

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе и
образовательным инновациям
О.Н. Здрок
2020 г.
Регистрационный № УД- 8427 / уч.



**ТЕПЛО-МАССОПЕРЕНОС
В ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ**

**Учебная программа учреждения высшего образования
по учебной дисциплине для специальности:**

1-31 04 06 Ядерные физика и технологии

Минск 2020

Учебная программа составлена на основе образовательного стандарта специальности 1-31 04 06 Ядерные физика и технологии ОСВО 1-31 04 0 6 – 2013 от 30.08.2013 № 88 и учебного плана № G31-229/уч. от 20.03.2019.

СОСТАВИТЕЛЬ:

О.В. Семенович – старший преподаватель кафедры ядерной физики физического факультета Белорусского государственного университета.

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

П.С. Гринчук, заведующий отделением теплофизики Государственного научного учреждения «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси», член-корреспондент НАН Беларуси, доктор физико-математических наук.

Н.И. Стетюкевич, старший научный сотрудник лаборатории радиационно-конвективного теплообмена Государственного научного учреждения «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси», кандидат технических наук.

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой ядерной физики физического факультета Белорусского государственного университета
(протокол № 11 от 21 мая 2020 г.);

Научно-методическим Советом БГУ
(протокол № 5 от 17 июня 2020 г.).

Заведующий кафедрой ядерной физики
к. ф.-м. н., доцент



А.И. Тимошенко

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Цели и задачи учебной дисциплины

Цель учебной дисциплины – усвоение студентами основных понятий, положений и концепций в области теории тепломассообмена и, в частности, тепломассопереноса в ядерных энергетических установках (ЯЭУ) у студентов – будущих инженеров-физиков, специализирующегося в области ядерной физики и технологий (в том числе – ядерной энергетики).

Задачи учебной дисциплины:

- ознакомить обучающихся с предметом дисциплины «Тепломассоперенос в ядерно-энергетических установках»;
- сформировать основные понятий, положения и концепции в области теории тепломассообмена и, в частности, тепломассопереноса в ЯЭУ у студентов – будущих инженеров-физиков, специализирующегося в области ядерной физики и технологий (в том числе – ядерной энергетики);
- сформировать понятия о методах исследования и моделирования названных явлений;
- способствовать развитию научного мировоззрения обучающихся.

Место учебной дисциплины в системе подготовки специалиста с высшим образованием.

Учебная дисциплина «Тепло-массоперенос в ядерно-энергетических установках», относится **к циклу** специальных дисциплин государственного компонента, разработана для специальности 1-31 04 06 Ядерные физика и технологии первой ступени высшего образования.

Связи с другими учебными дисциплинами, включая учебные дисциплины компонента учреждения высшего образования, дисциплины специализации и др.

Дисциплина позволяет сформировать широкий кругозор в вопросах теплофизики ядерных энергетических установок.

Учебный материал дисциплины основан на базовых знаниях и представлениях, заложенных в дисциплинах «Математический анализ», «Теория вероятности и математическая статистика», «Основы векторного и тензорного анализа», «Дифференциальные и интегральные уравнения», «Методы математической физики», «Механика», «Молекулярная физика», «Оптика», «Физика ядра и элементарных частиц», «Теоретическая механика».

Учебный материал дисциплины будет использован при преподавании следующих специальных дисциплин: «Ядерные энергетические установки», «Атомные электрические станции», «Теплотехническое оборудование АЭС», «Оборудование АЭС», «Режимы работы и эксплуатации АЭС», «Ядерная безопасность», а также дисциплин специализации «Термогидродинамика переходных и аварийных режимов реакторных установок», «Математическое моделирование физических процессов в реакторных установках», «Техническая термодинамика ядерных энергетических установок».

Из множества эффективных педагогических методик и технологий, которые способствуют вовлечению обучающихся в поиск и управление знаниями, приобретению опыта самостоятельного решения разнообразных задач, следует выделить:

- технологии проблемно-модульного обучения;
- технологии научно-исследовательской деятельности;
- проблемно-ориентированный междисциплинарный подход;
- интенсивное обучение;
- моделирование проблемных ситуаций и их решение.

Для формирования современных социально-личностных и профессиональных компетенций выпускника вуза в практику проведения занятий целесообразно внедрять методики активного обучения и дискуссионные формы.

В результате изучения дисциплины обучающийся должен:

знать:

- теоретические основы тепломассопереноса;
- особенности гидродинамики и теплообмена в ядерных реакторах;
- процессы тепломассопереноса в ядерных энергетических установках при различных режимах работы.

уметь:

- решать задачи теплопроводности, задачи конвективного теплообмена;
- формулировать задачи тепломассопереноса в оборудовании ядерных энергетических установок.

владеть:

- методами измерения температурных полей, теплофизических свойств конструкционных материалов и теплоносителей;
- основами современных методов расчёта и моделирования термогидродинамических процессов в реакторной установке, реакторе (активной зоне), тепловыделяющей сборке, тепловыделяющем элементе.

Требования к компетенциям

Освоение учебной дисциплины «Тепло-массоперенос в ядерно-энергетических установках» должно обеспечить формирование следующих академических, социально-личностных и профессиональных компетенций.

Академические компетенции:

- АК-1. Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач.
- АК-2. Владеть системным и сравнительным анализом.
- АК-3. Владеть исследовательскими навыками.
- АК-4. Уметь работать самостоятельно.
- АК-5. Быть способным вырабатывать новые идеи (креативность).
- АК-6. Владеть междисциплинарным подходом при решении проблем.
- АК-7. Иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой с компьютером.

АК-8. Иметь лингвистические навыки (устная и письменная коммуникация).

АК-9. Уметь учиться, повышать свою квалификацию в течение всей жизни.

Социально-личностные компетенции:

СЛК-1. Обладать качествами гражданственности.

СЛК-2. Быть способным к социальному взаимодействию.

СЛК-3. Обладать способностью к межличностным коммуникациям.

СЛК-5. Быть способным к критике и самокритике (критическое мышление).

СЛК-6. Уметь работать в команде.

Профессиональные компетенции:

ПК-1. Применять знания теоретических и экспериментальных основ ядерной физики и ядерных технологий, ядерно-физических методов исследования, методов измерения физических величин, методов автоматизации эксперимента, методов планирования, организации и ведения научно-производственной, научно-педагогической, производственно-технической, опытно-конструкторской работы в области ядерно-физических технологий и атомной энергетики.

ПК-2. Осуществлять на основе методов математического моделирования оценку производственных процессов.

ПК-3. Пользоваться компьютерными методами сбора, хранения и обработки информации, системами автоматизированного программирования, научно-технической и патентной литературой.

ПК-4. Взаимодействовать со специалистами смежных профилей.

ПК-5. Применять полученные знания фундаментальных положений физики, экспериментальных, теоретических и компьютерных методов исследования, планирования, организации и ведения научно-технической работы.

ПК-6. Использовать новейшие открытия в естествознании, методы научного анализа, информационные образовательные технологии, физические основы современных технологий, оборудование и аппаратуру в исследовательской, научно-педагогической и производственной деятельности.

ПК-7. Разрабатывать и оптимизировать ядерно-физические технологии в энергетике и промышленности.

ПК-9. Пользоваться глобальными информационными ресурсами.

ПК-10. Пользоваться государственными языками Республики Беларусь и иными иностранными языками как средством делового общения.

ПК-12. Осуществлять поиск, систематизацию и анализ информации по перспективным направлениям развития отрасли, инновационным технологиям, проектам и решениям.

Структура учебной дисциплины

Дисциплина изучается в 8 семестре. Форма получения высшего образования – очная, дневная.

Всего на изучение учебной дисциплины «Тепло-массоперенос в ядерно-энергетических установках» отведено: 92 часа, в том числе 56 аудиторных часов, из них: лекции – 32 часа, лабораторные работы – 20 часов; управляемая самостоятельная работа – 4 часа.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 2,5 зачетные единицы.

Форма текущей аттестации по учебной дисциплине – зачёт.

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

Тема 1. Основные положения теории тепломассообмена.

1.1 Основные понятия термомеханики сплошных сред: сплошная среда; тело; движение; материальные координаты; деформация; силы – внешние, взаимные, контактные; принцип напряжений. Теорема переноса; теорема переноса для области, содержащей сингулярную поверхность.

1.2. Законы сохранения массы, импульса и энергии в интегральной форме. Дифференциальная форма законов сохранения массы, импульса и энергии. Критерии подобия; критерияльные числа (числа подобия). Критерий Кнудсена.

Тема 2. Теплопроводность (стационарные и нестационарные процессы).

2.1. Механизмы теплопроводности в газах, жидкостях, твёрдых телах. Уравнение теплопроводности. Коэффициент температуропроводности, коэффициент теплоёмкости, коэффициент теплопроводности, термическое сопротивление, тепловой поток. Теплопроводность тел с внутренними источниками тепла. Критерии Био, Фурье.

2.2. Критический диаметр тепловой изоляции. Поле температур в полубесконечном массиве. Поля температур в телах простой формы. Перенос тепла в конструкциях с оребрёнными поверхностями. Циклические изменения температуры.

2.3. Регулярный режим теплообмена. Процессы теплопроводности при плавлении и затвердевании. Контактный теплообмен.

Тема 3. Теплофизические свойства топливных элементов, теплоносителей и конструкционных материалов реакторных установок. Методы определения теплофизических характеристик. Датчики температуры.

3.1. Требования, предъявляемые к теплофизическим свойствам теплоносителей, конструкционных элементов. Теплофизические характеристики ядерного топлива, теплоносителей, материалов конструкционных элементов.

3.2. Методы определения теплофизических характеристик: определение коэффициентов теплопроводности материалов абсолютным методом; определение теплофизических характеристик в регулярном режиме при граничных условиях 1-го и 2-го рода.

3.3. Определение коэффициентов теплопроводности и температуропроводности методом источника постоянной тепловой мощности.

3.4. Определение теплофизических характеристик материалов в регулярном режиме при граничных условиях 1-го и 4-го рода и исследование зависимости коэффициента температуропроводности от температуры.

3.5. Изучение эффекта Зеебека и градуировка термопар; градуировка металлических термометров сопротивления.

3.6. Градуировка полупроводниковых термометров сопротивления (термисторов).

Тема 4. Конвективный теплообмен в однофазных потоках.

4.1. Конвекция – механизм тепло и массообмена. Свободная и вынужденная конвекция. Основные уравнения конвективного тепло- и массообмена. Сжимаемые и несжимаемые, вязкие и невязкие течения. Коэффициенты динамической и кинематической вязкости. Коэффициент теплоотдачи. Критерии Архимеда, Галлилея, Грасгофа, Маха, Прандтля, Рейнольдса, Стантона, Фруда, Эйлера.

4.2. Ламинарный и турбулентный режимы течения и теплообмена. Принципы математического описания турбулентных течений. Усреднение по Рейнольдсу, усреднение по Фавру. Усреднённые дифференциальные уравнения баланса массы, импульса, энергии. Современные представления о природе турбулентности и модели турбулентности.

Тема 5. Основные положения теории пограничного слоя.

5.1. Понятие пограничного слоя. Система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена в приближении пограничного слоя. Учёт тепла трения в расчётах теплообмена в ламинарном пограничном слое. Теплообмен в турбулентном пограничном слое. Конвективный массообмен в пограничном слое. Структура турбулентного пограничного слоя. Критерии Нуссельта, Пекле.

Тема 6. Диффузионный массообмен.

6.1. Диффузия: основные механизмы процесса и законы. Виды диффузии: концентрационная диффузия, термодиффузия, бародиффузия. Дифференциальные уравнения диффузионного теплообмена. Критерии подобия: Шмидта, Льюиса, Шервуда. Моделирование теплоотдачи диффузией.

Тема 7. Теплообмен излучением (радиационный теплообмен). Сложный теплообмен.

7.1. Основные понятия. Законы теплового излучения: Планка, смещения Вина, Стефана-Больцмана, Кирхгофа, Ламберта. Радиационные характеристики: радиационная температура, цветовая температура, яркостная температура, относительная излучательная способность, поглощающая способность, отражательная способность, прозрачность. Теплообмен излучением между телами: радиационный теплообмен между плоскими поверхностями, угловые коэффициенты теплообмена; радиационный теплообмен между телом и оболочкой; коэффициент теплообмена излучением. Теплообмен в поглощающих и излучающих средах. Виды сложного теплообмена.

Тема 8. Конденсация. Кипение.

8.1. Механизмы процесса конденсации. Капельная конденсация. Плёночная конденсация. Плёночная конденсация неподвижного и движущегося пара. Конденсация из парогазовой смеси. Конденсация при прямом контакте фаз. Интенсификация теплообмена при конденсации. Механизмы процесса кипения. Кипение в большом объёме, кипение в каналах. Кризис теплообмена при кипении в большом объёме. Теплообмен при плёночном кипении.

Тема 9. Гидродинамика и теплообмен двухфазных потоков.

9.1. Определения двухфазных потоков: эмульсии, суспензии, гомогенные и гетерогенные потоки, термодинамически равновесные и термодинамически неравновесные потоки. Характеристики двухфазных потоков: объёмное расходное паросодержание, массовое расходное паросодержание, истинное объёмное паросодержание, приведённая скорость, коэффициент скольжения, скорость скольжения, скорость циркуляции. Режимы течения, зоны теплообмена. Кипение недогретой жидкости. Кипение парожидкостной смеси. Теплообмен в закризисной зоне парожидкостного потока.

Тема 10. Тепломассообмен при течении в каналах и пучках труб (стержней).

10.1. Тепломассообмен в круглых трубах при турбулентном режиме течения. Теплообмен и сопротивление в кольцевых каналах и прямоугольных трубах. Теплообмен в круглых трубах при турбулентном режиме течения с постоянными свойствами. Теплообмен в круглых трубах при турбулентном режиме течения с переменными свойствами. Гидродинамика и теплообмен при турбулентном течении жидкости в каналах некруглого сечения. Гидродинамика и теплообмен при продольном обтекании пучков труб (стержней). Тепломассообмен в парогенерирующих каналах. Кризис теплообмена. Методы интенсификации теплообмена.

Тема 11. Процессы гидродинамики и теплообмена в ядерных реакторах при различных режимах работы.

11.1. Тепловыделение в ядерных реакторах: источники энергии, распределение энерговыделения в реакторе, распределение температуры в канале с тепловыделением, тепловыделение в конструктивных элементах реактора. Особенности теплообмена в ядерных реакторах. Энерговыделение в активной зоне. Изменение температуры при переходных процессах. Тепловые удары и периодические колебания температуры. Тепломассоперенос в контурах.

Тема 12. Особенности процессов гидродинамики и теплообмена в активных зонах реакторов.

12.1. Основные соотношения между теплогидравлическими параметрами, характеризующими активную зону (а.з.). Специфика процессов гидродинамики и теплообмена в стержневых тепловыделяющих сборках (ТВС). Поля скоростей и температур в продольном пучке стержней. Распределение расходов теплоносителя и потери давления. Влияние поперечных перетечек на распределение параметров теплоносителя; межканальное перемешивание. Современные методы моделирования термогидродинамических процессов в стержневых ТВС. Теплообмен в а.з., охлаждаемой двухфазным теплоносителем; запас мощности до кризиса. Процессы теплообмена в тепловыделяющих элементах. Теплопередача в зазоре между топливным сердечником и оболочкой ТВЭЛ. Распределения температур в стержневом ТВЭЛ. Расчёт температурных полей в стержневом ТВЭЛ.

Тема 13. Процессы гидродинамики и теплообмена в парогенераторах.

13.1. Классификация теплообменных аппаратов: по способу передачи тепла, по назначению, по типу теплоносителя, по направлению потоков, по конфигурации поверхности, по компоновке. Общие положения теплового расчёта теплообменников. Учёт теплогидравлических неравномерностей. Принципы теплового расчёта парогенераторов.

Тема 14. Тепломассообмен в ЯЭУ при аварийных ситуациях.

14.1. Аварии с потерей теплоносителя: общая характеристика, аварии типа «малая течь», аварии типа «большая течь». Реактивностные аварии. Проектные аварии, запроектные аварии. Тяжёлые аварии. Пароциркониевая реакция. Взаимодействие расплава топлива с теплоносителем; паровой взрыв. Процессы тепломассообмена в расплавленном кориуме. Охлаждение расплавленного кориума и корпуса реактора. Тепломассоперенос паровоздушной капельной среды в герметичной оболочке.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Дневная форма получения образования

Номер раздела, темы, занятия	Название раздела, темы, занятия; перечень изучаемых вопросов	Количество аудиторных часов					Литература	Формы контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Количество часов УСР		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Основные положения теории тепломассообмена	4						
1.1	Основные понятия термомеханики сплошных сред: сплошная среда; тело; движение; материальные координаты; деформация; силы – внешние, взаимные, контактные; принцип напряжений. Теорема переноса; теорема переноса для области, содержащей сингулярную поверхность.	2					[1д], [5д], [12д–16д]	выборочный контроль
1.2	Законы сохранения массы, импульса и энергии в интегральной форме. Дифференциальная форма законов сохранения массы, импульса и энергии. Критерии подобия; критериальные числа (числа подобия). Критерий Кнудсена.	2					[1д], [5д], [12д–16д]	выборочный контроль
2	Теплопроводность (стационарные и нестационарные процессы)	6						
2.1	Механизмы теплопроводности в газах, жидкостях, твёрдых телах. Уравнение теплопроводности. Коэффициент температуропроводности, коэффициент теплоёмкости, коэффициент теплопроводности, термическое сопротивление, тепловой поток. Теплопроводность тел с внутренними источниками тепла. Критерии Био, Фурье.	2					[1, 4, 5], [1д], [5д]	выборочный контроль

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2.2	Критический диаметр тепловой изоляции. Поле температур в полубесконечном массиве. Поля температур в телах простой формы. Перенос тепла в конструкциях с оребренными поверхностями. Циклические изменения температуры.	2					[1, 4, 5], [1д], [5д]	выборочный контроль
2.3	Регулярный режим теплообмена. Процессы теплопроводности при плавлении и затвердевании. Контактный теплообмен.	2					[1, 4, 5], [1д], [5д]	выборочный контроль
3	Теплофизические свойства топливных элементов, теплоносителей и конструкционных материалов реакторных установок. Методы определения теплофизических характеристик. Датчики температуры	2			20			
3.1	Требования, предъявляемые к теплофизическим свойствам теплоносителей, конструкционных элементов. Теплофизические характеристики ядерного топлива, теплоносителей, материалов конструкционных элементов.	2					[5], [5д], [8д], [9д], [14д]	выборочный контроль
3.2	Определение коэффициентов теплопроводности материалов абсолютным методом; определение теплофизических характеристик в регулярном режиме при граничных условиях 1-го и 2-го рода.				4		[4, 5], [14д]	защита лабораторной работы
3.3	Определение коэффициентов теплопроводности и температуропроводности методом источника постоянной тепловой мощности.				4		[4, 5], [14д]	защита лабораторной работы
3.4	Определение теплофизических характеристик материалов в регулярном режиме при граничных условиях 1-го и 4-го рода и исследование зависимости коэффициента температуропроводности от температуры.				4		[4, 5], [14д]	защита лабораторной работы
3.5	Изучение эффекта Зеебека и градуировка термопар.				4		[4, 5], [14д]	защита лабораторной работы
3.6	Градуировка металлических термометров сопротивления, градуировка полупроводниковых термометров сопротивления (термисторов).				4		[4, 5], [14д]	защита лабораторной работы

1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	Конвективный теплообмен в однофазных потоках	4						
4.1	Конвекция – механизм тепло и массообмена. Свободная и вынужденная конвекция. Основные уравнения конвективного тепло- и массообмена. Сжимаемые и несжимаемые, вязкие и невязкие течения. Коэффициенты динамической и кинематической вязкости. Коэффициент теплоотдачи. Критерии Архимеда, Галлилея, Грасгофа, Маха, Пекле, Прандтля, Рейнольдса, Стантона, Фруда, Эйлера, Нуссельта.	2					[1, 4–6], [9д]	выборочный контроль
4.2.	Ламинарный и турбулентный режимы течения и теплообмена. Принципы математического описания турбулентных течений. Усреднение по Рейнольдсу, усреднение по Фавру. Усреднённые дифференциальные уравнения баланса массы, импульса, энергии. Современные представления о природе турбулентности и модели турбулентности.	2					[7], [6д], [7д], [8д], [9д]	выборочный контроль
5	Основные положения теории пограничного слоя	2						
5.1	Понятие пограничного слоя. Система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена в приближении пограничного слоя. Учёт тепла трения в расчётах теплообмена в ламинарном пограничном слое. Теплообмен в турбулентном пограничном слое. Конвективный массообмен в пограничном слое. Структура турбулентного пограничного слоя. Критерии Нуссельта, Пекле.	2					[1, 9], [8д], [9д], [11д]	выборочный контроль
6	Диффузионный массообмен	1						
6.1	Диффузия: основные механизмы процесса и законы. Виды диффузии: концентрационная диффузия, термодиффузия, бародиффузия. Дифференциальные уравнения диффузионного теплообмена. Критерии подобия: Шмидта, Льюиса, Шервуда. Моделирования теплоотдачи диффузией.	1					[9], [3д], [5д]	выборочный контроль

1	2	3	4	5	6	7	8	9
7	Теплообмен излучением (радиационный теплообмен). Сложный теплообмен	1				2		
7.1	Основные понятия. Законы теплового излучения: Планка, смещения Вина, Стефана-Больцмана, Кирхгофа, Ламберта. Радиационные характеристики: радиационная температура, цветовая температура, яркостная температура, относительная излучательная способность, поглощающая способность, отражательная способность, прозрачность. Теплообмен излучением между телами: радиационный теплообмен между плоскими поверхностями, угловые коэффициенты теплообмена; радиационный теплообмен между телом и оболочкой; коэффициент теплообмена излучением. Теплообмен в поглощающих и излучающих средах. Виды сложного теплообмена.	1					[9], [10], [12д]	выборочный контроль
	Контрольная работа по темам №№ 1–7.					2		Контрольная работа № 1
8	Конденсация. Кипение	2						
8.1	Механизмы процесса конденсации. Капельная конденсация. Плёночная конденсация. Плёночная конденсация неподвижного и движущегося пара. Конденсация из парогазовой смеси. Конденсация при прямом контакте фаз. Интенсификация теплообмена при конденсации. Механизмы процесса кипения. Кипение в большом объёме, кипение в каналах. Кризис теплообмена при кипении в большом объёме. Теплообмен при плёночном кипении.	2					[9], [10], [12д]	выборочный контроль

1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	Гидродинамика и теплообмен двухфазных потоков	2						
9.1	Определения двухфазных потоков: эмульсии, суспензии, гомогенные и гетерогенные потоки, термодинамически равновесные и термодинамически неравновесные потоки. Характеристики двухфазных потоков: объёмное расходное паросодержание, массовое расходное паросодержание, истинное объёмное паросодержание, приведённая скорость, коэффициент скольжения, скорость скольжения, скорость циркуляции. Режимы течения, зоны теплообмена. Кипение недогретой жидкости. Кипение парожидкостной смеси. Теплообмен в закризисной зоне парожидкостного потока.	2					[9], [10], [16], [12д]	выборочный контроль
10	Тепломассообмен при течении в каналах и пучках труб (стержней)	2						
10.1	Тепломассообмен в круглых трубах при турбулентном режиме течения. Теплообмен и сопротивление в кольцевых каналах и прямоугольных трубах. Теплообмен в круглых трубах при турбулентном режиме течения с постоянными свойствами. Теплообмен в круглых трубах при турбулентном режиме течения с переменными свойствами. Гидродинамика и теплообмен при турбулентном течении жидкости в каналах некруглого сечения. Гидродинамика и теплообмен при продольном обтекании пучков труб (стержней). Тепломассообмен в парогенерирующих каналах. Кризис теплообмена. Методы интенсификации теплообмена.	2					[9], [10], [12д]	выборочный контроль

1	2	3	4	5	6	7	8	9
11	Процессы гидродинамики и теплообмена в ядерных реакторах при различных режимах работы	2						
11.1	Тепловыделение в ядерных реакторах: источники энергии, распределение энерговыделения в реакторе, распределение температуры в канале с тепловыделением, тепловыделение в конструктивных элементах реактора. Особенности теплообмена в ядерных реакторах. Энерговыделение в активной зоне. Изменение температуры при переходных процессах. Тепловые удары и периодические колебания температуры. Тепломассоперенос в контурах.	2					[9], [11д], [17д]	выборочный контроль
12	Особенности процессов гидродинамики и теплообмена в активных зонах реакторов	2						
12.1	Основные соотношения между теплогидравлическими параметрами, характеризующими активную зону (а.з). Специфика процессов гидродинамики и теплообмена в стержневых тепловыделяющих сборках (ТВС). Поля скоростей и температур в продольном пучке стержней. Распределение расходов теплоносителя и потери давления. Влияние поперечных перетечек на распределение параметров теплоносителя; межканальное перемешивание. Современные методы моделирования термогидродинамических процессов в стержневых ТВС. Теплообмен в а.з, охлаждаемой двухфазным теплоносителем; запас мощности до кризиса. Процессы теплообмена в тепловыделяющих элементах. Теплопередача в зазоре между топливным сердечником и оболочкой ТВЭЛ. Распределения температур в стержневом ТВЭЛ. Расчёт температурных полей в стержневом ТВЭЛ.	2					[9], [11д], [17д]	выборочный контроль

1	2	3	4	5	6	7	8	9
13	Процессы гидродинамики и теплообмена в парогенераторах	1				2		
13.1	Классификация теплообменных аппаратов: по способу передачи тепла, по назначению, по типу теплоносителя, по направлению потоков, по конфигурации поверхности, по компоновке. Общие положения теплового расчёта теплообменников. Учёт теплогидравлических неравномерностей. Принципы теплового расчёта парогенераторов.	1					[9], [11д], [17д]	выборочный контроль
	Контрольная работа по темам №№ 8–13.					2		Контрольная работа № 2
14	Тепломассообмен в ЯЭУ при аварийных ситуациях	1						
14.1	Аварии с потерей теплоносителя: общая характеристика, аварии типа «малая течь», аварии типа «большая течь». Реактивностные аварии. Проектные аварии, запроектные аварии. Тяжёлые аварии. Пароциркониевая реакция. Взаимодействие расплава топлива с теплоносителем; паровой взрыв. Процессы тепломассообмена в расплавленном корииуме. Охлаждение расплавленного корииума и корпуса реактора. Тепломассоперенос паровоздушной капельной среды в герметичной оболочке.	1					[9], [15], [11д], [17д]	выборочный контроль

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Перечень основной литературы

1. Слеттери, Дж. С. Теория переноса импульса, энергии и массы в сплошных средах / Дж. С. Слеттери. – М.: Энергия, 1978. – 448 с.
2. Семенович, О.В. Введение в теплофизику ядерных энергетических установок: пособие. В 2 ч. Ч.1. Основы теории тепломассопереноса / О.В. Семенович. – Минск: БГУ, 2016. – 135 с. Ч.2. Тепломассоперенос в оборудовании реакторных установок / О.В. Семенович. – Минск: БГУ, 2017. – 191 с.
3. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Наука, 1968. – 600 с.
4. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – 2-е изд. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
5. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: учебник для вузов. – 3-е изд. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
6. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – 5-е изд., перераб. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1978. – 736 с.
7. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.
8. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 2005. – 550 с.
9. Себиси, Т. Конвективный теплообмен. Физические основы и вычислительные методы / Т. Себиси, П. Брэдшоу. – М.: Мир, 1987. – 592 с.
10. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1974. – 712 с.
11. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.
12. Кириллов П.Л., Богословская Г.П. Теплообмен в ядерных энергетических установках: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 456 с.
13. Теплообмен в ядерных энергетических установках: учебное пособие для вузов / Б.С. Петухов [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 548 с.
14. Кириллов, П.Л. Тепломассообмен в ядерных энергетических установках: Учебное пособие для вузов; 2-е изд., перераб. / П.Л. Кириллов, Г.П. Богословская. – М.: ИздАт, 2008. – 256 с.
15. Семенович, О.В. Термогидродинамика переходных и аварийных режимов реакторных установок: учеб. пособие / О.В. Семенович. – Минск: Вышэйшая школа, 2016. – 239 с.
16. Александров, А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: Справочник. Рек. Гос. службой стандартных справочных данных ГСССД Р-776-98/ А.А. Александров, Б.А. Григорьев. – М.: Издательство МЭИ, 1999. – 168 с.
17. Теплофизика. Неравновесные процессы тепломассопереноса / В.И. Байков [и др.]. – Минск, Вышэйшая школа, 2018. – 476 с.

Перечень дополнительной литературы

1. Handbuch der Physik. Band III/1. Prinzipien der klassischen Mechanik und Feldtheorie / Her. von S. Flugge. – Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag, 1960. – 902 p.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: учебное пособие. В. 10 т. Т. VI. Гидродинамика. – 3-е изд., перераб. – М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1986. – 736 с.
3. Седов Л.И. Механика сплошной среды: в 2 т. – М.: Наука, 1984. – Т. 1. – 415 с.
4. Лыков А.В. Теплообмен: (Справочник). – 2-е изд. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
5. Берд Р., Стюарт В., Лайтфут Е. Явления переноса. М.: Химия, 1974. – 688 с.
6. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. – М.: Высш. шк., 1973. – 296 с.
7. Седов П.И. Методы подобия и размерности с механике. – 9-е изд., перераб. – М.: Наука, Гл. ред. физ-мат. лит., 1981. – 448 с.
8. Иванов М.Г. Размерность и подобие. – Долгопрудный, 2013. – 68 с.
9. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.
10. Хинце И.О. Турбулентность. Ее механизмы и теория. – М.: Физматгиз, 1963. – 680 с.
11. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентности: учеб. пособие. – СПб: Балт. гос. техн. ун-т., 2001. – 108 с.
12. Кириллов, П.Л. Справочник по теплогидравлическим расчётам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы); 2-е изд., перераб. и доп. / П.Л. Кириллов, Ю.С. Юрьев, В.П. Бобков; Под общ. ред. П.Л. Кириллова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.
13. Кириллов, П.Л. Гидродинамические расчеты: Справочное учебное пособие / П.Л. Кириллов, Ю.С. Юрьев. – М.: ИздАт, 2009. – 216 с.
14. Семенович, О.В. Анализ субканальных моделей термогидродинамического расчёта стержневых ТВС: классификация и тенденции развития / О.В. Семенович. – Минск, 2009. – 36 с. – (Препринт / НАН Беларуси. Объединенный ин-т энергет. и ядер. исслед. – Сосны; ОИЭЯИ – Сосны-40).
15. Семенович, О.В. Сравнительный анализ современных теплогидравлических системных реалистических расчётных кодов / О.В. Семенович, А.В. Дойникова, В.А. Шапоров. – Минск, 2015. – 48 с. – (Препринт / НАН Беларуси. Объединенный ин-т энергет. и ядер. исслед. – Сосны; ОИЭЯИ-69).
16. Байков, В.И. Теплофизика. В 2 т. Т. 2. Термодинамика необратимых процессов, теория конвективного теплообмена, перенос энергии теплового излучения, процессы переноса и фазовые превращения в твердых телах /

В. И. Байков, Н. В. Павлюкевич, А. К. Федотов, А. И. Шнип. – Минск: Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2014. – 370 с.

Перечень рекомендуемых средств диагностики и методика формирования итоговой оценки

Для текущего контроля качества усвоения знаний по дисциплине рекомендуется использовать 2 контрольные работы и защита выполненных лабораторных работ (5 работ).

Контрольные мероприятия проводятся в соответствии с учебно-методической картой дисциплины.

Контрольные мероприятия проводятся в письменной форме. Оценка каждого из контрольных мероприятий проводится по десятибалльной шкале.

В случае неявки на контрольное мероприятие по уважительной причине студент вправе по согласованию с преподавателем выполнить его в дополнительное время.

Оценка текущей успеваемости – O_T – определяется как средневзвешенное (с округлением до целого значения по общепринятым правилам) оценок, полученных за контрольную работу и реферат. Рассчитывается по формуле: $O_T = (O_{KP-1} + O_{KP-2} + O_{ЛР})/3$, где O_{KP} – оценка контрольной работы, $O_{ЛР}$ – оценка за лабораторные работы. Для допуска к зачету необходимо получить O_T минимум 4 (четыре).

Формой текущей аттестации по дисциплине «Тепло-массоперенос в ядерно-энергетических установках» учебным планом предусмотрен зачет.

Зачет проводится в устной форме.

Итоговая (рейтинговая оценка) – $O_{И}$ – определяется как средневзвешенное значение оценки текущей успеваемости и оценки зачёта – $O_З$ – по формуле $O_{И} = 0,15 \cdot O_T + 0,85 \cdot O_З$ (с округлением до целого значения по общепринятым правилам).

Оценка «зачтено» выставляется в случае выполнения условия – $O_{И}$ минимум 5 (пять).

В случае O_T 9 (девять) или 10 (десять), оценка «зачтено» может быть выставлена по итогам текущей успеваемости («автоматом»).

В случае проведения экзаменационной сессии в «дистанционном формате» оценка «зачтено» выставляется по итогам текущей успеваемости – если оценка текущей успеваемости O_T равна оценке 4 (четыре) или выше.

Примерный перечень заданий для управляемой самостоятельной работы студентов

Контрольная работа по темам 1– 7 учебно-методической карты учебной дисциплины.

В рамках контрольной работы студент(-ка) письменно отвечает на 2 вопроса из числа вопросов, предлагаемых для самоконтроля в материалах лекций по темам, выносимых на контрольную и решает 3 ситуационные задачи по материалу тем 1– 7 (примеры задач рассматриваются в ходе лекций). Билеты контрольной работы предоставляются преподавателем.

Контрольная работа по темам 8– 13 учебно-методической карты учебной дисциплины.

В рамках контрольной работы студент(-ка) письменно отвечает на 3 вопроса из числа вопросов, предлагаемых для самоконтроля в материалах лекций по темам, выносимых на контрольную и решает 2 ситуационные задачи по материалу тем 8– 13 (примеры задач рассматриваются в ходе лекций). Билеты контрольной работы предоставляются преподавателем.

Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины

При организации образовательного процесса используются *практико-ориентированный подход* и *метод анализа конкретных ситуаций (кейс-метод)*.

Это предполагает освоение содержание образования через решения практических задач; приобретение навыков эффективного выполнения разных видов профессиональной деятельности; ориентацию на генерирование идей, реализацию групповых студенческих проектов, развитие предпринимательской культуры; использованию процедур, способов оценивания, фиксирующих сформированность профессиональных компетенций; приобретение студентом знаний и умений для решения практических задач; анализ ситуации, используя профессиональные знания, собственный опыт, дополнительную литературу и иные источники.

Методические рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся

Основой методики организации самостоятельной работы студентов является предоставление студентам необходимой для работы информации, а также обеспечение регулярных консультаций преподавателя и периодичной отчетности по различным видам учебной и самостоятельной работы.

В открытом доступе для студентов размещается следующая информация: ● программа дисциплины с указанием основной и дополнительной литературы; ● график консультаций преподавателя; ● вопросы к зачету ●сроки проведения контрольных мероприятий по различным видам учебной деятельности.

В случае необходимости, освоение части лекционного материала и материала лабораторных занятий по отдельным темам и в объеме, определяемым

решением кафедры, может быть организовано с использованием информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) и привлечением электронных средств обучения. Организация занятий с привлечением электронных средств обучения ведется с помощью образовательного портала Физического факультета БГУ eduphys.bsu.by.

ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
1. Ядерные энергетические установки.	Кафедра ядерной физики.	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения.	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте (протокол № 11 от 21.05.2020 г.)
2. Термогидродинамика переходных и аварийных процессов в реакторных установках.	Кафедра ядерной физики.	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения.	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте (протокол № 11 от 21.05.2020 г.)
3. Математическое моделирование физических процессов в реакторных установках.	Кафедра ядерной физики.	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения.	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте (протокол № 11 от 21.05.2020 г.)
4. Теплотехническое оборудование АЭС.	Кафедра ядерной физики.	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения.	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте (протокол № 11 от 21.05.2020 г.)
4. Ядерная безопасность.	Кафедра ядерной физики.	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения.	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте (протокол № 11 от 21.05.2020 г.)

**ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ
ПО ИЗУЧАЕМОЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**

на ____ / ____ учебный год

№ № ПП	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании
кафедры ядерной физики
(протокол № ____ от _____ 202_ г.)

Заведующий кафедрой
ядерной физики
к. ф.-м. н., доцент

_____ А.И. Тимощенко.

УТВЕРЖДАЮ
Декан физического факультета
к. ф.-м. н., доцент

_____ М.С. Тиванов.