

УТВЕРЖДАЮ  
Декан факультета

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ МЕХАНИКА КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

|  |  |
|--|--|
| Направление/специальность подготовки       | 15.03.03 Прикладная механика                               |
| Специализация/профиль/программа подготовки | Цифровой инжиниринг высокотехнологичных систем и процессов |
| Уровень высшего образования                | Бакалавриат  |
| Форма обучения                             | Очная  |
| Факультет                                  | И Робототехника и инновационная инженерия                  |
| Выпускающая кафедра                        | ИЗ Механика деформируемого твердого тела                   |
| Кафедра-разработчик рабочей программы      | ИЗ Механика деформируемого твердого тела                   |

| КУРС | СЕМЕСТР | ОБЩАЯ ТРУДОЁМКОСТЬ<br>(ЗАЧЕТНЫХ ЕДИНИЦ) | ЧАСЫ (по наличию видов занятий) |                    |        |                           |                         |                        |                 |                 |                               | ВИД ПРОМЕЖУТОЧНОГО<br>КОНТРОЛЯ |
|------|---------|---|---------------------------------|--------------------|--------|---------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|--------------------------------|
|      |         |   | ОБЩАЯ ТРУДОЁМКОСТЬ              | АУДИТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ |        |                           |                         | САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА |                 |                 |                               |                                |
|      |         |   |                                 | ВСЕГО              | ЛЕКЦИИ | ЛАБОРАТОРНЫЙ<br>ПРАКТИКУМ | ПРАКТИЧЕСКИЕ<br>ЗАНЯТИЯ | ВСЕГО                  | КУРСОВОЙ ПРОЕКТ | КУРСОВАЯ РАБОТА | ДРУГИЕ ВИДЫ<br>САМОСТ. РАБОТЫ |                                |
| 4    | 8       | 3                                       | 108                             | 26                 | 0      | 0                         | 26                      | 82                     | 0               | 0               | 82                            | диф. зач.                      |

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА СОСТАВЛЕНА В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ ФЕДЕРАЛЬНОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО СТАНДАРТА ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ (ФГОС ВО)

15.03.03 Прикладная механика

год набора группы: 2026

Программу составили:

Кафедра НЗ Механика деформируемого твердого тела  
Крутова Вероника Александровна, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_

Кафедра НЗ Механика деформируемого твердого тела  
Воронов Алексей Сергеевич, ассистент

\_\_\_\_\_

Программа рассмотрена  
на заседании кафедры-разработчика  
рабочей программы **НЗ Механика деформируемого твердого тела**

Заведующий кафедрой Крутова В.А., д.т.н., доц.

\_\_\_\_\_

Программа рассмотрена  
на заседании выпускающей кафедры

**НЗ Механика деформируемого твердого тела**

Заведующий кафедрой Крутова В.А., д.т.н., доц.

\_\_\_\_\_

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ МЕХАНИКА КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

### **Разделы рабочей программы**

1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ
2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО
3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ
4. ФОРМЫ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ
5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ
6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### **Приложения к рабочей программе дисциплины**

- Приложение 1. Аннотация рабочей программы
- Приложение 2. Технологии и формы обучения
- Приложение 3. Фонды оценочных средств

## 1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ПК-9.2 — Способен учитывать особенности цифрового анализа технических систем при ударном, вибрационном, температурном нагружениях, наличии концентрации напряжений, контактных взаимодействиях, потери несущей способности, а также при усталостных разрушениях

Формированию компетенций служит достижение следующих результатов образования:

### **ПК-9.2**

*знания:*

Модели контактного взаимодействия сопрягаемых поверхностей;

*умения:*

Настраивать контактное взаимодействие в программных комплексах конечно-элементного анализа;

*навыки:*

Решать задачи контактного взаимодействия в рамках профессиональной деятельности.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Дисциплина **МЕХАНИКА КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ** является дисциплиной **части, формируемой участниками образовательных отношений блока 1**, программы подготовки по направлению *15.03.03 Прикладная механика*.

Содержание дисциплины является логическим продолжением дисциплин: **УРАВНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ, МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА МАШИН, ОСНОВЫ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ, ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ 3-D МОДЕЛЕЙ, ТЕОРИЯ УПРУГОСТИ, ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ, МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В МЕХАНИКЕ, КОНСТРУКЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ.**

Предварительные компетенции, сформированные у обучающегося до начала изучения дисциплины:

- ОПК-1 — Способен применять естественнонаучные и общетехнические знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности
- ОПК-11 — Способен выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения физико-математический аппарат и современные компьютерные технологии
- ОПК-12 — Способен учитывать современные тенденции развития техники и технологий в своей профессиональной деятельности
- ПК-9.1 — Способен применять CAD/CAE технологии при моделировании поведения элементов механических систем, необходимом для решения производственных проектно-конструкторских задач
- ПК-9.2 — Способен учитывать особенности цифрового анализа технических систем при ударном, вибрационном, температурном нагружении, наличии концентрации напряжений, контактных взаимодействиях, потери несущей способности, а также при усталостных разрушениях

### 3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 з.е., 108 ч.

#### 3.1. Содержание (дидактика) дисциплины

| КУРС                       | СЕМЕСТР | Наименование разделов и дидактических единиц   | ВСЕГО | Аудиторные занятия в контактной форме |                      | Самостоятельная работа студентов | Формируемая компетенция, % |
|----------------------------|---------|--|-------|---------------------------------------|----------------------|----------------------------------|----------------------------|
|                            |         |  |       | ВСЕГО                                 | Практические занятия |                                  | ПК-Э.2                     |
| 4                          | 8       | <b>Раздел 1. Введение в механику контактного взаимодействия.</b> 1. Понятие контакта тел; 2. Типы контактов. Жесткое соединение, контакт с трением, контакт без трения; 3. Факторы, влияющие на величину коэффициента трения. Шероховатость; 4. Основные уравнения теории упругости. Цилиндрическая система координат; 5. Задача о вдавлении штампа в упругое полупространство; 6. Задача Герца. | 33    | 13                                    | 13                   | 20                               | 50                         |
| 4                          | 8       | <b>Раздел 2. Численное решение контактных задач в программных комплексах конечно-элементного анализа.</b> 1. Менеджер настройки контактов. Типы контактов. Алгоритмы контактов; 2. Расчет количества подшагов в контактной задаче; 3. Отработка практических навыков решения контактных задач статике и динамики.  | 75    | 13                                    | 13                   | 62                               | 50                         |
| <b>Всего за 8 семестр</b>  |         |  | 108   | 26                                    | 26                   | 82                               | 100                        |
| <b>Всего по дисциплине</b> |         |  | 108   | 26                                    | 26                   | 82                               | 100                        |

#### 3.2. Аудиторный практикум

| №<br>п/п           | Номер и наименование раздела дисциплины  | Тема практического занятия  | Объем,<br>ауд.-<br>часов |
|--------------------|--|---|--------------------------|
| 1                  | Раздел 1. Введение в механику контактного взаимодействия.  | Численное и аналитическое решение задачи о вдавлении цилиндрического/сферического штампа в упругое полупространство | 6                        |
| 2                  |  | Численное и аналитическое решение задачи Герца  | 7                        |
| 3                  | Раздел 2. Численное решение контактных задач в программных комплексах конечно-элементного анализа. | Статическая и циклическая прочность разъемных соединений деталей машин  | 5                        |
| 4                  |  | Численное моделирование теста Тейлора   | 8                        |
| Всего за 8 семестр |  |   | 26                       |

#### 3.3. Самостоятельная работа студента (СРС)

| №<br>п/п           | Номер и наименование раздела дисциплины  | Содержание учебного задания  | Объем<br>часов |
|--------------------|--|--|----------------|
| 1                  | Раздел 1. Введение в механику контактного взаимодействия.  | Изучение литературы по тематике дисциплины   | 20             |
| 2                  | Раздел 2. Численное решение контактных задач в программных комплексах конечно-элементного анализа. | Выполнение индивидуального практического задания                                       | 40             |
| 3                  |  | Изучение литературы по тематике дисциплины.<br>Подготовка к дифференцированному зачету | 22             |
| Всего за 8 семестр |  |  | 82             |

### 4. ФОРМЫ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

| СЕМЕСТР | НЕДЕЛИ СЕМЕСТРА |   |   |   |     |    |   |   |   |    |    |                         |
|---------|-----------------|---|---|---|-----|----|---|---|---|----|----|-------------------------|
|         | 1               | 2 | 3 | 4 | 5   | 6  | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12                      |
| 8       |                 |   |   |   | ИПЗ | ДР |   |   |   | ДР |    |                         |
|         |                 |   |   |   |     |    |   |   |   |    |    | 13                      |
|         |                 |   |   |   |     |    |   |   |   |    |    | Вопр.Диф.Зач, диф. зач. |

Условные обозначения:

- ДР – диагностическая работа;
- ИПЗ – индивидуальное практическое задание;
- Вопр.Диф.Зач – вопросы к дифференцированному зачету;
- диф. зач. – дифференцированный зачет.

**Текущий контроль успеваемости** студентов проводится в дискретные временные интервалы в следующих формах:

- диагностическая работа;
- индивидуальное практическое задание;
- вопросы к дифференцированному зачету.

**Промежуточная аттестация** проводится в формах:

- дифференцированный зачет.

## 5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 5.1. Основная литература по дисциплине:

1. П. Н. Хопин, С. В. Шишкин. . Трибология. Москва: Юрайт, 2023, эл. рес.

### 5.2. Дополнительная литература по дисциплине:

1. К. Джонсон. . Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989, 2 экз.

### 5.3. Периодические издания:

не требуются.

### 5.4. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины, электронные библиотечные системы:

1. <https://e.lanbook.com/> — ЭБС Лань;
2. <http://library.voenmeh.ru/jirbis2/> — Фундаментальная библиотека БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова;
3. <https://urait.ru/> — Образовательная платформа «Юрайт». Для вузов и ссузов..

### Современные профессиональные базы данных:

1. <https://rusneb.ru> – Национальная электронная библиотека (НЭБ);
2. <https://cyberleninka.ru/> - Научная электронная библиотека «Киберленинка»;
- <http://www.rfbr.ru/rffi/ru/library> - Полнотекстовая электронная библиотека Российского фонда фундаментальных исследований.

### Информационные справочные системы:

1. Техэксперт – Информационный портал технического регулирования: Нормы, правила, стандарты РФ;
2. [http://library.voenmeh.ru/jirbis2/index.php?option=com\\_irbis&view=irbis&Itemid=457](http://library.voenmeh.ru/jirbis2/index.php?option=com_irbis&view=irbis&Itemid=457) - БД ГОСТов собственной генерации БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова;
3. <http://www.consultant.ru/>- КонсультантПлюс- информационный портал правовой информации.

### 5.5. Программное обеспечение:

не требуется.

### 5.6. Информационные технологии:

взаимодействие с обучающимися посредством ЭИОС Moodle БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова.

## **6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **6.1. Практические занятия:**

1. Проектор;
2. Интерактивная доска;
3. Твердомер ИТВ, модификация ИТВ-10-АМ.

### **6.2. Прочее:**

1. рабочее место преподавателя, оснащенное компьютером с доступом в Интернет;
2. рабочие места студентов, оснащенные компьютерами с доступом в Интернет, предназначенные для работы в электронной образовательной среде.



### Аннотация рабочей программы

Дисциплина **МЕХАНИКА КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ** является дисциплиной **части, формируемой участниками образовательных отношений блока 1**, программы подготовки по направлению *15.03.03 Прикладная механика*. Дисциплина реализуется на факультете И Робототехника и инновационная инженерия БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова кафедрой И3 Механика деформируемого твердого тела.

Дисциплина нацелена на формирование *компетенций*:

ПК-9.2 Способен учитывать особенности цифрового анализа технических систем при ударном, вибрационном, температурном нагружениях, наличии концентрации напряжений, контактных взаимодействиях, потери несущей способности, а также при усталостных разрушениях.

Содержание дисциплины охватывает круг вопросов, связанных с физикой контактного взаимодействия и факторами, влияющими на прочность и долговечность сопрягаемых поверхностей деталей машин.

Программой дисциплины предусмотрены следующие **виды контроля**:

**Текущий контроль успеваемости** студентов проводится в дискретные временные интервалы в следующих формах:

- диагностическая работа;
- индивидуальное практическое задание;
- вопросы к дифференцированному зачету.

**Промежуточная аттестация** проводится в формах:

- дифференцированный зачет.

Общая трудоемкость освоения дисциплины составляет 3 з.е., **108 ч**. Программой дисциплины предусмотрены практические занятия (**26 ч.**), самостоятельная работа студента (**82 ч**).

## ТЕХНОЛОГИИ И ФОРМЫ ОБУЧЕНИЯ

### Рекомендации по освоению дисциплины для студента

Трудоемкость освоения дисциплины составляет 108 ч., из них 26 ч. аудиторных занятий, и 82 ч., отведенных на самостоятельную работу студента.

Рекомендации по распределению учебного времени по видам самостоятельной работы и разделам дисциплины приведены в таблице.

Контроль освоения дисциплины производится в соответствии с Положением о текущем, рубежном контроле успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся.

Формы контроля и критерии оценивания приведены в приложении 3 к Рабочей программе.

| Наименование работы  | Рекомендуемая литература   | Трудоемкость, час. |
|--|--|--------------------|
| Раздел 1. Введение в механику контактного взаимодействия.  |  |                    |
| Изучение литературы по тематике дисциплины   | К. Джонсон. . Механика контактного взаимодействия: М.: Мир, 1989 (1-3)<br>П. Н. Хопин, С. В. Шишкин. . Трибология: Москва: Юрайт, 2023 (1-2) | 20                 |
| Итого по разделу 1   |  | 20                 |
| Раздел 2. Численное решение контактных задач в программных комплексах конечно-элементного анализа. |  |                    |
| Выполнение индивидуального практического задания   | П. Н. Хопин, С. В. Шишкин. . Трибология: Москва: Юрайт, 2023 (1-4)   | 40                 |
| Изучение литературы по тематике дисциплины. Подготовка к дифференцированному зачету                |  | 22                 |
| Итого по разделу 2   |  | 62                 |

## ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств, позволяющие оценить результаты обучения по данной дисциплине, включают в себя:

- диагностическая работа
- вопросы к дифференцированному зачету;
- индивидуальное практическое задание;
- дифференцированный зачет.

### Критерии оценивания

#### Диагностическая работа

Диагностическая работа проводится в форме теста в ЭИОС Moodle:

- при правильном ответе менее чем на 60% вопросов - не аттестация;
- при правильном ответе на 60% вопросов и более - аттестация.

#### Вопросы к дифференцированному зачету

1. Формулировки основных допущений контактной задачи Герца. Ограничения применимости модели;
2. Контактные поверхности для случаев контактов типа сфера-сфера, цилиндр-цилиндр, цилиндр-плоскость;
3. Распределение нормальных и касательных напряжений под поверхностью в задаче Герца;
4. Критерии перехода упругого контакта в упруго-пластический;
5. Влияние шероховатости поверхности на реальную площадь контакта;
6. Влияние наличия/отсутствия трения на величину контактного давления и пятно контакта;
7. Физический смысл адгезии в контакте твердых тел;
8. Методы экспериментального и аналитического определения контактной жесткости;
9. МКЭ для контактных задач. Основные принципы и контактные конечные элементы;
10. Уравнение контактной задачи для гладкого упругого штампа. Физический смысл подынтегрального выражения;
11. Твердость по Бринеллю и по Виккерсу. Связь твердости и предела текучести;
12. Отличия статического и динамического контактов;

#### Индивидуальное практическое задание

ИПЗ размещено в соответствующем курсе в ЭИОС Moodle. voenmeh.ru

Практические задания оформляются в соответствии с ГОСТ 7.32-2017 и предоставляются в электронном или печатном виде в установленные технологической картой сроки.

Для того, чтобы задание были засчитано, оно должно быть выполнено без существенных ошибок.

#### Дифференцированный зачет

Дифференцированный зачет проходит в формате письменного ответа на вопросы. Каждому обучающемуся предлагается билет из 3-х вопросов.

Критерии оценивания:

Верный ответ на 1 вопрос - "Зачтено-удовлетворительно"

Верные ответы на 2 вопроса - "Зачтено-хорошо"

Верные ответы на все 3 вопроса - "Зачтено-отлично"

В течении семестра действует балльно-рейтинговая система, в соответствии с которой по результатам работы в семестре обучающийся имеет право на получение оценки без сдачи дифференцированного зачета. Критерии перевода баллов в оценку в соответствии с БРС:

85 - 100 "Зачтено-отлично"

75 – 84 "Зачтено-хорошо"

60 - 74 "Зачтено-удовлетворительно"

менее 60 - «Не зачтено»

| КУРС                | СЕМЕСТР | Наименование разделов и дидактических единиц   | ВСЕГО | Аудиторные занятия в контактной форме |                      | Самостоятельная работа студентов | Формируемая компетенция, % | НАИМЕНОВАНИЕ<br>ОЦЕНОЧНОГО СРЕДСТВА  |
|---------------------|---------|--|-------|---------------------------------------|----------------------|----------------------------------|----------------------------|--|
|                     |         |  |       | ВСЕГО                                 | Практические занятия |                                  | ПК-9.2                     |  |
| 4                   | 8       | Раздел 1. Введение в механику контактного взаимодействия.  | 33    | 13                                    | 13                   | 20                               | 50                         | Вопросы к дифференцированному зачету   |
| 4                   | 8       | Раздел 2. Численное решение контактных задач в программных комплексах конечно-элементного анализа. | 75    | 13                                    | 13                   | 62                               | 50                         | Вопросы к дифференцированному зачету,<br>Индивидуальное практическое задание |
| Всего за 8 семестр  |         |  | 108   | 26                                    | 26                   | 82                               | 100                        |  |
| Всего по дисциплине |         |  | 108   | 26                                    | 26                   | 82                               | 100                        |  |

## Оценочные материалы по дисциплине МЕХАНИКА КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

**ПК-9.2 - Способен учитывать особенности цифрового анализа технических систем при ударном, вибрационном, температурном нагружении, наличии концентрации напряжений, контактных взаимодействиях, потери несущей способности, а также при усталостных разрушениях**

- № 1 Прочитайте текст и запишите развернутый обоснованный ответ  
Стальной шарик радиуса  $R=10\text{мм}$  прижимается к плоской стальной плите силой  $F=100\text{Н}$ . Модуль Юнга стали  $E=200\text{ГПа}$ , коэффициент Пуассона  $\nu=0.3$ .  
Чему равен радиус контактного пятна  $a$  (в миллиметрах) по формуле Герца?
- № 2 Прочитайте текст, выберите правильный ответ и запишите аргументы, обосновывающие выбор ответа  
При нагружении сферического индентора на плоскую поверхность максимальное эквивалентное напряжение (по Мизесу) при упругом контакте возникает не на поверхности, а на некоторой глубине под ней. В каком месте под поверхностью впервые возникает пластическая деформация при увеличении нагрузки (для материала с постоянным пределом текучести)?  
А) Непосредственно на поверхности контакта в центре пятна  
Б) На поверхности контакта на краю пятна (там, где давление максимально)  
В) Под поверхностью на оси симметрии на глубине около  $0.5a$  (где  $a$  — радиус пятна контакта)  
Г) Под поверхностью на глубине около  $2a$  от центра пятна
- № 3 Прочитайте текст, выберите правильные ответы и запишите аргументы, обосновывающие выбор ответов  
Какие из перечисленных ниже допущений являются обязательными для классической модели контакта Герца?  
А) Тела являются изотропными и линейно-упругими  
Б) Силы трения в зоне контакта отсутствуют (контакт гладкий)  
В) Деформации тел велики (сравнимы с размерами тел)  
Г) Размеры зоны контакта малы по сравнению с радиусами кривизны тел  
Д) Поверхности тел идеально гладкие (шероховатость отсутствует)  
Е) Материалы тел обладают упрочнением (кинематическим или изотропным)
- № 4 Прочитайте текст и запишите развернутый обоснованный ответ  
При сжатии двух реальных шероховатых поверхностей их фактическая площадь контакта значительно меньше номинальной. Согласно классической модели Гринвуда-Вильямсона, для упругого контакта множества сферических выступов эта фактическая площадь контакта при увеличении нагрузки растёт пропорционально нагрузке в степени  $n$ .  
Чему равен показатель степени  $n$  в этой пропорции?
- № 5 Прочитайте текст и установите соответствие  
**Установите соответствие между моделью или типом контакта и её ключевой характеристикой / областью применения.**

| Модель / Тип контакта                    | Характеристика или применение   |
|--|---|
| 1. Модель Герца (Hertz)                  | А. Учет адгезии для жестких материалов с малым радиусом (керамика, стекло)          |
| 2. Модель JKR (Johnson-Kendall-Roberts)  | Б. Контакт множества упругих сферических выступов, площадь пропорциональна нагрузке |
| 3. Модель DMT (Derjaguin-Muller-Toporov) | В. Гладкие упругие тела, малые деформации, отсутствие трения                        |
| 4. Модель Greenwood-Williamson (GW)      | Г. Учет сильной адгезии для мягких материалов (резина, эластомеры)                  |

- № 6 Прочитайте текст и установите соответствие  
**Установите соответствие между описанием контактной задачи и тем, что в ней является искомым или ключевым методом решения.**

| Описание задачи   | Что ищут / метод решения   |
|---|--|
| 1. Определить распределение давления под жестким плоским штампом на упругой полуплоскости | А. Максимальное контактное давление $p_0$ и радиус пятна $a$           |
| 2. Найти глубину внедрения сферы в плоскость при заданной нагрузке (упругая постановка)   | Б. Система интегральных уравнений (ядро содержит разность перемещений) |
|   | В. Формула   |
| 3. Контакт двух тел с учетом сил трения (касательные напряжения на поверхности)           | Г. Решение интегрального уравнения типа                                |
|   | используется в обратном порядке  |
| 4. Определить модуль упругости материала по кривой нагружения при индентировании          | Г. Решение интегрального уравнения типа                                |

$$a = \sqrt[3]{\frac{3FR}{4E^*}}$$

$$\int_{-a}^a \frac{p(s) ds}{x-s} = \text{const}$$

- № 7 Прочитайте текст и установите последовательность  
Расположите в правильном порядке шаги расчета максимального контактного давления  $p_0$  и радиуса пятна  $a$  для случая «упругая сфера — упругая плоскость» при известной силе  $F$ , радиусе сферы  $R$  и известных упругих константах материалов

А) Вычислить приведенный радиус  $R^* = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1}$  (для сферы и плоскости  $R_2 = \infty$ , так что  $R^* = R_1$ )

Б) Найти радиус контактного пятна  $a = \sqrt[3]{\frac{3FR^*}{4E^*}}$

В) Вычислить приведенный модуль упругости  $E^* = \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{-1}$

Г) Вычислить максимальное контактное давление  $p_0 = \frac{3F}{2\pi a^2}$  (или  $p_0 = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{E^* a}{R^*}$ )

№ 8 Прочитайте текст, выберите правильные ответы и запишите аргументы, обосновывающие выбор ответов

При решении контактной задачи с трением (в отличие от задачи без трения) происходят следующие изменения:

- А) Распределение нормального давления остается таким же, как в задаче без трения (для нормальной нагрузки)
- Б) На поверхности возникают касательные напряжения, пропорциональные нормальному давлению (закон Амонтона-Кулона)
- В) Максимальное эквивалентное напряжение под поверхностью возрастает и приближается к поверхности
- Г) Зарождение пластической деформации происходит в той же точке под поверхностью (на глубине  $\sim 0.5a$ ), что и без трения
- Д) Учет трения позволяет пренебречь шероховатостью
- Е) Появляется явление фреттинга (микропроскальзывания на краях зоны контакта) при циклическом нагружении

№ 9 Прочитайте текст и установите последовательность

Расположите в порядке возрастания нагрузки (от самой малой до самой большой) последовательные режимы (стадии) контактного взаимодействия металлической сферой металлической плоскости.

А) Упругопластический режим — под поверхностью возникает пластическая зона, но пятно контакта еще окружено упругой областью

Б) Упругий герцевский режим — деформация полностью упругая, справедливо решение Герца

В) Глубокое пластическое внедрение — материал вокруг индентора полностью перешел в пластическое состояние, давление под индентором стабилизируется и приближается к твердости Бринеллю  $H_B \approx 3\sigma_T$

Г) Начало пластической деформации — максимальное касательное напряжение (по Мизесу или Треске) впервые достигает предела текучести материала (обычно на глубине  $\sim 0.5a$  под поверхностью)

№ 10 Прочитайте текст, выберите правильный ответ и запишите аргументы, обосновывающие выбор ответа

Для контакта упругой сферы радиуса  $R$  с упругой плоской поверхностью под действием силы  $F$  радиус контактного пятна  $a$  пропорционален  $F^p$ . Каков показатель степени  $p$  в точном решении Герца?

- 1. 1
- 2. 1/2
- 3. 1/3
- 4. 2/3

№ 11 Прочитайте текст, выберите правильный ответ и запишите аргументы, обосновывающие выбор ответа

Согласно модели Гринвуда-Вильямсона (GW) для упругого контакта двух шероховатых поверхностей, как реальная площадь контакта  $A_{\text{real}}$  за нормальной нагрузки  $F$ , если высоты выступов распределены по экспоненциальному закону?

- А)  $A_{\text{real}}$  растет медленнее нагрузки ( $A_{\text{real}} \propto F^{2/3}$ )
- Б)  $A_{\text{real}}$  пропорциональна нагрузке ( $A_{\text{real}} \propto F^1$ )
- В)  $A_{\text{real}}$  растет быстрее нагрузки ( $A_{\text{real}} \propto F^{4/3}$ )
- Г)  $A_{\text{real}}$  не зависит от нагрузки (определяется только шероховатостью)

№ 12 Прочитайте текст, выберите правильные ответы и запишите аргументы, обосновывающие выбор ответов

Контактная жесткость (нормальная) двух шероховатых поверхностей при упругом контакте зависит от следующих параметров:

- А) Номинальной площади соприкосновения
- Б) Средней квадратичной высоты шероховатости ( $R_q$  или  $R_a$ )
- В) Модуля Юнга материалов
- Г) Цвета поверхностей (оптическое отражение)
- Д) Радиуса кривизны вершин выступов (среднего радиуса)
- Е) Времени суток проведения эксперимента

