

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра динамического моделирования и биомедицинской инженерии

Устройство для исследования механических свойств биотканей

наименование темы выпускной квалификационной работы

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 2 курса 2281 группы

направления 12.04.04 «Биотехнические системы и технологии»

профиль подготовки «Аппаратные и программные средства биомедицины»

институт физики

Авдеев Андрей Павлович

фамилия, имя, отчество

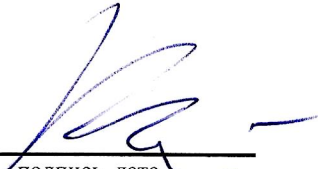
Научный руководитель:
Зав. кафедрой динамического
моделирования и
биомедицинской инженерии,
д.ф.-м.н., профессор


подпись, дата
20.06.2025

и Отлично!

А.С. Караваев

Зав. кафедрой динамического
моделирования и
биомедицинской инженерии,
д.ф.-м.н., профессор


подпись, дата
20.06.2025

А.С. Караваев

Саратов 2025

Введение. Современная медицина, биоинженерия и биоматериаловедение требуют точных методов оценки механических свойств имплантатов, хирургических нитей, искусственных сосудов и других биомедицинских материалов, а также тканей организма человека. Разрывные машины (испытательные приборы) играют ключевую роль в определении прочности, эластичности и деформационных характеристик таких материалов [1, 2]. Однако существующие коммерческие установки часто обладают высокой стоимостью, сложностью настройки и юстировки. Разработка специализированного прибора учебно-исследовательского класса с открытой архитектурой, точным контролем параметров и возможностью интеграции с системами анализа данных является актуальной научно-технической задачей.

Разрабатываемый компактный испытательный стенд может быть использован в следующих практических сферах [3, 4]:

1. Биомедицинские исследования и разработка новых материалов:
 - Испытание хирургических нитей – определение прочности на разрыв и эластичности при различных нагрузках, что критично для выбора шовного материала в хирургии;
 - Оценка свойств искусственных сосудов и кожных трансплантатов – моделирование нагрузок, имитирующих физиологические условия (например, давление крови в сосудах или механическое растяжение кожи);
 - Тестирование биodeградируемых имплантатов – анализ изменения механических свойств материала в процессе его рассасывания в организме;
 - Исследование механических свойств синтетических материалов, используемых в качестве костных заменителей.
2. Контроль качества медицинских изделий:
 - Производители медицинских материалов (например, полимерных мембран для заживления поверхностных ран или каркасов для тканевой инженерии) могут использовать стенд для оперативного тестирования партий продукции без необходимости закупки дорогостоящего промышленного оборудования;

- Проверка стабильности механических характеристик материалов после стерилизации (автоклавирование, гамма-облучение и др.).
3. Образовательный процесс в технических и медицинских вузах:
- Лабораторные работы по материаловедению – студенты смогут изучать зависимость механических свойств материалов от их структуры, например, сравнивая полимерные волокна разного состава;
 - Практикумы по биомеханике – моделирование нагрузок на костные имплантаты или связочные протезы;
 - Подготовка инженеров-биомедиков – освоение принципов работы испытательного оборудования и методов обработки экспериментальных данных.
4. Научные исследования в области мягкой робототехники и гибкой электроники:
- Тестирование эластомеров и проводящих полимеров, используемых в создании искусственных мышц и сенсоров;
 - Оценка долговечности гибких материалов при циклических нагрузках.

В рамках данной работы планируется разработка и создание настольного испытательного стенда, который будет предназначен для исследования механических свойств различных материалов. Этот стенд позволит проводить испытания образцов на растяжение и сжатие с максимальной нагрузкой до 20 кг.

Основной особенностью стенда является его компактность и возможность использования в образовательных учреждениях в качестве настольного испытательного оборудования. Общий вес всего оборудования не будет превышать 10 кг, а его габариты составят не более 25х25х80 см, что существенно отличает его от основных аналогов и конкурентов на рынке. На данный момент в России отсутствуют компактные испытательные машины,

которые могли бы применяться в образовательном процессе, несмотря на то, что в большинстве технических вузов преподаются дисциплины, подразумевающие работу студентов с испытательным оборудованием.

Создание такого компактного настольного стенда позволит значительно улучшить и упростить часть образовательного процесса, связанную с практической работой студентов. Это нововведение не только повысит качество обучения, но и обеспечит студентов необходимыми навыками работы с современным испытательным оборудованием, что является важным аспектом их подготовки к профессиональной деятельности.

Цель работы: Разработка и создание прототипа настольного испытательного прибора, предназначенного для измерения механических свойств биомедицинских материалов.

Для достижения цели в ходе работы было поставлено несколько задач, которые требуют:

- Разработать и изготовить электронную и механическую часть стенда;
- Разработать и отладить программу для работы с прибором;
- Произвести первичное испытание на упругих элементах;
- Произвести калибровку и тестирование изготовленного прибора на биоматериале и провести анализ результатов.

Основное содержание работы. Во введении обосновывается актуальность выбранной темы практической работы, обозначается практическое применение разрабатываемого стенда. В первой главе рассматриваются ключевые аспекты применения разрыв-машин в исследовании механических свойств биоматериалов. Эти устройства играют важную роль в изучении прочности, упругости и жесткости материалов, что особенно актуально для биомедицины и тканевой инженерии.

Особое внимание уделяется исследованию коллагеновых волокон – основного компонента соединительной ткани. Российские ученые Ю.А. Краснов и А.В. Сидоров с использованием оборудования Zwick/Roell установили зависимость прочности коллагена от его толщины и предварительной обработки [1]. Также рассматривается применение разрыв-машин для контроля качества медицинских изделий, в частности хирургических нитей. Исследования И.М. Смирновой и Д.С. Кузнецова (оборудование Shimadzu AG-X Plus) выявили различия в прочности нитей в зависимости от их состава и условий эксплуатации [5]. Отдельно анализируется использование разрыв-машин в образовательном процессе. Разработанный Н.И. Васильевой и О.Ю. Тихоновой лабораторный практикум на оборудовании Shimadzu Autograph позволяет студентам изучать механические свойства biomaterialов [6]. Во второй главе обозначается новизна разрабатываемого решения. Ключевым преимуществом решения стала его мобильность, позволившая проводить испытания непосредственно в клиниках. Прототип успешно интегрирован в учебный процесс Саратовского университета, где студенты проводят сравнительный анализ результатов с данными стационарных испытательных машин. В ходе анализа опыта коллег выявлены технические ограничения, требующие доработки: необходимость применения редуктора, усиленной металлической рамы и оптического энкодера для повышения точности измерений. Полученные результаты легли в основу дальнейшего совершенствования испытательного оборудования.

В третьей главе рассматривается инновационное решение в области лабораторного оборудования, главными особенностями которого являются компактность и возможность прямого подключения к компьютеру. Разрабатываемый прибор реализует принципиально новый подход: вся измерительная информация передается на внешний компьютер в реальном времени, что обеспечивает seamless-интеграцию в современные автоматизированные лабораторные комплексы.

Ключевым преимуществом предложенного решения является его образовательный потенциал. Благодаря компактным габаритам и прямой передаче данных на ПК, устройство идеально подходит для организации индивидуальных рабочих мест студентов. Это устраняет существенный недостаток традиционного подхода, при котором лабораторные занятия носили преимущественно демонстрационный характер - преподаватель показывал эксперименты группе студентов, которые затем занимались обработкой данных в отрыве от реального оборудования.

В четвертой главе рассматриваются конкурентные преимущества разрабатываемого устройства по сравнению с существующими аналогами на отечественном рынке учебного оборудования. Анализ показал, что профессиональные испытательные машины (например, МИМ-5ЛР-017) обладают высокой точностью, но слишком громоздки (400 кг) и дорогостоящи. Более доступные гидравлические установки (МСМ-017-ПК) ограничены в функциональности, а простейшие механические наборы не обеспечивают необходимой точности измерений.

Основное конкурентное преимущество заключается в уникальном сочетании точности профессионального оборудования с мобильностью и доступностью учебных комплексов. Устройство специально разработано для образовательных учреждений, позволяя проводить полноценные лабораторные работы без необходимости создания специальных условий.

В пятой главе представлен анализ рынка учебного оборудования и перспектив внедрения разрабатываемых испытательных машин в образовательный процесс.

Согласно статистическим данным, в 2023 году российские образовательные учреждения закупили 3.6 млн единиц учебного оборудования на сумму 27.57 млрд рублей, что покрыло лишь 43% от общей потребности. При этом доля учебных пособий и средств обучения составила 43%.

Особое внимание уделяется реализации федерального проекта "Профессионалитет", согласно которому 50% учебного времени в колледжах должно отводиться практической подготовке с использованием современного оборудования. Значительная часть студентов (46.7% в колледжах и 27.6% в вузах) осваивают инженерно-технические специальности, что подтверждает востребованность данных направлений на государственном уровне.

Полученные данные свидетельствуют о наличии устойчивого спроса на специализированное учебное оборудование для инженерно-технических специальностей со стороны образовательных учреждений различного уровня.

В шестой главе представлены основные элементы конструкции и принцип работы разрабатываемой установки. Устройство состоит из жесткой рамы, на которой установлен привод подвижной траверсы. Привод обеспечивает перемещение подвижной траверсы в вертикальном направлении. В нижней части рамы расположен закрытый отсек, в котором расположена моторно-трансмиссионная группа, включая шаговый двигатель и редуктор или ременную передачу, а также блок питания и электронные блоки управления.

В седьмой главе описывается процесс подбора комплектующих для конструирования устройства. Представлены различные решения, представленные на рынке, проанализированы преимущества и недостатки каждого из них. Основные компоненты устройства включают шаговый двигатель 17HS584015 с драйвером TMC2209 для точного позиционирования, тензометрический датчик (S-тип, 10 кг) с 24-битным АЦП HX711 для измерений, управляющую систему на базе Arduino Nano с блоком питания 12В 5А, а также механическую часть с трапецевидным винтом и линейными направляющими для плавного перемещения.

В восьмой главе представлены основные этапы разработки и сборки испытательного стенда для исследования механических свойств биологических тканей. В этой главе подробно описан процесс конструирования основных узлов стенда: рамы, подвижной траверсы, электронного блока управления. Рама

состоит из 2 стальных пластин и 2 полированных направляющих, подвижная траверса изготовлена из алюминиевой трубы прямоугольного сечения, электронный блок управления распаян на макетной плате, имеет модульное исполнение. Так же в главе описаны технологии, использованные в процессе конструирования стенда. Изготовленный и собранный прибор представлен на рисунке 1.

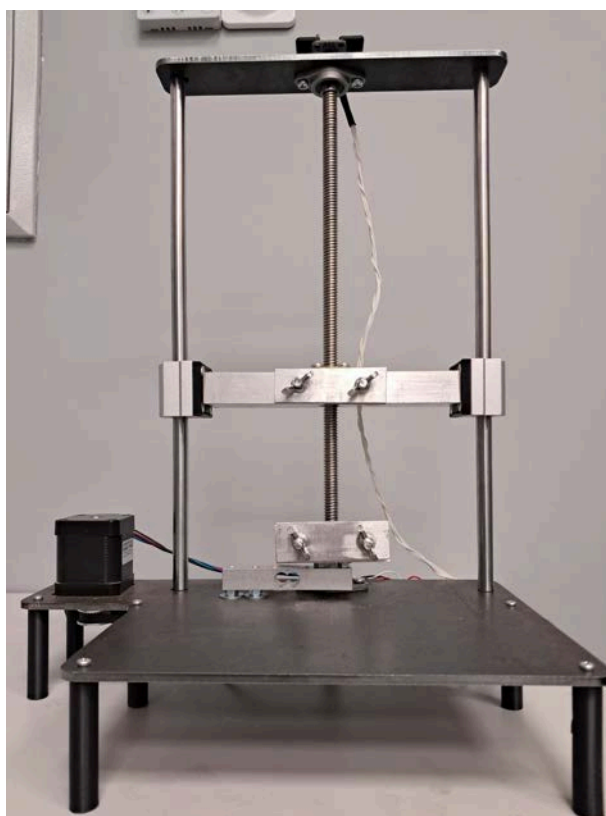


Рисунок 1 – Собранный прибор

В девятой главе представлена логика работы программного решения для управления стендом.

В десятой главе описана методика и результаты проведения испытаний изготовленного стенда.

Первичные испытания устройства были выполнены на стандартизированных упругих элементах - пружинах, что позволило проверить базовую работоспособность системы. После предварительной калибровки тензодатчика с использованием разновесов и лабораторных весов были получены зависимости нагрузки от изменения длины для одной и двух параллельно соединенных пружин. Результаты показали линейный характер зависимостей с ожидаемым соотношением углов наклона 1:2, что подтвердило корректность методики измерений и воспроизводимость результатов.

Основной этап испытаний проводился на биологических образцах (фрагментах говяжьей кости) при участии специалистов Лаборатории математического моделирования в биомеханике СГУ. Сравнительный анализ с эталонным прибором Instron 3302 выявил существенные различия в полученных данных. Графики зависимости "сила-удлинение" показали значительное расхождение в углах наклона, а также наличие выраженного нелинейного участка в начале кривой для разработанного устройства. Кроме того, был зафиксирован почти двукратный разброс в диапазонах изменения длины образцов. Анализ возможных причин расхождений позволил сформулировать гипотезу о преимущественном влиянии упругих деформаций тензодатчика на результаты измерений. Для верификации этой гипотезы была разработана специальная методика калибровки с использованием программного обеспечения на Python. Методика включала построение калибровочной кривой по тренировочной выборке измерений, устранение систематических сдвигов по осям и последующую линейную аппроксимацию данных. Применение калибровочной кривой позволило скорректировать диапазон изменения длины и продолжить сравнительный анализ.

Определение модуля Юнга выполнялось через построение графиков "напряжение-деформация" с последующим расчетом тангенса угла наклона линии регрессии. Сравнение итоговых значений модуля Юнга показало среднее отклонение 214.53 МПа и стандартное отклонение 174.06 МПа относительно

эталонных измерений. Графики напряжение-деформация и итоговые результаты испытаний представлены на рисунках 2, 3 и таблицы 1.

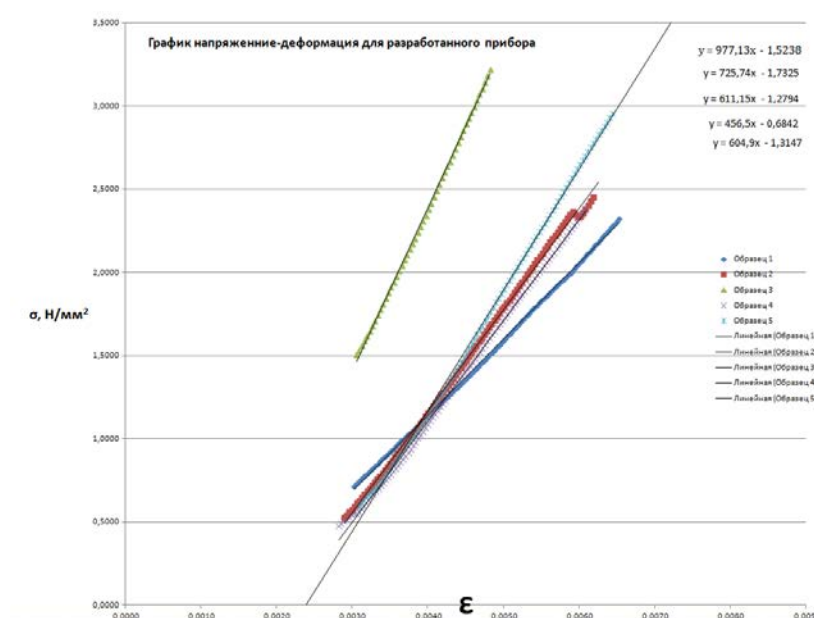


Рисунок 2 – График напряжение-деформация для разработанного прибора

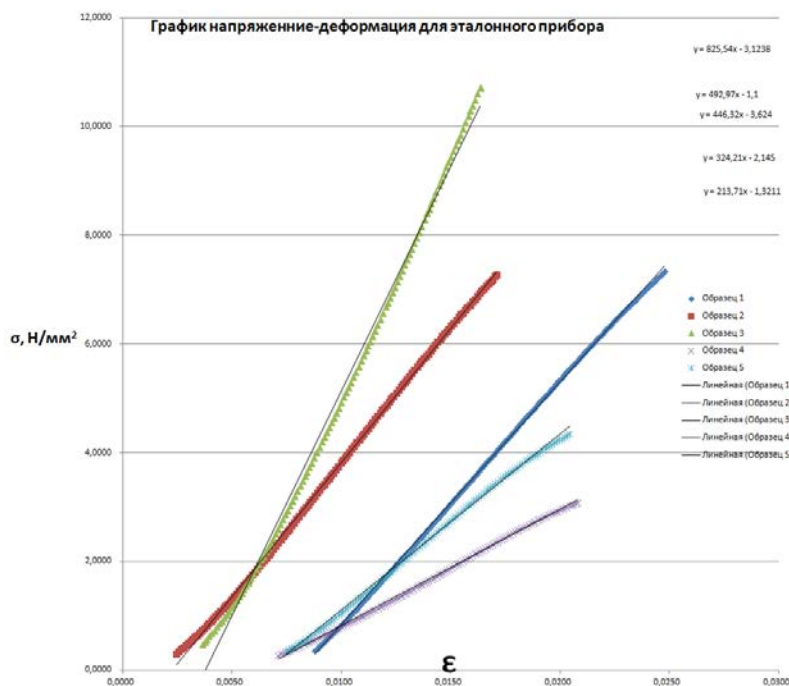


Рисунок 3 – График напряжение-деформация для эталонного прибора

Таблица 1 – Итоговые результаты измерений

Номер образца	Уравнение регрессии		Модуль Юнга, МПа		$\Delta_{\text{абс.}}$ МПа	$\Delta_{\text{отн.}}$ %
	Разработанный прибор	Эталонный прибор	Разработанный прибор	Эталонный прибор		
1	$y = 456.50x - 0.68$	$y = 446.32x - 3.62$	456.50	446.32	10.18	2.23
2	$y = 611.15x - 1.28$	$y = 492.97x - 1.10$	611.15	492.97	118.18	19.34
3	$y = 977.13x - 1.52$	$y = 825.54x - 3.12$	977.13	825.54	151.59	15.51
4	$y = 604.90x - 1.31$	$y = 213.71x - 1.32$	604.90	213.71	391.19	64.70
5	$y = 725.74x - 1.73$	$y = 324.21x - 2.15$	725.74	324.21	401.53	55.33

Закключение. В ходе выполненной работы была успешно разработан и изготовлен опытный образец компактного настольного испытательного стенда, предназначенного для определения механических свойств биомедицинских материалов. Разработанная конструкция обладает конкурентными преимуществами по сравнению с имеющимися серийными образцами, отличаясь компактностью и обладая низкой себестоимостью. Недостатком созданной конструкции является меньшая точность измерений по сравнению с серийными устройствами исследовательского класса.

Были выполнены испытания устройства для стандартизированных упругих элементов и биологических материалах. Испытания показали удовлетворительные результаты. На упругих элементах была показана адекватность и воспроизводимость измерений в диапазоне усилий до 1700Н. Испытание на фрагментах говяжьей кости в сравнении с прибором «Instron 3302» показало существенную неточность определения изменения длины образцов в более широком диапазоне сил (от 1700Н и более). Было выявлено, что причиной таких результатов стала деформация тензодатчика и иных элементов конструкции. Дальнейшие направления совершенствования конструкции будут направлены на повышение точности измерений путем уменьшения паразитных деформаций датчика веса и траверза.

Список использованных источников

1. Краснов Ю.А., Сидоров А.В. Исследование механических свойств коллагеновых волокон методом одноосного растяжения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Естественные науки. 2018. № 4. С. 75–83.
2. Jones R.M. Principles of Biological Materials Testing // Berlin: Springer, 2018. 210 p.
3. Доль А.В. Механические свойства атеросклеротических бляшек, покрышек и стенок артериальных сосудов: испытания на мобильном стенде // Российский журнал биомеханики. 2023. Т. 27. № 3. С. 81–88.
4. Smith J.R., Brown L.M. Advanced Biomaterials: Mechanical Properties and Applications // Cambridge: Cambridge University Press, 2019. 340 p.
5. Смирнова И.М., Кузнецов Д.С. Оценка прочностных характеристик шовных нитей различного состава // Медицинская техника. 2019. № 3. С. 45–50.
6. Васильева Н.И., Тихонова О.Ю. Разработка лабораторного практикума по изучению механических свойств биоматериалов // Современные проблемы науки и образования. 2020. № 2. С. 114–121.

А. П. Мещеряков
20.06.25