

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ

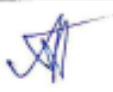
Директор ИЯТН

О.Ю. Долматов

«01» 09 2020г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**  
**ПРИЕМ 2020г.**  
**ФОРМА ОБУЧЕНИЯ очная**

| Разделение изотопов урана                            |                                        |         |     |
|------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------|-----|
| Направление подготовки/специальность                 | 14.03.02 – Ядерные физика и технологии |         |     |
| Образовательная программа (направленность (профиль)) | Ядерная физика и технологии            |         |     |
| Специализация                                        | Физика кинетических явлений            |         |     |
| Уровень образования                                  | высшее образование - бакалавриат       |         |     |
| Курс                                                 | 4                                      | семестр | 7   |
| Трудоемкость в кредитах (зачетных единицах)          | 6                                      |         |     |
| Виды учебной деятельности                            | Временной ресурс                       |         |     |
| Контактная (аудиторная) работа, ч                    | Лекции                                 |         | 32  |
|                                                      | Практические занятия                   |         | 16  |
|                                                      | Лабораторные занятия                   |         | 40  |
|                                                      | ВСЕГО                                  |         | 88  |
| Самостоятельная работа, ч                            |                                        |         | 128 |
| ИТОГО, ч                                             |                                        |         | 216 |

| Вид промежуточной аттестации                                         | Экзамсн                                                                              | Обеспечивающее подразделение | ОЯТЦ         |
|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------|
| Заведующий кафедрой -<br>руководитель отделения на<br>правах кафедры |   |                              | А.Г. Горюнов |
| Руководитель ООП                                                     |  |                              | П.Н. Бычков  |
| Преподаватель                                                        |  |                              | А.А. Орлов   |

2020 г.

## 1. Цели освоения дисциплины

Целями освоения дисциплины является формирование у обучающихся определенного ООП (п. 5 Общей характеристики ООП) состава компетенций для подготовки к профессиональной деятельности.

| Код компетенции | Наименование компетенции                                                                                                                                     | Индикаторы достижения компетенций |                                                                                                         | Составляющие результатов освоения (дескрипторы компетенции) |                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                 |                                                                                                                                                              | Код индикатора                    | Наименование индикатора достижения                                                                      | Код                                                         | Наименование                                                                                                                                                                                                                                                             |
| ПК(У)-2         | Способен проводить математическое моделирование процессов и объектов атомной отрасли с использованием стандартных методов проектирования и анализа           | И.ПК(У)-2.6                       | Демонстрирует знание и понимание динамики физических процессов, происходящих в разделительной установке | ПК(У)-2.6В1                                                 | Владеет опытом проведения физических расчетов параметров разделительных элементов, расчетов термодинамических и кинетических коэффициентов; обработки результатов этих расчетов и экспериментов; интерпретации полученных результатов в рамках изученных закономерностей |
|                 |                                                                                                                                                              |                                   |                                                                                                         | ПК(У)-2.6У1                                                 | Умеет определять массовую и объёмную производительность, применять законы кинетики и динамики для прогнозирования протекания нестационарных процессов в разделительных установках                                                                                        |
|                 |                                                                                                                                                              |                                   |                                                                                                         | ПК(У)-2.6З1                                                 | Знает теоретические основы теории разделения, компьютерные тренажеры разделительного производства                                                                                                                                                                        |
| ПК(У)-3         | Готов к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу полученных экспериментальных данных | И.ПК(У)-3.2                       | Обеспечивает эксплуатацию экспериментальных установок для разделения изотопов                           | ПК(У)-3.2В1                                                 | Владеет опытом оценивания составов произведенной изотопной продукции и их взаимосвязи с техническими характеристиками оборудования и установок                                                                                                                           |
|                 |                                                                                                                                                              |                                   |                                                                                                         | ПК(У)-3.2У1                                                 | Умеет проводить входной контроль исходного материала для разделения, выделения и получения изотопов, определять необходимые методы анализа исходного материала для установок по разделению изотопов                                                                      |
|                 |                                                                                                                                                              |                                   |                                                                                                         | ПК(У)-3.2З1                                                 | Знает правила работы с физическим оборудованием разделительного производства, типовые правила описания проводимых исследований и методики анализа и обработки результатов экспериментов.                                                                                 |
| ПК(У)-7         | Способен к расчету и проектированию деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием                                               | И.ПК(У)-7.3                       | Применяет программное обеспечение для расчета каскадов и проведения тестовых расчетов                   | ПК(У)-7.3В1                                                 | Владеет опытом анализа влияния осевой циркуляции газа, параметров и профиля циркуляционного потока на эффект разделения                                                                                                                                                  |
|                 |                                                                                                                                                              |                                   |                                                                                                         | ПК(У)-7.3У1                                                 | Умеет применять численные и аналитические методы определения внутренних параметров каскада по заданным внешним параметрам                                                                                                                                                |
|                 |                                                                                                                                                              |                                   |                                                                                                         | ПК(У)-7.3З1                                                 | Знает компоновку газовых центрифуг в технологической схеме                                                                                                                                                                                                               |

## 2. Место дисциплины (модуля) в структуре ООП

Дисциплина относится к вариативной части Блока 1 учебного плана образовательной программы (элективная дисциплина).

## 3. Планируемые результаты обучения по дисциплине

После успешного освоения дисциплины будут сформированы результаты обучения:

| Планируемые результаты обучения по дисциплине |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Индикатор достижения компетенции |
|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Код                                           | Наименование                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                  |
| РД 1                                          | Знать физико-химические свойства гексафторида урана и примесей, перспективы развития центробежной технологии обогащения урана, физические основы центробежного метода, основные понятия и термины, используемые в процессе разделения, основные характеристики разделительного элемента, ступени, каскада для разделения изотопов урана, эффект разделения за счет осевой циркуляции газа, влияние параметров и профиля циркуляционного потока на коэффициент обогащения. | И.ПК(У)-2.6                      |
| РД 2                                          | Владеть навыками использования научно-технической информации отечественных и зарубежных авторов по тематике изотопного разделения урана.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | И.ПК(У)-2.6                      |
| РД 3                                          | Знать основные элементы конструкции газовой центрифуги для разделения изотопов урана, их назначение, особенности эксплуатации газовых центрифуг, определяющие их ресурсную надежность, специфику работы основного технологического оборудования.                                                                                                                                                                                                                          | И.ПК(У)-3.2<br>И.ПК(У)-7.3       |
| РД 4                                          | Уметь выполнять обработку и анализ данных, полученных при теоретических и экспериментальных исследованиях.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | И.ПК(У)-7.23                     |
| РД 5                                          | Знать принципиальную схему построения обогатительного завода, принципы организации и типы разделительных каскадов, уравнения противоточного симметричного каскада, технологическую схему завода по обогащению изотопов урана, компоновку и маркировку основного технологического оборудования центрифужного завода, критерии эффективности работы каскада.                                                                                                                | И.ПК(У)-3.2                      |
| РД 6                                          | Владеть современными компьютерными технологиями и базами данных в своей предметной области, математического моделирования разделительных процессов.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | И.ПК(У)-2.6                      |
| РД 7                                          | Знать назначение, устройство и маркировку вспомогательных установок и систем, порядок проведения пуско-наладочных работ на блоках газовых центрифуг, способы удаления из каскадов легких и тяжелых примесей, способы обеспечения надежности работы газовых центрифуг, назначение и устройство конденсационно-испарительных установок, методику расчета внутренних параметров центрифужного каскада, критерии эффективности и оптимизации каскадов..                       | И.ПК(У)-2.6                      |
| РД 8                                          | Владеть методикой расчета и оптимизации каскадов различного профиля.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | И.ПК(У)-7.3                      |

Оценочные мероприятия текущего контроля и промежуточной аттестации представлены в календарном рейтинг-плане дисциплины.

## 4. Структура и содержание дисциплины

### Основные виды учебной деятельности

| Разделы дисциплины                                                                          | Формируемый результат обучения по дисциплине | Виды учебной деятельности | Объем времени, ч. |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------|-------------------|
| Раздел 1. Теоретические и физические основы центробежного способа разделения изотопов урана | РД 1, РД 2                                   | Лекции                    | 8                 |
|                                                                                             |                                              | Практические занятия      | 4                 |
|                                                                                             |                                              | Лабораторные занятия      | 12                |
|                                                                                             |                                              | Самостоятельная работа    | 32                |
| Раздел 2. Конструкция и особенности эксплуатации газовых центрифуг                          | РД 3, РД 4                                   | Лекции                    | 8                 |
|                                                                                             |                                              | Практические занятия      | 4                 |
|                                                                                             |                                              | Лабораторные занятия      | 12                |

|                                                                    |            |                        |    |
|--------------------------------------------------------------------|------------|------------------------|----|
|                                                                    |            | Самостоятельная работа | 32 |
| Раздел 3. Современное промышленное производство обогащенного урана | РД 5, РД 6 | Лекции                 | 8  |
|                                                                    |            | Практические занятия   | 4  |
|                                                                    |            | Лабораторные занятия   | 8  |
|                                                                    |            | Самостоятельная работа | 32 |
|                                                                    |            |                        |    |
| Раздел 4. Способы удаления из каскадов легких и тяжелых примесей   | РД 7, РД 8 | Лекции                 | 8  |
|                                                                    |            | Практические занятия   | 4  |
|                                                                    |            | Лабораторные занятия   | 8  |
|                                                                    |            | Самостоятельная работа | 32 |
|                                                                    |            |                        |    |

Содержание разделов дисциплины:

### **Раздел 1. Теоретические и физические основы центробежного способа разделения изотопов урана**

*В разделе рассмотрены физико-химические свойства гексафторида урана и примесей, перспективы развития центробежной технологии обогащения урана, физические основы центробежного метода, основные понятия и термины, используемые в процессе разделения, увеличение однократного эффекта разделения за счет осевой циркуляции газа, влияние параметров и профиля циркуляционного потока на коэффициент обогащения.*

#### **Темы лекций:**

1. Физико-химические свойства гексафторида урана, легких и примесей.
2. Физические основы центробежного метода разделения.
3. Влияние осевой циркуляции газа, параметров и профиля циркуляционного потока на эффект разделения.
4. Перспективы развития центробежной технологии обогащения урана.

#### **Темы практических занятий:**

1. Изучение описания программного обеспечения для расчета каскадов и проведение тестовых расчетов.
2. Поиск оптимальных параметров каскада для заданных внешних концентраций.

#### **Названия лабораторных работ:**

1. Устройство газовых центрифуг.
2. Подготовка к эксплуатации газовых центрифуг.
3. Проверка материала ротора на растяжение и разрыв.

### **Раздел 2. Конструкция и особенности эксплуатации газовых центрифуг**

*В разделе рассмотрены основные элементы конструкции газовой центрифуги для разделения изотопов урана: ротор, штанга, магнитная подвеска, нижняя опора, корректирующие устройства, электродвигатель, датчик сигнализатора вращения, корпус, молекулярные уплотнения, элементы для создания и поддержания потока циркуляции газа внутри ротора, универсальный мембранный клапан; особенности эксплуатации газовых центрифуг, определяющие их ресурсную надежность: гигиена внутренних полостей, необходимость поддержания глубокого вакуума и проведения вакуумной сушки, операции откачки и стравливания газовых центрифуг, недопустимость перегрева роторов, необходимость подогрева маятников при прохождении пусковых оборотов, необходимость ступенчатого разгона, необходимость проведения фреоновой обработки, необходимость подогрева роторов перед заполнением фреоном или рабочим газом, необходимость строгого поддержания гидравлического режима работы газовых центрифуг, недопустимость попадания легких примесей в работающие газовые центрифуги, недопустимость сейсмических воздействий, недопустимость торможения газовых центрифуг без*

*предварительной откачки рабочего газа.*

**Темы лекций:**

5. Конструкция газовой центрифуги.
6. Конструкция газовой центрифуги.
7. Особенности эксплуатации газовых центрифуг.
8. Особенности эксплуатации газовых центрифуг.

**Темы практических занятий:**

3. Исследование влияния модельных коэффициентов разделительной характеристики газовой центрифуги на эффективность каскада.
4. Исследование влияния нескольких потоков питания на эффективность каскада.

**Названия лабораторных работ:**

4. Компоновка газовых центрифуг в технологической схеме.
5. Контроль режимов работы газовых центрифуг.
6. Расчет каскада газовых центрифуг.

|                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------------|
| <b>Раздел 3. Современное промышленное производство обогащенного урана</b> |
|---------------------------------------------------------------------------|

*В разделе рассмотрены принципиальная схема построения обогатительного завода, принципы организации и типы разделительных каскадов, уравнения противоточного симметричного каскада, технологическая схема завода по обогащению изотопов урана, компоновка и маркировка основного технологического оборудования центрифужного завода, критерии эффективности работы каскада.*

**Темы лекций:**

9. Принципиальная схема построения обогатительного завода. Принципы организации каскадов.
10. Уравнения противоточного симметричного каскада.
11. Технологическая схема завода по обогащению изотопов урана.
12. Компоновка и маркировка основного технологического оборудования центрифужного завода.

**Темы практических занятий:**

5. Оптимизация дополнительного потока питания.
6. Оптимизация каскада из трех типов ступеней.

**Названия лабораторных работ:**

7. Структура цеха разделительного производства.
8. Газодиффузионный каскад для очистки рабочего газа от легких примесей.

|                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------|
| <b>Раздел 4. Способы удаления из каскадов легких и тяжелых примесей</b> |
|-------------------------------------------------------------------------|

*В разделе рассмотрены назначение, устройство и маркировка вспомогательных установок и систем, порядок проведения пуско-наладочных работ на блоках газовых центрифуг, способы удаления из каскадов легких и тяжелых примесей, надежность работы газовых центрифуг, назначение и устройство конденсационно-испарительных установок, методика расчета внутренних параметров центрифужного каскада.*

**Темы лекций:**

13. Вспомогательные установки и системы. Порядок проведения пуско-наладочных работ на блоках газовых центрифуг.

14. Способы удаления из каскадов легких и тяжелых примесей.
15. Конденсационно-испарительные установки.
16. Расчет внутренних параметров центрифужного каскада.

**Темы практических занятий:**

7. Оптимизация каскада с ограничениями по потоку отвала ступеней.
8. Оптимизация каскада с ограничениями по потоку питания ступеней.

**Названия лабораторных работ:**

9. Вспомогательное технологическое оборудование.
10. Механическое оборудование цеха.

**5. Организация самостоятельной работы студентов**

Самостоятельная работа студентов при изучении дисциплины (модуля) предусмотрена в следующих видах и формах:

- Работа с лекционным материалом, поиск и обзор литературы и электронных источников информации по индивидуально заданной проблеме курса;
- Опережающая самостоятельная работа;
- Изучение тем, вынесенных на самостоятельную проработку;
- Подготовка к лабораторным работам, к практическим занятиям;
- Подготовка к оценивающим мероприятиям: контрольным работам, зачету;
- Поиск, анализ, структурирование и презентация информации;
- Перевод текстов с иностранных языков;
- Исследовательская работа и участие в научных студенческих конференциях, семинарах и олимпиадах;
- Анализ научных публикаций по заранее определенной преподавателем теме;

**6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

**6.1. Учебно-методическое обеспечение**

**Основная литература:**

1. Баранов В.Ю. Изотопы: свойства, получение, применение: учебное пособие: В 2 т.: / В.Ю. Баранов. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2005. — Т. 2 — 2005. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/2104>
2. Теория каскадов для разделения бинарных и многокомпонентных изотопных смесей: учебное пособие / Г.А. Сулаберидзе, В.А. Палкин, В.Д. Борисевич, В.Д. Борман. — Москва: НИЯУ МИФИ, 2011. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/75765>.
3. Орлов А. А. Разделение изотопов урана: учебное пособие для вузов / А. А. Орлов, А. В. Абрамов; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2010. — URL: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2011/m274.pdf>.

**Дополнительная литература**

1. Оптическое и лазерно-химическое разделение изотопов в атомарных парах / П.А. Бохан, В.В. Бучанов, Д.Э. Закревский [и др.]. — 2-е изд. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2017. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/105021>
1. Борман В.Д. Физические основы разделения изотопов в газовой центрифуге: учебное пособие для вузов / Борман В.Д., Борисевич В.Д. — М.: Издательский дом МЭИ,

2017. — Текст: электронный // ЭБС "Консультант студента": [сайт]. — URL: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785383010877.html>.
2. Вергун А. П. Ионообменная технология разделения и очистки веществ: учебное пособие / А. П. Вергун, В. Ф. Мышкин, А. В. Власов; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) — Томск: 2010. — URL: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext3/m/2010/m39.pdf>.
3. Видяев Д. Г. Гидрогазодинамика разделительных процессов: учебное пособие / Д. Г. Видяев; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2010. — URL: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2011/m151.pdf>.

## 4.2. Информационное и программное обеспечение

Internet-ресурсы (в т.ч. в среде LMS MOODLE и др. образовательные и библиотечные ресурсы):

1. <https://e.lanbook.com/>
2. <https://new.znaniy.com/>
3. <https://urait.ru/>
4. <http://www.studentlibrary.ru/>
5. [www.lib.tpu.ru/](http://www.lib.tpu.ru/)
6. [www.lib.tsu.ru/](http://www.lib.tsu.ru/)
7. [www.elibrary.ru/](http://www.elibrary.ru/)
8. [www.scopus.com/](http://www.scopus.com/)
9. [www.wokinfo.com/russian/](http://www.wokinfo.com/russian/)
10. <http://www.rosatom.ru>
11. <http://window.edu.ru/>

Лицензионное программное обеспечение (в соответствии с **Перечнем лицензионного программного обеспечения ТПУ**):

7-Zip; Adobe Acrobat Reader DC; Adobe Flash Player; AkelPad; Cisco Webex Meetings; Far Manager; Google Chrome; Microsoft Office 2016 Standard Russian Academic; Mozilla Firefox ESR; Notepad++; Tracker Software PDF-XChange Viewer; WinDjView; XnView Classic; Zoom Zoom; ownCloud Desktop Client; Amazon Corretto JRE 8; Microsoft Office 2007 Standard Russian Academic; Ascon KOMPAS-3D 18 Education Concurrent MCAD ECAD; Autodesk AutoCAD Mechanical 2020 Education; Autodesk Inventor Professional 2020 Education; Document Foundation LibreOffice; MathWorks MATLAB Full Suite R2017b.

## 7. Особые требования к материально-техническому обеспечению дисциплины

В учебном процессе используется следующее лабораторное оборудование для практических и лабораторных занятий:

| №  | Наименование специальных помещений                                                                                                                                                                                                                             | Наименование оборудования                                                                                                                                                                                                                                                |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. | Аудитория для проведения учебных занятий всех типов, курсового проектирования, консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации (научная лаборатория)<br><br>634028, Томская область, г. Томск, Ленина проспект, д. 2, ауд. 239 (Учебный корпус №10) | Комплект газоаналитического оборудования (масс-спектрометр "Техмас", персональный компьютер INTEL ATOM D 410) - 1 шт.; Программно-аппаратный масс-спектрометрический комплекс - 1 шт.; Комплект учебной мебели на 13 посадочных мест; Компьютер - 1 шт.; Принтер - 1 шт. |

|    |                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                             |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2. | Аудитория для проведения учебных занятий всех типов, курсового проектирования, консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации<br><br>634028, Томская область, г. Томск, Ленина проспект, д. 2, ауд. 313 (Учебный корпус №10)                      | Комплект учебной мебели на 40 посадочных мест; Тумба подкатная - 1 шт.; Компьютер - 1 шт.; Проектор - 2 шт. |
| 3. | Аудитория для проведения учебных занятий всех типов, курсового проектирования, консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации (компьютерный класс)<br><br>634028, Томская область, г. Томск, Ленина проспект, д. 2, ауд. 242 (Учебный корпус №10) | Комплект учебной мебели на 12 посадочных мест; Компьютер - 13 шт.; Принтер - 1 шт.                          |

Рабочая программа составлена на основе Общей характеристики образовательной программы по направлению 14.04.02 – Ядерные физика и технологии, специализация – Физика кинетических явлений (приема 2020г., очная форма обучения).

Разработчик - профессор Орлов А.А.

Программа одобрена на заседании ОЯТЦ (протокол от 01.09.2020 г. № 29-д).

Заведующий кафедрой - руководитель отделения  
на правах кафедры, д.т.н.

подпись

Горюнов А.Г.