

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и  
дизайна»  
(СПбГУПТД)

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ВШТЭ



## Рабочая программа дисциплины

**Б1.О.05**

Процессы массопереноса в системах с участием твердой фазы

Учебный план: \_\_\_\_\_ ФГОС3++vm180401.19-1\_23-13.plx

Кафедра:  Процессов и аппаратов химической технологии

Направление подготовки:  
(специальность) 18.04.01 Химическая технология

Профиль подготовки:  
(специализация) Химическая технология переработки древесины

Уровень образования: магистратура

Форма обучения: очно-заочная

### План учебного процесса

Семестр (курс для ЗАО)	Контактная работа Практ. занятия	Сам. работа	Контроль, час.	Трудоём- кость, ЗЕТ	Форма промежуточной аттестации
1	УП	17	55	36	Экзамен
	РПД	17	55	36	
Итого	УП	17	55	36	
	РПД	17	55	36	

Рабочая программа дисциплины составлена в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 18.04.01 Химическая технология, утверждённым приказом Минобрнауки России от 07.08.2020 г. № 910

Составитель (и):

Кандидат технических наук, заведующий кафедрой

Никифоров А.О.

От кафедры составителя:

Заведующий кафедрой процессов и аппаратов химической технологии

Никифоров А.О.

От выпускающей кафедры:

Заведующий кафедрой

Смирнова Е.Г.

Методический отдел:

Смирнова В.Г.

## 1 ВВЕДЕНИЕ К РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЕ ДИСЦИПЛИНЫ

**1.1 Цель дисциплины:** Основной целью изучения дисциплины является приобретение студентами знаний включающих: общие понятия, закономерности, основные уравнения процессов массопереноса в системах с участием твердой фазы, умение применять приобретенную совокупность знаний при выполнении расчетов основных химико-технологических процессов получения продуктов тонкого органического синтеза и выполнение элементов проектных разработок.

### 1.2 Задачи дисциплины:

Главная задача изучения дисциплины состоит в том, чтобы научить студентов понимать основные закономерности процессов тепло- и массопереноса, грамотно использовать полученные знания для решения конкретных задач технологии получения продуктов тонкого органического синтеза.

### 1.3 Требования к предварительной подготовке обучающегося:

Предварительная подготовка предполагает создание основы для формирования компетенций, указанных в п. 2, при изучении дисциплин:

Физико-химические основы техники и технологии ЦБП

Теоретические основы переработки природных полимеров

Процессы массопереноса в системах с участием твердой фазы (по профилю)

Теоретические основы обработки и переработки целлюлозы, бумаги и картона

Математические методы в химической технологии

## 2 КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

**ОПК-2: Способен использовать современные приборы и методики, организовывать проведение экспериментов и испытаний, проводить их обработку и анализировать их результаты**

**Знать:** основные принципы массопереноса, действующие силы процесса, факторы, влияющие на процесс массопереноса в системах с участием твердой фазы.

**Уметь:** использовать знания фундаментальных наук при проведении исследований массопереноса в системах с участием твердой фазы.

**Владеть:** навыками разработки планов исследований процессов массопереноса, влияния внешних и внутренних факторов на процесс массопереноса.

### 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Наименование и содержание разделов, тем и учебных занятий	Семестр (курс для ЗАО)	Контактная работа	СР (часы)	Инновац. формы занятий	Форма текущего контроля
		Пр. (часы)			
Раздел 1. Введение в массообменные процессы в химической технологии переработки древесины.	1				О
Тема 1. Проект лиственница. Роль массообменных процессов (экстракции) в создании нового вида товарной продукции с выводом на мировые рынки. Ценные компоненты содержащиеся в древесине лиственницы, способы их извлечения. Разработка новых высокоэффективных процессов и аппаратов для обеспечения выпуска высококачественной продукции, экономии материальных и энергетических ресурсов и охраны окружающей среды от выбросов предприятий		2	4	ИЛ	
Тема 2. Массообменные процессы. Классификация. Основные понятия, определения. Экстракция в системе жидкость твёрдое тело. Классификация процессов. Основы расчётов типовых процессов. Материальный и тепловой балансы процесса. Движущая сила и кинетические коэффициенты процесса экстракции. Общий вид уравнений скорости процессов переноса. Расчет основных технологических параметров процесса экстракции.		3	6		
Раздел 2. Изучение теоретических закономерностей, описывающих процесс экстракции и растворения в химической технологии переработки древесины.					
Тема 3. Основные зависимости, описывающие процесс экстракции. Расчёт основных технологических параметров процесса. Расчёт конструктивных параметров экстракционных аппаратов.		3	2		
Тема 4. Основные зависимости, описывающие процесс растворения. Расчёт основных технологических параметров процесса. Расчёт конструктивных параметров аппаратов для растворения.		3	4		

Раздел 3. Изучение теоретических закономерностей, описывающих процесс сушки и адсорбции в химической технологии переработки древесины.				
Тема 5. Основные зависимости, описывающие процесс сушки. Расчёт основных технологических параметров процесса. Расчёт конструктивных параметров сушильных установок	3	19		0
Тема 6. Основные зависимости, описывающие процесс адсорбции. Расчёт основных технологических параметров процесса. Расчёт конструктивных параметров адсорберов.	3	20		
Итого в семестре (на курсе для ЗАО)	17	55		
Консультации и промежуточная аттестация (Экзамен)	2,5	33,5		
<b>Всего контактная работа и СР по дисциплине</b>	19,5	88,5		

#### 4 КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Курсовое проектирование учебным планом не предусмотрено

#### 5. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

##### 5.1 Описание показателей, критериев и системы оценивания результатов обучения

##### 5.1.1 Показатели оценивания

Код компетенции	Показатели оценивания результатов обучения	Наименование оценочного средства
ОПК-2	<p>1. Излагает основные принципы массопереноса, действующие силы процесса, факторы, влияющие на процесс массопереноса в системах с участием твердой фазы.</p> <p>2. Демонстрирует применение знаний фундаментальных наук при проведении исследований массопереноса в системах с участием твердой фазы.</p> <p>3. Использует навыки разработки планов исследований процессов массопереноса, влияния внешних и внутренних факторов на процесс массопереноса.</p>	<p>1. Вопросы устного собеседования.</p> <p>2. Практико-ориентированные задания.</p>

##### 5.1.2 Система и критерии оценивания

Шкала оценивания	Критерии оценивания сформированности компетенций	
	Устное собеседование	Письменная работа
5 (отлично)	Обучающийся показывает всесторонние знания в области процессов и аппаратного их оформления. Владеет основными понятиями и терминологией во время ответов. Хорошо знаком с основной и дополнительной литературой. Целеустремленно использует и применяет базовые знания в области физико-математических наук. Проявляет эрудицию при работе с учебным материалом.	Обучающийся показывает всесторонние знания в области процессов и аппаратного их оформления. Владеет основными понятиями и терминологией во время ответов. Хорошо знаком с основной и дополнительной литературой. Целеустремленно использует и применяет базовые знания в области физико-математических наук. Проявляет эрудицию при работе с учебным материалом.

4 (хорошо)	Обучающийся показывает достаточный уровень знаний по основам теории процессов. В целом разбирается в терминологии. Усвоил основную литературу; допускает некоторые погрешности и несущественные ошибки в ответах на вопросы экзаменационного билета и в ответах на дополнительные вопросы преподавателя.	Обучающийся показывает достаточный уровень знаний по основам теории процессов. В целом разбирается в терминологии. Усвоил основную литературу; допускает некоторые погрешности и несущественные ошибки в ответах на вопросы экзаменационного билета и в ответах на дополнительные вопросы преподавателя.
3 (удовлетворительно)	Обучающийся показывает знания учебного материала из лекций и основной литературы. В целом показывает знания базовых законов по гидравлическим, тепловым и массообменным процессам. Допускает существенные ошибки в ответах, но может их устранить под руководством преподавателя.	Обучающийся показывает знания учебного материала из лекций и основной литературы. В целом показывает знания базовых законов по гидравлическим, тепловым и массообменным процессам. Допускает существенные ошибки в ответах, но может их устранить под руководством преподавателя.
2 (неудовлетворительно)	Обучающийся не имеет достаточного уровня знаний дисциплины. Путается в понятиях, терминологии и формулировках. Плохо знает литературу. Допускает существенные и принципиальные ошибки и не может их устранить даже с помощью преподавателя. Списывание, попытка использования неразрешенных технических средств или подсказки другого человека.	Обучающийся не имеет достаточного уровня знаний дисциплины. Путается в понятиях, терминологии и формулировках. Плохо знает литературу. Допускает существенные и принципиальные ошибки и не может их устранить даже с помощью преподавателя. Списывание, попытка использования неразрешенных технических средств или подсказки другого человека.

## 5.2 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

### 5.2.1 Перечень контрольных вопросов

№ п/п	Формулировки вопросов
Семестр 1	
1	Механизм переноса массы в макрокапиллярах.
2	Массоперенос в микрокапиллярах. Кнудсеновская диффузия.
3	Структура и характеристики капиллярно-пористых материалов.
4	Массопроводность реального капиллярно-пористого тела. Критерий Био.
5	Уравнение стационарной диффузии для цилиндрического капиллярно-пористого тела.
6	Актуальные проблемы, связанные с экстракцией ценных компонентов из древесины лиственницы.
7	Экстрактивные вещества древесины лиственницы.
8	Физико-механические свойства древесины лиственницы.
9	Извлечение экстрактивных веществ.
10	Влияние различных факторов на процесс экстракции.
11	Теоретические представления о механизме пульсационных явлений.
12	Описание экспериментальных установок.
13	Методики проведения экстракции из древесины лиственницы.
14	Практическое применение полученных результатов.
15	Расчёт экономической эффективности экстракционной установки.
16	Сравнительная оценка способов экстракции древесины лиственницы.
17	Пути повышения эффективности процесса экстракции.
18	Способы сушки. Конвективная сушка и сушильные агенты.
19	Исследование кинетики сушки дисперсных материалов.
20	Параметры влажного воздуха. Диаграмма Рамзина.
21	Материальный и тепловой баланс сушильных установок.
22	Природные и синтетические сорбенты. Структура сорбентов.
23	Изотермы адсорбции Уравнения Лэнгмюра, Фрейндлиха.
24	Микропористые сорбенты. Уравнение Дубинина.

25	Кинетика адсорбции.
26	Динамика адсорбции. Уравнение Шилова.
27	Схемы конструкций адсорберов.
28	Схемы конструкций адсорберов.
29	Математическое описание и расчеты адсорбционных установок.
30	Расчеты адсорбционных установок с движущимся слоем адсорбента.
31	Расчеты адсорбционных установок с кипящим слоем адсорбента.

### 5.2.2 Типовые тестовые задания

Не предусмотрено.

### 5.2.3 Типовые практико-ориентированные задания (задачи, кейсы)

Пример 1. Определить количество поглощенного CS<sub>2</sub> 1 кг цеолита NaA при 20 °С и парциальном давлении CS<sub>2</sub>  $p = 30$  мм рт. ст. Система NaA – CS<sub>2</sub> описывается уравнением изотермы (1.3). Коэффициент аффинности для CS<sub>2</sub>  $\chi = 2,08$ ; структурная константа для NaA  $B = 4,9 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-2}$ ; параметр  $W_0 = 0,205 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Пример 2. Вычислить время окончания процесса адсорбции внутри сферической частицы активированного угля СКТ при ее заполнении бензолом при следующих условиях: диаметр частицы  $d = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; концентрация адсорбтива в окружающей частицу газе  $C_0 = 20 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ ; температура процесса  $t = 20 \text{ °С}$ ; коэффициент эффективной диффузии бензола через насыщенный слой внутри частиц  $D_{\text{эф}} = 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Пример 3. Частицами активированного угля сферической формы диаметром  $d = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  адсорбируется хлористый этил при постоянном его парциальном давлении в окружающей частицы среде  $p = 1,5$  мм рт.ст. и температуре 20 °С. Равновесие описывается изотермой Ленгмюра с параметрами  $aM \zeta = 0,55 \text{ кг/кг}$  и  $b = 0,013 \text{ мм рт.ст.}$  Определить среднюю концентрацию хлористого этила в первоначально чистых частицах угля через 200 с после начала адсорбции. Коэффициент диффузии хлористого этила в воздухе при 20 °С принять  $D = 7,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; плотность частицы угля  $\rho_u = 1,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

Пример 4. Вычислить значение коэффициента массоотдачи от потока воздуха, содержащего примесь сероуглерода, фильтрующегося через неподвижный слой сферических частиц адсорбента диаметром  $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Массовый поток воздуха  $0,50 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Температура воздуха 20 °С. Порозность неподвижного слоя  $\epsilon_0 = 0,4$ .

Пример 5. Найти значение общего коэффициента массопередачи при адсорбции паров воды из потока воздуха в аппарате с псевдоожиженным слоем сферических частиц цеолита NaA; диаметр частиц  $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Температура изотермического процесса 20 °С; объемный расход газа на  $1 \text{ м}^2$  поперечного сечения слоя  $5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Концентрация паров влаги в поступающем воздухе  $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ .

Пример 6. Определить максимальное и реальное время защитного действия неподвижного слоя активированного угля СКТ высотой 400 мм при фильтровании через него потока воздуха с начальной концентрацией паров бензола  $C_0 = 25 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$  и температурой 20 °С. Скорость воздуха на полное сечение аппарата 0,46 м/с; изотерма адсорбции прямоугольная; равновесная емкость частиц адсорбента  $a^*m = 27 \text{ кг/м}^3$  (рис.1.2); порозность слоя  $\epsilon_0 = 0,38$ . Потеря времени защитного действия слоя согласно опытным данным  $t_0 = 82 \text{ с}$ .

Пример 7. Влажный материал, содержащий 280 г влаги на 1 кг абсолютно сухой основы, высушивается до состояния, соответствующего содержанию 70 г на 1 кг абсолютно сухого материала. Расход поступающего в сушилку влажного материала  $G_n = 2,0 \text{ т/ч}$ . Определить количество высушенного материала и испаряемой влаги.

Пример 8. Определить количество удаляемой из 1 кг влажного материала влаги при его высушивании: а) от 120 до 60 % и б) от 12 до 6 % (на абсолютно сухой материал).

Пример 9. Вычислить влагосодержание и энтальпию влажного воздуха при температуре  $t = 30 \text{ °С}$ , относительной влажности  $\phi = 0,75$  (75 %) и общем давлении  $P = 0,0981 \text{ МПа}$  ( $1 \text{ кгс}/\text{см}^2$ ).

Пример 10. По данным предыдущего примера вычислить удельный объем влажного воздуха, приходящийся на 1 кг сухого воздуха, т.е. на  $(1+x)$  кг паровоздушной смеси.

Пример 11. Определить влагосодержание воздуха при  $t = 150 \text{ °С}$ , общем давлении  $P = 760 \text{ мм рт. ст.}$  и влагосодержании  $x = 0,070 \text{ кг/кг сух. воздуха}$ .

### 5.3 Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, владений (навыков и (или) практического опыта деятельности)

#### 5.3.1 Условия допуска обучающегося к промежуточной аттестации и порядок ликвидации академической задолженности

Проведение промежуточной аттестации регламентировано локальным нормативным актом СПбГУПТД «Положение о проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся»

#### 5.3.2 Форма проведения промежуточной аттестации по дисциплине

Устная  Письменная  Компьютерное тестирование  Иная

#### 5.3.3 Особенности проведения промежуточной аттестации по дисциплине

Возможность пользоваться справочными таблицами, компьютером;  
Время на подготовку ответа на экзамене 45 минут.

## 6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 6.1 Учебная литература

Автор	Заглавие	Издательство	Год издания	Ссылка
<b>6.1.1 Основная учебная литература</b>				
Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М.	Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи): учебное пособие для вузов	Санкт-Петербург: ХИМИЗДАТ	2010	<a href="https://ibooks.ru/reading.php?short=1&amp;productid=25202">https://ibooks.ru/reading.php?short=1&amp;productid=25202</a>
Н.П. Мидуков, В.С. Куров, Никифоров А.О.	Массообменные процессы в целлюлозно-бумажной промышленности [Текст] : учеб. пособие	М-во образования и науки РФ, СПбГТУРП. – СПб.: СПбГТУРП	2015	<a href="http://nizrp.narod.ru/metod/kafpriapxt/2.pdf">http://nizrp.narod.ru/metod/kafpriapxt/2.pdf</a>
<b>6.1.2 Дополнительная учебная литература</b>				
М.М. Ишанходжаева	Физическая химия. Процессы массообмена в системах с твердой фазой [Текст]. Ч. III: учебно-методическое пособие	М-во образования и науки РФ, СПбГТУРП. – СПб.: СПбГТУРП	2014	<a href="http://nizrp.narod.ru/metod/kaffizikollchem/2.pdf">http://nizrp.narod.ru/metod/kaffizikollchem/2.pdf</a>
М.М. Ишанходжаева	Физическая химия [Текст]. Ч. I. Диффузия в системах с твердой фазой: учебно-методическое пособие	М-во образования и науки РФ, СПбГТУРП. – СПб.: СПбГТУРП	2012	<a href="http://nizrp.narod.ru/fizchem.htm">http://nizrp.narod.ru/fizchem.htm</a>

### 6.2 Перечень профессиональных баз данных и информационно-справочных систем

Электронно-библиотечная система IPRbooks [Электронный ресурс]. URL: <http://www.iprbookshop.ru/>  
Электронная библиотека ВШТЭ СПб ГУПТД [Электронный ресурс]. URL: <http://nizrp.narod.ru>  
Электронно-библиотечная система «Айбукс» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ibooks.ru/>

### 6.3 Перечень лицензионного и свободно распространяемого программного обеспечения

MicrosoftWindows 8  
MicrosoftOfficeProfessional 2013  
PTC Mathcad 15  
AutoCADDesign



#### 6.4 Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине

Компьютерный класс с мультимедийным комплексом и выходом в Интернет.

Демонстрационные: стенд, плакаты (адсорбер, экстрактор, реактор)

Аудитория	Оснащение
Учебная аудитория	Мультимедийное оборудование, специализированная мебель, доска