

Белорусский государственный университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

Л. Толстик

« 9 » 2016 г.

Регистрационный № УД- 3937/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 2016

Учебная программа составлена на основе образовательного стандарта специальности 1-31 04 06 «Ядерная физика и технологии» (ОСВО 1-31 04 06-2013), введенном с 1 сентября 2013 г., и учебного плана специальности 1-31 04 06 «Ядерная физика и технологии», утвержденном 30 мая 2013 г., регистрационный номер УП G31-142/уч.

**СОСТАВИТЕЛЬ:**

**О.В. Семенович**, старший преподаватель кафедры ядерной физики Белорусского государственного университета.

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой ядерной физики физического факультета Белорусского государственного университета  
(протокол № 12 от 1 июня 2016 г.);

Советом физического факультета  
(протокол № 10 от 9 июня 2016 г.)

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программа дисциплины «Тепломассоперенос в ядерно-энергетических установках» разработана для специализации 1-31 04 06 03 «Физика ядерных реакторов и атомных энергетических установок» специальности 1-31 04 06 «Ядерные физика и технологии» первой ступени высшего образования. Настоящая программа является оригинальной и разработана с учетом соответствующих требований образовательного стандарта специальности 1-31 04 06 «Ядерные физика и технологии» (ОСВО 1-31 04 06-2013).

При составлении учебной программы «Тепломассоперенос в ядерно-энергетических установках» приняты во внимание два обстоятельства: 1) студентам не читался курс «Основы теории тепломассопереноса»; 2) количество учебных часов, отводимых на предмет «Тепломассоперенос в ядерно-энергетических установках», невелико. Тем не менее, студент должен усвоить знания и получить навыки, изложенные ниже. Ограниченное число лекций позволяет рассмотреть непосредственно на лекциях только наиболее существенные разделы дисциплины. Раздел посвященный изучению теплофизических свойств материалов ядерной техники и методам измерения теплофизических характеристик предлагается изучить в рамках цикла из 5 лабораторных работ.

*Цель учебной дисциплины* – усвоение студентами основных понятий, положений и концепций 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).

*Задачи учебной дисциплины:*

– сформировать основные понятия, 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.

*Учебный материал дисциплины основан* на базовых знаниях и представлениях, заложенных в дисциплинах цикла общенаучных и общепрофессиональных дисциплин «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», «Ядерная безопасность», а также дисциплин специализации «Термогидродинамика переходных и ава-

рийных режимов реакторных установок», «Техническая термодинамика ядерных энергетических установок».

Перед преподавателем данной дисциплины ставятся следующие задачи:

- ознакомить обучающихся с предметом тепломассопереноса в ядерных энергетических установках, в первую очередь – оснащёнными реакторами с водой под давлением;

- систематически изложить обучающимся основные сведения теории тепломассопереноса в сплошных средах;

- ознакомить обучающихся с особенностями гидродинамики и теплообмена в энергетических ядерных реакторах;

- способствовать развитию научного мировоззрения обучающихся.

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 научно-исследовательской деятельности;

- проблемно-ориентированный междисциплинарный подход;

- интенсивное обучение.

В результате усвоения дисциплины обучающийся должен

**знать:**

- теоретические основы тепломассопереноса;

- особенности гидродинамики и теплообмена в ядерном реакторе;

- процессы тепломассопереноса в ядерном реакторе;

**уметь:**

- решать уравнения теплопроводности, задачи конвективного теплообмена;

- анализировать и контролировать теплофизические процессы на работающих ядерных реакторах;

**владеть:**

- методами измерения температурных полей, теплофизических свойств конструкционных материалов и теплоносителей.

- основами современных методов расчёта и моделирования термогидродинамических процессов в реакторной установке, тепловыделяющей сборке, тепловыделяющем элементе.

В результате изучения учебной дисциплины «Тепломассоперенос в ядерно-энергетических установках» у обучающегося должны быть сформированы следующие **компетенции:**

- Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач.

- Владеть системным и сравнительным анализом.

- Владеть исследовательскими навыками.

- Уметь работать самостоятельно.

- Быть способным вырабатывать новые идеи (креативность).
- Владеть междисциплинарным подходом при решении проблем.
- Иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой с компьютером.
- Иметь лингвистические навыки (устная и письменная коммуникация).
- Уметь учиться, повышать свою квалификацию в течение всей жизни.
- Обладать качествами гражданственности.
- Быть способным к социальному взаимодействию.
- Обладать способностью к межличностным коммуникациям.
- Владеть навыками здорового образа жизни.
- Быть способным к критике и самокритике (критическое мышление).
- Уметь работать в команде.
- 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.
- Пользоваться компьютерными методами сбора, хранения и обработки информации, системами автоматизированного программирования, научно-технической и патентной литературой.
- Взаимодействовать со специалистами смежных профилей.
- Применять полученные знания фундаментальных положений физики, экспериментальных, теоретических и компьютерных методов исследования, планирования, организации и ведения научно-технической работы.
- 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.
- Разрабатывать и оптимизировать ядерно-физические технологии в энергетике и промышленности.
- Пользоваться глобальными информационными ресурсами.
- Пользоваться государственными языками Республики Беларусь и иными иностранными языками как средством делового общения.
- Реализовывать методы защиты производственного персонала и населения в условиях возникновения аварий, катастроф, стихийных бедствий и обеспечения радиационной безопасности при осуществлении научной,

производственной и педагогической деятельности.

Форма получения высшего образования — очная, дневная.

Общее количество часов — 92, количество аудиторных часов — 56.

Аудиторные занятия проводятся в виде лекций, лабораторных работ и управляемой самостоятельной работы (УСР). На проведение лекционных занятий отводится 32 часа, на лабораторные работы — 20 часов; на УСР — 4 часа.

Занятия проводятся на 4-м курсе в 8-м семестре.

Формы текущей аттестации по учебной дисциплине — зачёт (8 семестр).

## СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

### **1. Основные положения теории тепломассообмена**

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. 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. Теплопроводность (стационарные и нестационарные процессы)**

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. Критический диаметр тепловой изоляции. Поле температур в полубесконечном массиве. Поля температур в телах простой формы. Перенос тепла в конструкциях с ребрѐнными поверхностями. Циклические изменения температуры. Регулярный режим теплообмена. Процессы теплопроводности при плавлении и затвердевании. Контактный теплообмен.

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

Требования, предъявляемые к теплофизическим свойствам теплоносителей, конструкционных элементов. Теплофизические характеристики ядерного топлива, теплоносителей, материалов конструкционных элементов. 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; определение коэффициентов теплопроводности и температуропроводности методом источника постоянной тепловой мощности; определение теплофизических характеристик материалов в регулярном режиме при граничных условиях 1-го и 4-го рода и исследование зависимости коэффициента температуропроводности от температуры; изучение эффекта Зеебека и градуировка термопар; градуировка ме-

таллических термометров сопротивления, градуировка полупроводниковых термометров сопротивления (термисторов).

#### **4. Конвективный теплообмен в однофазных потоках**

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. 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.

#### **5. Основные положения теории пограничного слоя**

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.

#### **6. Диффузионный массообмен**

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

#### **7. Теплообмен излучением (радиационный теплообмен). Сложный теплообмен**

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 меж-

ду телом и оболочкой; коэффициент теплообмена излучением. Теплообмен в поглощающих и излучающих средах. Виды сложного теплообмена.

## **8. Конденсация. Кипение**

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.

## **9. Гидродинамика и теплообмен двухфазных потоков**

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.

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

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.

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

Тепловыделение в ядерных реакторах: источники энергии, распределение энергосодержания в реакторе, распределение температуры в канале с тепловыделением, тепловыделение в конструктивных элементах реактора. Особенности теплообмена в ядерных реакторах. Энергосодержание в ак-

тивной зоне. Изменение температуры при переходных процессах. Тепловые удары и периодические колебания температуры. Тепломассоперенос в контурах.

## **12. Особенности процессов гидродинамики и теплообмена в активных зонах реакторов**

Основные соотношения между теплогидравлическими параметрами, характеризующими активную зону (АЗ). 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 АЗ, 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 ТВЭЛе. Расчёт температурных полей в стержневом ТВЭЛе.

## **13. Процессы гидродинамики и теплообмена в парогенераторах**

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.

## **14. Тепломассообмен в ЯЭУ при аварийных ситуациях**

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 ДИСЦИПЛИНЫ

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	Контролируемая (управляемая) самостоятельная работа студента		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>1</b>	<b>Основные положения теории теплообмена</b>	<b>4</b>						
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]	
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]	
<b>2</b>	<b>Теплопроводность (стационарные и нестационарные процессы)</b>	<b>6</b>						
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]	

1	2	3	4	5	6	7	8	
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]	
2.3	Регулярный режим теплообмена. Процессы теплопроводности при плавлении и затвердевании. Контактный теплообмен..	2					[1, 4, 5], [1д], [5д]	
<b>3</b>	<b>Теплофизические свойства топливных элементов, теплоносителей и конструкционных материалов реакторных установок. Методы определения теплофизических характеристик. Датчики температуры</b>	<b>2</b>			<b>20</b>			
3.1	Требования, предъявляемые к теплофизическим свойствам теплоносителей, конструкционных элементов. Теплофизические характеристики ядерного топлива, теплоносителей, материалов конструкционных элементов.	2					[5], [5д], [8д], [9д], [14д]	
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]	2
3.3	Определение коэффициентов теплопроводности и температуропроводности методом источника постоянной тепловой мощности.				4		[4, 5], [14д]	2
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]	2
3.5	Изучение эффекта Зеебека и градуировка термопар.				4		[4, 5], [14д]	2
3.6	Градуировка металлических термометров сопротивления, градуировка полупроводниковых термометров сопротивления (термисторов).				4		[4, 5], [14д]	2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>4</b>	<b>Конвективный теплообмен в однофазных потоках</b>	<b>4</b>						
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]	
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]	
<b>5</b>	<b>Основные положения теории пограничного слоя</b>	<b>2</b>						
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]	
<b>6</b>	<b>Диффузионный массообмен</b>	<b>1</b>						
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]	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>7</b>	<b>Теплообмен излучением (радиационный теплообмен). Сложный теплообмен</b>	<b>1</b>				<b>2</b>		
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]	
7.2	Контрольная работа по материалу тем №№ 1–7					2		1
<b>8</b>	<b>Конденсация. Кипение</b>	<b>2</b>						
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]	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>9</b>	<b>Гидродинамика и теплообмен двухфазных потоков</b>	<b>2</b>						
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], [12д]	
<b>10</b>	<b>Тепломассообмен при течении в каналах и пучках труб (стержней)</b>	<b>2</b>						
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]	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>11</b>	<b>Процессы гидродинамики и теплообмена в ядерных реакторах при различных режимах работы</b>	<b>2</b>						
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]	
<b>12</b>	<b>Особенности процессов гидродинамики и теплообмена в активных зонах реакторов</b>	<b>2</b>						
12.1	Основные соотношения между теплогидравлическими параметрами, характеризующими активную зону (АЗ). 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 АЗ, охлаждаемой двухфазным теплоносителем; запас мощности до кризиса. Процессы теплообмена в тепловыделяющих элементах. Теплопередача в зазоре между топливным сердечником и оболочкой твэла. Распределения температур в стержневом твэле. Расчёт температурных полей в стержневом твэле.	2					[9], [11д], [17д]	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>13</b>	<b>Процессы гидродинамики и теплообмена в парогенераторах</b>	<b>1</b>				<b>2</b>		
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]	
13.2	Контрольная работа по материалу тем №№ 8–13.					2		1
<b>14</b>	<b>Тепломассообмен в ЯЭУ при аварийных ситуациях</b>	<b>1</b>						
14.1	Аварии с потерей теплоносителя: общая характеристика, аварии типа «малая течь», аварии типа «большая течь». Реактивные 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.	1					[9], [11д], [17д]	
	<b>ЗАЧЕТ</b>							3
	<b>ВСЕГО:</b>	<b>32</b>			<b>20</b>	<b>4</b>		

## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### Рекомендуемая литература

#### *Основная*

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.
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.

#### *Дополнительная*

1. Handbuch der Physik. Band III/1. Prinzipien der klassischen mechanik und feldtheorie / Her. von S. Flugge. – Berlin, Gottingen, 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. Тепломассообмен: (Справочник). – 2-е изд. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
5. Берд Р., Стьюарт 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).

## **Перечень используемых средств диагностики результатов учебной деятельности**

В качестве средств диагностики и контроля знаний рекомендуется использовать:

1. Проведение контрольных работ;
2. Защита выполненных лабораторных работ.
3. Проведение зачёта по дисциплине.

## **Перечень мероприятий для контроля качества усвоения знаний по учебной дисциплине**

### *Темы контрольных работ*

1. Материал тем №№ 1–7.
2. Материал тем 8–13.

## **Рекомендации по контролю качества усвоения знаний и проведению аттестации**

Текущий контроль знаний в семестре проводится как управляемая самостоятельная работа (УСР) и осуществляется в форме 2 письменных контрольных работ по вопросам программы, а также в виде зачётов (защит) выполненных лабораторных работ. Форма текущей аттестации – зачёт в 8 семестре. Система оценивания – рейтинговая.

Каждая контрольная работа включает теоретические вопросы и качественные (не требующие численных расчётов) задачи. Каждое задание (вопрос, задача) контрольной работы оценивается определённым количеством баллов (варьируется в зависимости от сложности элемента и темы контрольной работы). Оценка определяется следующим образом. Для получения высшей оценки – 10 (десять) – необходимо набрать минимум 75 % максимального количества баллов, предусмотренных в данной контрольной работе, плюс 1 балл. Минимальная норма для других оценок определяется так:  $НО = 0.1 * 0.75 * О * С + 1$ , где О – оценка, С – максимально возможное количество баллов за правильное решение всех заданий контрольной работы.

Например, за правильное решение всех заданий контрольной работы можно получить максимум 200 баллов. В таком случае, для получения оценки «десять» необходимо набрать минимум 151 балл; а результат, лежащий в диапазоне 121÷135 баллов, соответствует оценке «восемь».

Любую контрольную работу, которую студент(-ка) пропустил(-а) по уважительной причине, он(-а) может написать в другое время, согласованное с преподавателем и заведующим кафедрой. Одну (и только одну) из

контрольных работ, которую студент(-ка) пропустил(-а) без уважительной на то причины, он(-а) может написать в другое время, согласованное с преподавателем и заведующим кафедрой. Одну (и только одну) из написанных контрольных работ, студент(-ка) может переписать с целью улучшения оценки текущей успеваемости (засчитывается лучшая из двух оценок) в другое время, согласованное с преподавателем и заведующим кафедрой.

Оценка текущей успеваемости рассчитывается как средняя арифметическое значение (с округлением до целого значения по общепринятым правилам:  $N.5=N+1$ ) оценок за контрольные работы и средней арифметической (округлённой до целого значения по общепринятым правилам) оценки за лабораторные работы.

Аттестация по учебной дисциплине проводится в форме зачёта.

Студенты, имеющие оценку текущей успеваемости меньше 4 (четыре) и/или не выполнившие все лабораторные работы к зачёту не допускаются.

Студентам, имеющим оценку текущей успеваемости 9 (девять) или 10 (десять) зачёт выставляется по результатам текущей успеваемости («автоматически»).

Оценка зачёта и оценка текущей успеваемости служат для определения итоговой оценки по дисциплине, которая рассчитывается как средневзвешенная величина оценки текущей успеваемости и оценки зачёта. Рекомендуемые весовые коэффициенты для оценки текущей успеваемости – 0.5; для оценки зачёта – 0.5. Зачёт выставляется если итоговая оценка (не округляется!) равна минимум 6,0 (сумма оценок текущей успеваемости и зачёта должна быть не менее 12).

**ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ  
ПО ИЗУЧАЕМОЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ  
С ДРУГИМИ ДИСЦИПЛИНАМИ СПЕЦИАЛЬНОСТИ**

Название дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы по изучаемой учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Ядерные энергетические установки	Кафедра ядерной физики	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте Протокол № 12 от 01 июня 2016.
Атомные электрические станции	Кафедра ядерной физики	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте Протокол № 12 от 01 июня 2016.
Ядерная безопасность	Кафедра ядерной физики	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте Протокол № 12 от 01 июня 2016.
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 № 12 от 01 июня 2016.
Техническая термодинамика ядерных энергетических установок	Кафедра ядерной физики	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте Протокол № 12 от 01 июня 2016.

**ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ УВО**  
**Тепломассоперенос в ядерных энергетических установках**  
 на 2019 / 2020 учебный год

№№ пп	Дополнения и изменения	Основание
1.	Дополнить пункт « <i>Основная</i> » подраздела «Рекомендуемая литература» раздела «ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ» позицией «Теплофизика. Неравновесные процессы тепломассопереноса / В.И. Байков [и др.]. – Минск, Вышэйшая школа, 2018. – 476 с.».	Решение кафедры ядерной физики, протокол № 15 от 27.06.2019 г.
2.	Дополнить пункт « <i>Дополнительная</i> » подраздела «Рекомендуемая литература» раздела «ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ» позицией «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.».	
3.	В тексте преамбулы абзац об эффективных педагогических методиках и технологиях изложить в следующей редакции: «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, основанные на эвристическом подходе к обучению; технологии, основанные на практико-ориентированном подходе к обучению; технологии научно-исследовательской деятельности; метод анализа конкретных ситуаций (кейс-метод); метод проектного обучения; метод учебной дискуссии; методы и приемы развития критического мышления; метод группового обучения».	Поручение Совета Министров Республики Беларусь от 6 марта 2019 г. № 05/209-114/2718р; распоряжение проректора по учебной работе и образовательным инновациям О.И.Чуприс от 13.05.2019 № 276-5512
4.	Лекция «Требования, предъявляемые к теплофизическим свойствам теплоносителей, конструкционных элементов. Теплофизические характеристики ядерного топлива, теплоносителей, материалов конструкционных элементов» по теме-3 может быть прочитана в зависимости от конкретной ситуации (расписание, сроки командировки в НГТУ им. Р.Е. Алексеева, и т.п.) последней – после темы-14.	Решение кафедры ядерной физики, протокол № 15 от 27.06.2019 г.

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры (протокол № 15 от 27.06.2019 г.)

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



А.И. Тимошенко

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



М.С. Тиванов