

**Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
д.т.н. проф. Драгунов В.К.



_____ 2022 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
специальной дисциплины 2.4.8.Машины и аппараты, процессы
холодильной и криогенной техники**

Москва 2022

Программа составлена на основе паспорта специальности научных работников и программы - минимум кандидатского экзамена по специальности «Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники» в действующей редакции и в соответствии с Положением о подготовке научных и научно- педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре), утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 30 ноября 2021г. № 2122.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью дисциплины является изучение общих свойств и принципов функционирования машин и аппаратов холодильной и криогенной техники, разработка научно-методических основ создания систем установок, агрегатов и рабочих тел с планируемыми свойствами.

Задачами дисциплины являются:

- изучение экспериментальных и расчетных методов исследования процессов тепломассопереноса в однофазных, двухфазных средах, на поверхности раздела фаз, в квантовых жидкостях при ограничениях, вводимых конструкцией и средой эксплуатации машин и аппаратов холодильной и криогенной техники;
- освоение методов термодинамического анализа процессов сжатия, расширения, фазовых превращений, охлаждения, криостатирования, сжижения, конденсации в жидкое и твердое состояние рабочих тел;
- ознакомление с основными аппаратами криогенной техники, методиками их расчета и подбора, условиями их эксплуатации в технологических процессах разделения, очистки и получения сжиженных и сжатых промышленных и сверхчистых газов, в том числе природного газа;
- решение конструкторских, технологических и технико-экономических проблем по разработке и оценке преобразователей энергии, используемых в холодильной и криогенной технике.

МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ПРОГРАММЫ АСПИРАНТУРЫ

Специальная дисциплина в структуре программы аспирантуры входит в Блок 2 «Образовательный компонент. Общая трудоемкость составляет 7 зачетных единиц (з.е.).

Формула специальности

Научная специальность, объединяющая исследования по тепло- и массопереносу, сжатию, расширению, фазовым превращениям, охлаждению, криостатированию, сжижению, конденсации в жидкое и твердое состояние рабочих тел при ограничениях, вводимых конструкцией и средой эксплуатации машин и аппаратов холодильной и криогенной техники. В

рамках специальности разрабатываются технологические процессы разделения, очистки и получения сжиженных и сжатых промышленных и сверхчистых газов, в том числе природного газа, решаются конструкторские, технологические и технико-экономические проблемы по разработке и оценке преобразователей энергии, используемых в холодильной и криогенной технике, в системах кондиционирования и жизнеобеспечения.

Области исследований

1. Изучение общих свойств и принципов функционирования машин и аппаратов холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения, разработка научно-методических основ создания систем, комплексов, установок и агрегатов, рабочих тел с требуемыми свойствами.
2. Теоретические и экспериментальные исследования процессов холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения с целью выявления и углубленной оценки особенностей проявляющихся в них физических закономерностей, создания надежных алгоритмов управления и прогноза работы низкотемпературных машин, аппаратов и установок.
3. Развитие методов термодинамического анализа, натурного 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.
4. Развитие и реализация энергосберегающих технологий при создании машин и аппаратов холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения.
5. Создание цифровых баз данных по свойствам хладагентов и материалов, важнейшим элементам низкотемпературных систем, для цели их оптимального проектирования.
6. Развитие и реализация систем автоматического регулирования и управления низкотемпературных машин, установок и комплексов, в том числе с использованием нейронных сетей и искусственного интеллекта.

Отрасль науки

- технические науки

Введение

В основу настоящей программы положены следующие дисциплины: техника и физика низких температур, основы низкотемпературной трансформации тепла, теплопередача при низких температурах, криофизика, теплообменные аппараты криогенной техники, вакуумная техника, теплофизические процессы в криосистемах, процессы переноса в существенно неравновесных системах.

Термодинамические основы техники низких температур

Криология как наука о холоде, методах его получения и использования. Области практического использования низких температур. Основные процессы, используемые для получения низких температур. Кратковременное и непрерывное охлаждение. Пути уменьшения затрат при генерации холода.

Особенности применения принципов термодинамики и механики для анализа и расчета низкотемпературных систем. Температурные шкалы. Единицы измерения температуры. Единицы измерения производительности тепла и холода.

Основные задачи техники низких температур – поиск идеальных циклов и минимизации затрат для процессов охлаждения, криостатирования, конденсации в жидкое и твердое состояния, очистки и разделения газов, ожижения газов.

«Производство» энтропии. Источники необратимости. Энтропийный и эксергетический методы анализа низкотемпературных процессов, циклов, установок. Распределение затрат энергии по элементам низкотемпературных установок и систем. Теорема Гюи-Стодолы. Степень термодинамического совершенства.

Идеальное и реальное газовое состояние. Виды уравнений состояния. Методы определения термодинамических параметров. Термодинамические свойства смесей и методы их определения. Тепловые диаграммы и таблицы термодинамических свойств. Анализ процессов с помощью тепловых диаграмм. Равновесные состояния чистых веществ и смесей при фазовых переходах.

Анализ процессов, сопровождающихся в адиабатных условиях уменьшением температуры: дросселирование, изоэнтропное расширение, выхлоп, расширение газа в вихревой трубе, откачка паров кипящих жидкостей, насыщение ненасыщенных паров при барботаже, растворение гелия-3 в гелии-4, охлаждение в пульсирующем потоке, процессы смешения, температурная стратификация в газодинамических системах.

Процессы получения низких температур с рабочими веществами в твердом состоянии: термоэлектрическое охлаждение, адиабатное размагничивание, электромагнитнотермический эффект охлаждения, десорбционное охлаждение, тепловой эффект дегидрирования интерметаллидов.

Энергетические характеристики охлаждающих систем (удельная холодопроизводительность, коэффициент ожижения, удельная работа, холодильный коэффициент, коэффициент удельных затрат мощности). Степень термодинамического совершенства реальных систем.

Теория тепло- и массопереноса

Теплопроводность. Основные положения теории теплопроводности. Закон Фурье. Коэффициент теплопроводности. Дифференциальное уравнение теплопроводности.

Конвективный теплообмен. Классификация и характеристика процессов конвективного теплообмена. Система дифференциальных уравнений

конвективного теплообмена. Основные понятия и соотношения теории пограничного слоя. Теплоотдача в трубах и каналах. Анализ теплообмена при ламинарном режиме движения. Теплообмен при естественной (свободной) конвекции. Условие отсутствия естественной конвекции. Анализ теплообмена на основе соотношений теории пограничного слоя. Основы теории подобия и моделирования. Свойства подобных процессов. Критерии подобия и уравнения подобия.

Теплообмен излучением. Основные понятия и законы. Спектр излучения черного тела - закон Планка. Интегральное излучение черного тела. Закон Стефана-Больцмана. Излучательная способность и степень черноты. Закон Кирхгофа. Интенсивность излучения и закон Ламберта.

Теплообмен при фазовых превращениях. Классификация процессов фазовых превращений. Соотношения баланса полных потоков вещества, импульса и энергии на границе раздела фаз при фазовых переходах. Теплообмен при конденсации пара. Пленочный и капельный режимы конденсации. Теория Нуссельта и ее последующие уточнения. Теплообмен при кипении жидкости. Режимы кипения. Механизм и теплоотдача при пузырьковом режиме кипения. Гидродинамическая теория первого кризиса кипения, механизм и теплоотдача при пленочном режиме кипения. Второй кризис процесса кипения.

Процессы тепло- и массообмена. Классификация процессов тепло- и массообмена. Закон Фика. Система дифференциальных уравнений конвективного тепло- и массообмена. Граничные условия на проницаемых поверхностях, диффузионный пограничный слой. Закономерности совместного переноса массы, импульса и энергии. Аналогия процессов переноса массы, импульса и энергии (тройная аналогия). Влияние поперечного потока вещества на интенсивность процессов переноса.

Основы криофизики

Принципы физики конденсированных систем. Параметры конденсированного тела. Параметр взаимодействия. Параметр де Бройля. Концепция элементарных возбуждений. Энергетический спектр конденсированного тела. Кристаллическая решетка. Коллективные колебания кристаллической решетки. Фононы. Акустические и оптические фононы. Теплостойкость кристаллической решетки. Модель Дебая.

Основы физики сверхпроводимости. Основные опытные факты. Тепловые свойства сверхпроводников. Феноменологические теории сверхпроводимости. Два типа сверхпроводников. Сверхпроводники I рода в магнитном поле. Промежуточное состояние. Сверхпроводники II рода в магнитном поле: смешанное состояние, квантование магнитного потока и вихри Абрикосова. Резистивное состояние сверхпроводников и пиннинг. Жесткие сверхпроводники. Эффекты Джозефсона. Высокотемпературная сверхпроводимость.

Элементы физической кинетики. Основные понятия и определения: потенциалы взаимодействия, функция распределения молекул газа по

скоростям, моменты функции распределения. Связь микроскопического и макроскопического уровней описания. Кинетическое уравнение Больцмана.

Основы физики сверхтекучести и процессы переноса в He-II. Гелий – квантовая жидкость. Опытные факты и наблюдения. Термомеханический и механотермический эффекты в He-II. Соотношение Лондона. Двухскоростная модель Л.Д. Ландау: допущения (предположения) и математическое описание. Распространение звука в He-II. Постановка задачи о расчете теплообмена в He-II. Режим сопротивления П.Л. Капицы. Описание стационарного теплопереноса в He-II при ламинарном движении нормальной компоненты. Вывод уравнения, описывающего стационарный теплоперенос в He-II на основе уравнений двухскоростной гидродинамики. Критические скорости в He-II. Сила взаимного трения Гортера – Меллинка.

Криогенная техника

Основные этапы развития мировой и отечественной криогенной техники. Рабочие тела криогенных систем и их свойства.

Классические и реальные циклы. Циклы Линде, Клода, Гейландта, Капицы, Клименко, Лондона, Брайтона, Стирлинга, Гиффорда – Мак-Магона для охлаждения, термостатирования и ожижения газов.

Циклы с дросселированием. Детандерные циклы. Комбинированные циклы с дросселированием и расширением в детандере. Многоступенчатые циклы. Типовые ступени охлаждения. Холодопроизводящие процессы в циклах. Холодопроизводительность произвольного цикла. Виды потерь при определенной холодопроизводительности. Полезная холодопроизводительность. Методология расчета циклов.

Криогенные рефрижераторы. Особенности работы и основы теплового расчета в режимах криостатирования. Пути совершенствования.

Ожижители. Особенности организации циклов и основы расчета. Ожижители гелия и водорода, их устройство и особенности расчета. Пути совершенствования. Ортопароконверсия водорода.

Использование газовых смесей в качестве рабочих тел криогенных установок. Одноточный многокаскадный цикл.

Поршневые детандеры, принцип действия, идеальная и действительная индикаторные диаграммы, расчетная модель действительного цикла. Основные виды потерь холодопроизводительности. Конструкции поршневых детандеров, пути их совершенствования.

Принципы действия турбодетандеров. Основные понятия, схемы и типы турбодетандеров. Основные энергетические соотношения для турбодетандера и его элементов. Область применения турбодетандеров, перспективные направления в их развитии и совершенствовании.

Влажно-паровые и жидкостные детандеры, особенности их работы, методы расчета.

Криогенные газовые машины. Основные особенности рабочего процесса машин со встроенными теплообменными аппаратами. Методика расчета.

Рекуперативные теплообменники. Классификация и конструктивные

схемы (трубчатые, пластинчато-ребристые, матричные). Сравнительные характеристики теплообменников. Методы теплового и гидравлического расчета теплообменников, пути их совершенствования.

Конденсаторы-испарители, вымораживатели. Специфика фазовых переходов при криогенных температурах. Основы расчета аппаратов.

Схемы, устройство и принцип работы ректификационных колонн. Колонны с регулярными насадками. Расчет процесса разделения бинарной смеси. Определение ЧЭП и ВЭТТ. Пути совершенствования ректификационных колонн.

Физические основы процессов сорбции. Адсорбенты, их виды и свойства. Сорбционные методы очистки и разделения газовых смесей, методы расчета.

Виды тепловой изоляции. Физическая картина переноса тепла в изоляции. Основные характеристики и области применения различных видов тепловой изоляции. Удельные потоки теплоты через изоляцию.

Емкости для хранения криогенных жидкостей, процессы в емкостях. Криостаты. Расчет теплопритоков через изоляцию и по элементам конструкций.

Пусковые режимы криогенных установок. Факторы, влияющие на длительность пускового периода. Автоматизация режимов работы криогенных установок, методы обеспечения их технической и экологической безопасности.

Холодильная техника

Основные этапы в истории развития мировой и отечественной холодильной техники.

Способы получения умеренно низких температур (до 120 К). Типы холодильных установок (парокомпрессионные, парожетторные, газовые, абсорбционные, термоэлектрические и др.), принципы их действия.

Теоретический цикл парокомпрессионной холодильной машины. Сравнение парокомпрессионного цикла с обратным циклом Карно. Действительный цикл парокомпрессионной холодильной машины. Производство энтропии и степень термодинамического совершенства действительного цикла. Удельные величины холодопроизводительности и работы.

Циклы многоступенчатых и каскадных холодильных установок. Причины применения сложных циклов. Варианты многоступенчатых циклов и их сравнительные характеристики.

Теоретические и действительные циклы воздушных холодильных машин. «Русский» (вакуумный) цикл – Мартыновского, Туманского, Дубинского. Основы расчета циклов воздушных холодильных машин, области применения машин и пути их совершенствования.

Схемы и циклы теплоиспользующих холодильных установок: абсорбционных и парожетторных. Отображение рабочих процессов в тепловых диаграммах.

Рабочие вещества парокompрессионных холодильных машин, их классификация. Теплофизические свойства и эксплуатационные характеристики однокомпонентных рабочих веществ. Показатели «озонной» и «парниковой» опасности (ODP и GWP). Смазка холодильных компрессоров. Типы масел.

Азеотропные и неазеотропные смеси. Их свойства и области применения. Основные преимущества и недостатки холодильных установок, использующих неазеотропные смеси.

Объемные холодильные компрессоры: поршневые, винтовые, спиральные и ротационные. Принцип действия, основные характеристики, области применения и пути совершенствования.

Идеальная и действительная индикаторные диаграммы поршневого компрессора. Коэффициент подачи. Математические модели действительных процессов и оценка эффективности объемных компрессоров. Характеристики холодильных, объемных компрессоров.

Центробежные и струйные компрессоры, их принцип действия, основные характеристики, области применения и пути совершенствования.

Процессы в элементах центробежного компрессора. Уравнения удельной работы и степени повышения давления в ступени, производство энтропии в ступени. Основы расчета.

Типы испарителей – кожухотрубные, затопленные и с кипением внутри труб, панельные, оросительные. Физическая картина процессов в испарительных аппаратах разных типов. Основы расчета испарителей, пути их совершенствования.

Типы конденсаторов – кожухотрубные, оросительные и испарительные, с воздушным охлаждением. Особенности теплофизических процессов в конденсаторах. Теплоотдача к окружающей среде – воде или воздуху. Проблема сокращения расхода охлаждающей воды.

Автоматизация работы холодильных машин и установок. Приборы и системы автоматики для регулирования и защиты холодильных машин и установок. Применение микропроцессорной техники для программного регулирования. Экологическая и эксплуатационная безопасность.

Вопросы, включенные в билеты для проведения экзамена:

1. Внутренняя энергия. Обобщенные силы и координаты. Энтальпия, аналитические выражения и формулировки первого закона термодинамики.
2. Термодинамические циклы. Коэффициенты преобразования для прямых и обратных циклов. Цикл Карно. Теорема Карно.
3. Формулировки второго закона термодинамики. Энтропия. Возрастание энтропии в необратимых процессах
4. Фазовые переходы в чистых веществах и в смесях. Условия фазового равновесия, правило фаз Гиббса. Уравнение Клапейрона – Клаузиуса.
5. Основные положения теории теплопроводности. Закон Фурье. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Условия однозначности.

6. Теплоотдача в трубах и каналах. Анализ теплообмена при ламинарном режиме движения. Закономерности теплообмена при турбулентном течении.
7. Теплообмен при конденсации пара. Пленочный и капельный режимы конденсации. Теория Нуссельта и ее последующие уточнения.
8. Теплообмен при кипении жидкости. Теплоотдача при пузырьковом режиме кипения. Гидродинамическая теория первого кризиса кипения.
9. Основные опытные факты и феноменологические теории сверхпроводимости. Тепловые свойства сверхпроводников. Два типа сверхпроводников.
10. Элементы физической кинетики. Потенциалы взаимодействия, функция распределения молекул газа по скоростям, моменты функции распределения. Кинетическое уравнение Больцмана.
11. Основы физики сверхтекучести и процессы переноса в He-II. Опытные факты и наблюдения. Термомеханический и механотермический эффекты. Двухскоростная модель Л.Д. Ландау
12. Криогенные рефрижераторы. Особенности работы и основы теплового расчета в режимах криостатирования.
13. Ожижители. Особенности организации циклов и основы расчета. Ожижители гелия и водорода, их устройство и особенности расчета.
14. Криогенные газовые машины. Основные особенности рабочего процесса машин со встроенными теплообменными аппаратами. Методика расчета.
15. Схемы, устройство и принцип работы ректификационных колонн. Колонны с регулярными насадками. Расчет процесса разделения бинарной смеси.
16. Способы получения умеренно низких температур (до 120 К). Типы холодильных установок (парокомпрессионные, парожетторные, газовые, абсорбционные, термоэлектрические и др.), принципы их действия.
17. Циклы многоступенчатых и каскадных холодильных установок. Причины применения сложных циклов. Варианты многоступенчатых циклов и их сравнительные характеристики.
18. Рабочие вещества парокомпрессионных холодильных машин, их классификация. Теплофизические свойства и эксплуатационные характеристики однокомпонентных рабочих веществ.

ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Промежуточная аттестация проводится в форме экзамена.

Требования и критерии оценивания ответов экзамена

В процессе экзамена оценивается уровень научно-исследовательской компетентности аспиранта, что проявляется в квалифицированном представлении результатов обучения.

При определении оценки учитывается грамотность представленных ответов, стиль изложения и общее оформление, способность ответить на поставленный вопрос по существу.

Критерии выставления оценки на экзамене:

Оценка «ОТЛИЧНО» выставляется аспиранту, который показал при ответе на вопросы экзаменационного билета и на дополнительные вопросы, что владеет материалом изученной дисциплины, свободно применяет свои знания для объяснения различных явлений и решения задач.

Оценка «ХОРОШО» выставляется аспиранту, в основном правильно ответившему на вопросы экзаменационного билета и на дополнительные вопросы, но допустившему при этом не принципиальные ошибки.

Оценка «УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО» выставляется аспиранту, который в ответах на вопросы экзаменационного билета допустил существенные и даже грубые ошибки, но затем исправил их сам

Оценка «НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО» выставляется аспиранту, который:

- а) не ответил на вопросы экзаменационного билета
- б) при ответе на дополнительные вопросы обнаружил незнание большого раздела экзаменационной программы.

Данные критерии указаны Инструктивном письмом И-23 от 14 мая 2012 г.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Основная литература:

1. Техническая термодинамика /В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А.Е. Шейндлин. М.: Издательский дом МЭИ. 2008. 496 с.
2. Ягов В.В. Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях. Учебное пособие для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. 542с.
3. Ландау Л.Д, Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учебное пособие для вузов. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. –М.: Физматлит, 2014. 731с.
4. Дмитриев А.С. Основы криофизики конденсированных систем. Учебное пособие. М.: Изд-во МЭИ, 2006. 134с.
5. Лабунцов Д.А., Ягов В.В. Механика двухфазных систем. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
6. Крюков А.П. Процессы переноса в существенно неравновесных системах. М.: МЭИ, 2013. 124с.
7. Справочник по вакуумной технике и технологиям. Под ред. Д.Хоффман, Б.Сингха, Дж.Томаса III. Перевод с английского Ю.Л.Цвирко под ред. В.А. Романько, С.Б. Нестерова. М.: ТЕХНОСФЕРА. 2011. 736с.

Дополнительная литература:

1. Красникова О.К. Витые теплообменные аппараты криогенных и теплоэнергетических установок. М.: КолосС, 2008. 176 с.

2. Применение многокомпонентных рабочих тел в низкотемпературной технике / Лунин А. И., Могорычный В. И., Коваленко В. Н. – М.: Изд. дом МЭИ, 2009. 100с.
3. Холодильные машины: Учебник /Под ред. Л.С. Тимофеевского. СПб.: Изд-во «Политехника», 1997.
4. Теплотехника / Под общей редакцией А.М. Архарова, В.Н. Афанасьева. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 792 с.
5. Крюков А.П., Пузина Ю.Ю. Формы межфазных поверхностей при переносе массы, импульса, энергии. М.: Издательство МЭИ, 2015.
6. Дмитриев А.С. Введение в нанотеплофизику. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2015. 790с.
7. Ястребов А.К. Некоторые задачи теплообмена в однофазных и двухфазных системах, М.: Изд-во МЭИ. 2015 – 80с.

Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:
(программное обеспечение, на которое кафедра или МЭИ имеет лицензию, а также свободно распространяемое программное обеспечение)

СДО "Прометей", Майнд Видеоконференции, Open Office, Антиплагиат ВУЗ.

Интернет-ресурсы, включая профессиональные базы данных и информационные справочные системы:

Университетская информационная система «РОССИЯ»
<https://uisrussia.msu.ru>

Справочно-правовая система «Консультант+» <http://www.consultant-urist.ru>

Справочно-правовая система «Гарант» <http://www.garant.ru>

База данных Web of Science <https://apps.webofknowledge.com/>

База данных Scopus <https://www.scopus.com>

Портал открытых данных Российской Федерации <https://data.gov.ru>

База открытых данных Министерства труда и социальной защиты РФ
<https://rosmintrud.ru/opendata>

База данных Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU
<https://elibrary.ru/>

База данных профессиональных стандартов Министерства труда и социальной защиты РФ
<http://profstandart.rosmintrud.ru/obshchiy-informatsionnyy-blok/natsionalnyy-reestr-professionalnykh-standartov/>

Базы данных Министерства экономического развития РФ
<http://www.economy.gov.ru>

База открытых данных Росфинмониторинга <http://www.fedsfm.ru/opendata>

Электронная база данных «Издательство Лань» <https://e.lanbook.com>

Федеральная государственная информационная система «Национальная электронная библиотека» <https://нэб.рф>

Национальный портал онлайн обучения «Открытое образование»
<https://openedu.ru>

Электронная база данных "Polpred.com Обзор СМИ"
<https://www.polpred.com>

Официальный сайт Федерального агентства по техническому
регулированию и метрологии <http://protect.gost.ru/>

Электронная библиотека МЭИ <https://ntb.mpei.ru/e-library/index.php>.

ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:

Доцент кафедры
низких температур
к.т.н.

А.К. Ястребов

Заведующий кафедрой
низких температур
к.т.н., доцент

Ю.Ю. Пузина

Директор ИТАЭ
д.т.н., чл.-корр. РАН

А.В. Дедов