

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Костромской государственный университет»  
(КГУ)

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АНОДНОГО НАГРЕВА**

Направление подготовки 03.04.02–Физика  
Направленность «Физика конденсированного состояния вещества»  
Квалификация (степень) выпускника: Магистр

**Кострома**

Рабочая программа дисциплины «Теплофизические особенности анодного нагрева» разработана в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования направления подготовки 03.04.02–Физика, утвержден 7 августа 2020 г., приказ № 914.

Разработал Шадрин Сергей Юрьевич, заведующий кафедрой общей и теоретической физики, к.ф.-м.н., доцент.

Рецензент: Дьяков И.Г., доцент кафедры общей и теоретической физики, к.т.н., доцент.

УТВЕРЖДЕНО:

Заведующий кафедрой общей и теоретической физики  
Шадрин Сергей Юрьевич, заведующий кафедрой общей и  
теоретической физики, к.т.н., доцент

## 1. Цели и задачи освоения дисциплины

Основной целью курса является подготовка магистров физики к практической деятельности в области управления параметрами теплообмена при проведении электролитно-плазменной обработке, а также моделирования сложных физических процессов в научно-исследовательских институтах, лабораториях, конструкторских или проектных бюро путем формирования соответствующих компетенций.

В результате изучения учебной дисциплины «Теплофизические особенности анодного нагрева» обучаемые должны освоить компетенцию:

– способен применять фундаментальные знания в области физики для решения научно-исследовательских задач, а также владеть основами педагогики, необходимыми для осуществления преподавательской деятельности (ОПК-1)

Задачи дисциплины:

– сформировать представление о теплофизической картине электролитного нагрева с выявлением источников тепла и направлений тепло- и массопереноса

– освоить методы решения линейных и нелинейных уравнений математической физики, описывающих процессы теплопереноса и движения вязкой несжимаемой жидкости

– освоения новых, в том числе специализированных, методик расчета параметров теплообмена при фазовых переходах вещества.

## 2. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

освоить компетенцию:

способен применять фундаментальные знания в области физики для решения научно-исследовательских задач, а также владеть основами педагогики, необходимыми для осуществления преподавательской деятельности (ОПК-1)

Код и содержание индикаторов компетенции:

ОПК-1.1. Использует знания современных проблем и новейших достижений физики в научно-исследовательской работе

**знать**

- области применения уравнений математической физики, описывающих процессы теплопереноса и движение вязкой несжимаемой жидкости;

– гидродинамическую природу кризисов в механизме кипения жидкости, критерий устойчивости двухфазного граничного слоя;

– особенности распределения энергии в трехфазной системе анод–парогазовая оболочка–электролит при различных режимах электролитно-плазменной обработки;

– роль температуры и скорости нагрева на фазовые превращения в металлах и сплавах, на скорость и закономерности диффузионных, химических и электрохимических процессов;

**уметь**

– планировать и организовывать физические исследования, в частности интерпретировать формальные записи имеющихся физических моделей процесса теплообмена при кипении жидкости, модифицировать их применительно к специфике электролитно-плазменных методов, объяснять их содержание в процессе профессиональной коммуникации;

– самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики, в частности использовать полученные знания о динамике температурного поля при кипении жидкости для расчета теплообмена и энергетических характеристик на разогреваемой поверхности;

**владеть**

– методами планирования и организации научных исследований, в частности

методами решения линейных и нелинейных уравнений математической физики, описывающих процессы теплопереноса и движения вязкой несжимаемой жидкости;

– методами расчета энергетического баланса в трехфазной системе анод–парогазовая оболочка–электролит;

– методами управления распределением тепловых потоков, действующих в парогазовой оболочке, на основе физических свойств процесса.

### 3. Место дисциплины в структуре ОП ВО

Дисциплина «Теплофизические особенности анодного нагрева» изучается в первом семестре и входит в обязательную часть Блока 1 «Дисциплины» образовательной программы подготовки магистров физики. Дисциплина необходима для комплексного понимания научного направления «Скоростная химико-термическая обработка металлов», развиваемого в рамках профиля подготовки «Физика конденсированного состояния вещества». В некоторых методах термической обработки окружающая среда является сложным физическим объектом, например, парогазовой смесью, поэтому для выбора наиболее оптимальных режимов работы в каждом конкретном случае требуется знание особенностей процессов теплообмена и их влияние на конечный результат.

Перед изучением дисциплины «Теплофизические особенности анодного нагрева» обучающийся должен иметь представления о фазовых превращениях вещества в рамках курса общей физики, уметь использовать соответствующие уравнения математической физики в различных физических моделях. Требуемые знания и умения формируются в рамках базовой части основной образовательной программы бакалавриата по направлению подготовки Физика.

Освоение данной дисциплины необходимо как предшествующее для прохождения производственной и преддипломной практик.

Формирование компетенций, закладываемых при изучении данной дисциплины, будет продолжено в рамках дисциплин «Структура материалов», «Электрическая проводимость приэлектродной парогазовой оболочки».

### 4. Объем дисциплины (модуля)

#### 4.1. Объем дисциплины в зачетных единицах с указанием академических (астрономических) часов и виды учебной работы

Виды учебной работы,	Очная форма
Общая трудоемкость в зачетных единицах	5
Общая трудоемкость в часах	180
Аудиторные занятия в часах, в том числе:	68
Лекции	34
Практические занятия	34
Лабораторные занятия	–
Самостоятельная работа в часах	112
Форма промежуточной аттестации	Экзамен в 1 семестре

#### 4.2. Объем контактной работы на 1 обучающегося

Виды учебных занятий	Очная форма
Лекции	34
Практические занятия	34
Лабораторные занятий	–
Консультации	2

Зачет/зачеты	–
Экзамен/экзамены	0,35
Курсовые работы	–
Курсовые проекты	–
Всего	70,35

## 5. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам), с указанием количества часов и видов занятий

### 5.1 Тематический план учебной дисциплины

№	Название раздела, темы	Всего з.е/час	Аудиторные занятия			Самостоятельная работа
			Лекц.	Практ.	Лаб.	
1	Два основных режима кипения жидкости	22	6	6	–	10
2	Локальное вскипание электролита в приэлектродной зоне	18	4	4	–	10
3	Источники тепла в сплошной и устойчивой оболочке	18	4	4	–	10
4	Баланс тепла при стационарном анодном нагреве	42	10	10	–	22
5	Толщина парогазовой оболочки	44	10	10	–	24
6	Экзамен	36			–	36
	<b>Итого:</b>	<b>180</b>	<b>34</b>	<b>34</b>	–	<b>112</b>

### 5.2. Содержание:

**Тема 1. Два основных режима кипения.** Кривая кипения. Теплоотдача и плотность теплового потока при различных режимах кипения. Основные особенности пузырькового и пленочного режимов кипения. Первый и второй кризис кипения. Гидродинамическая природа кризисов в механизме кипения жидкости. Гистерезис в тепловых и гидродинамических явлениях.

#### **Тема 2. Локальное вскипание электролита в приэлектродной зоне**

Причины прекращения обычного электролиза в водных растворах. Роль электролизного выделения газа. Условия образования сплошной парогазовой оболочки и прохождения через нее электрического тока. Режим прерываний тока, его особенности, роль полярности активного электрода и параметров внешней цепи (емкости и индуктивности). Критические напряжения существования неустойчивой и устойчивой парогазовой оболочки.

#### **Тема 3. Источники тепла в сплошной и устойчивой оболочке**

Закономерности прохождения тока через парогазовую фазу. Математическое описание прохождения тока через оболочку. Способы выражения объемной мощности источников тепла в оболочке с учетом пространственных зарядов.

#### **Тема 4. Баланс тепла при стационарном анодном нагреве**

Распределение температуры в парогазовой оболочке, модели расчета. Экспериментальные измерения тепловых потоков из оболочки в электролит и деталь-анод. Влияние напряжения нагрева на тепловой поток из оболочки в электролит. Закономерности теплообмена между оболочкой и деталью-анодом. Методы определения потока из оболочки в анод. Доля тепла, поступающего из оболочки в атмосферу.

#### **Тема 5. Толщина парогазовой оболочки**

Модели расчета толщины парогазовой оболочки. Влияние толщины оболочки на вольтамперные и вольт-температурные характеристики нагрева. Проблема экспериментального определения толщины оболочки, возможные методы косвенных измерений.

## **6. Методические материалы для обучающихся по освоению дисциплины**

Предметом теории теплообмена являются процессы переноса тепла из одной части пространства в другую. Значимость процесса теплообмена как в природе, так и в технике определяется тем, что свойства тел самым существенным образом зависят от температуры, то есть от их теплового состояния. Последнее же, в свою очередь, определяется условиями теплообмена, которые поэтому оказывают решающее влияние на процессы изменения агрегатного состояния вещества, на течение химических реакций (в частности, процесс горения), механические, электроизоляционные, магнитные и другие свойства тел.

Основной целью курса «Теплофизические особенности анодного нагрева» является подготовка магистров физики к практической деятельности в области управления параметрами теплообмена при электролитно-плазменной обработке, а также моделирования сложных физических процессов в научных исследованиях. Явление анодного электролитного нагрева во многом определяется тепловым состоянием в трехфазной системе анод–парогазовая оболочка–электролит, и его понимание невозможно без комплексного изучения с позиции теплофизики, электрохимии и материаловедения.

Дисциплина «Теплофизические особенности анодного нагрева» изучается в первом семестре и входит в обязательную часть блока 1 «Дисциплины» образовательной программы подготовки магистров физики. На ее освоение отводится 180 часов, в том числе 112 часов на самостоятельную работу, которая в соответствии с тематическим планом разделена на содержательные блоки с соответствующими часами для самостоятельной работы.

Самостоятельная работа магистранта при работе с темой должна включать: выполнение перечисленных ниже заданий и прохождение соответствующих форм контроля. Подробная информация об особенностях выполнения индивидуальных заданий изложена в методических указаниях для магистрантов по данной дисциплине.

### **6.1. Самостоятельная работа обучающихся по дисциплине (модулю)**

<b>№ п/п</b>	<b>Раздел (тема) дисциплины</b>	<b>Задание</b>	<b>Часы</b>	<b>Методические рекомендации по выполнению задания</b>	<b>Форма контроля</b>
1	Два основных режима кипения жидкости	Решение индивидуальных заданий	10	Подробные рекомендации содержатся в методических указаниях [1] для магистрантов по данной дисциплине	Устный, письменный опрос

2	Локальное вскипание электролита в приэлектродной зоне	Решение индивидуальных заданий	10	Для подготовки к решению индивидуальных заданий рекомендуется пользоваться учебником [2] и монографией [3] из списка основной литературы	Письменный опрос
3	Источники тепла в сплошной устойчивой оболочке	Решение индивидуальных заданий	10	Для подготовки к решению индивидуальных заданий рекомендуется пользоваться учебником [2] и монографией [3] из списка основной литературы	Письменный опрос
4	Баланс тепла при стационарном анодном нагреве	Выполнение практического расчета	22	Для выполнения практического расчета рекомендуется использовать методы, изложенные в статьях [3–6] списка дополнительной литературы	Выступление с презентацией
5	Толщина парогазовой оболочки	Выполнение практического расчета	24	Для выполнения практического расчета рекомендуется использовать методы, изложенные в статьях [3, 7] списка дополнительной литературы	Выступление с презентацией
6	Экзамен	Решение индивидуальных заданий	36	Для подготовки к решению индивидуальных заданий рекомендуется пользоваться учебником [2] и монографией [3] из списка основной литературы	Экзамен

## 6.2. Тематика и задания для практических занятий

Формой отчетности по данной дисциплине является экзамен.

### Семинары 1–3. Два основных режима кипения жидкости

Задачи для разбора с преподавателем: 3.3, 3.4, 3.7, 3.9, 3.14, 3.18, 3.19, 3.20

Обсуждаемые вопросы: кривая кипения, критериальные уравнения, первый и второй критический тепловой поток, теплообмен при пузырьковом кипении в большом объеме, кризисный характер перехода от одного режима кипения к другому, явление гистерезиса при кипении, второй критический тепловой поток, коэффициент теплоотдачи при пленочном кипении для различных условий.

#### **Семинары 4–5. Локальное вскипание электролита в приэлектродной зоне**

Определение второго критического напряжения по графикам и осциллограммам. Преподаватель кратко напоминает лекционный материал, далее каждый магистрант получает вольт-амперную характеристику разряда конденсатора на разогретый анод при заданной концентрации электролита и набор осциллограмм, полученных при различном напряжении и указанной концентрации. Результатом работы является получения второго критического напряжения из двух предложенных методов, необходимо подробно остановится на обосновании различных численных значений полученных результатов.

#### **Семинары 6–7. Источники тепла в сплошной и устойчивой оболочке**

Решение задач о нахождении электрического поля в парогазовой оболочке при различных допущениях. Получение классических вольт-амперных характеристик, закон Богуславского-Ленгмюра, закон «трех вторых». Получение вольт-амперных характеристик парогазовой оболочки постоянной толщины, сравнение с экспериментальными данными. Выражение для удельной объемной мощности внутренних источников тепла.

#### **Семинары 8–12. Баланс тепла при стационарном анодном нагреве**

Получить вольт-температурные и вольт-амперные характеристики для анодного электролитного нагрева коротких образцов (приближение парогазовой оболочки постоянной толщины) условия на границах, выражение для объемной мощности внутренних источников тепла и другие допущения взять из таблицы, приведенной в методических указаниях [1].

Определение плотности теплового потока из парогазовой оболочки в анод по данным температурных измерений, обоснование одномерной модели расчета теплового потока. Знакомство с нестационарными схемами, методами решения некорректных задач вычислительной математики.

Определение тепловых потоков из оболочки в электролит и атмосферу, особенности расчета и практическая реализация.

#### **Семинары 13–17. Толщина парогазовой оболочки**

Прямое определение толщины парогазовой оболочке по фотографиям в прямой и обратной проекции. Модели пленочного кипения, расчет толщины парового слоя. Модификация моделей пленочного кипения к условиям электролитно-плазменного нагрева, расчет толщины по простейшим моделям.

### **7. Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля)**

#### **а) основная:**

1. Шадрин С.Ю. Теплообмен при кипении жидкости [Электронный ресурс] : методические указания для самостоятельной работы студентов : текстовое учебное электронное сетевое издание / М-во образования и науки РФ, Костром. гос. ун-т, Каф. общей и теоретической физики. - Электрон. текст. данные. - Кострома : КГУ, 2018. - 20 с. - Библиогр.: с. 16. - Б. ц.

2. Электролитно-плазменная модификация металлов : учебник / П.Н. Белкин, С.Ю. Шадрин, С.А. Кусманов, И.Г. Дьяков ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Костромской государственной университет имени Н. А. Некрасова. - Кострома : КГУ им. Н. А. Некрасова, 2014. - 308 с. : ил., табл., схем. - Библиогр. в кн.. - ISBN 978-5-7591-1475-8 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=275634> (31.08.2018)..

3. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и



сплавов : в 2-х т. / П.Н. Белкин, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин и др. - Москва : РИЦ "Техносфера", 2011. - Т. 1. - 464 с. - (Мир материалов и технологий). - ISBN 978-5-94836-267-0 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=88982> (21.06.2018).

**б) дополнительная:**

1. Цветков Ф. Ф. Тепломассообмен: Учебное пособие для вузов. – М.: Издательство МЭИ, 2006. – 550 с. ил. (30 экз)
2. Белкин П. Н., Шадрин С.Ю. Теплофизика: Сборник задач. – Кострома: ГОУ ВПО КГУ им. Н. А. Некрасова, 2013. – 51 с. (13 экз)
3. Shadrin S.Yu., Belkin P.N. Analysis of models for calculation of temperature of anode plasma electrolytic heating // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2012. – v. 55. – pp. 179-186.
4. I.G.D'yakov, V.S.Belkin, S.Yu.Shadrin, P.N. Belkin. Peculiarities of Heat Transfer at Anodic Plasma Electrolytic Treatment of Cylindrical Pieces, Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2014, Vol. 50, No 4, pp. 346–355.
5. A.V. Zhirov, P.N. Belkin, S.Yu. Shadrin Heat transfer in the anode region in plasma-electrolytic heating of a cylindrical sample // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – Vol. 90, №. 4. – 2017 – pp. 862–872.
6. S.Yu. Shadrin, A.V. Zhirov, P.N. Belkin Thermal features of plasma electrolytic heating of titanium // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – Vol. 107. – pp. 1104-1109.
7. S. Yu. Shadrin, P. N. Belkin, I. V. Tambovskiy, S. A. Kusmanov. Physical Features of Anodic Plasma Electrolytic Carburising of Low-Carbon Steels // Plasma Chemistry and Plasma Processing. – 2020. – Vol. 40, No. 2. – pp. 549–570.

## **8. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины**

Информационно-образовательные ресурсы:

1. Thermalinfo.ru – сайт справочной информации по теплофизическим свойствам веществ в зависимости от температуры и давления
  2. <http://diss.rsl.ru>
- Электронные библиотечные системы:
1. Университетская библиотека онлайн <http://biblioclub.ru>
  2. «Лань» <http://e.lanbook.com/>
  3. ЭБС «Znanium»

## **9. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

**Аудитория для лекций:**

Лекционные занятия проводятся в аудиториях с требуемым числом посадочных мест, оборудованные мультимедиа (например, корпус Е, № 226, количество посадочных мест – 60, мультимедийный комплекс, включающий экран, компьютер и проектор)

**Аудитории для практических занятий:**

Компьютерный класс, корпус "Е", ауд.227, количество посадочных мест – 16, Блок системный КМ Office ТЗ-4170, монитор Philips.

Лицензионное ПО: Windows 8.1 Pro договор № 50155/ЯР4393 от 12.12.2014 с ООО Софт-лайн Проекты, MathCAD Education договор № 208/13 от 10.06.2013 с ООО ЮнитАльфаСофт.

Свободно распространяемое программное обеспечение:

**Аудитории для самостоятельной работы:**

Читальный зал корпуса «Е», количество посадочных мест – 22, 9 компьютеров (6 для читателей, 3 для сотрудников); 1 сканер.

Читальный зал корпуса «Б1», количество посадочных мест – 200. 3 компьютера для сотрудников; 1 принтер; 1 копир/принтер; 1 проектор; 2 экрана для проектора; 1 ворота «Антивор»; 1 WIFI-точка доступа. Лицензионное ПО: АИБС МаркSQL.

Компьютерный класс, корпус "Е", ауд.227, количество посадочных мест – 16, Блок системный КМ Office ТЗ-4170, монитор Philips. Лицензионное ПО: Windows 8.1 Pro договор № 50155/ЯР4393 от 12.12.2014 с ООО Софт-лайн Проекты, MathCAD Education договор № 208/13 от 10.06.2013 с ООО ЮнитАльфаСофт.