспечить расположение выводов объекта на изотермической поверхности. Также возможно применение тепловых компенсаторов;
3. При выборе конструктивных характеристик камеры термостата необходимо учитывать следующие условия:
  - Линии стыка поверхностей должны быть сглажены;
  - Выбор толщины стенок камеры должен выбираться исходя из требований, описанных в техническом задании к проекту;
  - Для обеспечения равномерного температурного поля в камере и минимизации колебаний температуры необходимо использовать материалы, обладающие высокими значениями теплопроводности и теплоемкости. Но высокое значение теплоемкости приводит к тому, что

время установления стационарного режима значительно увеличивается. Следовательно, необходимо выбирать материал исходя из его температуропроводности (алюминий, медь, латунь);

- Наличие с внешней и внутренней сторон среды, имеющей постоянную температуру;
  - Обеспечение равномерного расположения вблизи стенок камеры термостата нагревателя или охладителя;
  - Обеспечение плотного контакта между элементами и деталями термостата (контактные термические сопротивления должны быть минимальны).
4. Параметры системы электроснабжения термостата выбираются на основании теплового расчёта мощности нагревателя, уставленного в теплообменном аппарате;
  5. Выбор электрической изоляции между элементами термостата осуществляется на основании ее температуры разрушения, которая должна иметь значение температуры выше, чем нагреватель и чем соседние компоненты термостата;
  6. Электрическая изоляция должна иметь высокую электрическую прочность;
  7. Теплоизоляционный материал термостата выбирается из материалов, обладающих низким значением теплопроводности (войлок, пенопласт, стекловата и т. д.). В качестве тепловой изоляции допускается использовать вакуум. Габаритные характеристики теплоизоляционного материала рассчитываются для каждого проекта индивидуально;
  8. Для снижения радиационной составляющей теплообмена рекомендуется помещать конструкцию термостата в специальный кожух. При этом материал, из которого изготовлен кожух, должен иметь низкий коэффициент излучения (степень черноты) или же пройти дополнительную обработку (полировка или нанесение специальных покрытий для снижения степени излучения поверхности кожуха).

В различных областях техники предъявляются разные требования к точности поддержания температуры:

1. в эталонных термостатах — не более 1 мК;
2. в машиностроении — около 0,1 К;
3. в пищевой промышленности — примерно 1 К;
4. в металлургической отрасли — в пределах 10 К;
5. в приборостроении 0,01–0,1 К.

## **1.2 Простейшая конструкция термостата**

Как было отмечено ранее, на сегодняшний день существует большое количество конструктивных решений для термостатов. Рассмотрим простейшую модель термостата, представленную на рисунке 5.

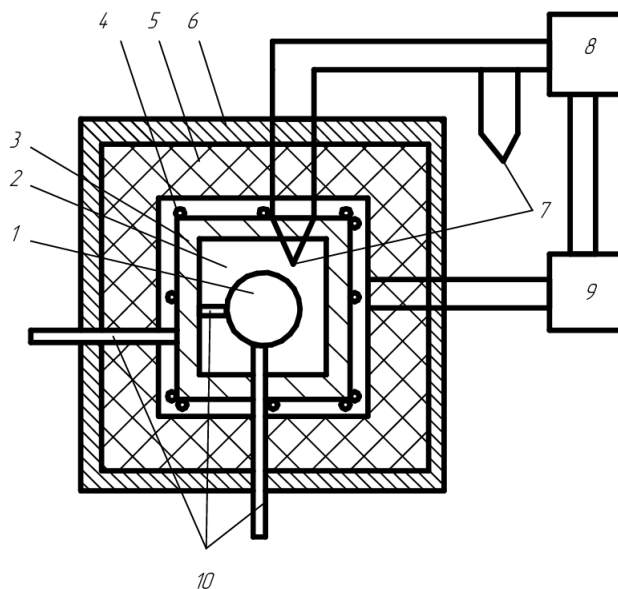


Рисунок 5 Простейшая конструкция термостата

Простейший термостат состоит из: 1- термостатируемый объект (далее образец); 2 – прослойка между образцом и камерой; 3 – камера термостата; 4 – источник теплового потока; 5 - теплоизоляционная прослойка; 6 – кожух; 7 – измерительный прибор (термопара, термометр сопротивления); 8 – усилитель-преобразователь сигнала; 9 – исполнительный орган.

Образец 1 помещается в изотермическую камеру 3 (равномерность разогрева стенок камеры поддерживается источниками теплового потока 4, которые находятся в пространстве камеры). Между образцом 1 и камерой 3 имеется прослойка воздуха 2. Снижение влияния внешних воздействий и возмущений на камеру достигается путем установки теплоизоляционной прослойки 5. Все компоненты термостата помещаются в изолированный кожух 6 для минимизации воздействия окружающей среды. Измерительный прибор 7, представляющий собой термопару или термометр сопротивления, усилитель-преобразователь сигнала 8 и исполнительный орган 9 обеспечивают регулирование значения температуры в камере и прослойке между образцом и камерой.

Разработка решений для обеспечения тепловой защиты образцов состоит из следующих шагов:

1. Выполнение исследования образца с описанием его основных параметров, в т. ч. условий его функционирования и возмущений, оказывающих на него влияние;
2. Определение методики обеспечения тепловой защиты, а также исходной структурной схемы;
3. Построение принципиальной схемы на основании выбранных элементов, входящих в схему;

4. Определение и расчет каждого элемента и параметра исходя из требований, предъявляемых к системе (статистические и динамические свойства);
5. Проведение лабораторных исследований разработанной системы и при необходимости уточнение параметров или компонентов;
6. Сборка и наладка системы в реальных условиях.

Исходя из представленных этапов можно сделать заключение, что для качественного выполнения всех перечисленных работ необходимо участие разнопрофильных специалистов.

### 1.3 Математическая модель термостата

Как отмечалось ранее, термостаты представляют собой сложный теплообменный аппарат, оснащенный системой автоматизации для поддержания требуемого уровня температуры объекта термостатирования.

Математическая модель подогревного термостата строится на основе анализа следующих технических параметров:

1. Необходимое (требуемое) значение температуры объекта (объема) термостатирования;
2. Точность поддержания необходимого (требуемого) значения температуры объекта (объема) термостатирования;
3. Неравномерность поля температур в объекте (объеме);
4. Внешние тепловые возмущения и воздействия на термостатируемый объект (объем);
5. Тепловая мощность, подводимая к объекту (объему) термостатирования
6. Массогабаритные характеристики термостата;
7. Применяемый регулятор, его особенности и характеристики.

Элементарная тепловая и математическая модели как для образца, так и для термостата в целом разрабатывается с учетом следующих допущений:

1. Замена реального образца на элементарный (упрощенный) объект (далее объект) объемом ( $V, \text{м}^3$ ) и площадью поверхности объекта ( $S, \text{м}^2$ );
2. Основные теплофизические характеристики исследуемого объекта, термостата и камеры выражены через величину полной теплоёмкости камеры и образца;
3. Поле температур по объекту равномерно. Значение температуры объекта при  $\tau > 0$  принимается равным мгновенному значению  $t_{об}(\tau)$ . Аналогичное допущение принимается для камеры термостата;
4. Исследуемый объект находится в тепловом взаимодействии с камерой термостата  $t_k(\tau)$  и окружающей средой с  $t_c(\tau)$ ;

5. Возмущающие тепловые воздействия характеризуются полной мощностью каждого элемента;
6. Теплоемкостью прослойки между образцом и камерой пренебрегаем (т.к. она много раз меньше теплоемкости образца, камеры и теплоизоляционного материала);
7. Прослойка между образцом и камерой характеризуется тепловой проводимостью  $\sigma_{об.к}$ ;
8. Теплоизоляционный материал характеризуется тепловой проводимостью  $\sigma_{из}$ ;
9. Теплообмен объекта с окружающей средой описывается законом Ньютона.

Соотношение (2.1) представляет собой математическое описание простого термостата с учетом допущений. Данное выражение получено исходя из закона сохранения энергии.

$$W_{об}(\tau) = C_{об} \frac{dt_{об}(\tau)}{d\tau} + \sigma_{пр} (t_{об}(\tau) - t_{пр}(\tau)) + \sigma_{об.к} (t_{об}(\tau) - t_{к}(\tau)) + \sigma_{об.с} (t_{об}(\tau) - t_{с}(\tau)), \quad (2.1)$$

$\sigma_{пр}$  – тепловая проводимость образца, описывается уравнением (2.2)

$$\sigma_{пр} = \alpha_{пр} V. \quad (2.2)$$

Соотношение (2,3) описывает процесс теплообмена камеры термостата с образцом и окружающей средой, при этом часть тепла накапливается в самой камере.

$$W_{к}(\tau) + \sigma_{об.к} (t_{об}(\tau) - t_{к}(\tau)) = C_{к} \frac{dt_{к}(\tau)}{d\tau} + \sigma_{к.с} (t_{к}(\tau) - t_{с}(\tau)). \quad (2.3)$$

Начальные условия к соотношениям 2.1 и 2.3:

$$t_{об}(\tau) = t_{об.н},$$

$$t_{к}(\tau) = t_{к.н}$$

Таким образом, соотношения 2.1 и 2.3 совместно с начальными условиями представляют собой математическое описание работы простейшего термостата. Однако в случае, если теплофизические параметры системы зависят от температуры, математическая модель примет нелинейный вид.

Основные допущения тепловой модели состоят в следующем:

1. В конструкции термостата выбираются наиболее важные в тепловом отношении элементы, характеризующиеся среднеповерхностной температурой, полной теплоемкостью и мощностью тепловыделений в них.
2. Теплообмен между элементами тепловой модели описывается уравнениями теплового баланса.
3. Тепловые проводимости между элементами тепловой модели рассчитываются в соответствии с законами кондуктивного, конвективного и лучистого теплообмена.
4. Датчик температуры и нагреватель, установленные на камере, подключены к регулятору температуры, который по сигналу датчика подает электропитание на нагреватель в соответствии с заданным законом регулирования. В простейшем случае применяется релейный или двухпозиционный закон регулирования: если температура камеры ниже заданной, то нагреватель работает на полную мощность, если температура камеры равна или выше заданной, то нагреватель выключен.

При работе такого устройства постоянно идет процесс нагрева или остывания камеры, и расхождение между заданным значением температуры на регуляторе и текущим значением камеры называется динамической погрешностью. Особенностью подогревных термостатов является дополнительный нагрев камеры за счет накопленного тепла в проводе нагревателя после отключения электропитания регулятором температуры.

Выбор параметров элементов тепловой модели производится в следующей последовательности:

1. Рассчитывается величина теплового сопротивления теплоизоляции, исходя из максимальной мощности тепловыделений в объекте термостатирования, заданной температурой камеры и максимальной температурой среды;
2. Рассчитывается мощность тепловыделений нагревателя, исходя из величины теплового сопротивления изоляции и минимальной температуры среды;
3. Зная теплоемкость камеры, тепловое сопротивление изоляции и мощность нагревателя, рассчитывают время выхода камеры термостата на заданный тепловой режим;
4. Если время выхода оказывается больше заданного в техзадании, то мощность нагревателя пересчитывается, исходя из заданного времени.
5. Рассчитывается толщина слоя изоляции, исходя из теплопроводности материала и допущения, что эта толщина будет много меньше размеров камеры;
6. Рассчитывается значение электрического сопротивления провода нагревателя, исходя из требуемой мощности и используемого напряжения электропитания;



7. Рассчитывается диаметр провода нагревателя, руководствуясь его электрическим сопротивлением, заданной длиной и удельным электрическим сопротивлением материала провода. Полученное значение диаметра округляется до десятых миллиметра в большую сторону.

Научные труды ученых в области тепловых режимов приборов, устройств, термостатов основываются на решении следующих задач:

1. Исследование стационарного теплового режима термостата. Данная задача позволяет обоснованно выбрать как теплофизические, так и конструкционные характеристики термостата, а также определить, каким образом меняется температура термостата, в зависимости от тепловых воздействий на объект. К основным тепловым воздействиям на объект принято относить: мощность источника теплоты, величину температуры, окружающей среду, мощность тепловыделений в объекте;
2. Исследование температурного распределения внутри объекта и камере, а также их теплового взаимодействия с окружающей средой и с соседними элементами термостата;
3. Определение внутренних тепловыделений и тепловых взаимодействий термостатируемого образца, влияющих на распределение температуры;
4. Исследование работы термостата в нестационарном режиме. Решение данной задачи дает возможность оценить тепловую инерцию образца и каждого из элементов, входящего в состав схемы, а также получить динамические зависимости работы термостата (в т.ч. его составных элементов) и провести оценку влияния внешних воздействий на термостатируемый образец и на точность термостатирования;
5. Исследование и разработка системы автоматизации процесса поддержания постоянной температуры объекта, а также оценка применимости различных регуляторов в конструкции термостата;
6. Исследование габаритных и эксплуатационных характеристик термостатов, на основе разработки новых расчетных, экспериментальных методов исследования (в т. ч. методов математического моделирования и визуализации);

Таким образом, проведенный анализ тепловой и математической моделей термостата позволил сделать заключение, что процесс решения задачи теплообмена будет значительно упрощен, если соблюдать следующую последовательность:

1. Провести исследование теплового режима термостата при обеспечении равномерности тепловых воздействий на него;
2. Провести исследование возникающих локальных эффектов, обусловленных тепловыми связями между элементами термостата. В первом приближении

допускается принять возникающие воздействия от внутренних источников энергии и от окружающей среды равномерными (значения коэффициентов теплообмена и теплофизические характеристики термостата неизменны).

Совокупность решений задач первого и второго этапов позволяет провести оценочные расчеты и дать приближенную аналитическую картину теплового режима термостатирующих устройств. Такой подход является правомочным, так как при решении задач теплообмена систем термостатирования одно из основных технических требований сводится к обеспечению равномерного температурного поля в термостатируемом объеме.

### **Вопросы для самопроверки по разделу 1**

1. Что такое термостат и термостатирование?
2. Классификация термостатов по назначению.
3. Классификация термостатов по теплоносителю.
4. Классификация термостатов по принципу действия.
5. Классификация термостатов по области применения.
6. Классификация термостатов по принципу нагрева и охлаждения.
7. Подогревные термостаты. Принципиальная схема и компонентный состав термостата.
8. Жидкостные термостаты. Принципиальная схема и компонентный состав термостата.
9. Полупроводниковые термостаты. Принципиальная схема и компонентный состав термостата.
10. Дефинильные термостаты. Принципиальная схема и компонентный состав термостата.
11. Простейшая конструкция термостата. Принципиальная схема и принцип действия.
12. Математическая модель термостата. Основные зависимости и законы.
13. Математическая модель термостата. Допущения, принятые при математическом моделировании.
14. Основные научные задачи в области термостатирования и исследования термостатов.
15. Разработка решений для обеспечения тепловой защиты образцов
16. Методические рекомендации при выборе конструктивных характеристик камеры термостата.
17. Методические рекомендации при выборе электрической изоляции.
18. Методические рекомендации при выборе тепловой изоляции.
19. Методические рекомендации при выборе материалов кожуха.
20. Основные тепловые взаимодействия (связи) в термостате.

## **Раздел 2. Системы автоматического регулирования. Регуляторы.**

Для более четкого понимания основных вопросов, касающихся систем автоматического регулирования и регуляторов, введем следующие понятия:

**Продолжительность цикла** — временной промежуток между несколькими последовательными вычислениями и корректировками выходного сигнала. Пример: если продолжительность цикла составляет 15 секунд, то регулятор осуществляет процесс пересчета управляемой величины каждые 15 секунд. Исходя из продолжительности цикла выделяют быстрые и медленные регуляторы.

**Управление выходным сигналом или рабочий цикл** — промежуток времени в цикле, в котором регулятор находится в активном состоянии при максимальной мощности регулирующего воздействия. Пример: есть рабочий цикл (50%) продолжительностью 30 секунд. При таком режиме работы регулятор находится 15 секунд в активном состоянии, и 15 секунд - в пассивном (не работает).

**Нейтральная область (W)** — область, в которую включен диапазон значений параметра выше требуемого, при котором процесс охлаждения не протекает. Наличие нейтральной (мертвой) области W обусловлено возникновением периодических переключений между процессами нагрева и охлаждения, приводя к нежелательным колебаниям.

**П – отклонение (пропорциональное)** — явление, при котором значение регулируемого параметра не соответствует требуемому (заданному) значению. Возникновение данного типа отклонения объясняется тем, что измеренное (фактическое) значение достигает стационарного состояния в точке, где выходная мощность, которая определяется по П-полосе, равна тепловым потерям в приборе.

**Возмущение** — воздействие, зачастую вызванное внешними факторами, которое, в свою очередь, приводит к возникновению нежелательных отклонений и изменений в регулируемом параметре. Основными примерами возмущений принято считать:

- Тепловые потоки (подвод/ отвод), воздействующие на объект при протекании технологического процесса;
- Возникающие колебания расхода протекающего теплоносителя, вызванного разными факторами (засор, протечка и т. д.);
- Скачки напряжения в сети электроснабжения, приводящие к колебаниям производительности насоса;

При правильной настройке и калибровке регулятора он способен компенсировать перечисленные выше воздействия.

**Регулирующая величина «У»** — параметр, который показывает, какое количество энергии было подведено в систему или отведено из нее для постоянного поддержания заданного (требуемого) значения температуры объекта. При значении регулирующей величины «У» от нуля до минус 100% протекает процесс охлаждения, при значении регулирующей величины «У» больше нуля до плюс 100% протекает процесс нагрева объекта.

**Рассогласование в системе «X<sub>w</sub>»** — разница между требуемым (заданным) значением температуры объекта и фактически измеренным.

**Непрерывный сигнал** — аналоговый сигнал в виде постоянно изменяющейся переменной с минимальным разрешением.

**Цифровой сигнал** — дискретный сигнал, который имеет только два стабильных состояния: ВКЛ/ВЫКЛ и МАКС/МИН.

## 2.1. Открытые и закрытые системы автоматического регулирования

На рисунке 6 представлена открытая система управления контура охлаждающей воды термостата. Открытые системы автоматического регулирования характеризуются отсутствием сравнения параметров на выходе из регулятора с требуемыми или заданными пользователем изначально (т. е. сигнал на выходе не влияет на управляемое воздействие).

В теории автоматического регулирования подобные системы получили название — открытые системы без обратной связи. На рисунке 6 представлен пример открытой системы, в которой объектом регулирования является литейная форма, которая используется на предприятиях сталелитейной отрасли. Так объект регулирования управляется путем применения ручного регулировочного клапана (запорная арматура). При колебаниях параметра давления, температуры или расхода теплоносителя система в автоматическом режиме производит регулировку температуры объекта с соблюдением теплового баланса в системе (тепловой поток от расплавленного железа к литейной форме и отвод теплоты нагретой литейной формы посредством охлаждающей воды).

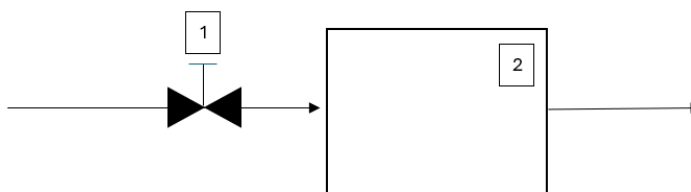


Рисунок 6. Открытая система управления контура охлаждающей воды термостата

1 – регулировочный клапан с ручным управлением; 2 – объект охлаждения (например: литейная форма)

Описанная на рисунке открытая схема управления может быть модифицирована в закрытую систему с обратной связью (рисунок 7). Отличительной чертой между схемами является наличие регулятора температуры, регулировочного клапана с электромагнитным управлением и измерительного прибора (датчика температуры, который устанавливается непосредственно в литьевой форме).

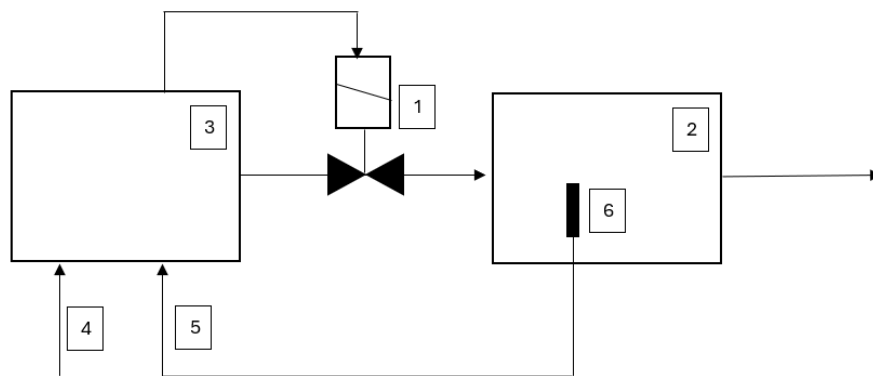


Рисунок 7. Закрытая система управления контура охлаждающей воды термостата

1 – регулировочный клапан с электромагнитным управлением; 2 – объект охлаждения (например: литьевая форма); 3 – регулятор; 4 – требуемая величина температуры (заданная); 5 – измеренное значение температуры объекта; 6 – измерительный прибор (датчик измерения температуры).

Использование представленной схемы дает возможность осуществлять постоянное измерение действительной температуры литьевой формы и передачу измеренного значения на регулирующий орган для сравнения с требуемым (заданным) значением температуры.

При этом в самом регулирующем органе также осуществляется коррекция управления в автоматического режиме, которая основывается на 3 состояниях:

- в случае несоответствия (расхождения значения измеренной прибором температуры от заданной в отрицательную сторону) регулирующий орган дает сигнал на электромагнитный клапан, который полностью или частично перекрывает движущийся поток охлаждающей воды;
- в случае, если измеренная прибором температура полностью совпадает с требуемой (заданной) температурой, регулятор продолжает функционировать в заданном режиме работы;
- в случае несоответствия (расхождения значения измеренной прибором температуры от заданной в положительную сторону) регулирующий орган дает сигнал на открытие электромагнитного клапана, который увеличивает расход охлаждающей воды. Если в системе установлена двухпозиционная

регулировка, то функционирование электромагнитного клапана осуществляется только в двух режимах ВКЛ/ВЫКЛ. На практике было установлено, что качество регулирования и поддержания заданного значения температуры объекта одинаково как при использовании непрерывного регулирования, так и двухпозиционного. Однако двухпозиционный регулятор является более экономичным и устойчивым к возникающим внешним воздействиям и возмущениям.

В теории автоматического регулирования существуют принципы «жесткого» и «гибкого» управления. Смысл принципа «жесткого» управления заключается в высокой степени оперативности реагирования даже на незначительные отклонения значения температуры от заданного. В свою очередь, принцип «гибкого» управления, напротив, имеет низкую степень реагирования и низкую чувствительность к малым значениям отклонения температуры от заданного. При этом использование принципа «гибкого» управления дает возможность снижения потребления электроэнергии за счет ступенчатого регулирования. На сегодняшний день в сложных технологических процессах применяются регуляторы, в алгоритме которых исключено мгновенное переключение на режимы максимального нагрева или максимального охлаждения. Такие регуляторы позволяют снизить колебания температуры за счет автоматизированной корректировки сигналов (увеличение или уменьшение мощности) при отклонении регулируемых параметров.

## 2.2. Основные типы регуляторов

Рассмотрим основные типы регуляторов, применяемых в системах автоматического регулирования.

### 2.2.1 Пропорциональный (П) регулятор

**Принцип действия:** Пропорциональный (П) регулятор формирует управляющее воздействие, пропорциональное текущей ошибке (соотношение 4):

$$u_t = K_p e(t), \quad (4)$$

где  $K_p$  — коэффициент пропорциональности.  $e(t)$  — ошибка, определяемая как разность между требуемым (заданным) значением (например температуры термостата или объекта) и измеренным (соотношение 5).

$$e(t) = r(t) - y(t), \quad (5)$$

где  $r(t)$  — референтное (требуемое) значение параметра температуры, а  $y(t)$  — измеренное значение параметра температуры.

### Достоинства (П) регулятора:

- данный тип регуляторов имеет высокое значение динамической реактивности, которое, в свою очередь, дает возможность мгновенной адаптации системы автоматического регулирования к изменениям;
- достаточно простая конструкция (П) регулятора, не требующая дополнительных сложных вычислений и мощностей для их проведения;
- высокий уровень устойчивости регулятора при осуществлении настройки или корректировки в условиях низких уровней внешних воздействий;
- (П) регулятор имеет низкое время запаздывания системы

### Недостатки (П) регулятора:

- при наличии постоянных сильных внешних воздействий на систему в (П) регуляторе возникает статистическая ошибка;
- в случае работы в режиме с высоким значением времени запаздывания системы возникают эффект перерегулирования и колебания в работе аппарата;

При регулировке значения температуры в системе пропорциональная полоса ограничивает диапазон температур выше и ниже необходимого значения, заданного пользователем. Соответственно, при превышении необходимого (требуемого) значения температуры регулятор посылает сигнал для включения охладителя в системе, при значении необходимой (требуемой) температуры ниже необходимого значения регулятор посылает сигнал для включения нагревателя в системе.

Выходной сигнал, отправляемый на исполнительное устройство, изменяется пропорционально величине рассогласования между заданным и фактическим значениями в диапазоне от 0 до 100%. Например, при ширине П-полосы 20 °С и рассогласовании 10 °С выходная мощность составляет 50%.

## 2.2.2 Интегральный (И) регулятор

**Принцип действия:** Интегральный (И) -регулятор формирует управляющее воздействие пропорционально интегралу ошибки по времени (соотношение 6):

$$u_t = K_i \int_0^t e(t) dt, \quad (6)$$

где  $K_i$  — коэффициент интеграции. Данный параметр обеспечивает реагирование системы на возникающее длительное отклонение параметра от заданного значения. Также коэффициент интеграции позволяет скомпенсировать длительные (постоянные) возмущения и систематическое смещение.

В данном типе регуляторов И-составляющая дает возможность регулировки возникающего рассогласования за счет интегрирования по времени. Значение интегрального времени измеряется в секундах и имеет два варианта задания: автоматически (т. е. регулятором) и вручную (т. е. пользователем)

#### **Достоинства (И) регулятора:**

- в интегральном регуляторе отсутствует статическая ошибка при достижении стационарного режима работы ( $e(t) \rightarrow 0$ );
- высокая эффективность работы при возникновении длительных внешних воздействий и возмущений, которые оказывают влияние на режим работы системы;
- высокая точность регулирования параметров. Данный эффект достигается за счет автоматизированной функции по «запоминанию» и анализу ошибок, которые происходили в прежние периоды работы;

#### **Недостатки (И) регулятора:**

- при возникновении ослабления или запаздывания сигнала время реагирования системы увеличивается;
- при чрезмерном увеличении коэффициента интеграции возможно возникновение колебаний в работе системы (в т. ч. автоколебания) и перегрузок.

Рассмотрим на примере принцип работы системы регулирования с применением интегрального регулятора. Пусть пропорциональная полоса (П-полоса) 0 °С, тогда выходной сигнал равен 0%. При этом стоит отметить, что наличие в системе тепловых потерь, связанных, например с процессами излучения, приводит к повторному рассогласованию. Таким образом, фактическое (измеренное) значение будет поддерживаться на уровне, при котором выходная величина, определяемая П-полосой, компенсирует потери.

### **2.2.3 Дифференциальная составляющая (компонент дифференциального регулирования Д)**

Компонент дифференциального регулирования (Д) характеризуется временем, которое нужно регулятору для того, чтобы предотвратить возникшие изменение регулируемой величины (например, если значение температуры объекта выше или ниже заданного пользователем значения). Регулировка производится путем анализа скорости измерения регулируемого параметра. Таким образом, дифференциальная составляющая понижает выходной сигнал до достижения пропорциональной полосы, что способствует замедлению колебаний температуры. Величина Д-составляющей так же, как и И-составляющей,



измеряется секундах и имеет два варианта задания: автоматически (т. е. регулятором) и вручную (т. е. пользователем)

#### 2.2.4 Пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор

**Принцип действия:** пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор комбинирует в себе свойства и механизмы как пропорционального регулятора, так и интегрального регулятора, и задается соотношением 7:

$$u_t = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt, \quad (7)$$

где  $K_p$  и  $K_i$  — коэффициент пропорциональности и коэффициент интеграции. Представленная схема автоматического регулирования дает возможность быстрого реагирования на возникающие внешние воздействия и возмущения за счет П-компонента регулятора и предотвращает возникновения статической ошибки за счет И-компонента регулятора.

**Достоинства пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора:**

- пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор имеет высокую точность регулирования параметр;
- пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор является универсальным регулятором в промышленных системах автоматизации;
- вероятность перерегулирования в системе при использовании ПИ-регулятора минимальна.

**Недостатки пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора:**

- сложность настройки и калибровки (ПИ) регулятора. Наличие двух составляющих регулирования «П» и «И» при неправильной настройке и калибровке соответствующих коэффициентов приводит к резким колебаниям регулируемой величины;
- непрерывные внешние воздействия и возмущения приводят к неустойчивости системы, изменению нагрузки и длительному переходному процессу;

#### 2.2.5 Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор

**Принцип действия:** Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор в своем составе имеет все три составляющие описанных ранее регуляторов: пропорциональную, интегральную и дифференциальную. Закон регулирования представлен соотношением (8):

$$u_t = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (8)$$

где  $K_d$  — коэффициент дифференциальной составляющей.

#### **Достоинства пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора:**

- пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор имеет высокую скорость реагирования и точность контроля параметров;
- малое количество переходных процессов;
- наличие дифференцирующей составляющей дает возможность прогнозирования изменения параметра;
- возможность активации управляющего воздействия до достижения стационарного режима работы. Данное преимущество приводит к значительной экономии времени на нормальный режим работы;
- гибкость и простота настройки и калибровки регулятора исходя из особенностей протекающего технологического процесса (даже в условиях мгновенных внешних возмущений и воздействий);
- ПИД-регулятор эффективнее справляется с возникающими колебаниями в системе по сравнению с пропорциональным и пропорционально-интегральным регуляторами.

#### **Недостатки пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора:**

- сложность настройки и калибровки ПИД-регулятора, связанная с наличием коэффициентов -  $K_p, K_d, K_i$ , требующих высокой точности определения;
- высокая чувствительность к возникающим шумам в процессе измерения. Наличие Д-составляющей приводит к появлению помех на высоких частотах, что требует дополнительной фильтрации сигнала;
- высокое значение времени запаздывания сигнала в системе может приводить к неустойчивости работы и осложнять процесс регулировки параметра объекта;

### **2.2.6 Методы осуществления управления с обратной связью**

Рисунок 8 иллюстрирует пример регулирования процесса литья железа под давлением, при котором в систему подводится теплота (т. е. термостат функционирует в режиме охлаждения объекта).

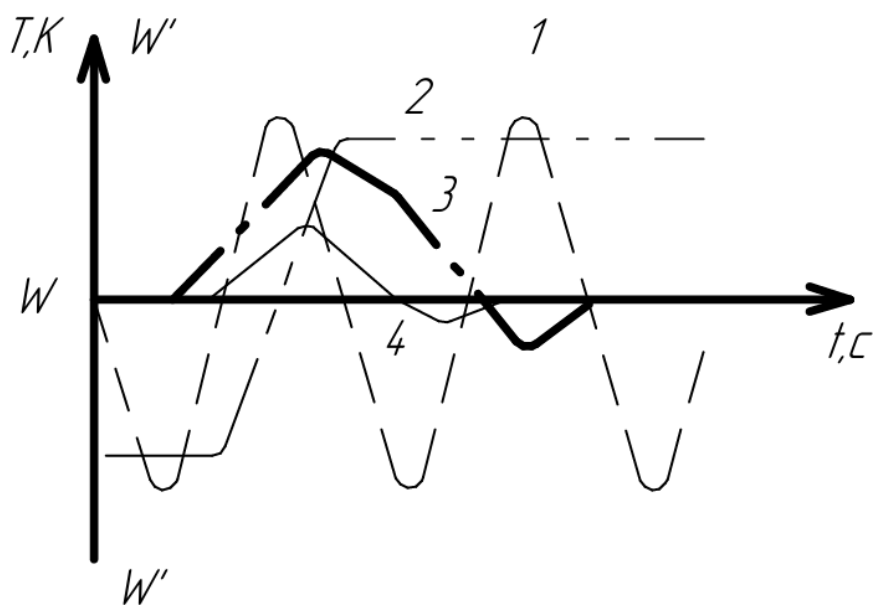


Рисунок 8 Регулирующее воздействие при различных методах регулирования с учетом компенсации возникающих внешних возмущений.

Здесь  $W'$  - рассогласование в системе автоматического регулирования;  $W$  - заданное пользователем значение; 1 – двухпозиционный регулятор; 2 - пропорционально -дифференцирующее (ПД) регулирование; 3 - пропорционально-интегрально- дифференцирующее (ПИД) регулирование; 4 - комбинированное регулирование (ПИД/ПД);  $T$  - значение температуры в системе, К;  $t$  – время протекания процесса, с.

Одним из наиболее распространенных примеров применения двухпозиционного управления (на рисунке 8 линия 1) являются термостаты безопасности. Как отмечалось ранее, данный тип регуляторов функционирует в двух режимах: «включено» или «выключено», т. е. нагрев или охлаждение. Отсутствие промежуточных положений и гибкости в управлении приводит к низкому качеству регулировки параметров объекта. Наиболее часто двухпозиционные регуляторы применяются в системах, имеющих большую инерционность (например, помещения, в которых необходимо поддерживать заданное значение температуры воздуха, или когда точность поддержания температуры не имеет особой важности).

В случае применения регулятора с пропорционально-дифференциальным (ПД) управлением (на рисунке 8 линия 2) рассогласование, которое установилось в системе, не стремится к нулевому значению. Величина параметра отклонения или рассогласования характеризуется потерями энергии, которые возникают в системе (например, излучение, теплопроводность, конвекция). Таким образом, если рассмотреть применение данного типа регулятора в системе автоматизации литейных форм, то можно отметить следующую особенность: еще до начала

процесса впрыска расплава металла температура объекта (формы) уже будет иметь отклонение от заданного пользователем значения. Это связано с тем, что в процессе самого впрыска расплава реализуется эндотермический процесс. Соответственно, достижение заданного пользователем значения температуры становится невозможным.

При использовании в системе автоматического регулирования технологического процесса ПИД регулятора (на рисунке 8 линия 3) появляется возможность избежать возникновения рассогласования в системе за счет наличия интегральной составляющей. Как отмечалось ранее, в интегральном регуляторе отсутствует статическая ошибка при достижении стационарного режима работы ( $e(t) \rightarrow 0$ ). Волновые характеристики (амплитуда и частота колебаний) в данном типе регулятора зависят исключительно от пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих. Однако стоит отметить, что управляющее воздействие при использовании в системе ПИД-регулятора формируется значительно медленнее, чем при использовании каскадной системы (ПИД/ПД) (на рисунке 8 линия 4), так как возникает задача достижения стационарного режима с минимальным уровнем колебаний.

Некоторые версии ПИД регуляторов оснащены автоматической опцией оптимизации параметров регулирования (т. е. регулятор самостоятельно вычисляет оптимальные значения величин для режимов нагрева или охлаждения на основании параметров протекающего теплоносителя и объекта регулирования). Однако использование данного типа регуляторов является ресурсозатратным:

- сложность автоматизации (настройка и калибровка) регулятора;
- для корректной настройки и оптимизации параметров необходимо обеспечить постоянное протекание процессов нагрева и охлаждения в системе;
- отсутствие сведений по процессам нагрева и охлаждения объекта термостатирования. Данные сведения необходимы для проведения корректных расчетов оптимальных параметров системы;
- при протекании процесса охлаждения возвращение системы в исходное положение (достижения исходной температуры) требует длительного промежутка времени;
- процесс оптимизации параметров системы проводится повторно при смене литейной формы.

Таким образом, можно сделать заключение, что применение ПИД регуляторов, оснащенных автоматической опцией оптимизации параметров регулирования в системах термостатирования, является ограниченным.

Еще одной разновидностью ПИД регуляторов являются самонастраивающиеся ПИД-регуляторы, принцип работы которых основывается на адаптации в реальном времени к изменяющимся условиям технологического

процесса. К таким условиям можно отнести простой оборудования или его профилактику и т.д. Однако применение самонастраивающихся ПИД-регуляторов в системах термостатирования нежелательно, поскольку регуляторы данного типа обладают очень высокой чувствительностью и реакцией даже на незначительные внешние воздействия или возмущения. Эти недостатки могут привести к нежелательным управляющим воздействиям и перегрузке системы. Одним из решений данных проблем, может быть, установка дополнительного датчика температуры в контроллер или дополнительная установка в регулятор десяти наборов регулируемых параметров. Этот подход позволит обеспечить в процессе регулирования быстрое реагирование и гибкое управление параметрами системы.

Пример процессов регулирования значения температуры жидкости и литейной формы представлен на рисунках 9 и 10.

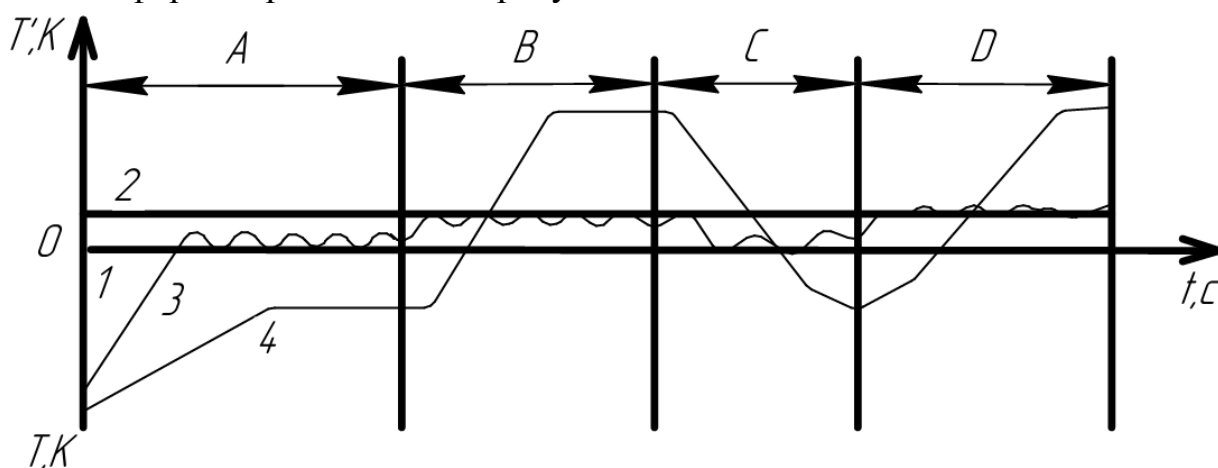


Рисунок 9. Регулирование температуры жидкости с применением ПИД регулятора

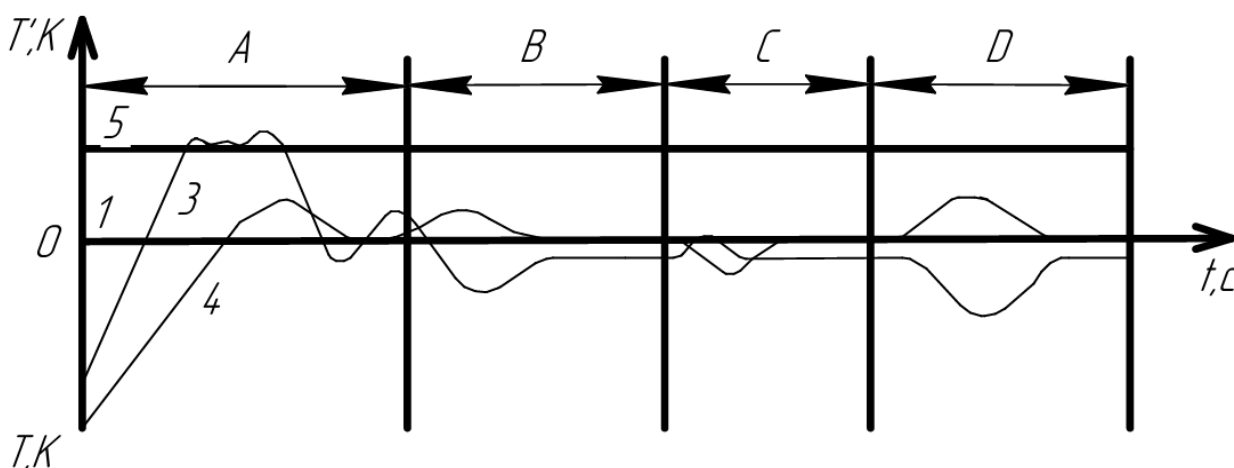


Рисунок 10 Регулирование температуры литейной формы с применением ПИД регулятора

Для решения широкого спектра задач термостатирования объектов наиболее целесообразно использовать комбинацию нескольких типов регулирования. Совместное использование ПИД и ПД регуляторов (рисунок 11) является наиболее эффективным решением, в особенности на производствах тяжелой металлургии (литьевые процессы).

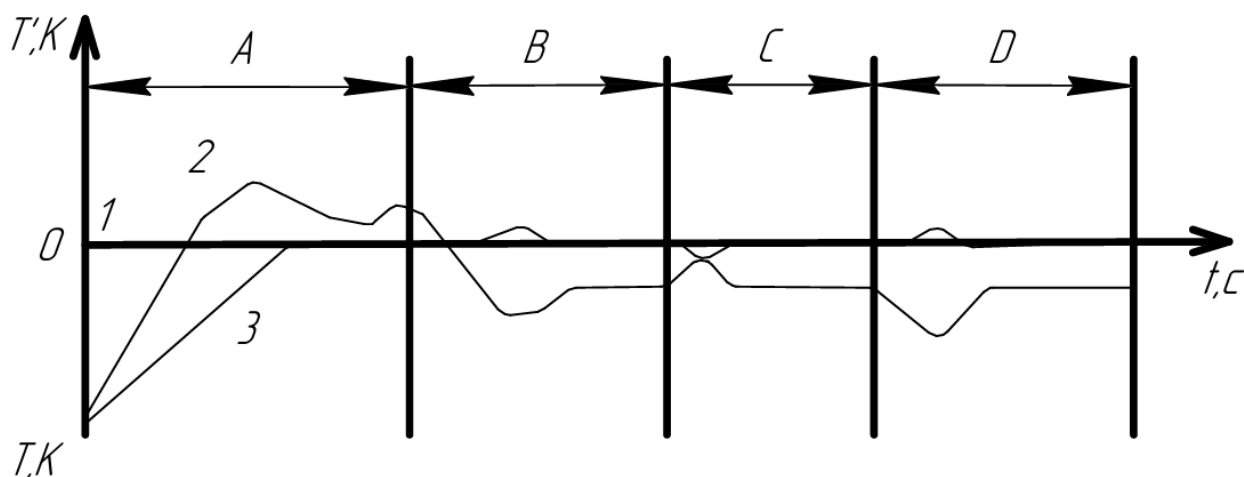


Рисунок 11 Регулирование температуры литейной формы с применением комбинации пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора и пропорционально -дифференциального (ПД) регулятора.

Здесь 1 — заданное значение температуры, которую необходимо поддерживать в системе; 2 — температура теплоносителя, K; 3 — значение температуры литейной формы, K;  $t$  — время протекания процесса, с. Участок «А» - процесс нагрева; участки «В и D» - процесс охлаждения; участок «С» - процесс прерывания охлаждения.

В представленной на рисунке 11 схеме ПД регулятор формирует заданное значение для дополнительно установленного в схеме ПИД регулятора, с учетом величины отклонения (рассогласования) в системе. При этом дополнительно используемый регулятор, обладающий высокой степенью чувствительности, обеспечивает быстрый отклик системы, тем самым снижая перепад температур между протекающей жидкостью и объектом регулирования (литейной формой). Данный подход позволяет минимизировать передачу избыточной тепловой энергии жидкости, поддерживая высокий уровень точность регулирования и контроля параметров.

Таким образом, система автоматического регулирования с комплексным использованием ПИД и ПД регуляторов обеспечивает мгновенное реагирование даже на минимальные отклонения параметра от заданного. При этом полностью исключается риск возникновения длительных колебаний регулируемого параметра, а также его выхода за допустимые диапазоны.

### 2.2.7 Выходные сигналы регулятора

В теории автоматического регулирования выходные сигналы из регулятора принято делить на две категории: синхронизированные (дискретные) и непрерывные (аналоговые) выходные сигналы.

#### – Синхронизированные (дискретные) выходные сигналы

На рисунке 12 представлен вид синхронизированного (дискретного) выходного сигнала из регулятора.

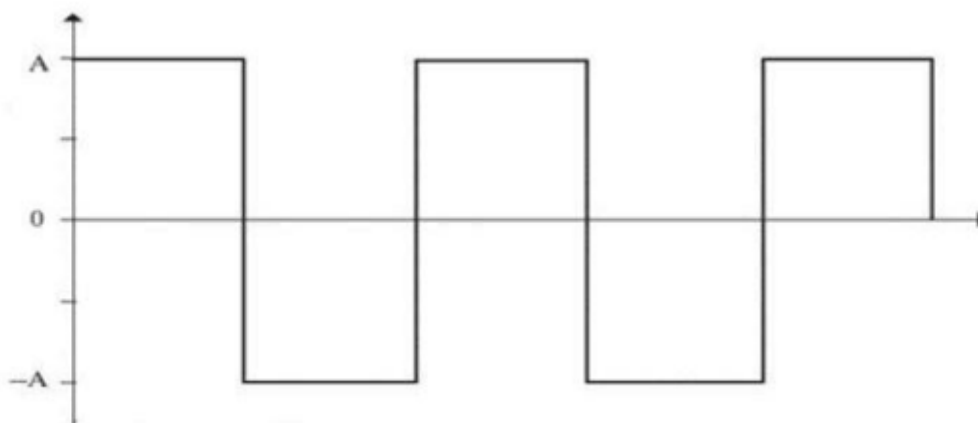


Рисунок 12 Синхронизированные (дискретные) выходные сигналы

Синхронизированные или дискретные выходные сигналы, как правило, обеспечиваются двухпозиционными регуляторами, управление в которых базируется на двух состояниях исполнительного элемента «ВКЛ» / «ВЫКЛ» (например, электромагнитные контакторы) или «ОТКРЫТ» / «ЗАКРЫТ» (например, электромагнитный клапан). Значение величины рабочего цикла определяет уровень передаваемой выходной мощности. Инерционные регулирующие системы поддерживают высокую точность дискретных (синхронизированных) выходных сигналов, что дает возможность корректной работы с двухпозиционными исполнительными механизмами. Однако стоит отметить, что в регуляторах, применяемых в системах термостатирования в большинстве случаев, используются трехпозиционные исполнительные механизмы. Их основное отличие от двухпозиционных заключается в наличии дополнительного положения на регуляторе, соответствующем нейтральному положению. Пример трехпозиционного регулятора представлен на рисунке 13.



Рисунок 13 Регулятор трехпозиционный (цифровой) ТРИД РК124

#### – Непрерывные (аналоговые) выходные сигналы

На рисунке 14 представлен вид непрерывного (аналогового) выходного сигнала из регулятора.

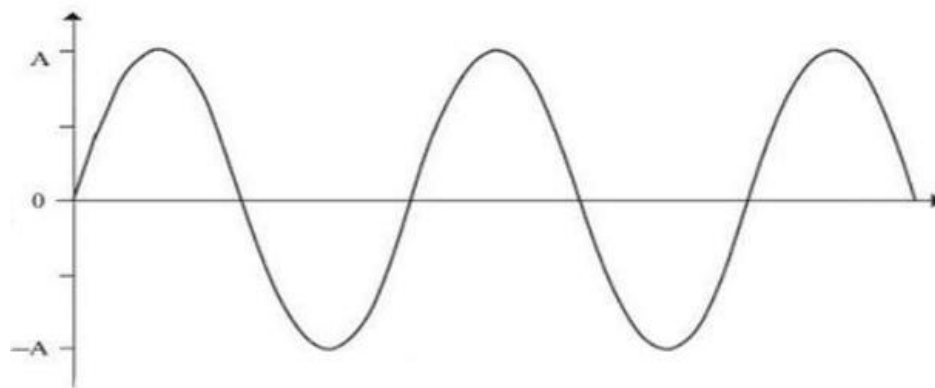


Рисунок 14 Непрерывные (аналоговые) выходные сигналы

В системах автоматического регулирования, работающих с аналоговыми выходными сигналами, дополнительно предусмотрена возможность управления и регулирования исполнительным механизмом на всех промежуточных положениях, которые находятся между «ВКЛ» / «ВЫКЛ» или «ОТКРЫТ» / «ЗАКРЫТ». Данный тип сигналов формируется в диапазоне от 0,5 до 20 мА.

Примерами исполнительных механизмов, работающих с аналоговыми (непрерывными) выходными сигналами в системах термостатирования являются пневматические клапаны или пневмораспределители (рисунок 15) или сервомеханизмы клапанного типа (рисунок 16).





Рисунок 15 Пневмораспределитель с электромагнитным управлением



Рисунок 16 Клапанные сервоприводы серии V70

### Вопросы для самоконтроля по разделу 2

1. Дать определение понятиям «продолжительность цикла» и «управление выходным сигналом (рабочий цикл)». Привести пример.
2. Дать определение понятию «нейтральная область (W)». Описать особенности возникновения данной области.
3. Дать определение понятию «возмущение» и привести примеры возмущений.
4. Дать определение понятиям «регулирующая величина (Y)» и «рассогласование в системе ( $X_w$ )».
5. Дать определение понятиям Непрерывный сигнал и Цифровой сигнал. Привести пример.
6. Дать определение понятию «открытая система автоматического регулирования». Особенности открытой системы автоматического регулирования, схема и пример.

7. Дать определение понятию «закрытая система автоматического регулирования». Особенности закрытой системы автоматического регулирования, схема и пример.
8. Возможные состояния регулирующего органа (регулятора).
9. Принцип работы двухпозиционного регулятора.
10. Принцип работы непрерывного регулятора.
11. Основные типы регуляторов. Пропорциональный (П) регулятор. Описание принципа действия, его достоинств и недостатков.
12. Основные типы регуляторов. Интегральный (И) регулятор. Описание принципа действия, его достоинств и недостатков.
13. Основные типы регуляторов. Пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор. Описание принципа действия, его достоинств и недостатков.
14. Дифференциальная составляющая (компонент дифференциального регулирования Д).
15. Основные типы регуляторов. Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор. Описание принципа действия, его достоинств и недостатков.
16. Методы осуществления управления с обратной связью.
17. Выходные сигналы регулятора. Синхронизированные (дискретные) выходные сигналы.
18. Выходные сигналы регулятора. Непрерывные выходные сигналы.
19. ПИД-регуляторы с автоматической оптимизацией параметров. Принцип работы и сложности применения данного типа регуляторов.
20. Суть принципа «жесткого» и «гибкого» управления в системах автоматического регулирования. Привести пример реализации данного принципа на практике.

## **Раздел 3 Практические рекомендации и примеры термостатирования технологического оборудования в промышленности**

### **3.1 Термостатирование в химической промышленности**

В данной главе рассмотрены основные примеры использования термостатов в промышленности. Задача соблюдения точности поддержания значения температуры на производстве – одна из самых сложных и ресурсозатратных. К примеру, термостатирование на предприятиях, связанных с плавкой полимеров, осложняется тем, что у проектировщиков есть только один известный параметр – теоретическая температура плавления полимера. Однако если исследовать данное направление глубже, то станет очевидно, что полиолефины характеризуются не одной теоретической температурой плавления, а целым диапазоном температур с учетом перехода между фазовыми состояниями. Как следствие, задача оптимизации процесса термостатирования производственных машин сводится к поиску оптимальной температуры термостатирования, которая в данном случае принимается на порядок ниже теоретической температуры плавления полимера. При этом если речь идет о конструкционных полимерах (например, полиамид), то в этом случае температура термостатирования принимается равной температуре плавления полиамида. Данная особенность объясняется теплофизическими свойствами полиамида, а именно температурой плавления, превышение которой приводит к резкому снижению вязкости полимера. Если же установить температуру термостатирования ниже температуры плавления конструкционного полимера, то возникает опасность затвердевания расплавленного раствора на поверхности камеры. Как в случае простых полимеров (полиолефины), так и конструкционных в зону плавления непрерывно подводится тепловая энергия (значение температуры нагрева всегда выше значения температуры плавления полимеров). Рассмотрим более подробно примеры процесса термостатирования в химической промышленности.

#### **– Компаундирование (сшивание) полиэтилена перекисью.**

Изготовление изоляционных материалов для электрических кабелей и проводов, работающих при высоких и сверхвысоких напряжениях, является сложной и многостадийной задачей. Это обусловлено жёсткими требованиями, которые предъявляются к электротехнической продукции. Так, например, для производства изоляции кабеля, работающего под напряжением 350 кВ, используется полиэтилен, компаундированный с 2 % перекисью. В процессе производства данного материала необходимо чётко соблюдать температурный режим при смешивании компонентов (125–135 °C). Малейшее отклонение температуры может привести к такой нежелательной реакции, как «частичное смешивание». «Частичное смешивание» вследствие своей неоднородности

напрямую оказывает влияние на прочность изоляционного материала, что может привести к нарушению целостности изоляции кабеля, коротким замыканиям, возгораниям и прочим аварийным ситуациям. Таким образом, задача термостатирования процесса компаундирования становится первостепенной при производстве изоляции. Поддержание температуры в процессе производства достигается не только за счет отвода теплоты циркулирующим теплоносителем, но и за счет постоянного температурного поля на поверхности металлических компонентов. Перечисленные факторы исключают возникновение локального перегрева, образования нагара и «частичного смешивания» компонентов.

– **Полиэтилен, сшитый силаном.**

Еще одним материалом для изготовления изоляции для электрических проводов и кабелей является полиэтилен, сшитый силаном. В отличие от компаундирования полиэтилена перекисью, раствор состоит из 2% смеси силана и перекиси, а диапазон рабочих напряжений кабелей составляет от 1 до 30 кВ. Сшивка силана и полиэтилена происходит путем прививки молекул силана к кристаллической решетке полиэтилена с активацией созданной связи при температуре 210 °С. В данном примере основная задача процесса термостатирования - не допустить нагрева раствора до критической температуры плавления. Оптимальная температура расплава (которую обеспечивает термостат) должна быть значительно (в 1,5 раза) меньше, чем температура расплава. Эти условия позволяют повысить эффективность протекания химической реакции и процесса смешения компонентов. Повышение температуры расплава в процессе возникает за счет механической энергии электродвигателя. Соответственно, термостатируя поверхность металлических компонентов, можно снизить температуру раствора, избежать возникновения разложения материалов, снизить количество продуктов разложения, улучшить качество итогового продукта и увеличить срок службы оборудования.

– **Огнестойкие композиции без галогенов для электротехнической продукции**

Огнестойкие композиции без галогенов также используются для изготовления изоляции кабелей и проводов, как и в примерах, описанных выше. Их основное отличие заключается в особом многокомпонентном растворе на основе гидроксида алюминия и гидроксида магния с высоким наполнением полиофенинами (55–60%). Повышенные защитные свойства данной композиции обеспечиваются благодаря эндотермической реакции (вода поглощает теплоту, выделяемую в процессе, и ограничивает распространение пламени). В данном случае в процессе термостатирования требуется жесткое поддержание значения температуры для исключения выделения жидкости при смешивании компонентов. Правильный подход к задаче термостатирования обеспечивает:

- высокую производительность агрегата;
- хорошую диспергацию (смешивание) компонентов композиционного раствора;
- отсутствие отложений и образований, снижающих теплопроводность аппарата;
- предотвращение перегрева материалов и приборов;
- высокое качество выпускаемой продукции.

### 3.2 Термостатирование в пищевой промышленности

Данный раздел посвящен использованию термостатов в пищевой промышленности. Рассмотрены основные трудности поддержания точного значения температуры в пищевых производствах и пути преодоления возникающих сложностей. Проанализированы преимущества использования термостатирующих устройств в пищевой отрасли.

#### – Обжаривание зерна с применением экструдеров

**Основная проблема:** использование насыщенного пара при температуре (200–210 °С) для обеспечения требуемого значения температуры при обжаривании зерен с применением экструдеров. Данный способ поддержания температуры является наиболее распространенным, однако и не лишен недостатков, а именно:

- необходимость обеспечения высокого давления и температуры насыщенного пара;
- опасность, возникающая при работе с сосудами под избыточным давлением;
- сложность технологического процесса и громоздкость конструкции;
- высокие затраты электроэнергии.

**Решение:** для обеспечения постоянного значения температуры при обжаривании зерен с применением экструдеров было осуществлено внедрение единого термостата. Преимуществом данного решения является возможность обеспечения нагрева теплоносителя до 300 °С без применения сложного и громоздкого оборудования. Таким образом, была повышена не только эффективность работы аппарата, но и улучшено качество конечной продукции (обжаренных зерен).

#### – Резервуар для плавления шоколада с интегрированным трубопроводом

**Основная проблема:** низкое качество продукта, вызванное недостаточным контролем значения температуры расплавленного шоколада. Дефекты продукта

выражаются наличием на поверхности шоколадной плитки пузырьков воздуха. Технологический процесс протекает при следующих условиях:

- ёмкость с охлаждающей рубашкой объемом:  $0.133 \text{ м}^3$ ;
- трубопровод с расплавленным шоколадом, массовым расходом:  $100 \text{ кг/ч}$ .
- температура ёмкости и трубопровода:  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- температура плавления шоколада:  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Решение:** для обеспечения поддержания температуры ёмкости и трубопровода на уровне  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  и температуры плавления шоколада  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  рекомендуется установить термостат со следующими техническими характеристиками:

- максимальное значение выходной температуры:  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- нагревательный элемент мощностью:  $6 \text{ кВт}$ ;
- теплоноситель – вода;
- охлаждающий элемент мощностью:  $38 \text{ кВт}$ ;
- циркуляционный насос с массовым расходом:  $4,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- давлением:  $0,54 \text{ МПа}$ .

Также для обеспечения стабильности работы термостата было использовано твердотельное реле.

#### – Температурное поддержание шаровой мельницы при остановках производства

**Основная проблема:** при простое оборудования возникала проблема кристаллизации шоколада. В отличие от предыдущего примера, в данном технологическом процессе уже рассматривается массовый расход шоколадной массы  $800 \text{ кг/ч}$ , конечный продукт – пралине.

**Решение:** для поддержания, требуемого технологией значения температуры в емкости аналогично с примером, описанным выше, рекомендуется использовать термостат с теми же техническими характеристиками. Только в данном случае объектом регулирования выступает емкость с охлаждающей рубашкой.

#### – Вторичное перераспределение и плавление бракованных шоколадных изделий

**Основная проблема:** при проведении переработки изделий, имеющих разные дефекты (например: пузырьки воздуха на поверхности, механические повреждения и т. д.), необходимо провести оптимизацию процесса плавки бракованной партии продукта. В данном технологическом процессе используются две емкости с охлаждающими рубашками (объем каждой  $0.133 \text{ м}^3$ ). Задача термостатирования сводится к поддержанию значения температуры на уровне  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ . Для интенсификации процесса плавления температуру раствора периодически повышают и поддерживают (не более 15 минут) на уровне  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Решение:** для обеспечения поддержания требуемого значения температур обеих емкостей рекомендуется установить термостат со следующими техническими характеристиками:

- максимальное значение выходной температуры: 90 °С;
- нагревательный элемент мощностью: 12 кВт;
- теплоноситель – вода;
- охладительный элемент мощностью: 70 кВт;
- циркуляционный насос с массовым расходом: 5,2 м<sup>3</sup>/ч;
- давлением: 0,54 МПа.

Также для обеспечения стабильности работы термостата было использовано твердотельное реле. А для более точного управления процессом регулирования температуры каждой емкости рекомендуется использовать реверсивный клапан.

#### – Емкость для хранения шоколада с интегрированным трубопроводом

**Основная проблема:** обеспечение значения температуры шоколада на уровне 55 °С для интенсификации процесса плавления закристаллизованного продукта. При расплавлении закристаллизованного шоколада используется емкость с охладительной рубашкой объёмом не менее 1,667 м<sup>3</sup>.

**Решение:** для обеспечения поддержания температуры ёмкости и трубопровода на уровне 55 °С и температуры плавления шоколада 70 °С, рекомендуется установить термостат со следующими техническими характеристиками:

- максимальное значение выходной температуры: 90 °С;
- нагревательный элемент мощностью: 20 кВт;
- теплоноситель – вода;
- охладительный элемент мощностью: 60 кВт;
- циркуляционный насос с массовым расходом: 5 м<sup>3</sup>/ч;
- давлением: 0,82 МПа.

### 3.3 Термостатирование валков и цилиндров в целлюлозно-бумажной промышленности

Данный раздел посвящен использованию термостатов в целлюлозно-бумажной промышленности. Рассмотрены основные трудности поддержания точного значения температуры при изготовлении и меловании бумаги, а также пути преодоления возникающих сложностей.

**Основная проблема:** поддержание точного значения температуры валков и цилиндров при изготовлении и меловании бумаги. Процесс мелования бумаги является сложным и ресурсозатратным. Так, для нанесения на поверхность

изделия раствора силиконового полимера применяются 5 полых валков, имеющих диаметр 300 мм, толщину 1,9 мм, скорость вращения валков 300 м/мин. Нанесение силиконового полимера позволяет повысить плотность бумаги и существенно расширить сферу ее использования ( бумага для выпекания, ленты и т. д.). Традиционно система автоматического регулирования включала в себя измерительные устройства, перепускные контуры, несколько пропорциональных звеньев, насос для прокачки воды. Однако значение температуры циркулирующей воды напрямую зависело от климатических условий, при этом мощность циркуляционного насоса не давала возможности обеспечения равномерного температурного поля по всей поверхности валков. Температурная неравномерность приводила к перегреву валков и, как следствие, к их температурному расширению. Это, безусловно, сказывалось на протекании процесса мелования (возникала неоднородность наносимого силиконового полимера на поверхность) и приводило к большому количеству бракованной продукции (1 -2 рулона с 1 запуска линии).

**Решение:** для обеспечения равномерного разогрева / охлаждения валков и поддержания заданного значения температуры рекомендуется замена клапана с пропорциональным управлением на термостат со следующими техническими характеристиками:

- максимальное значение выходной температуры: 90 °С;
- нагревательный элемент мощностью: 40 кВт;
- теплоноситель – вода;
- охладительный элемент мощностью: 160 кВт;
- циркуляционный насос с массовым расходом: 0.06 м<sup>3</sup>/ч;
- давлением: 0,46 МПа.

Реализация предложенных решений позволила повысить эффективность производства мелованной бумаги, а именно, обеспечить стабильное нанесение силиконового полимера на поверхность изделия, снизить количество бракованных изделий.

### 3.4 Термостатирование в приборостроении

Отрасль приборостроения является одной из самых динамично развивающихся в мире. Современное приборостроение ориентировано на производство высокоточных систем микроэлектроники, разнообразных датчиков и т. д. При этом вопросы поддержания заданных параметров температуры объектов напрямую связаны с качеством и надежностью выпускаемой продукции. Несоблюдение требований к поддержанию температуры может привести к снижению точности работы прибора, перерыву и деформации материалов, из которых изготовлен объект. Поэтому задача термостатирования приобретает



особую актуальность. Рассмотрим основные трудности поддержания точного значения температуры в заданных диапазонах при производстве микроэлектроники, а также пути преодоления возникающих сложностей.

**Основная проблема:** управление и регулирование температуры в приборах с чувствительными элементами вследствие возникающих внешних/ внутренних воздействий и возмущений. Применяемые на сегодняшний день способы нагревания и охлаждения не позволяют поддерживать точные значения температуры прибора, что оказывает существенное влияние на стабильность работы элементов.

**Решение:** использование компактных воздушных и водяных термостатов. Данный тип термостатов имеет следующие преимущества:

- высокая эффективность работы;
- точность поддержания температуры элементов (до 0,1 °С);
- наличие встроенного нагревающего / охлаждающего элемента с возможностью работы на разных типах теплоносителей;
- быстроедействие системы автоматического регулирования при возникновении аварийной ситуации;
- высокая надежность и износостойкость управляющих и регулирующих элементов термостата;
- максимальная температура теплоносителя (вода/воздух): 90–120 °С
- автоматическая адаптация систем управления при изменении температурного режима и прочих условий работы;
- возможность интеграции в любую систему;
- низкая стоимость обслуживания;

Основные области применения термостатов в приборостроении [4]:

- Температурное управление чувствительными зонами микроэлектронных приборов для минимизации температурных дрейфов и повышения точности измерений.
- Контроль температурного режима при испытаниях приборов, где критично поддерживать стабильный тепловой фон.
- Поддержка рабочих температур лазерных и оптоэлектронных модулей для обеспечения стабильности параметров излучения.
- Стабилизация температуры в камерах испытания и лабораторных установках, где создаётся тестовая среда с заданными тепловыми условиями.

### 3.5 Меры обеспечения безопасности при эксплуатации термостатов

Вопросы применения термостатов на промышленных объектах неизбежно связаны с требованиями охраны труда при эксплуатации термостатов на производстве и требованиями промышленной безопасности. Наиболее важным является неукоснительное соблюдение требований, описанных производителем в технической и эксплуатационной документации к теплообменному агрегату, а именно:

- обеспечение постоянной циркуляции охлаждающей воды в контуре термостата;
- непрерывный контроль перегрева элементов;
- исключение внешних воздействий (тепловых потоков) от приборов и установок с повышенным тепловыделением. Расположение термостатов вблизи печей и высокотемпературных установок запрещено;
- применение материалов и компонентов с высокой термической стойкостью и возможностью работы при высоких значениях давления;
- контроль состояния циркулирующего теплоносителя (проверка наличия загрязнения и примесей), в случае необходимости его замена;
- в случае замены вида теплоносителя (например воды на масло) убедиться в полном отсутствии заменяемого теплоносителя в системе во избежание аварийных ситуаций (закипания воды в трубах);
- обеспечение герметичности системы и периодическая профилактика основных узлов контура;
- при работе системы в условия высоких температур (больше 250 °С) необходимо обеспечить все присоединения к термостату металлическими шлангами. Данное решение способствует повышению надежности и долговечности работы системы;
- обеспечить наличие вентиляционных и вакуумных каналов в соответствии с направлением течения теплоносителя;
- при наличии малого объема теплоносителя в системе необходимо предусмотреть наличие вакуумного клапана для обеспечения безопасности при удалении теплоносителя из расширительного бака (например, формы для литья пластмасс и металлов);
- при наличии большого объема теплоносителя в системе рекомендуется установка термостата и расширительного бака выше уровня потребителя. Данное требование позволяет избежать противотока теплоносителя. Особо актуально для целлюлозно-бумажной промышленности и предприятий, эксплуатирующих валковую технику.

При невозможности обеспечения оптимального уровня уклона рекомендуется реализовать следующие мероприятия:

- на стадии проектирования выбрать конструкцию расширительного бака с наличием компонентов, способных предотвратить обратный поток жидкости в т. ч. через трубопроводы водоснабжения;
- обеспечить установку электромагнитных клапанов с функцией включения при выходе из строя термостата или при его профилактической остановке.

Также необходимо осуществлять периодическую профилактику и в случае необходимости ремонтные работы компонентов системы. Своевременное проведение профилактических мероприятий позволит обеспечить высокий уровень безопасности при эксплуатации оборудования, снизить число несчастных случаев на производстве, минимизировать возможные убытки предприятия, а также позволит обеспечить нормальную и надежную работу не только системы термостатирования, но и предприятия в целом.

### **3.5.1 Экономическая эффективность использования термостатов**

При решении задачи поддержания значения температуры, обеспечения равномерного температурного поля возникает задача экономического характера, а именно экономическая целесообразность применения того или иного типа термостата, выбор системы автоматического регулирования, анализ затрат и прибыли и т. д.

Заключение о рентабельности и эффективности применяемых решений при эксплуатации термостата основывается на следующих критериях:

- снижение процента бракованной продукции при запуске производственной линии. Выполнение данного критерия основывается на обеспечении точного регулирования и поддержания значения температуры объекта термостатирования и снижения возникающих потерь на начальной стадии процесса (прогрев оборудования);
- оптимальное время продолжения цикла. Выполнения данного критерия основывается на вычислении оптимального времени технологического процесса и количестве изготовленной продукции в единицу времени;
- использование качественных расходных материалов и оборудования.

### **Вопросы для самоконтроля по разделу 3**

1. Практические рекомендации по термостатированию технологического оборудования.
2. Компаундирование сшивающегося перекисью полиэтилена.
3. Полиэтилен, сшивающийся под действием силанов.
4. Огнестойкие композиции без галогенов для изоляции кабелей и проводов.
5. Оптимальное термостатирование. Преимущества.

6. Обжаривание зерна с применением экструдеров. Проблематика. Технические параметры. Реализуемое решение.
7. Применение термостатов в технологии производства шоколада. Проблематика. Технические параметры. Принятое решение.
8. Температурное поддержание шаровой мельницы при остановках производства. Проблематика. Технические параметры. Реализуемое решение.
9. Вторичное перераспределение и плавление бракованных шоколадных изделий. Проблематика. Технические параметры. Реализуемое решение.
10. Емкость для хранения шоколада с интегрированным трубопроводом. Проблематика. Технические параметры. Реализуемое решение.
11. Термостатирование валков и цилиндров в целлюлозно-бумажной промышленности. Проблематика. Технические параметры. Реализуемое решение.
12. Использование термостатов в приборостроении. Проблематика. Технические параметры. Реализуемое решение.
13. Меры обеспечения безопасности при эксплуатации термостатов.
14. Мероприятия реализуемые на предприятиях в случае невозможности создания уклона.
15. Области применения термостатов.
16. Достоинства компактных (воздушных и водяных) термостатов.
17. Экономическая эффективность использования термостатов. Рентабельность и эффективность эксплуатации термостатов.
18. Мероприятия реализуемые на предприятиях для минимизации убытков, связанных с простоями оборудования.

## Раздел 4 Расчет термостатов

При выполнении расчетных заданий рекомендуется представлять результаты в виде отчетов, включающих таблицы, графики и письменные объяснения (при необходимости). Рекомендуется использование программных средств, таких как Excel, MATLAB или любые другие программы для выполнения вычислений и моделирования. Контроль выполнения задач и подготовка итоговых работ могут осуществляться в форме устных презентаций, письменных отчетов.

### Задача 1

Рассчитать термостат, представленный на рисунке 6, в котором термостатируются хромель-алюмелевые термопары (общее число термоэлектродов равно 20). Термостат имеет следующие конструктивные и теплофизические характеристики:

- алюминиевый цилиндрический блок:  $d = 50$  мм,  $l = 80$  мм
- алюминиевая цилиндрическая камера:  $d = 90$  мм,  $l = 120$  мм
- полость камеры:  $d = 70$  мм,  $l = 100$  мм
- кожух камеры: (ДхШхВ)  $a = 110$  мм,  $b = 110$  мм  $c = 140$  мм,
- теплоизолятор:  $\delta = 10$  мм
- диаметр электродов:  $d = 0,5$  мм
- длина электродов (на выходе из термостата):  $l = 50$  мм
- теплопроводность электродов:  $\lambda_{\text{элек}} = 50 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$

### Исходные данные:

- Полная масса термостата (блок + термостатирующий элемент):  $m_{\text{об}} = 0,35$  кг
- Площадь поверхности термостата (блок + термостатирующий элемент):  $S_{\text{об}} = 1,65 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$
- Удельная теплоемкость материала блока термостата (для алюминия):  $c_{\text{об}} = 0,92 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
- Удельная теплоемкость камеры (для алюминия):  $c_{\text{к}} = 0,92 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
- Удельная теплоемкость изоляции (для стекловаты):  $c_{\text{из}} = 0,8 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
- Теплопроводность изоляции наружной:  $\lambda_{\text{из}} = 0,07 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
- Теплопроводность стекловаты:  $\lambda_{\text{из}} = 0,045 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$

- Расчетный объем пространства между блоком и камерой (устанавливается изоляция):  $V_{из} = 2,28 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$
- Площадь поверхности камеры:  $S_{к.наруж} = 4,67 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$
- Объем камеры:  $V_{к} = 3,79 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$
- масса камеры:  $m_{к} = 1,04 \text{ кг}$
- Площадь поверхности изоляции наружная:  $S_{из.нар} = 8,58 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$
- Площадь поверхности изоляции внутренняя:  $S_{из.вн} = 4,67 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$
- Объем изоляции:  $V_{из.нар} = 9,31 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$
- Плотность изоляции:  $\rho_{из.нар} = 400 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

1. Найти массу изоляции:

$$m_{из} = \frac{\rho_{из.нар}}{V_{из.нар}} = 0,37 \text{ кг}$$

2. Найти суммарную массу камеры вместе с тепловой изоляцией:

$$m_{сумм} = m_{из} + m_{к} = 1,41 \text{ кг}$$

3. Найти полную теплоемкость термостата. (Принимается допущение, что полная теплоемкость термостата равна полной теплоемкости блока):

$$C_{об} = c_{об} m_{об} = 0,32 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

4. Найти полную теплоемкость камеры:

$$C_{к} = c_{к} m_{к} = 0,957 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

5. Найти полную теплоемкость изоляции:

$$C_{из} = c_{из} m_{из} = 0,296 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

6. Суммарная (эффективная) теплоемкость камеры:

$$C_{эф.к} = C_{из} + C_{к} = 1,25 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

7. Определить тепловую проводимость термостата и камеры,  $\sigma_{об}$ :

$$\sigma_{об} = \sigma_{об+к} + \sigma_{об+с} = 0,104 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$$

$$\sigma_{к} = \sigma_{об+к} + \sigma_{к+с}$$

$$\sigma_{об+к} = \frac{\lambda \cdot 2S_1 S_2}{L(S_1 + S_2)} = 9,55 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$$

$$\sigma_{об+с} = \frac{\lambda_{элект} \cdot n \cdot \pi d^2}{4l} = 0,39 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$$

8. Показатель тепловой инерции объекта,  $\varepsilon_{об}$ :

$$\varepsilon_{об} = \frac{C_{об}}{\sigma_{об}} = \frac{C_{об}}{\sigma_{об+к} + \sigma_{об+с} + \sigma_{пр}} = 3,1 \cdot 10^3 \text{ с.}$$

9. Определить тепловую проводимость между камеры,  $\sigma_k$ :

$$\sigma_k = \sigma_{об+к} + \sigma_{к+с} = 0,328 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$$

$$\sigma_{к+с} = \frac{\sigma_{из} \sigma_{ср}}{\sigma_{из} + \sigma_{ср}} = 0,232 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$$

10. Определить тепловую проводимость изоляции,  $\sigma_{из}$ :

$$\sigma_{из} = \frac{\lambda \cdot 2S_{из.нар} S_{из.внутр}}{L_{из} (S_{из.нар} + S_{из.внутр})} = 0,301 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$$

11. Определяющий размер,  $L_{из}$ :

$$L_{из} = \frac{2V_{из.нар}}{(S_{из.нар} + S_{из.внутр})} = 1,41 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

12. Определить тепловую проводимость среды,  $\sigma_{ср}$ , при  $\alpha_{ср} = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ К}}$  (коэффициент конвективной теплоотдачи между термостатом и окружающей средой)

$$\sigma_{ср} = \alpha_{ср} S_{из.нар} = 0,858 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$$

13. Показатель тепловой инерции камеры,  $\varepsilon_k$ :

$$\varepsilon_{об} = \frac{C_{эфф.к}}{\sigma_k} = \frac{C_{эфф.к}}{\sigma_{об+к} + \sigma_{к+с}} = 3,8 \cdot 10^3 \text{ с.}$$

## Задача 2.

Найти значение мощности ( $W_k$ ) нагревательного элемента термостата, описанного в примере 1, и определить значение температуры образца ( $t_{об}$ ) помещенного в термостат, при следующих условиях:  $t_k = 60^\circ\text{С}$ ,  $t_{с.мин} = -10^\circ\text{С}$ . Дополнительно сделать заключение об изменении температур,  $t_{об}$ ,  $t_k$ , при увеличении температуры  $t_c = 20^\circ\text{С}$ .

1. В данном случае, поскольку термостат является пассивным, условимся, что  $W_{об} = 0$ , и  $\eta_{пр} = 0$ . Соотношение для расчета значения мощности ( $W_k$ ) примет вид:

$$W_k = \sigma_k (1 - \eta_{об+к} \chi_{об+к}) (t_k - t_c) = 16,7 \text{ Вт}$$

2. Рассчитать температуру образца в термостате:

$$t_{об} = \eta_{об+с} t_{с.мин} + \eta_{об+к} t_k = 57,2^\circ\text{C}$$

т.к. в системе присутствует отвод теплоты от образца в среду  $\eta_{об+с}$ , то значение температуры образца в термостате ниже значения температуры камеры на  $2,8^\circ\text{C}$ .

3. Определить влияние изменения температуры окружающей среды на температуры образца и камеры:

$$t_{об} = K(\eta_{об+к} \sigma_k^{-1} W_k + \varphi_{об+с} t_c)$$

$$t_k = K(\chi_{об+к} \sigma_k^{-1} W_k + \varphi_{к+с} t_c)$$

4. Определить безразмерные коэффициенты  $K, \varphi_{об+с}, \varphi_{к+с}$ :

$$K = (1 - \eta_{об+к} \chi_{об+к})^{-1}$$

$$\varphi_{об+с} = \eta_{об+с} + \eta_{об+к} \chi_{к+с}$$

$$\varphi_{к+с} = \chi_{к+с} + \eta_{об+с} \chi_{об+к}$$

5. Определить безразмерные коэффициенты  $\eta$  и  $\chi$ :

$$\eta_{об+к} = \frac{\sigma_{об+к}}{\sigma_{об}} = 0,96 \quad \eta_{об+с} = \frac{\sigma_{об+с}}{\sigma_{об}} = 0,04 \quad \eta_{пр} = \frac{\sigma_{пр}}{\sigma_{об}} = 0$$

$$\chi_{об+к} = \frac{\sigma_{об+к}}{\sigma_k} = 0,29 \quad \chi_{к+с} = \frac{\sigma_{к+с}}{\sigma_k} = 0,71$$

Подставляя известные величины в уравнение температур, получаем:

$$\Delta t_{об} = \Delta t_k = \Delta t_c = 30^\circ\text{C}$$

Закключение: увеличение температуры образца и камеры прямо пропорционально увеличению температуры окружающей среды.

## Задача 2.1.

Определить изменение температуры образца в термостате, если управление нагревателем производит автоматический регулятор, обеспечивающий постоянную температуру в камере  $t_k = 60^\circ\text{C}$  и  $\Delta t_c = 30^\circ\text{C}$ .

1. Найти температуру образца, если автоматический регулятор включен.

$$\Delta t'_{об} = \eta_{об+с} \Delta t_c = 1,2^\circ\text{C}$$

2. Выполнить сравнение  $\Delta t'_{об}$ , со значением  $\Delta t_{об}$ , определенным в задаче 2.

Закключение: использование автоматического регулятора температуры играет важную роль в стабилизации температуры ( $\Delta t'_{об} = 1,2^\circ\text{C}$  и  $\Delta t_{об} = 30^\circ\text{C}$ ). Однако достижение полной стабилизации температуры невозможно из-за возникающих локальных тепловых потоков  $\eta_{об+с} \neq 0$ .



### Задача 3.

В блоке термостата градуируются 2 термометра сопротивления, имеющих сопротивление, равное 100 Ом. Найти изменение температуры образца и камеры при силе тока равно 10 мА. Принять конструкцию из примера 1 и 2.

1. Определить мощность, которая выделяется в образце, по соотношению:

$$W_{об} = 2I^2R = 0.02 \text{ Вт}$$

2. Определить изменение температуры в камере и образце:

$$t_k = \frac{K \cdot \chi_{об+к}}{\sigma_{об}} = 0,8^\circ\text{C}$$
$$t_{об} = \frac{K \cdot W_{об}}{\sigma_{об}} = 0,19^\circ\text{C}$$

### Задача 4.

Найти амплитуду колебаний температуры образца ( $a_{об}$ ), если в случае выключенного автоматического регулятора период колебаний составляет 20 секунд, а амплитуда колебаний температуры камеры составляет  $a_k = 2$  К. Выполнить расчет для периодов и амплитуд  $a_k$ , указанных в соответствии с вариантом задания.

1. Соотношение для определения амплитуда колебаний температуры образца ( $a_{об}$ ),

$$a_{об} = a_k \eta_{об+к} \frac{1}{\sqrt{1 + (\varepsilon_{об} \omega)^2}} = 0,002 \text{ К}$$

2. Определить неизвестные характеристики, входящие в уравнение в пункте 1:

$$\varepsilon_{об} = \frac{C_{об}}{\sigma_{об}} = \frac{C_{об}}{\sigma_{об+к} + \sigma_{об+с}} = 3,1 \cdot 10^3 \text{ с.}$$
$$\eta_{об+к} = \frac{\sigma_{об+к}}{\sigma_{об}} = 0,96$$

3. Определить  $\sigma_{об}$ ,  $\sigma_{об+к}$ ,  $\sigma_{об+с}$ :

$$\sigma_{об} = \sigma_{об+к} + \sigma_{об+с} = 9,94 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$$

$$\sigma_{об+к} = \frac{\lambda \cdot 2S_1 S_2}{L(S_1 + S_2)} = 9,55 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$$

$$\sigma_{об+с} = \frac{\lambda \cdot n \cdot \pi d^2}{4L} = 0,39 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$$

### Задача 5.

На нагревательный элемент, расположенный в камере, продолжительное время подается мощность, равная  $W_k=16,7$  Вт. Параметр  $\varepsilon_{об}$  принимается исходя из исходных данных к задаче 5. Выполнить расчет изменения значения температуры образца и камеры термостата при переходном процессе.

1. Определить  $\nu$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ :

$$\nu = \sqrt{1 + \frac{4 \cdot \eta_{об+к} \cdot \chi_{об+к} \cdot \varepsilon_{об} \cdot \varepsilon_k}{(\varepsilon_{об} + \varepsilon_k)^2}} = 5,27$$

$$\varepsilon_1 = \frac{2\varepsilon_{об}\varepsilon_k}{(1-\nu)\varepsilon_{об} + (1+\nu)\varepsilon_k} = 3,1 \cdot 10^3 \text{ с.}$$

$$\varepsilon_k = \frac{C_k}{\sigma_k} = \frac{C_k}{\sigma_{об+к} + \sigma_{к+с}}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{2\varepsilon_{об}\varepsilon_k}{(1+\nu)\varepsilon_{об} + (1-\nu)\varepsilon_k} = 7,34 \cdot 10^3 \text{ с.}$$

2. Подставим найденные значения в уравнение для определения температуры образца и камеры:

$$\theta_{об}(\tau) = \frac{t_{об}(\tau)}{t_{об.ст}} = 1 - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} e^{-\frac{\tau}{\varepsilon_1}} + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} e^{-\frac{\tau}{\varepsilon_2}}$$

$$\theta_k(\tau) = \frac{t_k(\tau)}{t_{к.ст}} = 1 + \frac{\varepsilon_{об} - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} e^{-\frac{\tau}{\varepsilon_1}} - \frac{\varepsilon_{об} - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} e^{-\frac{\tau}{\varepsilon_2}}$$

Сделаем допущение, что  $x = \frac{\tau}{\varepsilon_2}$ , тогда имеем:

$$\theta_{об}(\tau) = 1 - 1,436e^{-x} + 0,436e^{-3,29x} \text{ (график красный)}$$

$$\theta_k(\tau) = 1 - 0,834e^{-x} - 0,166e^{-3,29x} \text{ (график синий)}$$

3. Построим график изменения значения температуры образца и камеры термостата при переходном процессе

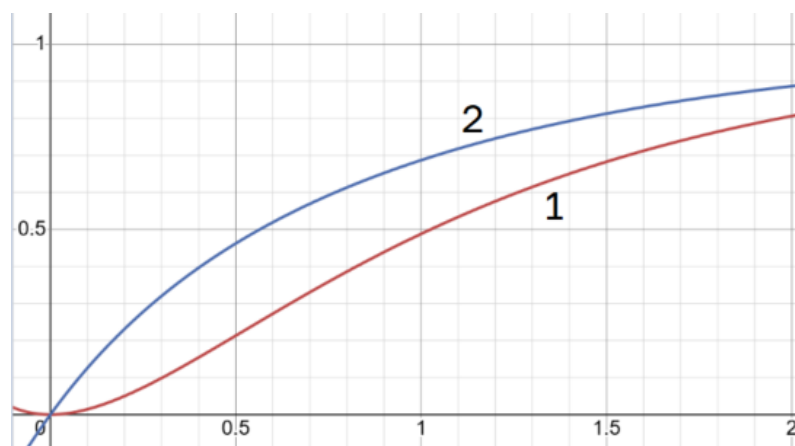


Рисунок 17 Результаты расчета изменения значения температуры образца и камеры термостата при переходном процессе

4. Выполним расчет по приближенным зависимостям в виде

$$\theta_{об}(\tau) = 1 - e^{-\frac{\tau}{\varepsilon_{об.1}}}$$

$$\varepsilon_{об.1} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = K(\varepsilon_{об} + \varepsilon_к)$$

$$\theta_к(\tau) = 1 - e^{-\frac{\tau}{\varepsilon_{к.1}}}$$

$$\varepsilon_{к.1} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_{об} = K\varepsilon_к + (K - 1)\varepsilon_{об}$$

Сделаем допущение, что  $x = \frac{\tau}{\varepsilon_2}$ , тогда имеем:

$$\theta_{об}(\tau) = 1 - e^{-0,767x} \text{ (график 3)}$$

$$\theta_к(\tau) = 1 - e^{-1.131x} \text{ (график 4)}$$

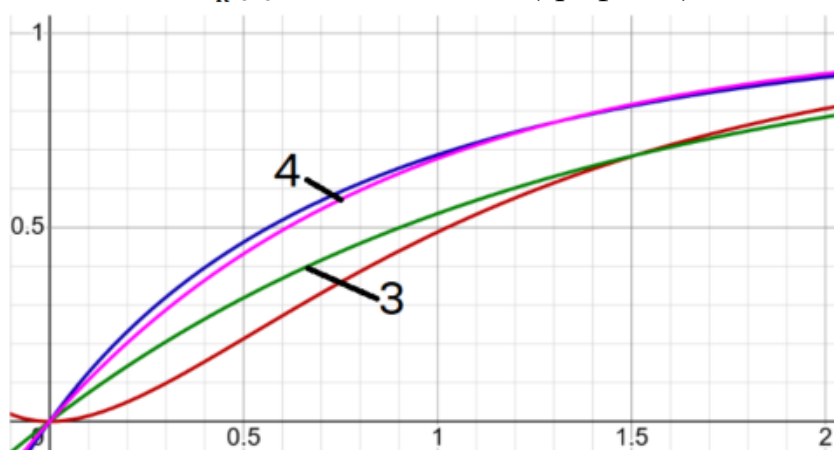


Рисунок 18 Результаты расчета изменения значения температуры образца и камеры термостата при переходном процессе (по приближенным формулам)

## Задача 6

Провести исследование процесса нагревания, протекающего в пассивном термостате, если происходит изменение температуры окружающей среды с  $t_{с.окр} = 0$  до  $t_{с.ст}$ .

1. Т. к. по условию работы пассивного термостата  $W_{об} = W_{к} = 0$ ,  $t_{об.окр} = t_{к.окр} = 0$ ,  $\eta_{пр} = 0$ , имеем:  $t_{об} = t_{с.ст}$
2. Для построения переходного процесса воспользуемся следующими уравнениями:

$$\theta_{об}(\tau) = \frac{t_{об}(\tau)}{t_{об.ст}} = 1 + \frac{b_{об.окр} - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} e^{-\frac{\tau}{\varepsilon_1}} - \frac{b_{об.окр} - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} e^{-\frac{\tau}{\varepsilon_2}}$$

$$\theta_{к}(\tau) = \frac{t_{к}(\tau)}{t_{к.ст}} = 1 + \frac{b_{к+окр} - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} e^{-\frac{\tau}{\varepsilon_1}} - \frac{b_{к+окр} - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} e^{-\frac{\tau}{\varepsilon_2}}$$

3. Определить неизвестные параметры  $b_{об.окр}$  и  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  (аналогично примеру 5):

$$\varepsilon_1 = \frac{2\varepsilon_{об}\varepsilon_{к}}{(1-\nu)\varepsilon_{об} + (1+\nu)\varepsilon_{к}} \quad \varepsilon_2 = \frac{2\varepsilon_{об}\varepsilon_{к}}{(1+\nu)\varepsilon_{об} + (1-\nu)\varepsilon_{к}}$$

$$\varepsilon_{к} = \frac{C_{к}}{\sigma_{к}} = \frac{C_{к}}{\sigma_{об+к} + \sigma_{к+с}}$$

4. Определить безразмерные коэффициенты  $\eta$  и  $\chi$ :

$$\eta_{об+к} = \frac{\sigma_{об+к}}{\sigma_{об}} = 0,96 \quad \eta_{об+с} = \frac{\sigma_{об+с}}{\sigma_{об}} = 0,04 \quad \eta_{пр} = \frac{\sigma_{пр}}{\sigma_{об}} = 0$$

$$\chi_{об+к} = \frac{\sigma_{об+к}}{\sigma_{к}} = 0,29 \quad \chi_{к+с} = \frac{\sigma_{к+с}}{\sigma_{к}} = 0,71$$

Тогда:

Соотношение для  $\theta_{об}(\tau)$ :

$$b_{об+окр} = \frac{\varepsilon_{к}\eta_{об+с}}{\varphi_{об+с}} = 0,21 \cdot 10^3 \text{ с}$$

$$\varphi_{об+с} = \eta_{об+с} + \eta_{об+к}\chi_{к+с} = 0,722$$

Соотношение для  $\theta_{к}(\tau)$ :

$$b_{к+окр} = \frac{\varepsilon_{об}\chi_{к+с}}{\varphi_{к+с}} = 3,03 \cdot 10^3 \text{ с}$$

$$\varphi_{к+с} = \chi_{к+с} + \eta_{об+с}\chi_{об+к} = 0,722$$

5. Сделаем допущение, что  $x = \frac{\tau}{\varepsilon_2}$ , подставим найденные зависимости в исходные уравнение построим график изменения температур объекта и камеры при переходном режиме и изменении температуры окружающей среды

$$\theta_{об}(x) = 1 - 1,395e^{-x} + 0,395e^{-3,29x} \quad (\text{график 1})$$

$$\theta_{к}(\tau) = 1 - 0,843e^{-x} - 0,157e^{-3,29x} \quad (\text{график 2})$$

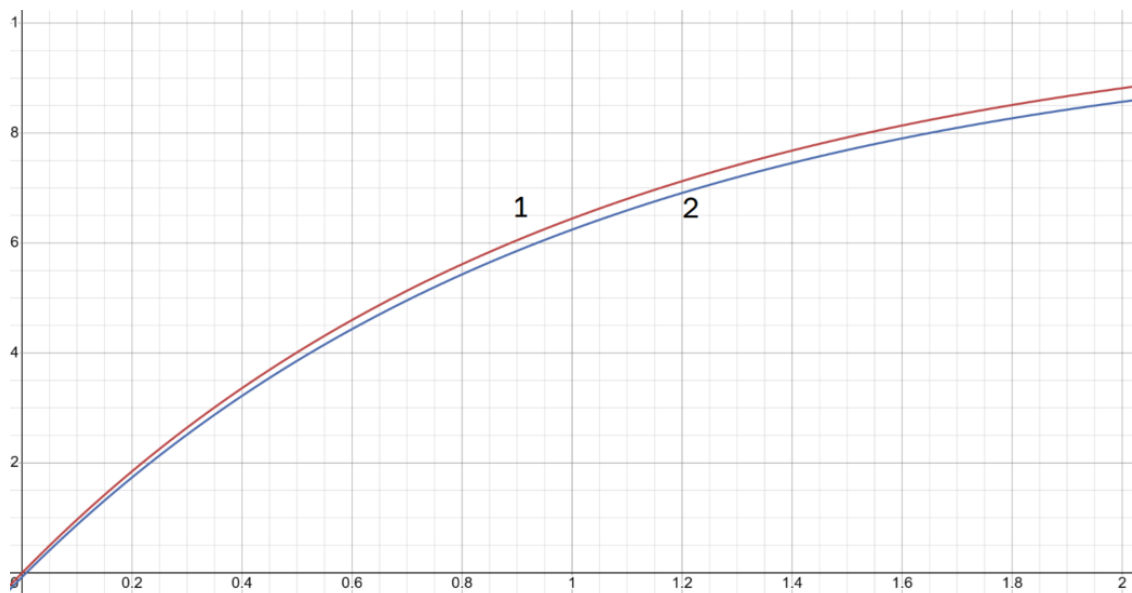


Рисунок 19 Результат расчета изменения температур объекта и камеры при переходном режиме и изменении температуры окружающей среды

5. Выполним расчет по приближенным зависимостям в виде

$$\theta_{об}(\tau) = 1 - e^{-\frac{\tau}{\varepsilon_{об.1}}}$$

$$\varepsilon_{об.1} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = K(\varepsilon_{об} + \varepsilon_{к})$$

$$\theta_{к}(\tau) = 1 - e^{-\frac{\tau}{\varepsilon_{к.1}}}$$

$$\varepsilon_{к.1} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_{об} = K\varepsilon_{к} + (K - 1)\varepsilon_{об}$$

Сделаем допущение, что  $x = \frac{\tau}{\varepsilon_2}$ , тогда имеем:

$$\theta_{об}(\tau) = 1 - e^{-0,784x} \quad (\text{график 3})$$

$$\theta_{к}(\tau) = 1 - e^{-1,122x} \quad (\text{график 4})$$

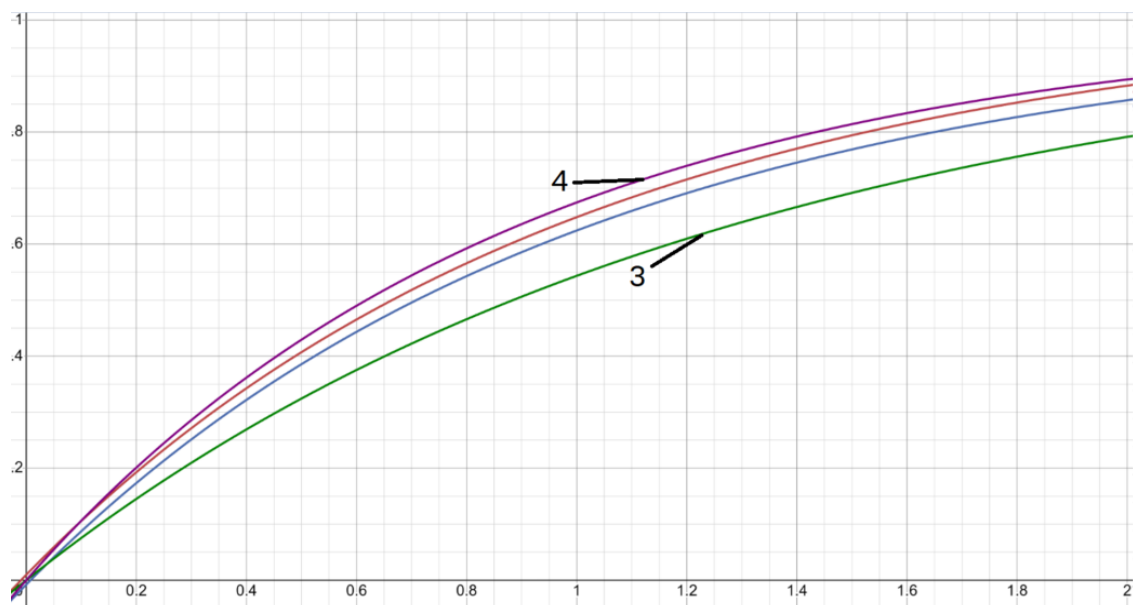


Рисунок 20 Результат расчета изменения температур объекта и камеры при переходном режиме и изменении температуры окружающей среды по приближенным формулам

Анализируя графики, можно сделать выводы, что изменение значения температуры как камеры, так и образца зависит в низкой степени от возмущений, оказываемых со стороны окружающей среды.

### Задача 7.

Пассивный термостат для поддержания температуры цилиндрического контейнера с заданными массой, диаметром, высотой и теплофизическими характеристиками его содержимого. Теплоизоляционный материал имеет вид пустотелого параллелепипеда с заданными высотой, шириной и длиной. Материал, из которого изготовлены стенки, между которыми находится тепловая изоляция — тонкостенный листовый материал, теплоемкость которого пренебрежимо мала. Необходимо определить технические характеристики термостата следующих габаритных размеров:

- теплоизоляционный материал (внутренние размеры);
- длина, 0,4 м
- ширина, 0,4 м
- высота, 0,5 м
- теплоизоляционный материал (внешние размеры);
- длина, 0,6 м
- ширина, 0,6 м
- высота, 0,7 м

### Исходные данные:

- масса цилиндрического контейнера (объекта),  $m_{об} = 15$  кг.
- диаметр цилиндрического контейнера (объекта),  $D_{об} = 220$  мм
- высота цилиндрического контейнера (объекта),  $H_{об} = 400$  мм
- теплоемкость объекта,  $c_{об} = 4000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
- удельный вес (плотность),  $\rho_{об} = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
- теплопроводность,  $\lambda_{об} = 0,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
- температуропроводность,  $\alpha_{об} = 1,25 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$
- теплоемкость теплоизоляционного материала,  $c_{из} = 1300 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
- удельный вес (плотность) изоляции,  $\rho_{из} = 50 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
- теплопроводность изоляции,  $\lambda_{из} = 0,05 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
- температуропроводность изоляции,  $\alpha_{из} = 7,7 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$

1. Определение объема и площади поверхности контейнера:

$$V_{об} = \pi \cdot r^2 \cdot h = 0,015 \text{ м}^3$$

$$S_{об} = 2\pi \cdot r \cdot (h + r) = 0,35 \text{ м}^2$$

2. Определение объема и площади (внутренней и внешней) теплоизоляционного материала:

$$V_{из} = a \cdot b \cdot h = 0,17 \text{ м}^3$$

$$S_{из.внутр} = 2ab + 2ah + 2bh = 1,12 \text{ м}^2$$

$$S_{из.нар} = 2ab + 2ah + 2bh = 2,4 \text{ м}^2$$

3. Определение массы и полной теплоемкости теплоизоляционного материала:

$$m_{из} = \rho_{из} V_{из} = 8,5 \text{ кг}$$

$$C_{из} = m_{из} c_{из} = 11000 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

4. Произведем оценку определяющего размера теплоизоляционного материала.

$$L_{из} = \frac{2V_{из}}{(S_{из.внутр} + S_{из.нар})} = 0,05 \text{ м}$$

5. Произведем оценку определяющего размера образца и фактора формы тела:

$$L_{об} = \frac{S_{об}}{2\pi h} = 0,15 \text{ м}$$

$$n = \frac{L_{об} S_{об}}{V_{об}} - 1 = 2,5$$

6. Определить  $\varepsilon_{об}$ ,  $\sigma_{об}$ ,  $\tau_{об}$ :

$$\varepsilon_{об} = \frac{L_{об}^2}{\alpha_{об}(n+1)(n+3)} = 9350 \text{ с. 1}$$

$$\tau_{об} = 0,5\varepsilon_{об}(n+1) = 16300 \text{ с.}$$

$$\sigma_{об} = \frac{2\lambda_{об}S_{об}}{L_{об}} = 2,33 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$$

7. Определить полную тепловую проводимость теплоизоляционного материала:

$$\sigma_{из} = \frac{\lambda_{из} S_{внутр} S_{внешн}}{V_{из}} = 0,79 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$$

8. Определить объем и толщину воздушной прослойки:

$$V_{в} = V_{из} - V_{об} = 0,155 \text{ м}^3$$

$$L_{в} = \frac{2V_{в}}{(S_{внутр} + S_{внешн})} = 0,088 \text{ м}$$

### Задача 7.1

Для найденных технических и теплофизических параметров термостата определить параметры теплообмена термостата со средой, при температуре объекта  $t_{об} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , и  $t_{из} = t_{ср} = -5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Значение коэффициента теплоотдачи от внешней оболочки в среду принимается в зависимости от варианта

1. Определим суммарный коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \alpha_{л} + \alpha_{к} = 2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$$

2. Определить лучистую составляющую теплообмена:



$$\alpha_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \frac{\left(\frac{T_{\text{об}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{из}}}{100}\right)^4}{T_{\text{об}} - T_{\text{из}}} = 1,24 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$$

$\varepsilon_{\text{пр}}$ - приведенная степень черноты между объектом и внутренней поверхностью оболочки термостата, принимается равным исходя из варианта.

$C_0$  –постоянная Стефана-Больцмана, принимается равной  $5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}^4}$

3. Тепловая проводимость, обусловленная лучистой составляющей теплообмена равна:

$$\sigma_{\text{в.луч}} = \alpha_{\text{л}} S_{\text{об}} = 1,38 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$$

4. Тепловая проводимость, обусловленная конвективной составляющей теплообмена равна:

$$\sigma_{\text{в.конв}} = \frac{\lambda_{\text{в}} S_{\text{об}} S_{\text{из}}}{V_{\text{в}}} = 0,85 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$$

$\lambda_{\text{в}}$ - теплопроводность воздушной прослойки принимается равной  $0,03 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$

5. Тепловая проводимость воздушного зазора:

$$\sigma_{\text{в}} = \sigma_{\text{в.луч}} + \sigma_{\text{в.конв}} = 2,23 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$$

6. Определим конвективную составляющую теплообмена:

$$\alpha_{\text{к}} = \frac{\sigma_{\text{в.конв}}}{S_{\text{из}}} = 0,76 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$$

7. Определить критерий тепловой инерции:

$$\varepsilon_{\text{из}} = \frac{(f_1 - f_2) + \zeta_1^{-1}(1 - f_2) + (2f_1 - f_2)\zeta_2^{-1} + 2\zeta_1^{-1}\zeta_2^{-1}}{\varphi_1 + \varphi_2 + 2\varphi_2\zeta_1^{-1} + 2\varphi_1\zeta_2^{-1}} = 1,71 \cdot 10^3 \text{с.}$$

8. Определить  $f_1, f_2, \zeta_1, \zeta_2, \varphi_1, \varphi_2$ :

$$\zeta_1 = \frac{\alpha L_{\text{из}}}{\lambda_{\text{из}}} = 4 \quad \zeta_2 = \frac{\alpha_{\text{с}} L_{\text{из}}}{\lambda_{\text{из}}} = 20$$

$$\varphi_1 = \frac{L_{\text{из}} S_{\text{внутр}}}{V_{\text{из}}} = 0,64 \quad \varphi_2 = \frac{L_{\text{из}} S_{\text{нар}}}{V_{\text{из}}} = 1,36$$

$$f_1 = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{1}{6} (\varphi_1 - \varphi_2) \right) = 0,56$$

$$f_2 = \frac{3}{10} \left( 1 - \frac{2}{9} \varphi_1 + \frac{1}{3} \varphi_2 \right) = 0,39$$

9. Отсюда, полная тепловая проводимость между термостатом и окружающей средой:

$$\sigma_{\text{полная}} = \frac{1}{\left( \frac{1}{\sigma_{\text{в}}} + \frac{1}{\sigma_{\text{из}}} + \frac{1}{\sigma_{\text{с}}} \right)} = 0,57 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$$

10. Тепловая проводимость среды находится из соотношения:

$$\sigma_{\text{ср}} = \alpha_{\text{с}} S_{\text{из}} = 24 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$$

### Задача 8

Найти мощность нагревателя термостата, которую необходимо подвести к объекту, чтобы обеспечить поддержание его температуры на уровне  $t_{\text{об}} = 5^\circ\text{C}$ . Если значение температуры среды составляет  $t_{\text{с}} = -15^\circ\text{C}$ . Дополнительно, произвести оценку перепадов температуры в термостате (пассивном) при достижении стационарного режима. Выполнить расчет переходной характеристики для параметра температуры на поверхности объекта термостатирования, изменение которой обусловлено изменением температуры окружающей среды. Параметры термостата принять из задач 7 и 7.1.

1. Определить мощность нагревателя, которую необходимо подвести к объекту, чтобы обеспечить поддержание его температуры на уровне  $t_{\text{об}} = 5^\circ\text{C}$ .

$$Q_{\text{нагр}} = \sigma_{\text{полная}} (t_{\text{об}} - t_{\text{с}}) = 11,4 \text{ Вт}$$

2. Соответственно перепады температур можно определить исходя из следующих выражений:

$$\frac{t'_{\text{из}} - t_{\text{с}}}{t_{\text{об}} - t_{\text{с}}} = \frac{\sigma_{\text{полная}}}{\sigma_{\text{с}}} \rightarrow t'_{\text{из}} = \frac{\sigma_{\text{полная}} (t_{\text{об}} - t_{\text{с}})}{\sigma_{\text{с}}} + t_{\text{с}} = -14,5^\circ\text{C}$$

$$\frac{t_{\text{из}} - t'_{\text{из}}}{t_{\text{об}} - t_{\text{с}}} = \frac{\sigma_{\text{полная}}}{\sigma_{\text{из}}} \rightarrow t_{\text{из}} = \frac{\sigma_{\text{полная}} (t_{\text{об}} - t_{\text{с}})}{\sigma_{\text{из}}} + t'_{\text{из}} = -0,1^\circ\text{C}$$

3. Т.к. в задаче 7.1 значение  $t_{\text{из}} = -5^\circ\text{C}$ , то необходимо выполнить перерасчет параметров  $\sigma_{\text{в.луч}}, \sigma_{\text{в.конв}}, \sigma_{\text{в}}$ . Отсюда, тепловая

проводимость, обусловленная лучистой составляющей теплообмена равна:

$$\sigma_{в.луч} = \alpha_{л} S_{об} = 1,43 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$$

$$\alpha_{л} = \varepsilon_{пр} C_0 \frac{\left(\frac{T_{об}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{из}}{100}\right)^4}{T_{об} - T_{из}} = 1,59 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$$

4. Тепловая проводимость, обусловленная конвективной составляющей теплообмена, равна:

$$\sigma_{в.конв} = \frac{\lambda_{в} S_{об} S_{из}}{V_{в}} = 0,72 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$$

$\lambda_{в}$ - теплопроводность воздушной прослойки принимается равной  $0,03 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$

5. Тепловая проводимость воздушного зазора:

$$\sigma_{в} = \sigma_{в.луч} + \sigma_{в.конв} = 2,15 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$$

6. Полная тепловая проводимость

$$\sigma_{полная} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sigma_{в}} + \frac{1}{\sigma_{из}} + \frac{1}{\sigma_{с}}\right)} = 0,564 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$$

7. Делаем пересчет мощности нагревателя термостата с учетом уточненного значения полной тепловой проводимости:

$$Q_{нагр} = \sigma_{полная} (t_{об} - t_{с}) = 11,3 \text{ Вт}$$

8. Соответственно перепады температур, с учетом уточненного значения полной тепловой проводимости, можно определить исходя из следующих выражений:

$$\frac{t'_{из} - t_{с}}{t_{об} - t_{с}} = \frac{\sigma_{полная}}{\sigma_{с}} \rightarrow t'_{из} = \frac{\sigma_{полная} (t_{об} - t_{с})}{\sigma_{с}} + t_{с} = -14,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\frac{t_{из} - t'_{из}}{t_{об} - t_{с}} = \frac{\sigma_{полная}}{\sigma_{из}} \rightarrow t_{из} = \frac{\sigma_{полная} (t_{об} - t_{с})}{\sigma_{из}} + t'_{из} = -0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

9. Переходная характеристика исследуемого объекта находится из следующего соотношения:

$$\theta_{об}(1, \tau) = \frac{t_{об}(1, \tau)}{t_{об.ст}} = 1 - \frac{\varepsilon_{об} - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} e^{-\frac{\tau}{\varepsilon_1}} + \frac{\varepsilon_{об} - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} e^{-\frac{\tau}{\varepsilon_2}}$$

10. Найдем параметры  $a_1, a_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2$ :

$$\varepsilon_1 = \frac{a_1}{2} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{4a_2}{a_1^2}} \right) = 1,16 \cdot 10^5 \text{ с.}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{a_1}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4a_2}{a_1^2}} \right) = 1,8 \cdot 10^3 \text{ с.}$$

$$a_1 = \varepsilon_{об} + \varepsilon_{об}(0) + \varepsilon_{из}(0, \zeta_2) = 1,18 \cdot 10^5 \text{ с}$$

$$a_2 = \varepsilon_{об}\varepsilon_{из}(0, \zeta_2) + \varepsilon_{об}(0)\varepsilon_{из}(0, \zeta_2) = 2,09 \cdot 10^8 \text{ с}$$

$$\varepsilon_{об}(0) = \frac{C_{об}}{\sigma_{полная}} = \frac{c_{об}\rho_{об}V_{об}}{\sigma_{полная}} \quad \varepsilon_{из}(0, \zeta_2) = \frac{L_{из}^2(1 - f_2 + 2\zeta_2^{-1})}{2a_{из}\varphi_2}$$

11. Сделав допущение, что  $x = \frac{\tau}{\varepsilon_1} = 8,62 \cdot 10^{-6} \tau$ , имеем:

$$\theta_{об}(x) = 1 - 0,934e^{-x} - 0,066e^{-1,08x} \quad (\text{на рисунке 22 график 1})$$

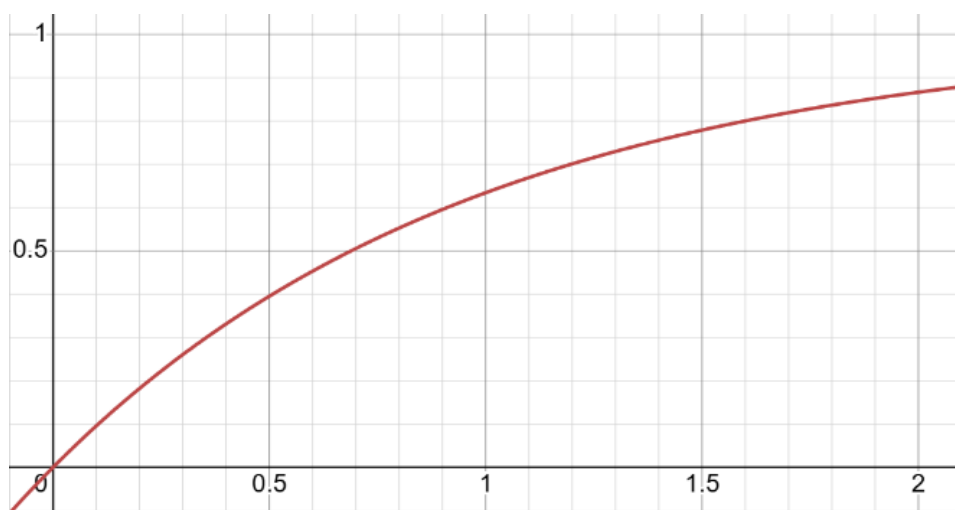


Рисунок 21 Результат расчета переходной характеристики для параметра температуры на поверхности объекта термостатирования по общей формуле.

12. Выполним расчет по приближенной формуле для определения переходной характеристики для параметра температуры на поверхности

объекта термостатирования. Переходная характеристика будет описываться следующим соотношением:

$$\theta_{об}(1, \tau) = \frac{t_{об}(1, \tau)}{t_{об.ст}} = 1 - \left(1 + \frac{\varepsilon_{из}}{\varepsilon_T} e^{-\frac{\tau}{\varepsilon_T}}\right)$$

$$\varepsilon_T = \varepsilon_{об}(0) + \varepsilon_{из}(0, \zeta_2) - \varepsilon_{из}$$

$$\theta_{об}(x) = 1 - 1,016e^{-1,08x} \text{ (график 2)}$$

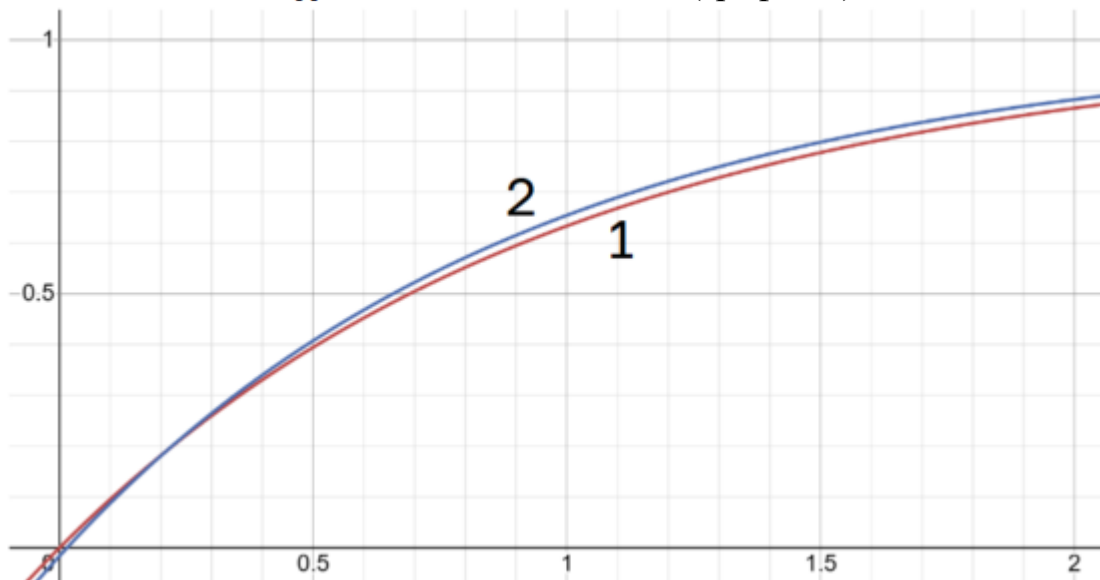


Рисунок 22 Результат расчета переходной характеристики для параметра температуры на поверхности объекта термостатирования по общей (красный график) и приближенной формулам (синий график).

## Задача 9

Выполнить оценку амплитуд  $a_{об}(1)$  и  $a_{об}(0)$  изменения температуры на поверхности и в центре объекта. Изменение температуры окружающей среды в течение суток ( $T = 24$  ч) составляет  $a_c = 10$  К, по отношению к некоторому среднему значению температуры. Изменение температуры окружающей среды имеет гармоническую зависимость.

1. Определить частотную характеристику пассивного термостата  $a_{об}(1)$ :

$$a_{об}(1) = a_c \sqrt{\left(\frac{1 + \varepsilon_{об}^2 \omega^2}{1 + (a_1^2 - 2a_2)\omega^2 + a_2^2 \omega^4}\right)} = 1,4 \text{ К}$$

2. Определить неизвестные характеристики, входящие в уравнение, представленное в пункте 1:

$$a_1 = \varepsilon_{об} + \varepsilon_{об}(0) + \varepsilon_{из}(0, \zeta_2) = 1,18 \cdot 10^5 \text{ с}$$

$$a_2 = \varepsilon_{об}\varepsilon_{из}(0, \zeta_2) + \varepsilon_{об}(0)\varepsilon_{из}(0, \zeta_2) = 2,09 \cdot 10^8 \text{ с}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 7,27 \cdot 10^{-5} \text{ с}$$

$$\varepsilon_{об}(0) = \frac{C_{об}}{\sigma_{полная}} = \frac{c_{об}\gamma_{об}V_{об}}{\sigma_{полная}}$$

$$\varepsilon_{из}(0, \zeta_2) = \frac{L_{из}^2(1 - f_2 + 2\zeta_2^{-1})}{2a_{из}\varphi_2} = 3,19 \cdot 10^3 \text{ с}$$

$$\varphi_2 = \frac{L_{из}S_{нар}}{V_{из}} = 1,36$$

$$f_2 = \frac{3}{10} \left( 1 - \frac{2}{9}\varphi_1 + \frac{1}{3}\varphi_2 \right) = 0,39$$

3. Произведем оценку определяющего размера теплоизоляционного материала:

$$L_{из} = \frac{2V_{из}}{(S_{внутр} + S_{внеш})} = 0,05 \text{ м}$$

4. Определить частотную характеристику пассивного термостата.  $a_{об}(0)$ .

$$a_{об}(0) = \frac{a_c}{\sqrt{(1 + \tau_{об}^2\omega^2)(1 + (a_1^2 - 2a_2)\omega^2 + a_2^2\omega^4)}} = 0,75 \text{ К}$$

5. Определить неизвестные характеристики входящие в уравнение в пункте 3.

$$\tau_{об} = 0,5\varepsilon_{об}(n + 1) = 16300 \text{ с.}$$

$n$  – фактор формы тела.

### Задача 10

Найти максимальное значение периода колебаний температуры окружающей среды  $t_{среды}(\tau)$ , при условии, что величина отклонения температуры внутри термостата (без находящегося в нем объекта) не больше некоторого значения  $\Delta$ . Значение температуры внутреннего пространства термостата принимается равной  $t_{из}(0, \tau)$  – температура внутренней поверхности теплоизоляционного материала.

1. Основное уравнение амплитудно-частотной характеристики теплоизоляционного материала, из которого определяется минимальная частота  $\omega$

$$A_{\text{из}}(0, \omega) = \frac{a_{\text{об}}(0)}{a_c} = \sqrt{(1 + \varepsilon(0, \zeta_2)^2 \omega^2)(1 + \tau_{\text{из}}^2 \omega^2)} = 0,01 \text{ К}$$

2. Определить неизвестные параметры, входящие в уравнение 1.

$$\varepsilon_{\text{из}}(0, \zeta_2) = \frac{L_{\text{из}}^2(1 - f_2 + 2\zeta_2^{-1})}{2a_{\text{из}}\varphi_2} = 3,19 \cdot 10^3 \text{ с}$$

$$\tau_{\text{из}}(0) = \frac{L_{\text{из}}^2 f_2}{2a_{\text{из}}\varphi_2} = 1,75 \cdot 10^3 \text{ с} \quad \varphi_2 = \frac{L_{\text{из}} S_{\text{нар}}}{V_{\text{из}}} = 1,36$$

$$f_2 = \frac{3}{10} \left( 1 - \frac{2}{9} \varphi_1 + \frac{1}{3} \varphi_2 \right) = 0,39$$

3. Сделаем допущение, что  $\Delta = A_{\text{из}}(0, \omega) = 0,01 \text{ К}$ , тогда минимальная частота исходя из соотношения 1 составит:

$$\omega = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}.$$

4. Таким образом максимальное значение периода колебаний температуры окружающей среды  $t_{\text{среды}}(\tau)$ , составит:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 1,5 \cdot 10^3 \text{ с} = 25 \text{ мин.}$$

## Задача 11

Выполнить расчет подогревного термостата при следующих условиях:

- объект с источником тепловыделений  $\Phi$ , Вт должен находиться в камере с температурой  $t_k$ , °C (рисунок 23);
- температура окружающей среды находится в пределах  $t_{\text{ср. max}}, t_{\text{ср. min}}$ , °C;
- теплоемкость камеры с объектом  $C_k$ ,  $\frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ ;
- камера имеет цилиндрическую форму с диаметром  $D_k$ , мм;
- напряжение питания нагревателя  $U$ , В;
- диаметр провода нагревателя  $d_{\text{н.}}$ , мм;
- материал теплоизоляции пенополистирол с теплопроводностью  $\lambda$ ,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ .

Определить:

1. тепловое сопротивление изоляции  $R_{\text{из}}$ ,  $\frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$ ;
2. мощность нагревателя  $\Phi_{\text{н}}$ , Вт;

3. время выхода термостата на стационарный режим  $\tau, c$  ;
4. рассчитать внешний диаметр изоляции  $D_{из}$ , мм;
5. рассчитать электрическое сопротивление нагревателя  $R_H, Ом$ ;
6. рассчитать время выхода нагревателя на рабочий режим при температуре среды  $t_{ср.min}, ^\circ C$ ;
7. рассчитать длину нагревателя  $l, мм$ .

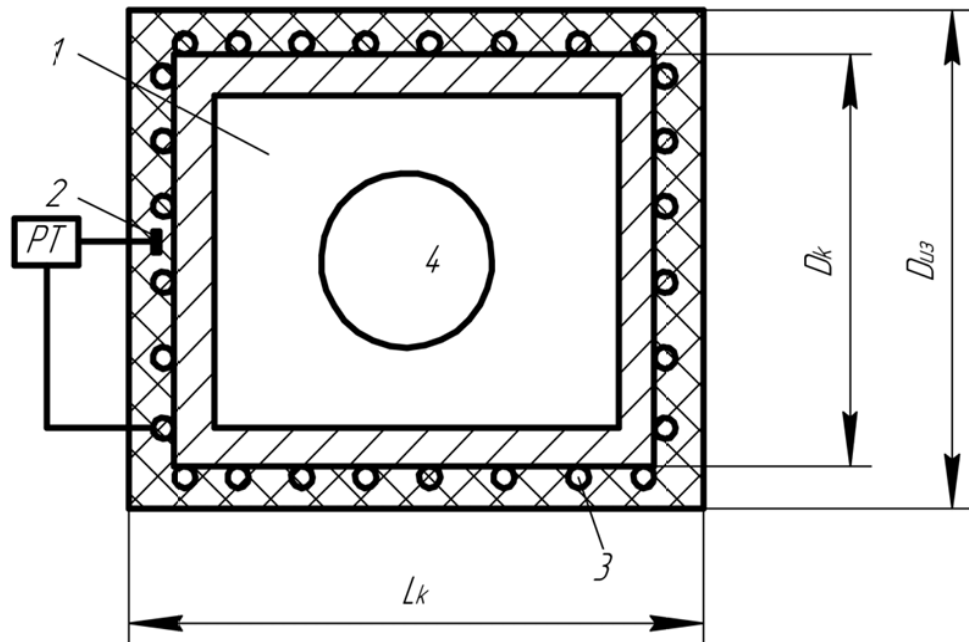


Рисунок 23. Схема подогревного термостата

1 – камера термостата; 2 – датчик температуры; 3 – нагревательный элемент; 4 – объект термостатирования.

1. Рассчитать тепловое сопротивление изоляции  $R_{из}$  :

$$R_{из} = \frac{t_k - t_{ср.max}}{\Phi} = 16 \frac{^\circ C}{Вт}$$

2. Рассчитать мощность нагревателя  $\Phi_H, Вт$ :

$$\Phi_H = \frac{t_k - t_{ср.min}}{R_{из}} = 7,5 Вт$$

3. Рассчитать время достижения термостатом стационарного режима  $\tau, c$ :
- Уравнение теплового баланса для камеры будет:

$$C_k \frac{dt_k(\tau)}{d\tau} + \sigma_{к.с} (t_k(\tau) - t_{ср}(\tau)) = \Phi,$$

где  $\sigma_{к.с} = \frac{1}{R_{из}}, \Phi = K(t_k(\tau) - t_{зад})$



Начальные условия:

$$t_k(0) = t_{\text{ср}}$$

$$t_k(\tau) = t_{\text{зад}}$$

Исходя из начальных условий, получаем следующее соотношение:

$$t_k(\tau) = t_{\text{ср}}(\tau) + (t_{\text{ср}}(\tau) - KR_{\text{из}}t_{\text{зад}}) \left[ 1 - e^{\frac{KR_{\text{из}}-1}{C_k R_{\text{из}}} \tau} \right]$$

Отсюда  $\tau$  будет равно:

$$\tau = \frac{C_k R_{\text{из}}}{KR_{\text{из}}-1} \ln \left( 1 - \frac{t_{\text{зад}}-t_{\text{ср}}}{t_{\text{ср}}-KR_{\text{из}}t_{\text{зад}}} \right) \approx 0,77 \text{ с}$$

4. Рассчитать внешний диаметр изоляции  $D_{\text{из}}$ , мм :

$$R_{\text{из}} = \frac{1}{2\lambda\pi L} \ln \frac{D_{\text{из}}}{D_{\text{к}}} \rightarrow D_{\text{из}} = D_{\text{к}} e^{(R_{\text{из}}2\lambda\pi L)} = 59 \text{ мм}$$

5. Рассчитать электрическое сопротивление нагревателя  $R_{\text{н}}$ , Ом.

$$R_{\text{н}} = \frac{U^2}{\Phi_{\text{н}}} = 19,2 \text{ Ом}$$

6. Рассчитать длину нагревателя. Длину нагревателя в данном случае определяется из формулы сопротивления нагревателя:

$$R_{\text{н}} = \rho \frac{l}{A},$$

где  $l$  —длина нагревателя, мм;  $A$  — площадь,  $\text{м}^2$ ;  $\rho$  —удельное электрическое сопротивление проводника,  $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}}{\text{м}}$  ( $\rho = 1,1 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}}{\text{м}}$ ), тогда  $l$ :

$$l = \frac{R_{\text{н}} A}{\rho} = 3,42 \text{ мм}$$

### Исходные данные к задаче 1

Вариант	$S_{\text{из,нар}}, 10^{-2} \text{ М}^2$	$S_{\text{из,вн}}, 10^{-2} \text{ М}^2$	$S_{\text{об}}, 10^{-2} \text{ М}^2$	$m_{\text{к}}, \text{ кг}$	$m_{\text{об}}, \text{ кг}$	$V_{\text{из,нар}}, 10^{-4} \text{ М}^3$	$c_{\text{об}}, 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$c_{\text{к}}, 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$c_{\text{из}}, 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\rho_{\text{из,нар}}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\lambda_{\text{из}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
1	10,61	5,73	1,72	1,39	0,22	12,73	0,92	0,92	0,8	400	0,64
2	8,87	4,79	1,44	1,6	0,56	10,64	0,46	0,46	0,9	200	0,07
3	10,61	5,73	1,72	1,9	0,21	12,73	0,14	0,14	1,3	150	0,45
4	7,13	3,85	1,16	2,1	0,76	8,56	0,2	0,2	1,1	100	0,32
5	13,22	7,14	2,14	2,5	0,54	15,86	0,92	0,92	1,2	200	0,78
6	9,74	5,26	1,58	0,9	0,99	11,69	0,25	0,25	0,7	250	0,55
7	10,61	5,73	1,72	0,65	0,23	12,73	0,75	0,75	0,9	300	0,41
8	9,74	5,26	1,58	1,67	0,37	11,69	0,15	0,15	0,8	450	0,03
9	14,96	8,08	2,42	1,22	0,99	17,95	0,92	0,92	0,7	400	0,69
10	14,09	7,61	2,28	0,54	0,21	16,91	0,37	0,37	1,1	100	0,36
11	12,35	6,67	2,00	0,57	0,34	14,82	0,46	0,46	1,2	80	0,53
12	8,14	4,40	1,32	1,66	1,11	9,77	0,61	0,61	1,4	150	0,08
13	16,7	9,02	2,71	2,3	1,4	20,04	0,92	0,92	1,3	250	0,27
14	11,48	6,20	1,86	1,96	1,09	13,78	0,54	0,54	0,8	200	0,73
15	13,22	7,14	2,14	2,2	0,78	15,86	0,95	0,95	0,9	400	0,49
16	14,09	7,61	2,28	1,54	0,45	16,91	0,51	0,51	1,1	160	0,61
17	13,22	7,14	2,14	2,4	0,55	15,86	0,92	0,92	1,4	180	0,39
18	15,83	8,55	2,56	2,01	1,03	19,00	0,35	0,35	0,8	90	0,66
19	8,87	4,79	1,44	1,45	0,99	10,64	0,46	0,46	0,9	100	0,55

### Исходные данные к задаче 2 и 2.1

Вариант	$t_k, ^\circ\text{C}$	$t_{c,\text{мин}}, ^\circ\text{C}$	$t_c, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{\text{об+к}} 10^{-2}, \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$	$\sigma_{\text{из}} 10^{-2}, \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$	$\sigma_{\text{ср}} 10^{-2}, \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$	$\sigma_{\text{об}} 10^{-2}, \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$	$\Delta t_c, ^\circ\text{C}$ (к задаче 2.1)
1	53	-32	22	12,34	36,74	75,34	15,34	39
2	52	-26	33	8,67	23,58	62,89	8,67	26
3	76	-10	32	16,89	44,12	88,45	20,45	45
4	72	-6	19	9,45	29,67	70,12	13,12	32
5	54	-6	22	14,12	41,39	83,67	9,78	37
6	46	-12	18	7,56	25,84	65,78	17,56	27
7	41	-17	26	13,78	37,05	79,90	12,89	30
8	73	-9	28	10,23	42,93	68,54	19,23	40
9	86	-24	20	15,67	22,47	86,23	7,45	21
10	57	-31	35	8,90	38,60	72,45	16,78	40
11	54	-31	27	11,34	26,15	60,34	14,56	20
12	55	-12	29	17,00	45,21	90,12	10,89	35
13	44	-11	15	9,78	31,89	77,89	18,34	38
14	50	-12	22	12,56	21,96	66,23	11,23	41
15	43	-8	35	14,89	40,74	80,45	13,89	20
16	80	-31	31	7,99	28,33	69,78	20,12	21
17	61	-11	28	13,45	43,55	85,67	8,45	41
18	50	-14	22	16,23	24,48	64,56	17,89	42
19	90	-19	19	8,45	33,77	73,89	12,34	47

### Исходные данные к задаче 3

Вариант	$I, \text{М}$	$R, \text{Ом}$	$\sigma_{\text{об+с}} 10^{-2}, \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$	$\sigma_{\text{об+к}} 10^{-2}, \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$	$\sigma_{\text{из}} 10^{-2}, \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$	$\sigma_{\text{ср}} 10^{-2}, \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$
1	12	78	1,37	9,39	28,10	55,84
2	7	103	0,89	6,63	18,23	47,05
3	19	64	2,12	12,80	33,63	65,15
4	4	125	1,05	7,22	22,79	52,14
5	16	89	0,76	10,72	31,58	61,76
6	9	72	2,39	5,80	19,92	49,05
7	13	117	1,68	10,47	28,33	59,08
8	8	66	0,72	7,80	32,74	51,01
9	20	131	1,94	11,88	17,39	63,57
10	5	85	1,27	6,81	29,49	53,79
11	14	95	0,88	8,64	20,15	45,19
12	17	60	2,03	12,88	34,45	66,34
13	6	122	1,45	7,47	24,46	57,65
14	15	104	0,92	9,55	17,01	49,37
15	11	73	1,61	11,30	31,10	59,47
16	18	108	2,35	6,12	21,79	51,89
17	10	67	1,23	10,22	33,20	63,18
18	13	101	0,78	12,30	18,90	48,19
19	7	87	2,08	6,47	25,87	54,81

### Исходные данные к задаче 4

Вариант	$L, 10^{-2} \text{ м}$	$n, \text{ шт}$	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$S_1, 10^{-2} \text{ м}^2$	$S_2, 10^{-2} \text{ м}^2$	$a_{\text{к}}, \text{ К}$	$C_{\text{об}}, 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$	$T, \text{ с}$
1	1,6	10	0,49	4,43	1,72	2,0	760	15
2	1,2	16	0,07	3,72	1,44	0,5	775	25
3	2,0	8	0,66	4,43	1,72	3,0	800	10
4	1,4	20	0,36	3,02	1,16	0,2	860	40
5	1,0	14	0,45	5,49	2,14	2,1	925	20
6	1,8	12	0,27	4,08	1,58	1,4	950	35
7	0,8	18	0,78	4,43	1,72	0,8	1025	30
8	1,4	8	0,32	4,08	1,58	2,7	1100	25
9	1,2	20	0,53	6,19	2,42	1,1	1175	15
10	2,0	16	0,61	5,84	2,28	3,0	1200	20
11	1,6	10	0,08	5,13	2,00	0,4	1275	10
12	1,0	12	0,73	3,43	1,32	2,3	1350	40
13	1,8	14	0,55	6,90	2,71	1,6	1400	35
14	0,8	18	0,64	4,78	1,86	0,3	1450	30
15	1,4	8	0,39	5,49	2,14	2,8	1525	15
16	1,2	20	0,41	5,84	2,28	1,2	1585	25
17	2,0	10	0,69	5,49	2,14	0,7	1650	20
18	1,6	16	0,03	6,54	2,56	2,5	1750	10
19	1,0	12	0,5	3,72	1,44	1,8	1875	40

### Исходные данные к задаче 5

Вариант	$W_{\text{к}}, \text{Вт}$	$\varepsilon_{\text{об}}, 10^3 \text{ с}$	$C_{\text{к}}, 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\eta_{\text{об+к}}$	$\chi_{\text{об+к}}$	$\sigma_{\text{об+к}}, 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$	$\sigma_{\text{к+с}}, 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$
1	15,4	3,45	0,74	0,85	0,82	3,014	20,658
2	23,1	1,76	0,51	0,73	0,75	1,958	14,586
3	8,7	4,12	0,89	0,92	0,91	4,664	28,16
4	29,5	2,89	0,65	0,78	0,88	2,31	15,884
5	12,3	5,00	1,00	0,88	0,78	1,672	23,584
6	26,8	1,34	0,72	0,71	0,69	5,258	12,76
7	9,9	3,67	0,58	0,96	0,94	3,696	23,034
8	20,2	2,45	0,91	0,79	0,83	1,584	17,16
9	17,6	4,78	0,65	0,83	0,76	4,268	26,136
10	24,4	1,23	0,79	0,90	0,90	2,794	14,982
11	13,1	2,67	0,50	0,76	0,80	1,936	19,008
12	27,9	3,89	0,86	0,89	0,87	4,466	28,336
13	10,5	4,56	0,63	0,74	0,73	3,19	16,434
14	21,7	1,11	0,77	0,94	0,85	2,024	21,01
15	28,3	5,00	0,70	0,70	0,79	3,542	24,86
16	16,2	2,33	0,83	0,87	0,92	5,17	13,464
17	19,8	3,44	0,58	0,81	0,70	2,706	22,484
18	25,0	1,99	0,91	0,92	0,95	1,716	27,06
19	14,9	4,21	0,65	0,77	0,81	4,576	14,234

### Исходные данные к задаче 6

Вариант	$t_{\text{с,окр}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{\text{об+к}}, 10^{-2}, \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$	$\sigma_{\text{к+с}}, 10^{-2}, \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$	$\sigma_{\text{об+с}}, 10^{-2}, \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$	$C_{\text{к}}, 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$	$\nu$
1	12	4,795	32,865	1,37	0,68	7,52
2	-3	3,115	23,205	0,89	0,51	4,89
3	0	7,42	44,8	2,12	0,79	9,07
4	23	3,675	25,27	1,05	0,62	6,34
5	-7	2,66	37,52	0,76	0,87	8,21
6	5	8,365	20,3	2,39	0,67	4,76
7	-10	5,88	36,645	1,68	0,56	9,98
8	19	2,52	27,3	0,72	0,81	5,33
9	7	6,79	41,58	1,94	0,61	7,88
10	-2	4,445	23,835	1,27	0,72	4,62
11	16	3,08	30,24	0,88	0,50	6,45
12	-8	7,105	45,08	2,03	0,77	8,91
13	24	5,075	26,145	1,45	0,60	5,78
14	3	3,22	33,425	0,92	0,70	9,23
15	-5	5,635	39,55	1,61	0,65	4,98
16	10	8,225	21,42	2,35	0,75	7,14
17	-1	4,305	35,77	1,23	0,56	6,67
18	22	2,73	43,05	0,78	0,81	8,55
19	6	7,28	22,645	2,08	0,61	5,89

### Исходные данные к задаче 7

Вариант	$m_{об}, \text{кг}$	$D_{об}, \text{мм}$	$H_{об}, \text{мм}$	$c_{об}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$c_{из}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\rho_{из}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\rho_{об}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\lambda_{об}, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\alpha_{об}, 10^{-7} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\lambda_{из}, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\alpha_{из}, 10^{-7} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$
1	12	155	305	1520	760	60	720	0,43	1,45	0,64	8,45
2	7	160	310	1550	775	65	740	0,06	2,10	0,07	12,30
3	20	180	330	1600	800	70	760	0,58	1,05	0,45	7,85
4	16	195	345	1720	860	75	780	0,32	2,55	0,32	9,60
5	9	200	350	1850	925	80	800	0,40	0,80	0,78	10,15
6	24	215	365	1900	950	85	820	0,24	2,20	0,55	11,75
7	6	220	370	2050	1025	90	860	0,69	1,80	0,41	7,95
8	14	235	385	2200	1100	95	880	0,28	2,45	0,03	13,00
9	18	240	390	2350	1175	100	900	0,47	1,15	0,69	8,25
10	23	255	405	2400	1200	105	920	0,54	2,30	0,36	9,80
11	8	260	410	2550	1275	110	940	0,07	0,95	0,53	10,40
12	19	275	425	2700	1350	115	960	0,64	2,00	0,08	11,20
13	10	280	430	2800	1400	120	1000	0,48	1,60	0,27	7,50
14	21	295	445	2900	1450	125	1020	0,56	2,25	0,73	12,85
15	13	150	450	3050	1525	130	1040	0,34	1,75	0,49	8,95
16	25	165	465	3170	1585	55	1060	0,36	2,50	0,61	13,00
17	5	185	470	3300	1650	75	1080	0,61	1,35	0,39	9,35
18	17	210	485	3500	1750	85	1100	0,03	2,15	0,66	10,55
19	22	290	495	3750	1875	115	1120	0,44	1,25	0,55	7,65



### Исходные данные к задаче 7,1

Вариант	$t_{об}, ^\circ\text{C}$	$t_{из} = t_{ср}, ^\circ\text{C}$	$v_{ср}, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	$\alpha_{с}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$	$\varepsilon_{пр}$	$\lambda_{в}, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
1	10	-10	4	15	0.78	0,03
2	15	-5	5	20	0.65	0,03
3	20	0	4	15	0.82	0,03
4	25	5	5	20	0.50	0,03
5	30	-10	4	15	0.88	0,03
6	35	-5	5	20	0.73	0,03
7	5	0	4	15	0.60	0,03
8	15	5	5	20	0.79	0,03
9	25	-10	4	15	0.55	0,03
10	35	-5	5	20	0.83	0,03
11	10	0	4	15	0.68	0,03
12	20	5	5	20	0.76	0,03
13	30	-10	4	15	0.81	0,03
14	5	-5	5	20	0.66	0,03
15	25	0	4	15	0.54	0,03
16	10	5	5	20	0.87	0,03
17	15	-10	4	15	0.58	0,03
18	20	-5	5	20	0.70	0,03
19	35	0	4	15	0.77	0,03

### Исходные данные к задаче 8

Вариант	$t_c, ^\circ\text{C}$	$t_{об}, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon_{об}, \text{с}$	$\alpha_{из}, 10^{-7} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\sigma_c, \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$	$\sigma_{из}, \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$	$\varepsilon_{пр}$	$c_{об}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\rho_{об}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$m_{об}, \text{кг}$
1	-8,7	15	2,79	8,45	39	0,60	0.78	1520	720	0,22
2	-4,4	20	1,43	12,30	33	0,51	0.65	1550	740	0,56
3	-2,6	25	3,34	7,85	46	0,64	0.82	1600	760	0,21
4	4,4	30	2,34	9,60	36	0,55	0.50	1720	780	0,76
5	-8,7	35	4,05	10,15	43	0,62	0.88	1850	800	0,54
6	-4,4	40	1,09	11,75	34	0,50	0.73	1900	820	0,99
7	-7,0	10	2,97	7,95	41	0,67	0.60	2050	860	0,23
8	4,4	20	1,98	13,00	36	0,55	0.79	2200	880	0,37
9	-8,7	30	3,87	8,25	44	0,58	0.55	2350	900	0,99
10	-4,4	40	1,00	9,80	38	0,63	0.83	2400	920	0,21
11	-6,1	15	2,16	10,40	32	0,53	0.68	2550	940	0,34
12	4,4	25	3,15	11,20	46	0,62	0.76	2700	960	1,11
13	-8,7	35	3,69	7,50	40	0,52	0.81	2800	1000	1,4
14	-4,4	10	0,90	12,85	35	0,66	0.66	2900	1020	1,09
15	-4,4	30	4,05	8,95	42	0,49	0.54	3050	1040	0,78
16	4,4	15	1,89	13,00	36	0,61	0.87	3170	1060	0,45
17	-8,7	20	2,79	9,35	44	0,57	0.58	3300	1080	0,55
18	-4,4	25	1,61	10,55	34	0,64	0.70	3500	1100	1,03
19	-0,9	40	3,41	7,65	38	0,54	0.77	3750	1120	0,99

### Исходные данные к задаче 9

Вариант	$S_{\text{из,нар}}, 10^{-2} \text{ м}^2$	$S_{\text{из,вн}}, 10^{-2} \text{ м}^2$	$a_c, \text{ К}$	$\varepsilon_{\text{об}}, 10^3 \text{ с}$	$\sigma_{\text{полная}}, \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$	$n$	$\rho_{\text{из}}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$m_{\text{из}}, \text{ кг}$	$c_{\text{об}}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\rho_{\text{об}}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$m_{\text{об}}, \text{ кг}$
1	10,61	5,73	10	2,79	0,45	4	400	0,42	1520	720	0,22
2	8,87	4,79	12	1,43	0,62	2	200	0,48	1550	740	0,56
3	10,61	5,73	9	3,34	0,78	3	150	0,57	1600	760	0,21
4	7,13	3,85	7	2,34	0,97	2	100	0,63	1720	780	0,76
5	13,22	7,14	11	4,05	0,43	3	200	0,75	1850	800	0,54
6	9,74	5,26	6	1,09	0,85	2	250	0,27	1900	820	0,99
7	10,61	5,73	12	2,97	0,66	4	300	0,20	2050	860	0,23
8	9,74	5,26	13	1,98	0,91	2	450	0,50	2200	880	0,37
9	14,96	8,08	5	3,87	0,51	3	400	0,37	2350	900	0,99
10	14,09	7,61	9	1,00	0,88	3	100	0,16	2400	920	0,21
11	12,35	6,67	3	2,16	0,77	3	80	0,17	2550	940	0,34
12	8,14	4,40	6	3,15	0,69	2	150	0,50	2700	960	1,11
13	16,7	9,02	10	3,69	0,59	4	250	0,69	2800	1000	1,4
14	11,48	6,20	8	0,90	0,82	2	200	0,59	2900	1020	1,09
15	13,22	7,14	3	4,05	0,44	5	400	0,66	3050	1040	0,78
16	14,09	7,61	10	1,89	0,94	3	160	0,46	3170	1060	0,45
17	13,22	7,14	6	2,79	0,58	2	180	0,72	3300	1080	0,55
18	15,83	8,55	9	1,61	0,83	3	90	0,60	3500	1100	1,03
19	8,87	4,79	14	3,41	0,60	3	100	0,44	3750	1120	0,99

### Исходные данные к задаче 10

Вариант	$\alpha_{из}, 10^{-7} \frac{м^2}{с}$	$\Delta=A_{из}(0, \omega), К$	$S_{из,нар}, 10^{-2} м^2$	$V_{из,нар}, 10^{-4} м^3$	$\rho_{из}, \frac{кг}{м^3}$	$\lambda_{из}, \frac{Вт}{м \cdot К}$	$c_{из}, 10^3 \frac{Дж}{кг \cdot К}$
1	8,45	0,01	10,61	12,73	400	0,64	0,8
2	12,30	0,02	8,87	10,64	200	0,07	0,9
3	7,85	0,01	10,61	12,73	150	0,45	1,3
4	9,60	0,02	7,13	8,56	100	0,32	1,1
5	10,15	0,01	13,22	15,86	200	0,78	1,2
6	11,75	0,02	9,74	11,69	250	0,55	0,7
7	7,95	0,01	10,61	12,73	300	0,41	0,9
8	13,00	0,02	9,74	11,69	450	0,03	0,8
9	8,25	0,01	14,96	17,95	400	0,69	0,7
10	9,80	0,02	14,09	16,91	100	0,36	1,1
11	10,40	0,01	12,35	14,82	80	0,53	1,2
12	11,20	0,02	8,14	9,77	150	0,08	1,4
13	7,50	0,01	16,7	20,04	250	0,27	1,3
14	12,85	0,02	11,48	13,78	200	0,73	0,8
15	8,95	0,01	13,22	15,86	400	0,49	0,9
16	13,00	0,02	14,09	16,91	160	0,61	1,1
17	9,35	0,01	13,22	15,86	180	0,39	1,4
18	10,55	0,02	15,83	19,00	90	0,66	0,8
19	7,65	0,01	8,87	10,64	100	0,55	0,9

### Исходные данные к задаче 11

Вариант	$\Phi, \text{ВТ}$	$t_{\kappa}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ср}, \text{max}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ср}, \text{min}}, ^\circ\text{C}$	$U, \text{В}$	$l, \text{м}$	$S, \text{м}^2$
1	1	50	30	-40	12	4	0,01
2	1,5	51	31	-38	12	4,1	0,011
3	2	52	32	-36	12	4,2	0,012
4	2,5	53	33	-34	12	4,3	0,013
5	3	54	34	-36	27	4,4	0,014
6	3,5	55	35	-34	27	4,5	0,015
7	4	56	36	-32	27	4,6	0,016
8	4,5	57	37	-30	27	4,7	0,017
9	5	58	38	-28	27	4,8	0,018
10	5,5	59	39	-26	220	4,9	0,019
11	6	60	40	-24	220	5	0,02
12	6,5	61	41	-26	220	5,1	0,021
13	7	62	42	-28	220	5,2	0,022
14	7,5	63	43	-30	220	5,3	0,023
15	8	64	44	-28	220	5,4	0,024
16	8,5	65	45	-30	220	5,5	0,025
17	9	66	46	-31	220	5,6	0,026
18	9,5	67	47	-32	220	5,7	0,027
19	10	68	48	-33	220	5,8	0,028

### Список использованных источников

1. Бакланова, В. Г. Теплообменные аппараты низкотемпературных установок и систем термостатирования : учебное пособие / В. Г. Бакланова, Ю. А. Шевич. — Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, [б. г.]. — Часть 1: Аппараты трубчатого и пластинчато-ребристого типов — 2011. — 68 с. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/52215>
2. Буренин В.В. Системы термостатирования Теорет. основы, способы получения тепла и холода, Учеб. пособие. — М.: Б. и., 2014. — 96 с.
3. Кондратьев Г.М., Дульнев Г.Н., Платунов Е.С., Ярышев Н.А. Прикладная физика. Теплообмен в приборостроении / Серия "Выдающиеся ученые ИТМО". - СПб: СПбГУ ИТМО, 2003. - 560  
Ссылка на книгу: <https://books.ifmo.ru/book/251/251.htm>
4. Дульнев Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре: Учебник для вузов по специальности «Конструирование и производство радиоаппаратуры». Москва, издательство Высшая школа, 1984. — 247
5. Дульнев Г. Н., Э. М. Семяшкин. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах - Ленинград: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1968. - 359 с
6. Дульнев Г.Н. и др. Методы расчета теплового режима приборов. – М.: Радио и связь, 1990.
7. Ярышев Н.А., Андреева Л.Б. Тепловой расчет термостатов. - Л.: Энергоатомиздат 1984.
8. В.И.Егоров, В.А.Кораблев, А.В.Шарков Системы термостатирования. Методические указания к лабораторным работам. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2006. - 51 с.

Шеин Владислав Максимович  
Кораблев Владимир Антонович  
Сулин Александр Борисович

## **Термостатирование и термостаты**

**Учебно-методическое пособие**

В авторской редакции  
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО  
Зав. РИО Н.Ф. Гусарова  
Подписано к печати  
Заказ №  
Тираж  
Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел**  
**Университета ИТМО**  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А