

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

Драгунов В.К.

« 16 » июня 2015 г.

Программа аспирантуры

Направление 13.06.01 Электро- и теплотехника

Направленность (специальность) 05.04.03 Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА  
дисциплины по выбору

«Процессы переноса в существенно неравновесных системах»

Индекс дисциплины по учебному плану: Б1.В.ДВ.4.2

Всего 108 часов

Семестр 7, в том числе

6 часов – контактная работа,  
84 часа – самостоятельная работа  
18 часов – контроль

Программа составлена на основе федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (уровень подготовки кадров высшей квалификации) по направлению подготовки 13.06.01 Электро- и теплотехника, утвержденного приказом министерства образования и науки РФ от 30 июля 2014 № 878, и паспорта специальности 05.04.03 «Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения», утвержденной приказом Минобрнауки России от 25 февраля 2009 г. № 59.

## **ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

**Целью изучения дисциплины является** систематизация полученных при изучении базовых дисциплин знаний о неравновесных процессах переноса, характеризующихся значительной неравновесностью, ознакомление с современным состоянием исследований в соответствующих областях, приобретение навыков выполнения на этой основе инженерных расчетов для решения конкретных прикладных задач.

### **Задачи дисциплины**

- освоение методов описания систем в условиях сильной неравновесности процессов переноса;
- ознакомление со свойствами, спецификой описания и применении сверхтекучего гелия в аппаратах криогенных систем охлаждения теплонапряженного оборудования;
- изучение конкретных методические решения при обосновании расчетов технологических процессов и схем низкотемпературного оборудования.

**В процессе освоение дисциплины формируются следующие компетенции:**

- способность проектировать и осуществлять комплексные исследования, в том числе междисциплинарные, на основе целостного системного научного мировоззрения с использованием знаний в области истории и философии науки (УК-2);
- готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач (УК-3);
- владение методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности (ОПК-1);
- готовность к преподавательской деятельности по основным образовательным программам высшего образования (ОПК-5);

- готовность осуществлять комплексные исследования общих свойств и принципов функционирования машин и аппаратов холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения, разрабатывать научно-методические основы создания систем установок и агрегатов и рабочих тел с планируемыми свойствами (ПК-1).

- способность проводить теоретические и экспериментальные исследования процессов холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения с целью углубления оценки проявляющихся в них физических закономерностей, создания надежных алгоритмов управления и прогноза (ПК-2).

- Способность развивать методы натурального и вычислительного моделирования процессов и объектов холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения с целью поиска оптимальных решений по экономичности, надежности и ресурсу низкотемпературных установок, машин и аппаратов (ПК-3).

## **ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАЗОВАНИЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

В результате освоения учебной дисциплины обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

### **знать:**

- расчетно-теоретические и экспериментальные методы исследования теплогидравлических процессов, принципы организации научно-исследовательской работы и выполнения экспериментальных исследований, осуществления обработки, анализа и обобщения полученных результатов при реализации теплофизических процессов в условиях значительного отклонения от состояния термодинамического равновесия (УК-2);

- методы моделирования высоко- и низкотемпературных теплогидравлических процессов в конкретных технических системах и математические модели элементов, работающих на различных физических принципах, способы применения соответствующих пакетов прикладных программ и основы разработки программных продуктов для моделирования процессов и систем (ОПК-1);

- способы расчета существенно неравновесных процессов переноса с целью применения их на практике для разработки энергонапряженного оборудования, машин и аппаратов высоких технологий (ПК-1);

- методы расчета процессов переноса на межфазных поверхностях НеII и жидких металлов (ПК-2).

### **уметь:**

- проявлять инициативу, в том числе в ситуациях риска, брать на себя всю полноту ответственности за свои решения в рамках профессиональной компетенции, способностью разрешать проблемные ситуации (УК-3);

- применять современные методы исследования, проводить технические испытания и (или) научные эксперименты, оценивать результаты выполненной работы (ПК-2);

- разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности на предприятии, осуществлять технико-экономическое обоснование инновационных проектов, управлять программами освоения новой продукции и технологии (ОПК-5);

**владеть:**

- представлениями о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии науки (ОПК-1);

- навыками выполнения научных исследований в области проектирования и создания аппаратов новой техники (ПК-2);

- принципами построения алгоритмов оптимизационных проектных расчетов с использованием в разработке технических проектов новых информационных технологий (ПК-3);

- готовностью использовать основы искусственного интеллекта, основные информационные и экспертные системы в областях проектирования и расчета научно-исследовательского и технологического оборудования, способностью разрабатывать элементы конструкций (УК-2);

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ**

### ***Обзор методов решения кинетического уравнения Больцмана применительно к задачам испарения-конденсации***

Линейная теория. Моментный метод решения одномерных задач. Прямое численное решение кинетического уравнения Больцмана (для разных чисел Кнудсена, многомерные задачи). Прямое статистическое моделирование. Модельные уравнения.

### ***Результаты исследования задач испарения-конденсации***

Параметричность испарения, дозвуковой и сверхзвуковой конденсации. Предельные потоки испарения-конденсации. Инженерные соотношения для расчета испарения и конденсации в дозвуковом режиме. Диаграмма предельных потоков в сверхзвуковой области. Конденсация в присутствии неконденсируемых газов. Кривые  $q=f(\Delta T)$  для конденсации-испарения во всем диапазоне изменения интенсивностей. Рекомендации по уменьшению  $\Delta T$ . Определение итогового перепада температур от газа через межфазную

поверхность, пленку конденсата, стенку теплообменника (конденсатора) охлаждающему теплоносителю. Влияние неполной конденсации на границе раздела фаз на характеристики процесса. Модели описания: коэффициенты испарения-конденсации, «сквозные» кинетические уравнения для пара и конденсата; расчет взаимодействий молекул газа и конденсата методами молекулярной динамики; предельные скорости и предельные потоки массы.

### ***Кипение сверхтекучего гелия***

Кривая кипения сверхтекучего гелия. Пиковая и "восстановительная" тепловая нагрузка. Расчет "восстановительной" тепловой нагрузки по линейной теории и в общем случае. Перенос тепла через паровую пленку для нелинейных задач в одномерной и двумерной постановке. Перенос массы и энергии в ограниченной паровой области при наличии градиента температур на межфазной поверхности. Расчет эволюции паровой пленки при больших тепловых нагрузках для плоского, цилиндрического и сферического нагревателей. Особенности теплообмена в HeII при пониженной гравитации. Задачи теплопереноса в капиллярно-пористом теле, заполненном HeII. Расчет процессов переноса в единичном капилляре при наличии продольного теплового потока.

### ***Процессы криовакуумирования***

Роль направленности потоков при криоконденсации (десублимации). Расчет теплопереноса в области неприменимости законов градиентного типа. Примеры расчета течений, характеризуемых малыми числами Кнудсена, с учетом сильной неравновесности на межфазной границе.

### ***Конденсация паров металлов***

Роль процессов переноса на межфазной поверхности при определении общего термического сопротивления в системе: пар – пленка конденсата – стенка конденсатора – охлаждающий теплоноситель. Влияние неконденсируемых газов. Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными.

### ***Сонолюминесценция***

Сущность явления. Математическое описание: уравнения сохранения для жидкости и парогазовой смеси; универсальные и специальные условия совместности. Влияние испарения-конденсации на межфазной поверхности на характеристики процесса.

### ***Формы межфазных поверхностей при переносе массы, импульса, энергии***

Классификация задач тепло-массопереноса через границы раздела фаз. Примеры приложений. Квазиравновесные и молекулярно-кинетические методы расчета. Сопоставление результатов применения соответствующих

подходов для определения формы межфазных поверхностей при пленочном кипении недогретых жидкостей.

## **ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАЗОВАНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

Промежуточная аттестация по итогам освоения дисциплины: 3 семестр – дифференцированный зачет.

### **Вопросы для самоконтроля и для проведения зачета**

1. Перечислите термические сопротивления, возникающие в общем случае при конденсации парогазовой смеси на охлаждаемой стенке теплообменника-конденсатора.
2. Как изменяется по нормальной к межфазной поверхности координате полная энтальпия пара и его скорость при одномерном стационарном испарении и конденсации?
3. Сколько газодинамических величин надо задать для того, чтобы описать процесс одномерного стационарного испарения однокомпонентного вещества в полубесконечное пространство?
4. Сколько газодинамических величин надо задать для описания одномерной стационарной конденсации однокомпонентного вещества из полубесконечного пространства для до- и сверхзвуковых скоростей?
5. Какие методы решения кинетического уравнения Больцмана Вам известны? Перечислите достоинства и недостатки каждого из них.
6. От чего зависит плотность теплового потока при переносе теплоты через плоский слой газа в свободномолекулярном пределе? Приведите соответствующую формулу.
7. Как изображаются в пространстве: относительная температура, плотность, число Маха равновесие, испарение, дозвуковая и сверхзвуковая конденсация?
8. При каких условиях в режиме сверхзвуковой конденсации вблизи межфазной поверхности формируется скачок уплотнений?
9. Что такое коэффициенты испарения и конденсации? Сопоставьте результаты интерпретации экспериментальных данных при равенстве и неравенстве этих коэффициентов.
10. Как зависит предельное значение коэффициента конденсации от величины числа Маха конденсируемого чистого пара.
11. Чем отличаются экспериментальные зависимости плотности потока массы от разности температур пара и межфазной поверхности при конденсации паров металлов для относительно малых и больших чисел Маха?

12. Как связана интенсивность конденсации при криовакуумной откачке с температурой границы раздела фаз?

13. Чем определяется интенсивность сонолюминесценции? При каком содержании неконденсируемого газа внутри схлопывающегося пузырька она максимальна?

14. От чего зависит поведение плотности пара и газа по нормальной к межфазной поверхности координате в задаче об одномерном испарении в парогазовую среду? Назовите два типа решений.

15. Каким образом можно найти предельное количество пара, при котором полностью запирается одномерная стационарная конденсация из парогазовой среды?

16. В каких случаях для расчета интенсивности конденсации из парогазовой среды применение традиционного чисто диффузионного подхода (модели эквивалентной ламинарной пленки) становится неправомерным?

17. Из решения какого уравнения сохранения можно получить распределение плотности пара по координате при его одномерном стационарном натекании на конденсирующую поверхность через парогазовую среду?

18. Перечислите параметры, определяющие степень неравновесности процессов переноса вблизи межфазных поверхностей.

19. В каких случаях относительно простая модель «треугольной потенциальной ямы» дает достаточно хорошее согласование с результатами, полученными на основании использования более сложных подходов?

20. Каков алгоритм анализа и пересчета экспериментально полученной функции распределения молекул газа по скоростям при отражении от границы раздела фаз в «полумаксвелловскую»?

Критерии оценки за освоение дисциплины определены в Инструктивном письме И-23 от 14 мая 2012 г.

### **Рекомендуемая литература**

#### **Основная**

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учебное пособие для вузов. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. –М.: Физматлит, 2014. 731с.

2. Крюков А.П. Процессы переноса в существенно неравновесных системах. М.: МЭИ, 2013.

3. Крюков А.П., Пузина Ю.Ю. Формы межфазных поверхностей при переносе массы, импульса, энергии. М.: Издательство МЭИ, 2015.

4. Королев П.В., Крюков А.П. Методы описания конденсированных систем. М.: Издательский дом МЭИ, 2010.

**Дополнительная**

5. Лабунцов Д.А., Ягов В.В. Механика двухфазных систем. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007.

6. Крюков А.П. Элементы гидродинамики и теплопереноса в Не-П. Учебное пособие. М.: Изд-во МЭИ, 2004.

7. Дмитриев А.С. Введение в нанотеплофизику. М.:БИНОМ. Лаборатория знаний. 2015. 790с.

8. Численное решение кинетического уравнения Больцмана в инженерной практике. Учебное пособие /Крюков А.П., Левашов В.Ю., Шишкова И.Н., Ястребов А.К. М.: Изд-во МЭИ, 2005.