

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физический факультет



УТВЕРЖДАЮ:
Декан физического факультета

С.Н. Филимонов

«15» апреля 2021 г.

Рабочая программа дисциплины

Термодинамика фазовых равновесий

по направлению подготовки

03.03.02 Физика

Направленность (профиль) подготовки:
«Фундаментальная физика»

Форма обучения
Очная

Квалификация
Бакалавр

Год приема
2021

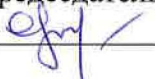
Код дисциплины в учебном плане Б1.В.ДВ.01.07.02

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОП

 О.Н. Чайковская

Председатель УМК

 О.М. Сюсина

Томск – 2021

1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины (модуля)

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ОПК-2 – Способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные;

ПК-1 – Способен проводить научные исследования в выбранной области с использованием современных экспериментальных и теоретических методов, а также информационных технологий.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 2.1. Выбирает адекватные методы решения научно-исследовательских задач в выбранной области, планирует проведение научных исследований.

ИПК 1.1. Собирает и анализирует научно-техническую информацию по теме исследования, обобщает научные данные в соответствии с задачами исследования.

2. Задачи освоения дисциплины

– Освоить аппарат термодинамики фазовых равновесий и представления о термодинамических системах и диаграммах состояния металлических систем.

– Научиться применять представления о термодинамическом равновесии при решении практических и теоретических задач профессиональной деятельности.

3. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, входит в модуль по выбору "Физика металлов".

4. Семестр(ы) освоения и форма(ы) промежуточной аттестации по дисциплине

Семестр 5, зачет.

Семестр 6, экзамен.

5. Входные требования для освоения дисциплины

Для успешного освоения дисциплины требуются компетенции, сформированные в ходе освоения образовательных программ предшествующего уровня образования.

Для изучения и понимания материала данной дисциплины обучающийся должен владеть основными представлениями и понятиями из курсов: Математический анализ; Дифференциальные уравнения; Общий курс физики.

6. Язык реализации

Русский

7. Объем дисциплины (модуля)

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 з.е., 144 часа, из которых:

– лекции: 32 ч.;

– практические занятия: 32 ч.;

– в том числе практическая подготовка: 32 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

8. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам

Тема 1. Введение в термодинамику фазовых равновесий.

Современное использование термодинамических данных. Термодинамическое моделирование. Программный пакет ThermoCalc. Положения о равновесии. Классификация равновесных состояний. Система и среда. Нулевое начало. Температура. Тепловое равновесие. Механическое равновесие.

Тема 2. Начала термодинамики.

Первое начало. Теплота и работа. Внутренняя энергия. Второе начало. Обратимые и необратимые процессы. Равновесная энтропия. Произведенная энтропия при неравновесных процессах. Диссипация энергии. Третье начало. Основное термодинамическое равенство. Термодинамические потенциалы, их первые и вторые производные.

Тема 3. Равновесие фаз в однокомпонентной системе.

Условия термодинамического равновесия. Потенциал Максвелла-Гюи. Условия устойчивости термодинамического равновесия. Условия предельной устойчивости. Качественный вид термодинамических функций. Открытые системы. Вещественное равновесие. Химический потенциал. Большой термодинамический потенциал. Условие двухфазного равновесия.

Тема 4. Равновесие фаз в многокомпонентной системе.

Многокомпонентная открытая система. Химический потенциал компонента. Уравнение Гиббса-Дюгема. Двухкомпонентная система. Равновесие двух фаз в системе с нефиксированными экстенсивными параметрами. Диаграмма состояния Т-Р. Скрытая теплота и скрытая механическая работа превращения. Равновесие двух фаз в системе с фиксированными параметрами. Графическое изображение двухфазного равновесия. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Правило коноды. Изохорные и адиабатические переходы. Правило отрезков. Равновесие в системе жидкость-газ. Равновесие трех фаз в однокомпонентной системе.

Тема 5. Термодинамика растворов.

Графическое изображение состава многокомпонентных систем. Симплекс концентраций. Растворы, мольные парциальные функции. Формулы аддитивности. Обобщенное соотношение Гиббса-Дюгема. Функции смешения. Свойства атермических растворов и растворов с идеальной энтропией смешения. Идеальные растворы. Равновесие и устойчивость растворов. Равновесие двухфазной многокомпонентной системы. Энергия смешения раствора. Модель регулярных растворов.

Тема 6. Диаграммы состояния.

Диаграммы состояния металлических систем. Первичная кристаллизация сплавов. Твердый раствор. Химические соединения. Механические смеси. Правило фаз Гиббса. Диаграммы состояния двухкомпонентных сплавов. Эвтектика, перитектика. Связь между диаграммами состояния, структурой и свойствами сплавов. Понятие о диаграммах состояния трехкомпонентных сплавов. Диаграмма состояния железо-углерод.

Тема 7. Термодинамика растворов (продолжение).

Раствор идеальных газов. Парциальная внутренняя энергия. Парциальный объем и парциальное давление газов. Закон Амага. Закон Дальтона. Парциальная энтальпия. Энтропия смешения идеальных газов. Энергия Гиббса и химические потенциалы идеальных газов. Парадокс Гиббса. Формализм Льюиса. Фугитивность и активность компонентов раствора. Положительные и отрицательные растворы. Закон Рауля. Закон Рауля и Генри для предельно разбавленного раствора. Закон Генри. Интегрирование уравнения Гиббса-Дюгема. Анализ поведения двухкомпонентных регулярных растворов. Фазовое расслоение. Эмпирическое определение регулярных растворов. Графический

анализ экстремумов функции $\varphi_{см}(c)$. Диаграмма состояния Т-С (фазовое расслоение). Сравнение диаграмм состояния различного типа. Влияние энергии смешения на вид диаграмм состояния.

Тема 8. Термодинамика межфазных границ.

Общие сведения о теории поверхностей раздела. Свободная энергия поверхности. Влияние кристаллографической ориентации на поверхностное натяжение. Природа поверхностей раздела твердых тел и сегрегация примесей. Уравнение адсорбции. Поверхностная энергия металлов и соединений. Внутренние границы раздела фаз. Границы раздела зерен. Когерентные и некогерентные границы.

Тема 9. Фазовые превращения и термодинамика зарождения фаз.

Термодинамические стимулы фазовых превращений и классификация фазовых переходов. Термодинамика зарождения фаз. Термодинамика мартенситных превращений.

9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится с применением балльно-рейтинговой системы, включающей активность студента на семинарских занятиях, и фиксируется в форме баллов (нарастающим итогом): максимальное количество баллов - 50. Контрольная точка проводится не менее одного раза в семестр.

10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Зачет в пятом семестре проводится в письменной форме по билетам. Билет содержит два теоретических вопроса. Продолжительность зачета 1,5 часа.

Примерный перечень вопросов к зачету:

1. Система и среда. Общее начало термодинамики.
2. Механическая аналогия термодинамического равновесия.
3. Термодинамические параметры.
4. Обратимые и необратимые процессы.
5. Функции состояния. Нулевое начало термодинамики.
6. Теплота и работа.
7. Первое начало термодинамики.
8. Второе начало термодинамики для обратимых процессов. Энтропия.
9. Второе начало термодинамики для необратимых процессов. Принцип компенсации. Диссипация энергии.
10. Тепловой двигатель.
11. Третье начало термодинамики.
12. Основное термодинамическое равенство. Различные варианты записи основного термодинамического равенства.
13. Термодинамические потенциалы их свойства.
14. Дифференциалы термодинамических потенциалов.
15. Теплоемкость.
16. Первые производные от термодинамических потенциалов по характерным параметрам.
17. Вторые производные от термодинамических потенциалов. Характеристики вещества.
18. Свойства якобианов. Соотношения между c_p и c_v .
19. Условия термодинамического равновесия. Потенциал Максвелла-Гюи.
20. Условия устойчивости термодинамического равновесия.
21. Качественный вид термодинамических функций.
22. Однокомпонентная открытая система. Химический потенциал.
23. Многокомпонентная открытая система. Химический потенциал.

24. Уравнение Гиббса-Дюгема, пример двухкомпонентной системы.
25. Равновесие двух фаз в системе с нефиксированными экстенсивными параметрами. Изменение экстенсивных параметров системы.
26. Диаграмма состояния Т-Р. Скрытая теплота превращения. Скрытая механическая работа превращения.
27. Условия механического равновесия фаз. Запрет на межфазный перенос вещества.
28. Равновесие двух фаз в системе с фиксированными параметрами. В изохорной системе. В адиабатической системе.
29. Двухфазное равновесие в замкнутой системе. Совместное рассмотрение механического и вещественного равновесия и их устойчивости в изохорно-изотермической системе.
30. Графическое изображение двухфазного равновесия. График Т-Р. Изобарное сечение трехмерного графика. Изотермическое сечение.
31. Уравнение Клаузиуса – Клапейрона.
32. Диаграммы состояния типа Р-V с областью двухфазности. Вариантность однофазного и двухфазного равновесия
33. Правило коноды для однокомпонентной системы. Изохорные и адиабатические переходы/
34. Правило отрезков.
35. Равновесие в системе жидкость газ. Двухфазное равновесие.
36. Графическое изображение состава многокомпонентной системы. Треугольник, тетраэдр, симплекс концентраций. Особые сечения.
37. Растворы. Мольные парциальные функции. Экстенсивные параметры раствора. Формулы аддитивности. Обобщенное соотношение Гиббса-Дюгема.
38. Функции смешения. Теплота смешения, энтропия смешения, Термодинамический стимул смешения. Идеальные растворы.
39. Равновесие раствора, устойчивость равновесия.
40. Энергия смешения раствора. Модель регулярных растворов.
41. Диаграммы состояния металлических систем. Индивидуальный вопрос.

Экзамен в третьем семестре проводится в письменной форме по билетам. Продолжительность экзамена 1,5 часа.

На промежуточную аттестацию (как зачет, так и экзамен) планируется не более 50 баллов.

Итоговая оценка по дисциплине складывается из суммы баллов, полученных по итогам текущего контроля за семестр и промежуточной аттестации.

Зачет выставляется при наличии не менее 50 баллов. При меньшем количестве баллов, выставляется «незачтено».

Результаты экзамена определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Экзаменационная оценка определяется исходя из результатов экзамена и текущей аттестации в течение семестра и согласуется с принятым соответствием с 5-ти балльной шкалой оценивания: 100-86 – «отлично»; 85-66 – «хорошо»; 65-50 – «удовлетворительно», менее 50 – «неудовлетворительно».

Экзаменационный билет включает 2 вопроса из списка контрольных вопросов по курсу (приведен в разделе 11), проверяющих сформированность компетенции ОПК-2 и ПК-1 в соответствии с индикаторами ИОПК 2.1. и ИПК 1.1. Ответы даются в развернутой форме.

Пример экзаменационного билета:

БИЛЕТ № 1

Вопрос 1. Фазовое расслоение двухкомпонентного регулярного твердого раствора. Условия диффузионной неустойчивости твердого раствора. Диаграмма состояния (Т-С).

Вопрос 2. Закон Рауля и Генри для предельно разбавленных растворов. Обобщение этих законов на случай неидеальной газовой фазы.

Дополнительные и/или уточняющие вопросы по основным темам и всему содержанию курса (разделы 8, 11), позволяющие оценить уровень освоения всей программы. Ответ на уровне формулировки основных определений и/или краткого изложения физики явления и соответствующих представлений.

Например:

Вопрос 1. Начала термодинамики (I, II, III).

Вопрос 2. Мольные парциальные функции.

Вопрос 3. Уравнение Гиббса-Дюгема.

Вопрос 4. Основные термодинамические равенства (записать и объяснить).

И т.д.

11. Учебно-методическое обеспечение

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» – <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=22018>

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

Перечень вопросов, выносимых на экзамен.

1. Фазовое расслоение двухкомпонентного регулярного твердого раствора. Условия диффузионной неустойчивости твердого раствора. Диаграмма состояния (Т-С).
2. Закон Рауля и Генри для предельно разбавленных растворов. Обобщение этих законов на случай неидеальной газовой фазы.
3. Анализ поведения двухкомпонентных регулярных твердых растворов. График $\varphi_{\text{смеш}}(c)$ и его особые точки.
4. Вторые производные от термодинамических потенциалов. Характеристики вещества.
5. Начала термодинамики (общее, I, II, III), обратимые и необратимые процессы, энтропия.
6. Диаграммы состояния металлических систем. Различные виды диаграмм. Эвтектика, перитектика, растворимость. Правило фаз Гиббса.
7. Графическое изображение двухфазного равновесия. Трехмерный график (φ -р-Т). Изобарное сечение (φ -Т). Изобара $S(T)$. Скачек теплоемкости $C_p(T)$. Метастабильные состояния. Изотермическое сечение $\varphi(p)$. Изотерма объема $V(P)$.
8. Формализм Льюиса. Фугитивности и активности компонентов раствора. Коэффициент активности.
9. Энергия Гиббса и химические потенциалы раствора идеальных газов.
10. Парадокс Гиббса и его решение, предложенное Гиббсом.
11. Теплоемкость (адиабатическая, изотермическая, изохорная, изобарная).
12. Энергия смешения двухкомпонентного раствора. Энергия смешения при полном конфигурационном беспорядке. Произвольное количество компонентов. Мольная парциальная энергия смешения раствора.
13. Правило коноды для однокомпонентной системы. Изохорные и адиабатические переходы. Конода на графике ($f-v$) и ($h-s$). Правило отрезков.
14. Сравнение диаграмм состояния различного типа.
15. Парциальный объем и парциальное давление газов. Закон Дальтона, Амаго. Парциальная энтальпия идеальных газов. Энтропия смешения идеальных газов.
16. Уравнение Гиббса-Дюгема, пример двухкомпонентной системы.
17. Регулярные растворы. Химическое взаимодействие и термодинамические свойства растворов.
18. Диаграмма состояния $T-P$. Скрытая теплота превращения. Скрытая механическая работа превращения.
19. Равновесие раствора, устойчивость равновесия.

20. Равновесие в системе жидкость газ. Двухфазное равновесие. Уравнение Ван-дер-Ваальса (критическая точка, изотермы). Диаграмма состояния P - v , бинадаль, спинодаль.
21. Однокомпонентная открытая система. Химический потенциал. Выражения для химического потенциала, полученные из термодинамических потенциалов: внутренней энергии, энтальпии, свободной энергии, энтропии, потенциала Гиббса.
22. Функции смешения. Теплота смешения, энтропия смешения, Термодинамический стимул смешения. Идеальные растворы.
23. Термодинамика поверхностей раздела. Поверхностное натяжение. Внутренние границы раздела фаз.
24. Растворы. Мольные парциальные функции. Экстенсивные параметры раствора. Формулы аддитивности. Обобщенное соотношение Гиббса-Дюгема.
25. Стандартное состояние. Эндотермические и экзотермические растворы. Энтропия смешения. Термодинамический стимул смешения. Конфигурационная энтропия.
26. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Диаграммы состояния типа p - v с областью двухфазности. Вариантность однофазного и двухфазного равновесия.
27. Термодинамические стимулы фазовых превращений. Классификация превращений. Термодинамика зарождения фаз. Термодинамика мартенситных превращений.
28. Термодинамические параметры (экстенсивные, интенсивные, удельные, интенсивные меры равновесия, транзитивность равновесия, внутренние и внешние параметры).
29. Графическое изображение состава многокомпонентной системы. Треугольник, тетраэдр, симплекс концентраций. Особые сечения.
30. Закон Рауля, выраженный в терминах формализма Льюиса.

в) План семинарских / практических занятий по дисциплине.

1. Равновесие фаз в однокомпонентной системе.
2. Равновесие фаз в многокомпонентной системе.
3. Термодинамика растворов-I.
4. Диаграммы состояния.
5. Термодинамика растворов-II.
6. Термодинамическая теория твердого состояния.
7. Термодинамика межфазных границ.

г) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.

Самостоятельная работа студента включает:

- углубленное теоретическое изучение разделов курса при подготовке к лекционным и практическим занятиям;
- подготовку к обсуждению материала, в том числе самостоятельный поиск необходимых источников информации, включая научно-образовательные ресурсы сети Интернет;
- подготовку к зачету;
- подготовку к экзамену.

12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) основная литература:

1. Квасников И. А. Термодинамика и статистическая физика: Теория равновесных систем: термодинамика. Т.1. Изд.3, перераб. / И. А. Квасников. – URSS. 2012. – 328 с.
2. Карапетьянц М. Х. Химическая термодинамика. Изд.4 / М. Х. Карапетьянц. – URSS. 2013. – 584 с.
3. Термодинамика : учебное пособие для вузов. В 2ч. : Ч.1. основной курс / В.П. Бурдаков, Б.В. Дзюбенко, С.Ю. Меснякин, Т.В. Михайлова. – 2-е изд., пересмотр. – М. : Дрофа, 2016. – 479, [1] с.: ил.

б) дополнительная литература:

1. Базаров И.П. Термодинамика. - М.: Высшая школа, 1991. - 376с.
2. Паскаль Ю.И. Термодинамика и кинетика фазовых превращений. -Томск: Изд-во ТГУ (ротапринт), 1977. - 200с.
3. Паскаль Ю.И. Термодинамический анализ диаграмм состояния двухкомпонентных систем. - Томск: Изд-во ГУ (ротапринт), 1979. - 120с.
4. Паскаль Ю.И. Борисов С.С. Химический формализм в теории фазовых превращений. - Томск. Изд-во ТГУ (ротапринт), 1980. - 200 с.
5. Свелин Р.А. Термодинамика твердого состояния. - М.: Metallurgy, 1968. - 316с.
6. Бурдаков В.П. Термодинамика: учебное пособие для вузов. В 2ч./ В.П. Бурдаков, Б.В. Дзюбенко, С.Ю. Меснянкин, Т.В. Михайлова. – М.: Дрофа, 2009. Ч. 1. Основной курс. – 479 с.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика Том V. Статистическая физика. Часть I. - М.: 1976. - 584с.
8. Докторов А.Б, Бурштейн А.И. Термодинамика: Курс лекций / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2003. 82с.
9. Смирнов Е.А. Термодинамика фазовых превращений в металлах и сплавах. Учебное пособие. М.: МИФИ, 1998. - 84с.
10. Пригожин И., Дефей Р. Химическая термодинамика. - Новосибирск: Изд- во Новосиб. Ун-та, 1967. -360с.
11. Пригожин И. Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур: Пер. с англ. Ю.А. Данилова и В.В. Белого – М.: Мир, 2002. – 461 с., ил. – (Лучший зарубежный учебник).
12. Лоренц Г.А. Лекции по термодинамике. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001, 178 стр.
13. Жоровков М.Ф. Расчет диаграмм состояния бинарных систем в приближении регулярных растворов-Изд-во Томского ун-та, 2001.-71с.
14. Базаров И.П. Заблуждения и ошибки в термодинамике. Изд. 2-е испр. – М: Едиториал УРСС, 2003 – 120с.

в) ресурсы сети Интернет:

1. Издательство «Лань» [Электронный ресурс] : электрон.-библиотечная система. – Электрон. дан. – СПб., 2010- . – URL: <http://e.lanbook.com/>
2. Издательство «Юрайт» [Электронный ресурс] : электрон.-библиотечная система. – Электрон. дан. – М., 2013- . URL: <http://www.biblio-online.ru/>
3. Электронно-библиотечная система Znanium.com [Электронный ресурс] / Научно-издательский центр Инфра-М. – Электрон. дан. – М., 2012- . URL: <http://znanium.com/>
4. Электронно-библиотечная система Консультант студента [Электронный ресурс] / ООО «Политехресурс». - М, 2012- . – URL: <http://www.studentlibrary.ru/>
5. Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ [Электронный ресурс] . – Электрон. дан. – Томск, 2011-. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>
6. Электронный каталог [Электронный ресурс] / НИ ТГУ, Научная библиотека ТГУ. – Электрон. дан. – Томск, 2008-2016. – URL: <http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?theme=system>
7. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., 2000- . – URL: <http://elibrary.ru/defaultx.asp?>
8. КонсультантПлюс [Электронный ресурс]: справ. правовая система. – Электрон. дан. – М., 1992- . – Доступ из локальной сети Науч. б-ки Том. гос. ун-та.

9. Гарант [Электронный ресурс] : информ.-правовое обеспечение / НПП «Гарант-Сервис». – Электрон. дан. – М., 2016. – Доступ из локальной сети Науч. б-ки Том. гос. ун-та.
10. ScienceDirect [Electronic resource] / Elsevier B.V. – Electronic data. – Amsterdam, Netherlands, 2016. – URL: <http://www.sciencedirect.com/>
11. SpringerLink [Electronic resource] / Springer International Publishing AG, Part of Springer Science+Business Media. – Electronic data. – Cham, Switzerland, [s. n.]. – URL: <http://link.springer.com/>
12. ProQuest Ebook Central [Electronic resource] / ProQuest LLC. – Electronic data. – Ann Arbor, MI, USA, [s. n.]. – URL: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tomskuniv-ebooks/home.action>

13. Перечень информационных технологий

- а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:
- Microsoft Office Standart 2013 Russian: пакет программ. Включает приложения: MS Office Word, MS Office Excel, MS Office PowerPoint, MS Office OneNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook); системы компьютерной вёрстки LaTeX; системы компьютерной алгебры Wolfram Mathematica, Waterloo Maple;
 - публично доступные облачные технологии (GoogleDocs, Яндекс диск и т.п.).

б) информационные справочные системы:

- Электронный каталог Научной библиотеки ТГУ – <http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>
- Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ – <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>
- ЭБС Лань – <http://e.lanbook.com/>
- ЭБС Консультант студента – <http://www.studentlibrary.ru/>
- Образовательная платформа Юрайт – <https://urait.ru/>
- ЭБС ZNANIUM.com – <https://znanium.com/>
- ЭБС IPRbooks – <http://www.iprbookshop.ru/>

14. Материально-техническое обеспечение

Аудитории для проведения занятий лекционного типа.

Аудитории для проведения занятий семинарского типа, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.

Аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации в смешанном формате, оснащенные системой «Актру».

Все виды материально-информационной базы Научной библиотеки ТГУ.

Мультимедийное оборудование физического факультета ТГУ.

Программное обеспечение курсов, предшествующих изучению представленной дисциплины.

15. Информация о разработчиках

Литовченко Игорь Юрьевич, доктор физико-математических наук, доцент, кафедра физики металлов физического факультета ТГУ, профессор.