

ИНСТИТУТ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ЭЛЕКТРОНИКЕ, СПИНТРОНИКЕ И ФОТОНИКЕ  
КАФЕДРА МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ

ОДОБРЕНО НТС ИНТЭЛ

Протокол № 03/3-21

от 31.08.2021 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

**СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКО-ХИМИЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВ И ЖИДКОСТЕЙ**

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 03.04.01 Прикладные математика и физика

| Семестр | Трудоемкость,<br>кред. | Общий объем<br>курса, час. | Лекции, час. | Практич.<br>занятия, час. | Лаборат. работы,<br>час. | В форме<br>практической<br>подготовки/В | СРС, час. | КСР, час. | Форма(ы)<br>контроля,<br>экс./зач./КР/КП |
|---------|------------------------|----------------------------|--------------|---------------------------|--------------------------|---|-----------|-----------|--|
| 3       | 3                      | 108                        | 12           | 36                        | 0                        |   | 24        | 36        | 3 КР                                     |
| Итого   | 3                      | 108                        | 12           | 36                        | 0                        | 0                                       | 24        | 36        |  |

## АННОТАЦИЯ

Курс излагается как часть теоретической физики и последовательно знакомит студентов с теорией массопереноса жидкостей и газов в полимерах: изучение основных уравнений и классических задач мембранного разделения, теории свободного объема, конвективного и диффузионного механизма массопереноса. Каждая тема сопровождается физическими объяснениями и подробными выводами соответствующих уравнений.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Целями освоения учебной дисциплины является изучение органических мембранных материалов, синтетических и природных полимеров, физического и фазового состояния полимеров, основных требований к полимерным мембранным материалам.

### 2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Изучение данной дисциплины предшествует научно-исследовательской работе студентов, и обеспечивает проработку теоретических вопросов в рамках выбранного профиля подготовки, изучение современных методов исследования физических свойств полимерных материалов. В рамках курса наряду со знаниями теоретических основ студенты получают практические навыки постановки физических экспериментов в области исследования селективных явлений в мембранах и исследования полимерных материалов.

Уровень сложности теоретических и практических заданий полностью соответствует требованиям государственного образовательного стандарта.

### 3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

| Код и наименование компетенции | Код и наименование индикатора достижения компетенции |
|--------------------------------|--|
|--------------------------------|--|

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

| Задача профессиональной деятельности (ЗПД)   | Объект или область знания                 | Код и наименование профессиональной компетенции;<br>Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта) | Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции              |
|--|---|--|--|
| научно-исследовательский   |   |  |  |
| Проведение научных и аналитических исследований по отдельным разделам (этапам, заданиям) | Природные и социальные явления и процессы | ПК-1 [1] - Способен самостоятельно и (или) в составе исследовательской группы разрабатывать,               | З-ПК-1[1] - Знать основные методы и принципы научных исследований, математического |

|   |  |   |  |
|---|--|---|--|
| <p>темы (проекта) в соответствии с утвержденными планами и методиками исследований, построение физических, математических и компьютерных моделей изучаемых процессов и явлений в рамках предметной области по профилю специализации</p> |  | <p>исследовать и применять математические модели для качественного и количественного описания явлений и процессов и (или) разработки новых технических средств</p> <p><i>Основание:</i><br/>Профессиональный стандарт: 40.011</p> | <p>моделирования, основные проблемы профессиональной области, требующие использования современных научных методов исследования для качественного и количественного описания явлений и процессов и (или) разработки новых технических средств. ; У-ПК-1[1] - Уметь ставить и решать прикладные исследовательские задачи, оценивать результаты исследований; проводить научные исследования и получать новые научные и прикладные результаты самостоятельно и в составе научного коллектива; В-ПК-1[1] - Владеть навыками выбора и использования математических моделей для научных исследований и (или) разработки новых технических средств самостоятельно и (или) в составе исследовательской группы.</p> |
| <p>Участие в проведении наблюдений и измерений, выполнении эксперимента и обработке данных с использованием современных компьютерных технологий</p>   | <p>Природные и социальные явления и процессы</p> | <p>ПК-3 [1] - Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием, приборами и установками в избранной предметной области в соответствии с целями программы специализированной</p>                | <p>3-ПК-3[1] - Знать основные методы исследований, принципы работы приборов и установок в избранной предметной области ; У-ПК-3[1] - Уметь выбирать необходимые технические средства для проведения экспериментальных</p>  |

|   |  |   |   |
|---|--|---|---|
|   |  | <p>подготовки магистра</p> <p><i>Основание:</i><br/>Профессиональный стандарт: 40.011</p>   | <p>исследований в избранной предметной области, обрабатывать полученные экспериментальные результаты;</p> <p>В-ПК-3[1] - Владеть навыками работы с исследовательским и испытательным оборудованием, приборами и установками в избранной предметной области</p>  |
| <p>Проведение фундаментальных и прикладных математических и физических исследований, направленных на решение инженерных, технических и информационных задач</p> | <p>инновационный;</p> <p>Природные и социальные явления и процессы</p> | <p>ПК-5 [1] - Способен применять физические методы теоретического и экспериментального исследования, методы математического анализа и моделирования для постановки задач по развитию, внедрению и коммерциализации новых наукоемких технологий</p> <p><i>Основание:</i><br/>Профессиональный стандарт: 40.011</p> | <p>З-ПК-5[1] - Знать физические методы теоретического и экспериментального исследования, методы математического анализа и моделирования, принципы экспертизы продукции для постановки задач по развитию, внедрению и коммерциализации новых наукоемких технологий ;</p> <p>У-ПК-5[1] - Уметь применять физические методы теоретического и экспериментального исследования, методы математического анализа и моделирования для постановки задач по развитию, внедрению и коммерциализации новых наукоемких технологий;</p> <p>В-ПК-5[1] - Владеть навыками теоретического и экспериментального исследования, математического анализа и моделирования для</p> |

|  |  |  |  |
|--|--|--|--|
|  |  |  | постановки задач по развитию, внедрению и коммерциализации новых наукоемких технологий |
|--|--|--|--|

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Разделы учебной дисциплины, их объем, сроки изучения и формы контроля:

| № п.п | Наименование раздела учебной дисциплины | Недели | Лекции/ Практик. (семинары) / Лабораторные работы, час. | Обязат. текущий контроль (форма*, неделя) | Максимальный балл за раздел** | Аттестация раздела (форма*, неделя) | Индикаторы освоения компетенции  |
|-------|---|--------|---|---|-------------------------------|-------------------------------------|--|
|       | <i>3 Семестр</i>                        |        |   |   |                               |                                     |  |
| 1     | Первый раздел                           | 1-8    | 6/18/0  |   | 25                            | Зд-8                                | 3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3, 3-ПК-5, У-ПК-5, В-ПК-5 |
| 2     | Второй раздел                           | 9-16   | 6/18/0  |   | 25                            | Зд-16                               | 3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3, 3-ПК-5, У-ПК-5,        |

|  |   |  |         |  |    |        |   |
|--|---|--|---------|--|----|--------|---|
|  |   |  |         |  |    |        | В-ПК-5  |
|  | <i>Итого за 3 Семестр</i>                   |  | 12/36/0 |  | 50 |        |   |
|  | <b>Контрольные мероприятия за 3 Семестр</b> |  |         |  | 50 | ЗО, КР | 3-ПК-1,<br>У-ПК-1,<br>В-ПК-1,<br>3-ПК-3,<br>У-ПК-3,<br>В-ПК-3,<br>3-ПК-5,<br>У-ПК-5,<br>В-ПК-5,<br>3-ПК-1,<br>У-ПК-1,<br>В-ПК-1,<br>3-ПК-3,<br>У-ПК-3,<br>В-ПК-3,<br>3-ПК-5,<br>У-ПК-5,<br>В-ПК-5 |

\* – сокращенное наименование формы контроля

\*\* – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

| <b>Обозначение</b> | <b>Полное наименование</b> |
|--------------------|----------------------------|
| ЗО                 | Зачет с оценкой            |
| Зд                 | Задание (задача)           |
| З                  | Зачет                      |
| КР                 | Курсовая работа            |

## КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

| Недел<br>и | Темы занятий / Содержание   | Лек.,<br>час.          | Пр./сем.<br>, час. | Лаб.,<br>час. |
|------------|---|------------------------|--------------------|---------------|
|            | <i>3 Семестр</i>  | 12                     | 36                 | 0             |
| <b>1-8</b> | <b>Первый раздел</b>  | 6                      | 18                 | 0             |
| 1 - 8      | <p><b>Основные типы полимерных мембранных материалов. Основные закономерности селективного переноса в полимерных пористых мембранах.</b></p> <p>Тема 1 Разделение жидких и газообразных веществ с помощью мембран, основные физические и физико-химические принципы, лежащие в основе мембранных способов разделения, основных типы мембранного разделения, примеры их практической реализации. Тема 2 Основные типы мембранных материалов. Органические мембранные материалы, синтетические и природные полимеры, физическое и фазовое состояние полимеров, основные требования к полимерным материалам мембран. Тема 3 Неорганические материалы: керамика, цеолиты, металлы и сплавы. Преимущества и недостатки полимерных и неорганических материалов мембран. Тема 4 Перенос газовых смесей в свободно-молекулярном режиме через пористые мембраны, особенности переноса в системах жидкость-мембрана-пар и жидкость-мембрана-жидкость. Основные понятия о процессе трансмембранного переноса в непористых мембранах. Кинетическая и термодинамическая компоненты трансмембранного переноса веществ: объемные процессы и процессы на границе раздела фаз мембрана/вещество. Тема 5 Феноменологический подход к описанию сорбции, диффузии и проницаемости газов и паров, вывод первого и второго закона Фика, закон Генри и температурные зависимости коэффициентов растворимости, диффузии и проницаемости. Основные экспериментальные закономерности поведения параметров переноса для типичных мембранных материалов. Тема 6 Зависимость коэффициента растворимости от температур кипения газов, связь растворимости газов с их силовыми постоянными потенциала Леннарда-Джонса (6-12). Вывод основных уравнения взаимосвязи коэффициентов растворимости и параметров потенциала Леннарда-Джонса. Тема 7 Основные физико-химические закономерности диффузии газов в полимерных мембранах. Зависимость коэффициента диффузии от размера и формы диффузанта (критический объем, сечение, анизодиаметричность молекулы и т.д.). Тема 8 Математическое описание диффузии: решение нестационарных уравнений Фика для различных начальных и граничных условий. Определение профиля</p> | Всего аудиторных часов |                    |               |
|            |   | 6                      | 18                 | 0             |
|            |   | Онлайн                 | 0                  | 0             |

|        |   |                        |    |   |
|--------|---|------------------------|----|---|
|        | распределения концентраций по толщине мембраны. Растворение газов и жидкостей в приповерхностной области мембраны. Проницаемость мембраны. Расчет потока вещества через мембрану.   |                        |    |   |
| 9-16   | <b>Второй раздел</b>  | 6                      | 18 | 0 |
| 9 - 16 | <b>Основные физико-химические закономерности растворения и диффузии газов в полимерных мембранах. Полимерные материалы в мембранных процессах</b><br>Тема 9 Микроскопические теории диффузии, модели активированной диффузии и модели свободного объема. Теоретические представления о процессах сорбции низкомолекулярных веществ в высокоэластических и стеклообразных полимерах. Модели сорбции и диффузии газов и паров в микропористых полимерных и неорганических материалах.<br>Тема 10 Основные понятия реализации активного транспорта компонентов разделяемой смеси, организация процесса трансмембранного переноса с помощью переносчиков и по эстафетному механизму, перенос водорода через металлические мембраны, ионный транспорт в керамических мембранах.<br>Тема 11 Особенности сорбции, диффузии и проницаемости веществ, вступающих в обратимые специфические взаимодействия с материалом мембраны.<br>Тема 12 Эффекты пластификации полимеров, концентрационные зависимости растворимости, диффузии и проницаемости низкомолекулярных веществ в полимерах. Термодинамика и прямое моделирование процессов переноса.<br>Тема 13 Феноменология мембранного переноса с позиций термодинамики неравновесных процессов. Компьютерный анализ селективного переноса веществ на микроуровне методами Монте-Карло и молекулярной динамики.<br>Тема 14 Основные составляющие селективного трансмембранного переноса. Основные закономерности разделения газов, паров и жидкостей по диффузионному механизму, требования, предъявляемые к полимерному материалу мембраны, примеры разделения по диффузионному механизму.<br>Тема 15 Основные закономерности разделения газов, паров и жидкостей по сорбционному механизму, требования, предъявляемые к полимерному материалу мембраны, примеры разделения по сорбционному механизму. Разделение газов и паров при реализации обратимых специфических взаимодействий с материалом мембраны одного из компонентов разделяемой смеси, основные закономерности, наблюдаемые в этих условиях, зависимость селективности разделения от состава смеси и температуры, разделение жидкостей методом первапорации, селективность процесса, эффект взаимного | Всего аудиторных часов |    |   |
|        |   | 6                      | 18 | 0 |
|        |   | Онлайн                 |    |   |
|        |   | 0                      | 0  | 0 |



|  |   |  |  |  |
|--|---|--|--|--|
|  | влияния компонентов при трансмембранном переносе. |  |  |  |
|--|---|--|--|--|

Сокращенные наименования онлайн опций:

| <b>Обозначение</b> | <b>Полное наименование</b>       |
|--------------------|----------------------------------|
| ЭК                 | Электронный курс                 |
| ПМ                 | Полнотекстовый материал          |
| ПЛ                 | Полнотекстовые лекции            |
| ВМ                 | Видео-материалы                  |
| АМ                 | Аудио-материалы                  |
| Прз                | Презентации                      |
| Т                  | Тесты                            |
| ЭСМ                | Электронные справочные материалы |
| ИС                 | Интерактивный сайт               |

## 5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Курс реализует компетентностный подход и предусматривает широкое использование в учебном процессе активных форм проведения занятий (компьютерные практикумы, разбор домашних заданий, система контрольно-измерительных материалов, включая тесты) а также, проведение занятий в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков студентов.

## 6. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

| <b>Компетенция</b> | <b>Индикаторы освоения</b> | <b>Аттестационное мероприятие (КП 1)</b> |
|--------------------|----------------------------|--|
| ПК-1               | З-ПК-1                     | ЗО, КР, Зд-8, Зд-16                      |
|                    | У-ПК-1                     | ЗО, КР, Зд-8, Зд-16                      |
|                    | В-ПК-1                     | ЗО, КР, Зд-8, Зд-16                      |
| ПК-3               | З-ПК-3                     | ЗО, КР, Зд-8, Зд-16                      |
|                    | У-ПК-3                     | ЗО, КР, Зд-8, Зд-16                      |
|                    | В-ПК-3                     | ЗО, КР, Зд-8, Зд-16                      |
| ПК-5               | З-ПК-5                     | ЗО, КР, Зд-8, Зд-16                      |
|                    | У-ПК-5                     | ЗО, КР, Зд-8, Зд-16                      |
|                    | В-ПК-5                     | ЗО, КР, Зд-8, Зд-16                      |

## Шкалы оценки образовательных достижений

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

| Сумма баллов | Оценка по 4-ех балльной шкале    | Оценка ECTS | Требования к уровню освоению учебной дисциплины   |
|--------------|----------------------------------|-------------|---|
| 90-100       | 5 – <i>«отлично»</i>             | A           | Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.                                     |
| 85-89        | 4 – <i>«хорошо»</i>              | B           | Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.   |
| 75-84        |                                  | C           |   |
| 70-74        |                                  | D           |   |
| 65-69        | 3 – <i>«удовлетворительно»</i>   | E           | Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.  |
| 60-64        |                                  |             |   |
| Ниже 60      | 2 – <i>«неудовлетворительно»</i> | F           | Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине. |

## 7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

- 66 M54 Membrane Engineering for the Treatment of Gases Vol.1 Gas-separation Problems with Membranes, Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2011
- ЭИ М 64 Молекулярная физика и термодинамика в вопросах и задачах : , Санкт-Петербург: Лань, 2022

3. ЭИ К 90 Химия и физика полимеров : , Санкт-Петербург: Лань, 2022
4. 620 Б43 Исследование нанопористых материалов методом жидкостной порометрии : лабораторная работа, А. А. Белогорлов, А. М. Грехов, Москва: НИЯУ МИФИ, 2011
5. 620 Б43 Исследование проницаемости жидкостей через нанопористые мембраны при повышенных давлениях : лабораторная работа, А. А. Белогорлов, А. М. Грехов, Москва: НИЯУ МИФИ, 2010
6. 66 С24 Введение в мембранную технологию : , А. А. Свитцов, Москва: ДеЛи принт, 2007
7. 62 М90 Введение в мембранную технологию : , М. Мулдер, Москва: Мир, 1999
8. 57 Н21 Физическая химия мембран : , М. Накагаки; Пер. с яп., М.: Мир, 1991

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 57 М49 Мембраны и мембранные технологии : , Москва: Научный мир, 2013
2. 620 Н25 Наноструктурные материалы : , Москва: Техносфера, 2009
3. 001 М82 Научная сессия МИФИ-2008 Т.4 Молекулярно-селективные и нелинейные явления и процессы. Химическая физика, горение и детонация. Физика, химия и компьютерная разработка материалов. Прикладная ядерная физика, , Москва: , 2008

#### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

#### LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

<https://online.mephi.ru/>

<http://library.mephi.ru/>

### **8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

### **9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ**

При подготовке к текущему контролю и зачету рекомендуется пользоваться следующей литературой:

1. Введение в мембранную технологию - Мулдер М. 1999
2. Физикохимия мембранных процессов - Тимашев С.Ф, 1988
3. Statistical Thermodynamics Of Surfaces, Interfaces, And Membranes (Frontiers in Physics) world scientific 2003

## 10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ

При подготовке к текущему контролю и зачету рекомендуется пользоваться следующей литературой:

1. Введение в мембранную технологию - Мулдер М. 1999
2. Физикохимия мембранных процессов - Тимашев С.Ф, 1988
3. Statistical Thermodynamics Of Surfaces, Interfaces, And Membranes (Frontiers in Physics) world scientific 2003

Автор(ы):

Еремин Юрий Сергеевич

Грехов Алексей Михайлович, к.ф.-м.н.

Рецензент(ы):

Волков В.В.