

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Шитикова Александра Васильевна

Должность: И.о. директора института агrobiотехнологий

Дата подписания документа: 2026 10:55:07

Уникальный программный ключ:

fcd01ecb1fdf76896cc51f245ad12c3f716ce658



МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –

МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА

(ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева)

Институт агrobiотехнологий

Кафедра биотехнологии

УТВЕРЖДАЮ:

И. о. директора института
агrobiотехнологий

Шитикова А.В.

“28” 08 2025 г.



**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ
Б1.О.08 «МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ»**

для подготовки магистров

ФГОС ВО 3++

Направление: 19.04.01 – Биотехнология

Направленность: Биоинженерия и клеточные биотехнологии

Курс 1

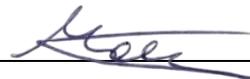
Семестр 2

Форма обучения – очная

Год начала подготовки 2025

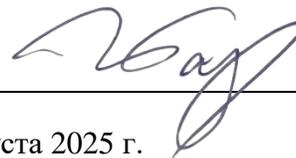
Москва, 2025

Разработчики: Моисеенко К.В., канд. биол. наук, доцент



«28» августа 2025 г.

Рецензент: Тараканов И.Г., д-р биол. наук, профессор



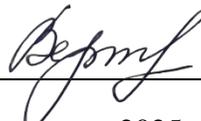
«28» августа 2025 г.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО 3++, профессионального стандарта и учебного плана по направлению подготовки 19.04.01 – Биотехнология.

Программа обсуждена на заседании кафедры биотехнологии, протокол № 1 от «28» августа 2025 г.

И.о. зав. кафедрой:

Вертикова Е.А., доктор с.-х. наук, профессор



«28» августа 2025 г..

Согласовано:

Председатель учебно-методической комиссии Института агробиотехнологии:

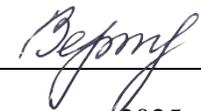
Шитикова А.В., доктор с.-х. наук, профессор



«28» августа 2025 г.

И.о. заведующего выпускающей кафедрой биотехнологии:

Вертикова Е.А., доктор с.-х. наук, профессор



«28» августа 2025 г.

Заведующий отделом комплектования ЦНБ



(подпись)

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ	3
АННОТАЦИЯ.....	4
1. ЦЕЛЬ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....	5
2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ.....	5
3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ.....	5
4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	10
4.1 Распределение трудоёмкости дисциплины по видам работ	10
4.2 Содержание дисциплины	11
4.3 Лекции, практические занятия.....	13
5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	18
6. ТЕКУЩИЙ КОНТРОЛЬ УСПЕВАЕМОСТИ И ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ	18
6.1. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений и навыков и (или) опыта деятельности	18
6.1.1. Примерные вопросы для обсуждения на практических занятиях.....	18
6.1.2. Примерные вопросы для тестирования.....	19
6.1.3 Перечень вопросов, выносимых на промежуточную аттестацию (экзамен):	19
6.2. Описание показателей и критериев контроля успеваемости, описание шкал оценивания	20
7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ ..	21
7.1 Основная литература	21
7.2 Дополнительная литература.....	21
7.3 Методические указания, рекомендации и другие материалы к занятиям	22
8. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ	22
9. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ СТУДЕНТАМ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ...	23
10. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПРЕПОДАВАТЕЛЯМ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ.....	25
РЕЦЕНЗИЯ	26
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ	27

АННОТАЦИЯ

рабочей программы учебной дисциплины Б1.О.08 «Методы моделирования биотехнологических процессов» для подготовки магистра по направлению 19.04.01 – «Биоинженерия и клеточные биотехнологии»

Цель освоения дисциплины: формирование у студентов теоретических знаний и практических умений в области математического моделирования, анализа и оптимизации биотехнологических процессов, включая кинетику роста клеток, формирование продуктов, работу биореакторов и систем очистки; развитие навыков применения современных программных средств и вычислительных методов для решения инженерных задач в биотехнологии.

Место дисциплины в учебном плане: дисциплина включена в обязательную часть учебного плана по направлению подготовки 19.04.01 – Биотехнология.

Требования к результатам освоения дисциплины: в результате освоения дисциплины формируются следующие компетенции: ОПК-2, ОПК-3, ОПК-4, ОПК-6.

Краткое содержание дисциплины: Курс охватывает фундаментальные принципы построения математических моделей биопроцессов. Рассматриваются кинетические модели роста микроорганизмов и культур клеток, образования продуктов, потребления субстратов. Изучаются основы моделирования различных типов биореакторов (идеальное смешение, вытеснение, каскады), массообмена, стерилизации, процессов выделения и очистки продуктов. Особое внимание уделяется применению компьютерного моделирования для анализа, оптимизации и масштабирования биотехнологических систем.

Предшествующими курсами, на которых непосредственно базируется дисциплина «Основы моделирования биотехнологических процессов» являются «Методологические основы исследования в биотехнологии», «Информационные технологии в биотехнологии», «Клеточная инженерия», «Управление качеством биотехнологической продукции». Дисциплина «Методы моделирования биотехнологических процессов» является основополагающей для изучения следующих дисциплин: «Системная биология», «Молекулярная генетика», «Биоинформатика».

Общая трудоемкость дисциплины: 108 часов (3 зачетные единицы).

Промежуточный контроль: экзамен.

1. ЦЕЛЬ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью освоения дисциплины «Основы моделирования биотехнологических процессов» является формирование у магистров системных знаний и практических навыков в области математического описания, компьютерного моделирования, анализа и оптимизации основных этапов биотехнологических производств. Курс направлен на развитие способности применять современный математический аппарат и программные инструменты для решения задач проектирования, управления и интенсификации биопроцессов, включая культивирование микроорганизмов и клеток, работу биореакторов, процессы выделения и очистки целевых продуктов.

Цель дисциплины соотносится с общими целями основной профессиональной образовательной программы (ОПОП ВО) по направлению 19.04.01 – Биотехнология, в рамках которого изучается данная дисциплина.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

Дисциплина «Основы моделирования биотехнологических процессов» входит в обязательную часть учебного плана (Б1.О.08). Дисциплина реализуется в соответствии с требованиями ФГОС ВО 3++, ОПОП ВО и Учебного плана по направлению 19.04.01 – Биотехнология.

Предшествующими курсами, на которых непосредственно базируется дисциплина «Методы моделирования биотехнологических процессов» являются «Методологические основы исследования в биотехнологии», «Информационные технологии в биотехнологии», «Клеточная инженерия», «Управление качеством биотехнологической продукции».

Дисциплина «Методы моделирования биотехнологических процессов» является основополагающей для изучения следующих дисциплин: Системная биология», «Молекулярная генетика», «Биоинформатика».

Особенностью дисциплины является прикладной характер, сочетающий глубокое теоретическое освоение принципов моделирования с практическим применением расчетных методов и программного обеспечения для анализа реальных биотехнологических систем.

Рабочая программа дисциплины для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья разрабатывается индивидуально с учетом особенностей психофизического развития, индивидуальных возможностей и состояния здоровья таких обучающихся.

3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Изучение данной учебной дисциплины направлено на формирование у обучающихся компетенций, представленных в таблице 1.

Таблица 1

Требования к результатам освоения учебной дисциплины

№ п/п	Индекс компетенции	Содержание компетенции (или её части)	Индикаторы компетенций	В результате изучения учебной дисциплины обучающиеся должны:		
				Знать	Уметь	Владеть
1.	ОПК-2	Способен использовать специализированное программное обеспечение, базы данных, адаптировать известные программные продукты, элементы искусственного интеллекта для решения задач профессиональной деятельности	ОПК-2.1 Знает пути и перспективы применения современных компьютерных технологий в биологических науках и образовании	принципы построения математических моделей биопроцессов; классификацию и области применения специализированного ПО для моделирования	выбирать тип модели и математический аппарат для описания конкретного биотехнологического процесса	навыками поиска и использования профессиональных баз данных и специализированного ПО в области моделирования
2.	ОПК-3	Способен разрабатывать алгоритмы и участвовать в разработке	ОПК-3.1 Знает методы алгоритмизации, языки и технологии	основные методы алгоритмизации и численные методы решения дифференциальных	разрабатывать алгоритмы для численного решения	основами алгоритмизации задач моделирования биопроцессов

		программ в сфере своей профессиональной деятельности	программирования, пригодные для практического применения в профессиональной области	уравнений, описывающих динамику биопроцессов	уравнений кинетики роста и моделей биореакторов	
3.	ОПК-3		ОПК-3.2 Умеет применять методы алгоритмизации, языки и технологии программирования при решении профессиональных задач	синтаксис и возможности среды моделирования (MATLAB, Python, специализированные пакеты) для анализа биосистем	применять среды математического моделирования для анализа, оптимизации и визуализации результатов моделирования биопроцессов	навыками применения языков программирования или специализированных пакетов для реализации моделей биопроцессов
4.	ОПК-3		ОПК-3.3 Владеет навыками программирования, отладки и тестирования прототипов программно-технических	методы верификации и валидации математических моделей	проводить отладку и тестирование созданных моделей, оценивать адекватность модели	навыками отладки, тестирования и анализа адекватности моделей биотехнологических процессов

			комплексов задач		реальному процессу	
5.	ОПК-4	Способен выбирать и использовать современные инструментальные методы и технологии, осваивать новые методы и технику исследований для решения конкретных задач профессиональной деятельности	ОПК-4.1 Знает современные методы, технологии и оборудование для лабораторных исследований в области профессиональной деятельности	современные инструментальные методы сбора данных для параметризации моделей (аналитические методы, сенсоры, системы мониторинга)	использовать экспериментальные данные для идентификации параметров и валидации математических моделей	методами обработки экспериментальных данных для целей моделирования
6.	ОПК-6	Способен разрабатывать и применять на практике инновационные решения в научной и производственной сферах биотехнологии на основе новых знаний и проведенных	ОПК-6.2 Оценивает риски и управляет процессом разработки и принятия решений на основе использования современных методов исследования и технологических	методы оптимизации и анализа чувствительности биотехнологических процессов	применять методы оптимизации для поиска оптимальных условий проведения биопроцесса (температура, pH, режим питания) с учетом ограничений	навыками использования моделей для анализа чувствительности, оптимизации и оценки рисков при принятии технологических решений

		исследований с учетом экономических, экологических, социальных и других ограничений	решений			
--	--	---	---------	--	--	--

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1 Распределение трудоёмкости дисциплины по видам работ

Общая трудоёмкость дисциплины составляет **3 зач. ед. (108 часов)**, их распределение по видам работ и семестрам представлено в таблице 2.

Таблица 2

Распределение трудоёмкости дисциплины по видам работ по семестрам

Вид учебной работы	Трудоёмкость	
	час.	В т.ч. по семестрам № 2
Общая трудоёмкость дисциплины по учебному плану	108	108
1. Контактная работа	66,4	66,4
<i>Аудиторная работа</i>	66,4	66,4
<i>Лекции (Л)</i>	32	32
<i>Практические занятия (ПЗ)</i>	32	32
<i>Консультации перед экзаменом</i>	2	2
<i>Контактная работа на промежуточном контроле (КРА)</i>	0,4	0,4
2. Самостоятельная работа (СРС)	41,6	41,6
<i>самостоятельное изучение разделов, самоподготовка (проработка и повторение лекционного материала и материала учебников и учебных пособий, подготовка к лабораторным и практическим занятиям, коллоквиумам и т.д.)</i>	14,6	14,6
<i>подготовка к экзамену (контроль)</i>	27	27
Вид промежуточного контроля:	Экзамен	

4.2 Содержание дисциплины

Таблица 3

Тематический план учебной дисциплины

Наименование разделов и тем дисциплин (укрупнённо)	Всего часов	Аудиторная работа			Внеаудиторная работа (СР)
		Л	ПЗ	ПКР	
Раздел 1 «Основы кинетического моделирования биопроцессов»	29.6	12	12	--	5.6
Тема 1.1. Кинетика роста клеток и потребления субстрата	10	4	4	--	2
Тема 1.2. Кинетика образования продуктов метаболизма	10	4	4	--	2
Тема 1.3. Структурированные и неструктурированные модели	9.6	4	4	--	1.6
Раздел 2 «Моделирование биореакторов»	23	11	9	--	3
Тема 2.1. Модели идеальных биореакторов: периодический, проточный (хемостат)	8	4	3	--	1
Тема 2.2. Модели неидеальных биореакторов, каскады реакторов	8	4	3	--	1
Тема 2.3. Моделирование систем с иммобилизованными клетками и биофильтрами	7	3	3	--	1
Раздел 3 «Моделирование вспомогательных и разделительных процессов»	26	9	11	--	6
Тема 3.1. Моделирование массообмена (кислород, тепло) в биореакторах	8	3	3	--	2

Тема 3.2. Моделирование процессов стерилизации	9	3	4	--	2
Тема 3.3. Основы моделирования процессов выделения и очистки (фильтрация, экстракция, хроматография)	9	3	4	--	2
Консультации перед экзаменом	2	--	--	2	--
Контактная работа на промежуточном контроле (КРА)	0.4	--	--	0.4	--
Подготовка к экзамену	27	--	--	--	27
Итого по дисциплине:	108	32	32	2.4	41.6

Раздел 1 «Основы кинетического моделирования биопроцессов» **Тема 1.1 «Кинетика роста клеток и потребления субстрата»** Модели неограниченного роста (Моно, Мозер, Контуа). Модели с ингибированием (субстратом, продуктом). Влияние условий среды (рН, температура). Определение кинетических параметров по экспериментальным данным. **Тема 1.2 «Кинетика образования продуктов метаболизма»** Связь кинетики роста и продуктообразования. Модели ассоциированного, частично-ассоциированного и неассоциированного продуктообразования. Модели для вторичных метаболитов. **Тема 1.3 «Структурированные и неструктурированные модели»** Одно- и двухкомпонентные неструктурированные модели. Принципы построения структурированных моделей (учет ключевых внутриклеточных компонентов). Сегрегированные модели. Модели популяционной динамики.

Раздел 2 «Моделирование биореакторов» **Тема 2.1 «Модели идеальных биореакторов: периодический, проточный (хемостат)»** Материальные балансы для идеального реактора смешения (CSTR) и периодического реактора (Batch). Стационарные и динамические режимы работы хемостата. Критическое время разбавления. **Тема 2.2 «Модели неидеальных биореакторов, каскады реакторов»** Модели с учетом гидродинамики (ячеечные, диффузионные). Каскады идеальных реакторов смешения. Моделирование систем с рециклом биомассы. **Тема 2.3 «Моделирование систем с иммобилизованными клетками и биофильтрами»** Модели с учетом диффузионных ограничений в иммобилизованных системах (частицах, мембранах). Эффективность использования иммобилизованных клеток. Простейшие модели биофильтров.

Раздел 3 «Моделирование вспомогательных и разделительных процессов» **Тема 3.1 «Моделирование массообмена (кислород, тепло) в биореакторах»** Уравнения переноса кислорода. Коэффициенты массопередачи (kLa). Тепловой баланс биореактора. **Тема 3.2 «Моделирование процессов стерилизации»** Кинетика гибели микроорганизмов. Расчет

времени стерилизации для периодического и непрерывного процессов. Влияние температуры.
Тема 3.3 «Основы моделирования процессов выделения и очистки» Базовые модели фильтрации (уравнение Рунт). Модели экстракции (равновесные ступени). Принципы моделирования хроматографических колонок.

4.3 Лекции, практические занятия

Таблица 4

Содержание лекций, практических занятий и контрольные мероприятия

№ п/п	№ раздела	№ и название лекций, лабораторных и практических занятий	Формируемые компетенции	Вид контрольного мероприятия	Кол-во часов / в т.ч. практ. работ
Раздел 1. Основы кинетического моделирования биопроцессов					
1	1.1	Лекция №1 «Введение в моделирование. Классификация моделей. Кинетика роста (модель Моно)»	ОПК-2.1, ОПК-3.1	--	4
2	1.1	Практическое занятие №1 «Определение кинетических параметров μ_{max} и K_s по экспериментальным данным»	ОПК-3.2, ОПК-4.1	защита расчетной работы	4
3	1.2	Лекция №2 «Кинетика продуктообразования и потребления субстрата»	ОПК-3.1	--	4
4	1.2	Практическое занятие №2 «Построение моделей ассоциированного и неассоциированного продуктообразования»	ОПК-3.2, ОПК-3.3	защита расчетной работы	4
5	1.3	Лекция №3	ОПК-3.1	--	4

№ п/п	№ раздела	№ и название лекций, лабораторных и практических занятий	Формируемые компетенции	Вид контрольного мероприятия	Кол-во часов / в т.ч. практ. работ
		«Структурированные и неструктурированные модели роста»			
6	1.3	Практическое занятие №3 «Разработка простейшей двухкомпонентной структурированной модели»	ОПК-3.2, ОПК-3.3	защита расчетной работы	4
Раздел 2. Моделирование биореакторов					
7	2.1	Лекция №4 «Материальные балансы. Идеальный периодический реактор и хемостат»	ОПК-3.1, ОПК-6.2	--	4
8	2.1	Практическое занятие №4 «Расчет динамики периодического процесса и стационарных состояний хемостата»	ОПК-3.2, ОПК-6.2	устный опрос, защита работы	3
9	2.2	Лекция №5 «Неидеальные биореакторы и каскады реакторов»	ОПК-3.1	--	4
10	2.2	Практическое занятие №5 «Моделирование каскада из двух хемостатов. Анализ производительности»	ОПК-3.2, ОПК-3.3, ОПК-6.2	защита расчетной работы	3
11	2.3	Лекция №6 «Моделирование систем с	ОПК-3.1	--	3

№ п/п	№ раздела	№ и название лекций, лабораторных и практических занятий	Формируемые компетенции	Вид контрольного мероприятия	Кол-во часов / в т.ч. практ. работ
		иммобилизованными клетками»			
12	2.3	Практическое занятие №6 «Расчет эффективности частицы с иммобилизованными клетками с учетом диффузии субстрата»	ОПК-3.2, ОПК-3.3	защита расчетной работы	3
Раздел 3. Моделирование вспомогательных и разделительных процессов					
13	3.1	Лекция №7 «Моделирование массо- и теплообмена в биореакторах»	ОПК-3.1, ОПК-4.1	--	3
14	3.1	Практическое занятие №7 «Расчет потребности в кислороде и коэффициента kLa для процесса культивирования»	ОПК-3.2, ОПК-4.1	устный опрос	3
15	3.2	Лекция №8 «Кинетика стерилизации. Моделирование процессов стерилизации сред»	ОПК-3.1	--	3
16	3.2	Практическое занятие №8 «Расчет времени стерилизации для заданной степени обеззараживания»	ОПК-3.2	защита расчетной работы	4

№ п/п	№ раздела	№ и название лекций, лабораторных и практических занятий	Формируемые компетенции	Вид контрольного мероприятия	Кол-во часов / в т.ч. практ. работ
17	3.3	Лекция №9 «Основы моделирования процессов выделения и очистки биопродуктов»	ОПК-2.1, ОПК-3.1	--	3
18	3.3	Практическое занятие №9 «Моделирование одноступенчатой экстракции и упрощенной фильтрации»	ОПК-3.2, ОПК-3.3	защита расчетной работы	4
Итого часов:					64
ВСЕГО Лекций (Л):					32
ВСЕГО Практических занятий (ПЗ):					32

Таблица 5

Перечень вопросов для самостоятельного изучения дисциплины

№ п/п	№ раздела и темы	Перечень рассматриваемых вопросов для самостоятельного изучения	Формируемые компетенции
1	Тема 1.1	Более сложные модели ингибирования (некомпетентное, по субстрату и продукту). Методы нелинейной регрессии для оценки параметров.	ОПК-3.1, ОПК-3.2
2	Тема 1.2	Модели для автолиза клеток. Кинетика образования продуктов в условиях лимитирования различными факторами.	ОПК-3.1
3	Тема 1.3	Обзор современных структурированных моделей (например, для <i>E. coli</i> , <i>S. cerevisiae</i>). Метод баланса элементарных мод (ЕМВ).	ОПК-2.1, ОПК-3.1
4	Тема 2.1	Аналитическое решение уравнений материального баланса для хемостата. Устойчивость стационарных состояний.	ОПК-3.1, ОПК-6.2
5	Тема 2.2	Модели реакторов с рециклом биомассы. Сравнение производительности различных схем каскадов.	ОПК-3.1, ОПК-6.2
6	Тема 2.3	Модели биофильтров для очистки сточных вод. Модели ферментаторов с ультрафильтрационной мембраной.	ОПК-3.1
7	Тема 3.1	Корреляции для расчета коэффициента k_{La} в различных типах биореакторов.	ОПК-4.1
8	Тема 3.2	Конструкция и расчет стерилизующих фильтров для газов.	ОПК-4.1
9	Тема 3.3	Основы моделирования хроматографических процессов (модель тарелки, модель с дисперсией). Модели мембранных процессов (ультрафильтрация, обратный осмос).	ОПК-2.1, ОПК-3.1

5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Таблица 6

Применение активных и интерактивных образовательных технологий

№ п/п	Тема и форма занятия	Наименование используемых активных и интерактивных образовательных технологий
1.	Практическое занятие №1 «Определение кинетических параметров μ_{\max} и K_s »	Разбор конкретных ситуаций (Case-study) на основе реальных экспериментальных данных
2.	Практическое занятие №5 «Моделирование каскада из двух хемостатов»	Компьютерное моделирование в среде MATLAB/Python с последующим анализом результатов и принятием решений по оптимизации
3.	Лекция №9 «Основы моделирования процессов выделения и очистки»	Лекция-дискуссия о выборе и комбинации методов разделения на основе моделей
4.	Практическое занятие №8 «Расчет времени стерилизации»	Решение прикладных задач с вариацией исходных условий и обсуждение технологических компромиссов

6. ТЕКУЩИЙ КОНТРОЛЬ УСПЕВАЕМОСТИ И ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

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

6.1.1. Примерные вопросы для обсуждения на практических занятиях

Практическое занятие №1 «Определение кинетических параметров» 1. Какие методы графической обработки данных можно использовать для оценки параметров модели Моно? 2. Как наличие экспериментальной ошибки влияет на точность определения μ_{\max} и K_s ? 3. В каких случаях модель Моно неприменима и нужно использовать более сложные кинетические выражения?

Практическое занятие №4 «Расчет динамики периодического процесса и стационарных состояний хемостата» 1. Как время достижения максимальной биомассы в периодическом процессе зависит от начальной концентрации субстрата и μ_{\max} ? 2. Каков физический смысл критического времени разбавления ($D_{кр}$) в хемостате? 3. Как изменение скорости протока влияет на концентрацию биомассы, субстрата и продукта в стационарном состоянии?

Практическое занятие №5 «Моделирование каскада из двух хемостатов» 1. В чем преимущества каскада реакторов по сравнению с одним реактором равного общего объема? 2. Как оптимальным образом распределить объемы между реакторами в каскаде для максимизации

выхода продукта? 3. Как режим питания (в первый или второй реактор) влияет на динамику системы?

Практическое занятие №8 «Расчет времени стерилизации» 1. Почему зависимость скорости гибели клеток от температуры является экспоненциальной? 2. Как наличие терморезистентных спор влияет на расчетное время стерилизации? 3. Какие технологические факторы, кроме времени и температуры, важно учитывать при проектировании стерилизационной установки?

6.1.2. Примерные вопросы для тестирования

1. Параметр K_s в модели Моно характеризует:
 - a) максимальную удельную скорость роста;
 - b) концентрацию субстрата, при которой $\mu = 0.5 \mu_{\max}$;
 - c) константу скорости гибели клеток;
 - d) выход биомассы на субстрат.
2. Для продукта, образование которого напрямую связано с ростом биомассы (например, этанол при брожении), используется модель:
 - a) неассоциированного продуктообразования;
 - b) ассоциированного продуктообразования;
 - c) модели с ингибированием по продукту;
 - d) модель Льюенсика-Пирета.
3. В идеальном хемостате в стационарном состоянии удельная скорость роста клеток (μ) равна:
 - a) μ_{\max} ;
 - b) скорости потока среды (D);
 - c) нулю;
 - d) константе скорости потребления субстрата.
4. Коэффициент массопередачи kLa в уравнении переноса кислорода характеризует:
 - a) растворимость кислорода в среде;
 - b) скорость потребления кислорода клетками;
 - c) эффективность переноса кислорода из газа в жидкость;
 - d) концентрацию кислорода на выходе из реактора.
5. При увеличении температуры стерилизации на 10°C (в диапазоне $100-130^\circ\text{C}$) скорость гибели микроорганизмов:
 - a) увеличивается примерно в 10 раз;
 - b) уменьшается примерно в 2 раза;
 - c) увеличивается примерно в 2 раза;
 - d) не изменяется.

6.1.3 Перечень вопросов, выносимых на промежуточную аттестацию (экзамен):

1. Цели и задачи математического моделирования в биотехнологии. Классификация моделей.
2. Модель неограниченного роста Моно. Физический смысл параметров μ_{\max} и K_s .
3. Модели роста с ингибированием (субстратом, продуктом). Примеры.

4. Кинетические модели ассоциированного, частично-ассоциированного и неассоциированного продуктообразования.
5. Структурированные и неструктурированные модели. Принципы их построения, достоинства и недостатки.
6. Уравнение материального баланса для биомассы, субстрата и продукта в идеальном периодическом реакторе.
7. Идеальный проточный реактор смешения (хемостат). Вывод уравнений для стационарного состояния.
8. Понятие критического времени разбавления (Dкр). Его физический и технологический смысл.
9. Модели неидеальных биореакторов: ячеечная и диффузионная модели.
10. Каскады идеальных реакторов смешения. Преимущества по сравнению с одним реактором.
11. Особенности моделирования систем с иммобилизованными клетками. Учет диффузионных ограничений.
12. Уравнение переноса кислорода в биореакторе. Параметры, влияющие на коэффициент kLa.
13. Кинетика термической гибели микроорганизмов. Константа скорости гибели k и десятичный период снижения D.
14. Расчет времени стерилизации для периодического процесса.
15. Основные принципы моделирования процессов фильтрации биосуспензий.
16. Модели равновесной ступени для процессов экстракции.
17. Применение компьютерных сред (MATLAB, Python) для решения дифференциальных уравнений моделей биопроцессов.
18. Использование моделей для оптимизации параметров биотехнологического процесса (на примере хемостата).

6.2. Описание показателей и критериев контроля успеваемости, описание шкал оценивания

Для оценки знаний, умений, навыков и формирования компетенций по дисциплине применяется традиционная система контроля и оценки успеваемости студентов. Экзамен оценивается: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Критерии оценивания

Оценка	Критерии оценивания
Высокий уровень «5» (отлично)	Оценку «отлично» заслуживает студент, освоивший знания, умения, компетенции и теоретический материал без проблем; выполняющий все задания, предусмотренные учебным планом на высоком качественном уровне; практические навыки профессионального применения основных знаний сформированы.
Средний уровень «4» (хорошо)	Оценку «хорошо» заслуживает студент, практически полностью освоивший знания, умения, компетенции и теоретический материал; учебные задания не оценены максимальным числом баллов, в основном сформированы практические навыки.
Пороговый уровень «3» (удовлетворительно)	Оценку «удовлетворительно» заслуживает студент, освоивший базовые знания, умения и компетенции; учебные задания выполнены частично, практические навыки сформированы недостаточно.
Минимальный уровень «2» (неудовлетворительно)	Оценку «неудовлетворительно» заслуживает студент, не освоивший знания, умения, компетенции и теоретический материал; учебные задания не выполнены, практические навыки не сформированы.

7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

7.1 Основная литература

1. Шулер М.Л., Каги Ф., Делиса М. Биотехнологическая инженерия. Основные концепции. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2017. (Shuler M.L., Kargi F., DeLisa M. Bioprocess Engineering: Basic Concepts. 3rd ed. – Pearson, 2017).
2. Дорошев В.И. Математические модели биотехнологических процессов. – М.: Агропромиздат, 1989.

7.2 Дополнительная литература

1. Bailey J.E., Ollis D.F. Biochemical Engineering Fundamentals. – 2nd ed. – McGraw-Hill, 1986.
2. Blanch H.W., Clark D.S. Biochemical Engineering. – Marcel Dekker, 1996.
3. Биохимическая инженерия / Под ред. С. Айбы, А.Э. Хамфри, Н.Ф. Миллис. – М.: Мир, 1989.
4. Вольперт А.И., Худяков С.И. Математическое моделирование в биологии и химии. – М.: Наука, 2000.

- Остроумов А.Г. Основы компьютерного моделирования биотехнологических процессов. – СПб: Профессия, 2012.

7.3 Методические указания, рекомендации и другие материалы к занятиям

- Методические указания к выполнению практических работ по дисциплине «Основы моделирования биотехнологических процессов».
- Сборник задач по моделированию биотехнологических процессов.

8. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Таблица 8

Сведения об обеспеченности специализированными аудиториями, кабинетами, лабораториями

Наименование специальных помещений и помещений для самостоятельной работы (№ учебного корпуса, № аудитории)	Оснащенность специальных помещений и помещений для самостоятельной работы
1	2
Учебная лаборатория для проведения занятий семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации (Учебный корпус № 37, аудитории № 212, 303-308, 314)	Система очистки воды Hydrurus Ultra Flow, № 410124000603648 Комплект оборудования для очистки и обеззараживания воздуха, № 410124000603649 Стерилизатор паровой форвакуумный СПГА-100-1-НН В, №210124558132517 Бокс микробиологический безопасности БМБ-II «Ламинар-С» по ТУ 32.50.50-010-51495026-2020 в исполнении: БМБ-II-«Ламинар-С»-1,5, № 210124558132419, № 210124558132418, № 210124558132420, № 210124558132421, № 210124558132422 Климатическая камера «Лаборатория биофотоники», № 410124000603662, № 410124000603663 Комплект климатических установок (фитотрон), № 210124558132659, № 210124558132660 Комплекс контролируемого фотонного излучения для роста растений (люминесцентный), № 410124000603660 Комплекс контролируемого фотонного излучения для роста растений (светодиодный), № 410124000603659 Шейкер инкубатор DW-SI-D2403, Drawell, №

	<p>410124000603704 Шейкер - инкубатор с охлаждением CRYSTE, модель PURICELL_SHAKING X10, № 410124000603688 Спектрофотометр K5500Plus, Drawell № 410124000603673 Лиофильная сушилка, LFD-10A, Laboao, № 410124000603685 Комплект лабораторного оборудования пробоподготовки для биотехнологических исследований, № 410124000603692 Центрифуга лабораторная с охлаждением TGL18C,Nanbei, № 410124000603681 Льдогенератор XB-50, Scientz, № 410124000603690 Амплификатор детектирующий "ДТпрайм" по ТУ 9443- 004-96301278-2010 в модификации 5М6, № 410124000603637, № 410124000603638 Гельдокументирующая система QUANTUM-CX5 Edge - Epi UV PadBox, № 410124000603639 Гомогенизатор лабораторный RCP 24, № 410124000603640 Электропоратор для клеток эукариот, прокариот и растений CRY-3B, Scientz, № 410124000603691 Термостат Binder, №210134000004208 Интерактивная панель, № 410124000603731 Рабочая станция с предустановленным программным обеспечением, № 210134000018973 Рабочая станция, № 210134000019227-210134000019242</p>
<p>Центральная научная библиотека имени Н.И. Железнова. Читальные залы библиотеки.</p>	

9. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ СТУДЕНТАМ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Для успешного усвоения каждой из тем дисциплины «Методы моделирования биотехнологических процессов» студент должен внимательно прослушать и законспектировать лекцию по конкретной теме, подготовиться к выполнению практической работы, выполнить практическую работу в лаборатории и защитить ее, выполнить домашнее задание и в срок сдать его на проверку. Для самоконтроля студентов предназначены контрольные вопросы.

Для конспектирования лекций рекомендуется завести отдельную тетрадь из 96 листов. Конспект каждой лекции следует начинать с названия темы лекции и указания даты ее

проведения. Все заголовки разделов лекции следует четко выделять, например, подчеркиванием. Во время лекции следует внимательно следить за ходом мысли лектора и записывать важнейшие определения, разъяснения, формулы, термины. Также нужно стараться воспроизводить в конспекте рисунки и таблицы, которые демонстрирует лектор. При самостоятельной работе студента с конспектом лекций следует осуществлять самопроверку, то есть следить за тем, чтобы освоенным оказался весь материал, изложенный в лекции. Материал, который кажется студенту недостаточно понятным, следует проработать по учебнику и воспользоваться помощью преподавателя на консультациях. Работать с конспектом лекций следует еженедельно, внося в него свои дополнения, замечания и вопросы (для этого в тетради следует оставлять широкие поля).

Для подготовки и фиксирования практических работ следует завести лабораторный журнал (тетрадь). При подготовке к практической работе необходимо составить краткий (1-2 страницы) конспект теоретического материала, на котором основана данная практическая работа и ход ее выполнения. Для подготовки конспекта используют практикум, главы или разделы учебника, рекомендованные преподавателем и конспект лекций. Также при домашней самостоятельной подготовке к практической работе нужно начертить таблицы, приведенные в практикуме, и, если требуется, произвести необходимые для проведения работы расчеты. Домашняя подготовка является необходимой частью практической работы, без нее невозможен осмысленный подход к выполнению экспериментов и измерений. Кроме того, ограниченное время, отводимое на выполнение практической работы, требует хорошо скорректированных действий студента, к которым также необходимо предварительно подготовиться. После завершения экспериментальной части работы необходимо произвести обработку полученных результатов, сделать выводы и защитить работу у преподавателя.

Виды и формы отработки пропущенных занятий

Студент, пропустивший лекцию, представляет конспект по теме лекции. При пропуске практического занятия студент представляет конспект по теме пропущенного занятия. Оценка конспектов – зачтено, не зачтено.

10. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПРЕПОДАВАТЕЛЯМ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Главная задача дисциплины – сформировать у магистров инженерное мышление, основанное на применении математических методов для анализа и проектирования биотехнологических систем. Преподавание должно быть ориентировано на тесную связь теории с практикой.

На лекциях необходимо четко объяснять физический и биологический смысл вводимых параметров и уравнений моделей, избегая излишней математизации в ущерб пониманию. Целесообразно использовать примеры из современных биотехнологических производств (получение антибиотиков, рекомбинантных белков, биотоплива).

Практические занятия должны носить прикладной характер. Задачи следует формулировать на основе реальных или близких к реальным данным. Важно обучать студентов не только механизму расчетов, но и критическому анализу результатов моделирования, оценке адекватности моделей, интерпретации графиков, формулировке технологических выводов и рекомендаций.

Необходимо активно использовать интерактивные формы: обсуждение в группах, анализ «кейсов», компьютерные практикумы. Следует контролировать выполнение заданий и уровень понимания материала через устные опросы, тесты, защиту расчетных работ.

Важно обращать внимание студентов на программные средства, доступные для моделирования, и формировать навыки работы с ними на уровне, достаточном для решения типовых учебных задач.

Программу разработали:

Моисеенко К.В., канд. биол. наук, доцент кафедры
биотехнологии



«28 » августа 2025 г.

РЕЦЕНЗИЯ

на рабочую программу дисциплины Б1.О.08 «Основы моделирования биотехнологических процессов» ОПОП ВО по направлению 19.04.01 – «Биотехнология», направленность «Биоинженерия и клеточные биотехнологии» (квалификация выпускника – магистр)

Таракановым Иваном Герасимовичем, профессором кафедры физиологии растений ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», доктором биологических наук, проведена рецензия рабочей программы дисциплины «Основы моделирования биотехнологических процессов» ОПОП ВО по направлению 19.04.01 – «Биотехнология», направленность «Биоинженерия и клеточная биотехнология» (магистратура), разработанной в ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, на кафедре биотехнологии (разработчик Моисеенко Константин Валерьевич, доцент кафедры биотехнологии, кандидат биологических наук).

При рассмотрении представленной рабочей программы пришел к следующим выводам:

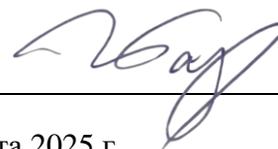
1. Рабочая программа дисциплины «Основы моделирования биотехнологических процессов» соответствует требованиям ФГОС ВО 3++ по направлению 19.04.01 – «Биотехнология» и содержит все необходимые структурные элементы.
2. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО определено верно – обязательная часть блока Б1 (Б1.О.08). Связи с предшествующими и последующими дисциплинами логичны и обоснованы.
3. Цели дисциплины четко сформулированы и соответствуют требованиям ФГОС и профилю подготовки магистров по направленности «Биоинженерия и клеточная биотехнология».
4. В программе корректно определен перечень формируемых компетенций (ОПК-2, ОПК-3, ОПК-4, ОПК-6), а результаты обучения в категориях «знать, уметь, владеть» детализированы и соответствуют содержанию дисциплины.
5. Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетные единицы (108 часов), что соответствует учебному плану. Распределение часов по видам работ и темам сбалансировано.
6. Содержание дисциплины структурировано по трем логичным разделам, охватывающим ключевые аспекты моделирования: кинетику, аппаратурное оформление, вспомогательные процессы. Темы практических занятий непосредственно связаны с лекционным материалом и носят прикладной характер.
7. В программе предусмотрено использование современных образовательных технологий (компьютерное моделирование, разбор кейсов, дискуссии).
8. Система контроля (текущий контроль на практических занятиях, экзамен) и критерии оценивания подробно описаны и адекватны.
9. Учебно-методическое обеспечение дисциплины представлено основной и дополнительной литературой, включая современный зарубежный учебник, что соответствует уровню магистерской подготовки.
10. Материально-техническая база, указанная в программе, позволяет реализовать заявленные методы обучения, включая компьютерный практикум.
11. Методические рекомендации для студентов и преподавателей содержат полезные указания по организации работы по освоению дисциплины.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

На основании проведенной рецензии можно сделать заключение, что рабочая программа дисциплины «Основы моделирования биотехнологических процессов» ОПОП ВО по направлению 19.04.01 – «Биотехнология», направленность «Биоинженерия и клеточные биотехнологии», разработанная доцентом кафедры биотехнологии ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева Моисеенко К.В., соответствует требованиям ФГОС ВО 3++, учебному плану и современным потребностям подготовки высококвалифицированных кадров в области биотехнологии. Программа методически грамотно составлена, содержит все необходимые компоненты и при ее реализации позволит обеспечить формирование заявленных профессиональных компетенций.

Рецензент:

Тараканов И.Г., профессор кафедры физиологии растений ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», доктор биологических наук, профессор



« 28 » августа 2025 г.