

ЛАБОРАТОРНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 681.2.08

**ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ
КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ АДГЕЗИИ
ПОВЕРХНОСТИ**

©2025 г. А. И. Аверина^{а*}, Н. В. Каширин^{а**}, А. Е. Гурьянов^а,
И. Б. Кондратенко^а

^аМарийский государственный университет

Россия, 424000, Республика Марий Эл, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 1

** e-mail: irene75@inbox.ru*

*** e-mail: kachnic@mail.ru*

Поступила в редакцию 26.03.2025 г.

После доработки 23.04.2025 г.

Принята к публикации 10.06.2025 г.

Представлен исследовательский программно-аппаратный комплекс для измерения показателя адгезии поверхности методом отрыва предварительно наклеенной липкой ленты с постоянной скоростью под углом 90°. Приведены конструкция адгезиметра и главный экран интерфейса программы обработки данных. Описана методика проведения эксперимента. Приведены результаты эксперимента, доказывающего, что измеряется адгезионное взаимодействие между клеевым слоем и поверхностью. Представлен эксперимент, демонстрирующий чувствительность комплекса к изменению адгезии поверхности, что особенно важно для проведения научно-исследовательских работ.

1. ВВЕДЕНИЕ

Адгезия как физическое явление представляет собой сцепление или связь, возникающую при соприкосновении поверхностных слоев двух разнородных материалов [1]. Адгезия играет определяющую роль во многих технологических процессах, таких как склеивание, пайка, сварка, прессование, нанесение покрытий, создание композитов и т. д. [2–5]. Адгезия критически важна в различных отраслях промышленности. Величина адгезионной связи напрямую влияет на механическую прочность, качество, надежность готовых изделий и их эксплуатационные характеристики.

ГОСТы регламентируют различные методы определения количественной характеристики адгезионной связи между материалами, основными из которых являются: измерение усилия отрыва пластины, метод решетчатых надрезов, измерение линейных

деформаций при сдвиге, метод нормального отрыва, метод отрыва липкой ленты и др. [6–10]. Для реализации этих методов разработаны специализированные приборы – адгезиметры. Анализ показывает, что представленные на рынке адгезиметры как отечественного (например Эксперт-АР, СМ-1У, АМЦ 2-20), так и зарубежного (например AR-2000, Elcometer 107) производства, хотя и позволяют определить усредненное численное значение адгезии поверхности, но в большинстве своем ориентированы на контрольные измерения и имеют существенные ограничения. Мы не выявили автоматизированные системы для измерения адгезии, что особенно важно для научно-исследовательских работ в области изучения адгезионных свойств поверхностей различных материалов. В связи с этим разработка программно-аппаратного комплекса для исследования адгезионных свойств поверхностей является актуальной задачей, решение которой позволит автоматизировать процесс измерения и обработки результатов, расширить научно-исследовательские возможности, повысит точность и воспроизводимость результатов.

В статье представлен разработанный исследовательский программно-аппаратный комплекс для измерения показателя адгезии поверхности методом отрыва предварительно наклеенной липкой ленты с постоянной скоростью под углом 90°. Приведены результаты экспериментов, показывающие достоверность и чувствительность комплекса.

2. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА

Предлагаемый нами способ определения адгезионных свойств поверхности основан на запатентованном методе отрыва липкой ленты от поверхности под углом 90° с постоянной скоростью [11]. Для реализации этого способа мы разработали исследовательский программно-аппаратный комплекс (рис. 1), в состав которого входят адгезиметр 1 собственной конструкции, ЭВМ 2 и ручной пресс 3. Схематически конструкция адгезиметра представлена на рис. 2.

Рис. 1. Фотография исследовательского программно-аппаратного комплекса для измерения адгезии поверхности...

Рис. 2. Конструкция адгезиметра...

Все конструктивные элементы адгезиметра крепятся к основанию 1, представляющему собой горизонтальную и вертикальную панели, жестко связанные между собой. Для измерения усилия используется неподвижный тензодатчик 2 резисторного типа с пределом измерения 5 кг, комплексной ошибкой 0.05 % FS и классом точности (по ГОСТ 30129) С3. Столик для образца 3 перемещается по направляющей 4,

которая расположена под углом 45° к горизонтальной панели основания. Движение столика обеспечивается передачей “винт-гайка” 5 посредством вращения вала 6, установленного в подшипниковых узлах 12, с помощью электродвигателя постоянного тока со встроенным редуктором 7. Исследуемый образец 8 с предварительно наклеенной липкой лентой 9 жестко крепится к столику 3 посредством зажимов образца 10. Свободный конец липкой ленты крепится к тензодатчику 2 с помощью зажима ленты 11. Конструкция адгезиметра позволяет перемещать столик с образцом с заданной оператором постоянной скоростью и обеспечивает постоянство угла между отслаиваемой липкой лентой и поверхностью образца (этот угол равен 90° в течение всего эксперимента). Управление двигателем и передача данных с тензодатчика в ЭВМ осуществляются электронным блоком управления и передачи данных 13.

Электронный блок управления и передачи данных в ЭВМ (рис. 3) состоит из нескольких ключевых компонентов, обеспечивающих эффективное функционирование комплекса: 1 – блок питания напряжением 12 В и мощностью 100 Вт, 2 – плата ШИМ-управления оборотов двигателя, 3 – микроконтроллер с АЦП-модулем.

Рис. 3. Электронный блок управления и передачи данных в ЭВМ.

Для обеспечения равномерного движения столика с образцом с заданной постоянной скоростью применена связка в виде ШИМ-модуля и редукторного двигателя постоянного тока, которая позволяет регулировать обороты двигателя без снижения вращающего момента. Регулировка оборотов осуществляется потенциометром, выведенным на переднюю панель адгезиметра, отображение информации об оборотах двигателя осуществляется трехразрядным семисегментным индикатором, расположенным на передней панели адгезиметра над потенциометром.

Микроконтроллер с АЦП HX711 предварительно усиливает сигнал с тензодатчика и преобразует его в число, значение которого прямо пропорционально поступившему на его вход напряжению, а следовательно, и приложенному к тензодатчику весу. Особенность применяемого АЦП в том, что полученные на выходе данные имеют строго линейную зависимость от напряжения, поступившего на вход АЦП. Микроконтроллер преобразует число с выхода АЦП в значение усилия отрыва и передает эти данные на ЭВМ.

Программная часть реализована с использованием языка программирования Python, что делает ее кроссплатформенной и позволяет функционировать на ЭВМ под управлением различных операционных систем (Windows, Linux и т.п.). Основной интерфейс программы представлен главным экраном (рис. 4). Здесь отображается таблица

с данными экспериментов, полученными с выхода микроконтроллера в граммах, которые без труда переводятся в усилие отрыва (F , H). Под таблицей располагается набор чекбоксов, предназначенных для выбора данных экспериментов, которые будут отображаться на графике обработки эксперимента. Функционал интерфейса включает следующие элементы управления: 1) кнопка “Все ВКЛ” – активирует все чекбоксы, 2) кнопка “Все ВЫКЛ” – деактивирует все чекбоксы, 3) кнопка “График” – открывает окно с визуализацией графиков выбранных экспериментальных данных в координатах “усилие отрыва–время движения столика”. Зная длину образца и время отрыва, можно легко пересчитать ось абсцисс в расстояние от края образца.

Рис. 4. Окно интерфейса программы обработки результатов эксперимента.

Программное обеспечение комплекса предоставляет гибкие возможности для работы с данными: 1) импорт экспериментальных данных из файлов формата CSV, 2) возможность прямого считывания информации с прибора измерения адгезии в режиме реального времени, 3) многооконный режим отображения графиков различных экспериментов. Такой подход к организации интерфейса обеспечивает удобство работы с программой и быстрый доступ к необходимым функциям анализа экспериментальных данных.

3. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Методика проведения измерения показателя адгезии исследуемой поверхности заключается в следующем. На поверхность исследуемого образца накладывается липкая лента (рис. 1) так, что один ее край остается свободным. Лента разглаживается ракелем с фетровым лезвием (рис. 1) при небольшом усилии так, чтобы между лентой и поверхностью не было воздушных пузырьков. Для обеспечения равномерности прижатия липкой ленты к поверхности образец с наклеенной липкой лентой помещается под опорные плиты пресса с приклеенными к ним резиновыми прокладками, пресс снабжен измерителем давления. Для обеспечения воспроизводимости результатов при испытаниях величины силы прижатия и времени выдержки под прессом неизменны. Подготовленный образец устанавливается в держатель адгезиметра и фиксируется. Свободный конец ленты фиксируется в зажиме тензодатчика (рис. 1).

Перед началом эксперимента устанавливается оптимальная скорость движения столика, и в окне интерфейса программы задается значение промежутка времени τ , через которое снимаются показания с тензодатчика. Включается двигатель и начинается процесс отрыва липкой ленты от поверхности образца. Одновременно начинается

передача данных с тензодатчика в ЭВМ до полного отрыва ленты от поверхности.

Для примера на рис. 4 представлено окно основного интерфейса программы, в котором выведен график эксперимента № 1 (кривая 1). Программа по экспериментальным точкам на плато рассчитывает среднее значение усилия отрыва и отражает его в виде горизонтальной линии (линия 2), численное значение усилия отображено в левом нижнем углу графика ($\langle F_a \rangle = 329.33$ г). Горизонтальная 3 и вертикальная 4 линии позволяют выбрать интересующую точку на графике и определить показатель адгезии на этом участке образца. Координаты этих линий отражены вблизи перекрестия ($F_a = 319$ г, $t = 11.7$ с). Управление положением линий 3 и 4 осуществляется с помощью клавиш “вверх”, “вниз”, “влево”, “вправо” на клавиатуре ЭВМ.

Следует отметить, что для обеспечения сопоставимости результатов при использовании липких лент различной ширины измеряемая величина усилия отрыва в граммах или Ньютонах легко переводится в системную единицу Н/м [10]. Для этого достаточно разделить полученное значение показателя адгезии в Ньютонах на ширину ленты.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

В экспериментах в качестве объекта выступала поверхность стеклотекстолита марки FR-4. В качестве липкой ленты использовалась полиимидная клейкая лента SXW20-30 с силиконовым клеевым слоем шириной 20 мм и толщиной 0.05 мм.

Для доказательства того, что в эксперименте измеряется адгезионное взаимодействие между клеевым слоем и поверхностью стеклотекстолита, а не когезионные свойства силиконового клея, были измерены краевые углы смачивания поверхности образца жидкостью до приклеивания липкой ленты и после проведения эксперимента на отрыв ленты. Капля наносилась на поверхность с использованием дозатора. Краевые углы измерялись методом лежащей капли с использованием гониометра ЛК-1, программное обеспечение которого автоматически рассчитывает краевой угол смачивания на основании полученных изображений. Изображение капли и значения краевых углов смачивания в окне программы обработки результатов гониометра представлены на рис. 5.

Рис. 5. Изображение капли в окне программы обработки результатов гониометра ЛК-1...

Анализ показал, что до приклеивания липкой ленты (рис. 6а) краевой угол смачивания составил величину 36.5° , а после отрыва липкой ленты (рис. 6б) – 36.7° . Полученные значения краевых углов практически идентичны. Этот факт указывает на то, что на поверхности исследуемого образца после отрыва липкой ленты не осталось следов

клеевого слоя. Данный результат подтверждает, что разрушение происходит по границе раздела “клеевой слой – поверхность образца”, а не внутри клеевого слоя. Следовательно, в эксперименте действительно измеряется адгезионное взаимодействие между поверхностью стеклотекстолита и силиконовым клеевым слоем.

Чувствительность исследовательского комплекса к изменению адгезии поверхности демонстрируется следующим экспериментом. В качестве образцов использовался стеклотекстолит марки FR-4. Подготовка образцов проводилась на горизонтальной линии микротравления Pill Export 650. Этапы подготовки образцов: 1) промывка водопроводной водой в течение 1 мин под давлением 0.6-0.75 бар, 2) промывка в водном растворе поверхностно-активного вещества (ПАВ) в течение 1 мин 15 с под давлением 1.0–1.2 бар при температуре раствора 48 °С, 3) промывка в дистиллированной воде в течение 1 мин 10 с под давлением 0.86–0.98 бар, 4) сушка в течение 20 с при температуре 50 °С.

В качестве ПАВ использовался моющий концентрат KLUTHE NAKUPUR T9, предназначенный для отмывки резинотехнических изделий, полимеров и прочих не смачиваемых водой поверхностей. Для приготовления раствора ПАВ добавлялось в дистиллированную воду. Были приготовлены растворы без добавления ПАВ и с добавлением ПАВ в концентрациях 0.08, 0.16, 0.47, 1.7 масс%. Измерение адгезии поверхности подготовленных образцов осуществлялось сразу после их подготовки.

Результаты эксперимента, усредненные по 6 измерениям, представлены на рис. 6 в виде зависимостей усилия отрыва F от времени движения столика t при различных концентрациях ПАВ. Как видим, изменение концентрации ПАВ в растворе приводит к изменению адгезии поверхности. Это продемонстрировано на рис. 7, на котором представлены усредненные значения усилия отрыва F_a в зависимости от концентрации ПАВ в растворе C . Сплошная линия, плавно соединяющая полученные экспериментальные значения, приведена для обеспечения наглядности восприятия результатов.

Эксперимент показывает, что даже небольшое увеличение концентрации ПАВ приводит к существенному снижению измеряемого показателя адгезии. Представленный эксперимент не только показывает чувствительность исследовательского комплекса к изменению адгезионных свойств поверхности, но и может косвенно свидетельствовать о том, что измеряется именно показатель адгезии поверхности. Также эксперимент демонстрирует широкие возможности комплекса для проведения научно-исследовательских работ по изучению адгезионных свойств поверхностей материалов.

Рис. 6. Зависимость усилия отрыва F от времени движения столика t после промывки образца...

Рис. 7. Зависимость показателя адгезии поверхности F_a от концентрации C ПАВ в моющем растворе.

5. ВЫВОДЫ

Описанный в работе и апробированный исследовательский программно-аппаратный комплекс отличается простотой исполнения и автоматизированным процессом измерения показателя адгезии плоских поверхностей. В основе разработанного адгезиметра лежит неразрушающий метод отрыва липкой ленты под углом 90° , этот метод обеспечивает целостность исследуемых образцов, что особенно важно при работе с дорогостоящими материалами. Внедренная система контроля скорости отрыва и силы прижатия липкой ленты перед экспериментом обеспечивает воспроизводимость и сопоставимость получаемых экспериментальных данных. Простота конструкции, интуитивно понятный программный интерфейс для управления процессом измерения и обработки результатов обеспечивают надежность и удобство эксплуатации комплекса. Автоматизация процесса измерения позволяет повысить точность получаемых результатов и минимизировать влияние человеческого фактора. Представленные результаты показывают высокую чувствительность комплекса к изменениям адгезионных свойств поверхности.

Разработанный программно-аппаратный комплекс представляет собой инновационное решение для определения усредненного показателя адгезии поверхности, он позволяет проводить исследования влияния различных внешних факторов на значение показателя адгезии. Комплекс может успешно применяться в научно-исследовательских лабораториях, на производственных предприятиях и в контрольно-измерительных центрах для проведения регулярных испытаний поверхностей материалов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кинлок Э. Адгезия и адгезивы. Наука и технология. Москва: Мир, 1991.

2. *Riedel R., Rani G., Sengupta A.* // *Microorganisms*. 2025. V. 13. P. 637.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms13030637>
3. *Linghu C., Yang X., Liu Y., Li D., Gao H., Hsia K.* // *J. Mech. Phys. Solids*. 2023. V. 170. P. 105091. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2022.105091>
4. *Dyuryagina A., Degert A., Byzova Y., Ostrovnoy K., Demyanenko A., Lutsenko A., Shirina T.* // *Polymers*. 2025. V. 17. P. 199. <https://doi.org/10.3390/polym17020199>
5. *Guo H., Saed M., Terentjev E.* // *Macromolecules*. 2023. V. 56. P. 6247.
<https://doi.org/10.1021/acs.macromol.3c01038>
6. ГОСТ 32299-2013. Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом отрыва. Москва: Стандартинформ, 2014.
7. ГОСТ 31149-2014 (ISO 2409:2013). Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом решетчатого надреза. Москва: Стандартинформ, 2014.
8. ГОСТ 51164-98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. Приложения А и Б. Москва: Госстандарт России, 1998.
9. ГОСТ 15140-78. Материалы лакокрасочные. Методы определения адгезии. Москва: Стандартинформ, 2009.
10. ГОСТ 9.602-2016. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. Приложение К. Москва: Стандартинформ, 2016.
11. *Каширин Н.В., Аверина А.И.* РФ Патент 2835973, 2025.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Фотография исследовательского программно-аппаратного комплекса для измерения адгезии поверхности: 1 – адгезиметр собственной конструкции, 2 – ЭВМ, 3 – ручной пресс, 4 – ракель с фетровым лезвием, 5 – липкая лента, 6 – фотография крупным планом места расположения образца в процессе измерения.
- Рис. 2.** Конструкция адгезиметра: 1 – основание, 2 – тензодатчик, 3 – столик для образца, 4 – направляющая, 5 – передача “винт-гайка”, 6 – вал передачи, 7 – двигатель, 8 – образец, 9 – липкая лента, 10 – зажим образца, 11 – зажим ленты, 12 – подшипниковый узел, 13 – электронный блок управления и передачи данных.
- Рис. 3.** Электронный блок управления и передачи данных в ЭВМ: 1 – блок питания с напряжением 12 В, 2 – плата ШИМ-управления оборотов двигателя, 3 – микроконтроллер с АЦП-модулем.
- Рис. 4.** Окно интерфейса программы обработки результатов эксперимента: 1 – график зависимости усилия отрыва от времени движения столика по эксперименту №1, 2 – прямая, показывающая усредненное значение усилия отрыва по длине образца, 3 – линия, показывающая значение усилия отрыва на выбранном участке образца, 4 – линия, показывающая условное положение выбранного участка образца.
- Рис. 5.** Изображение капли в окне программы обработки результатов гониометра ЛК-1: до приклеивания липкой ленты (а) и после отрыва липкой ленты (б).
- Рис. 6.** Зависимость усилия отрыва F от времени движения столика t после промывки образца при различных концентрациях ПАВ в моющем растворе: 1 – без ПАВ, 2 – 0.08, 3 – 0.16, 4 – 0.47, 5 – 1.7 масс %.
- Рис. 7.** Зависимость показателя адгезии поверхности F_a от концентрации C ПАВ в моющем растворе. Сплошная линия приведена для обеспечения наглядности восприятия результатов.

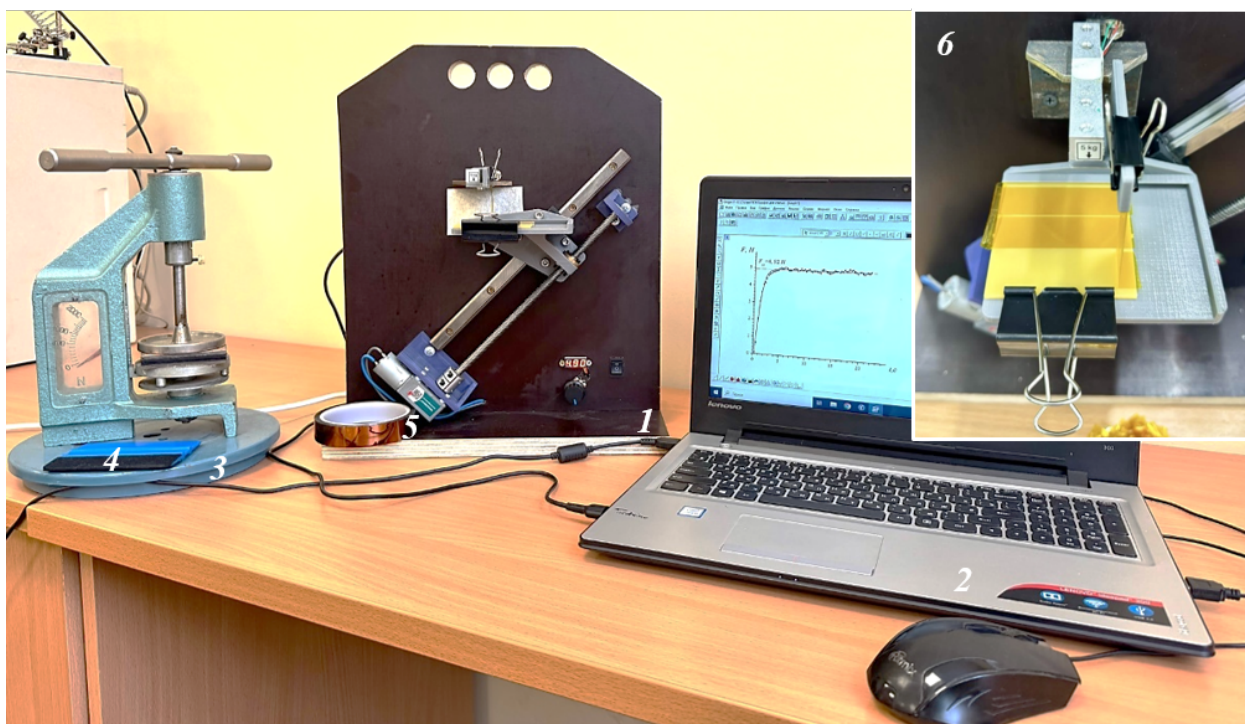


Рис. 1.

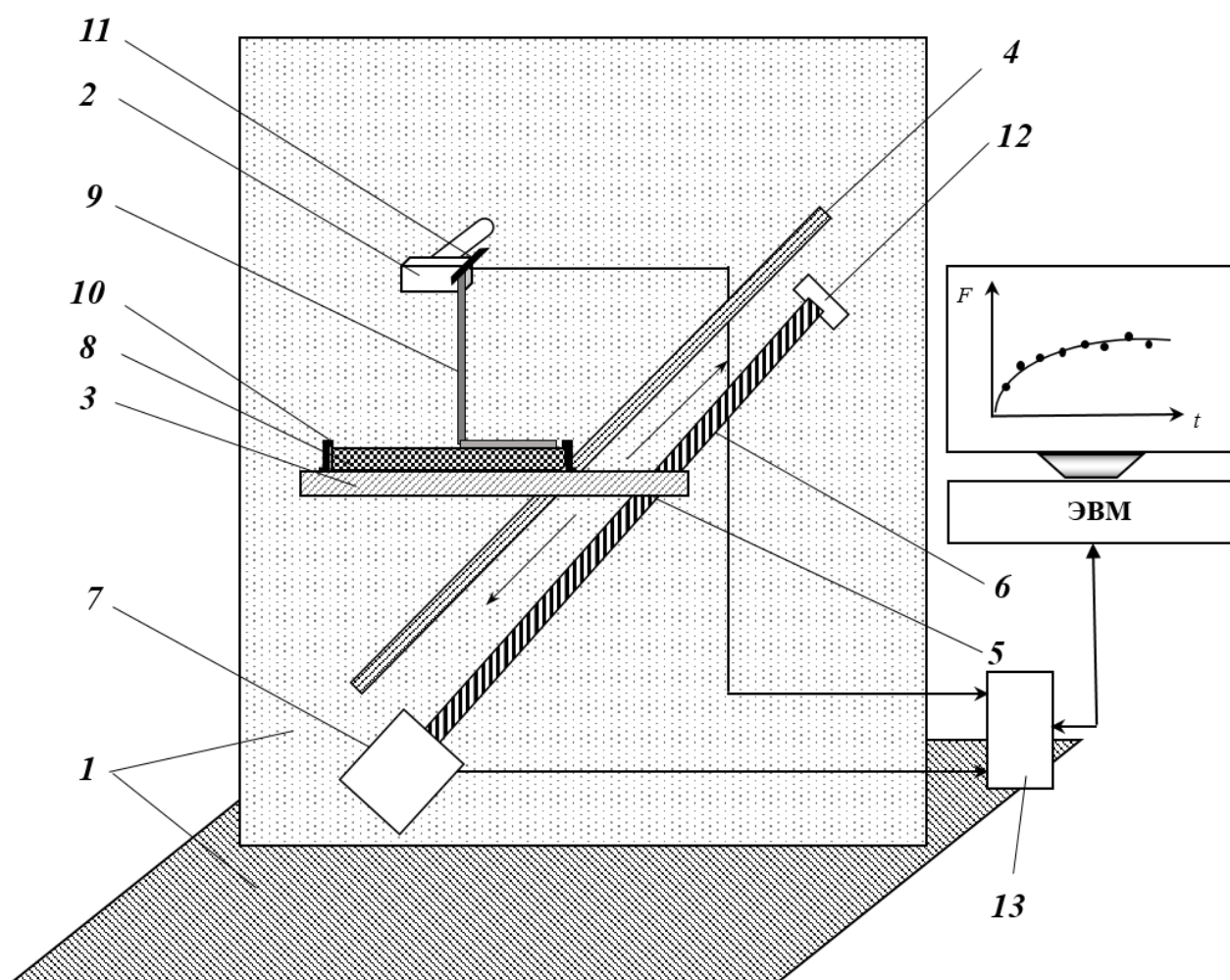


Рис. 2.

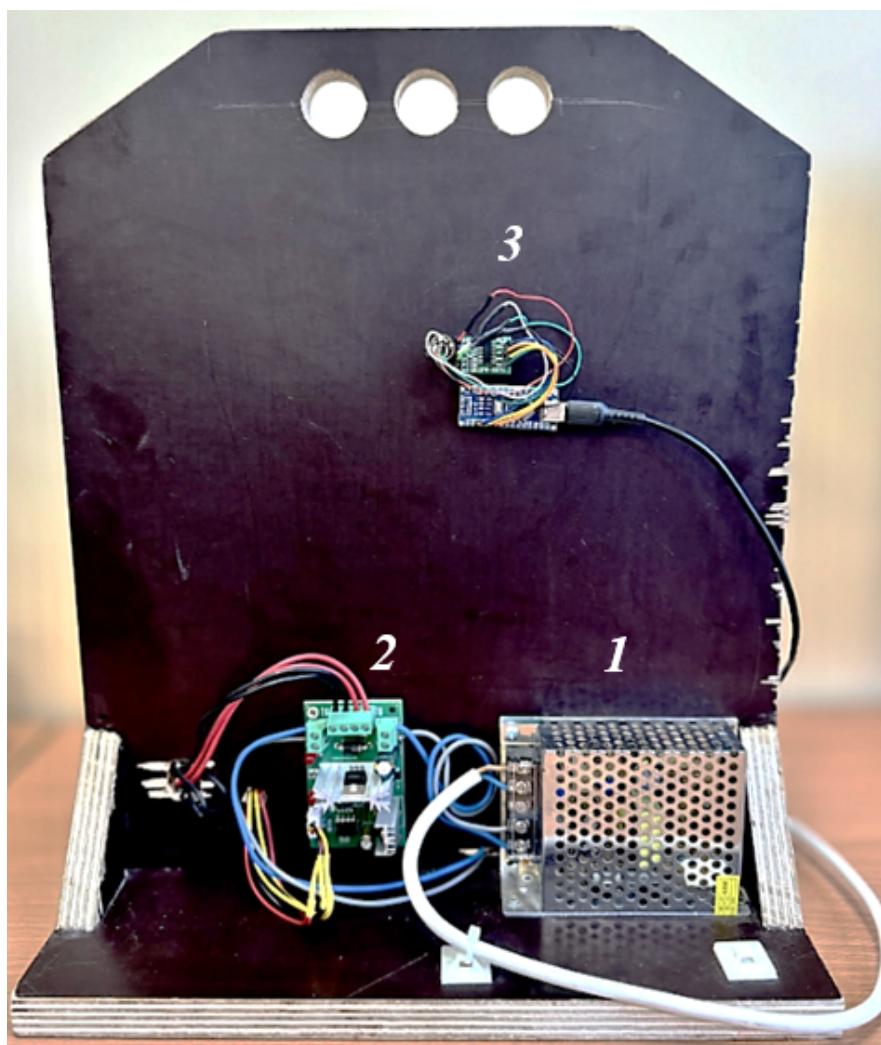


Рис. 3.

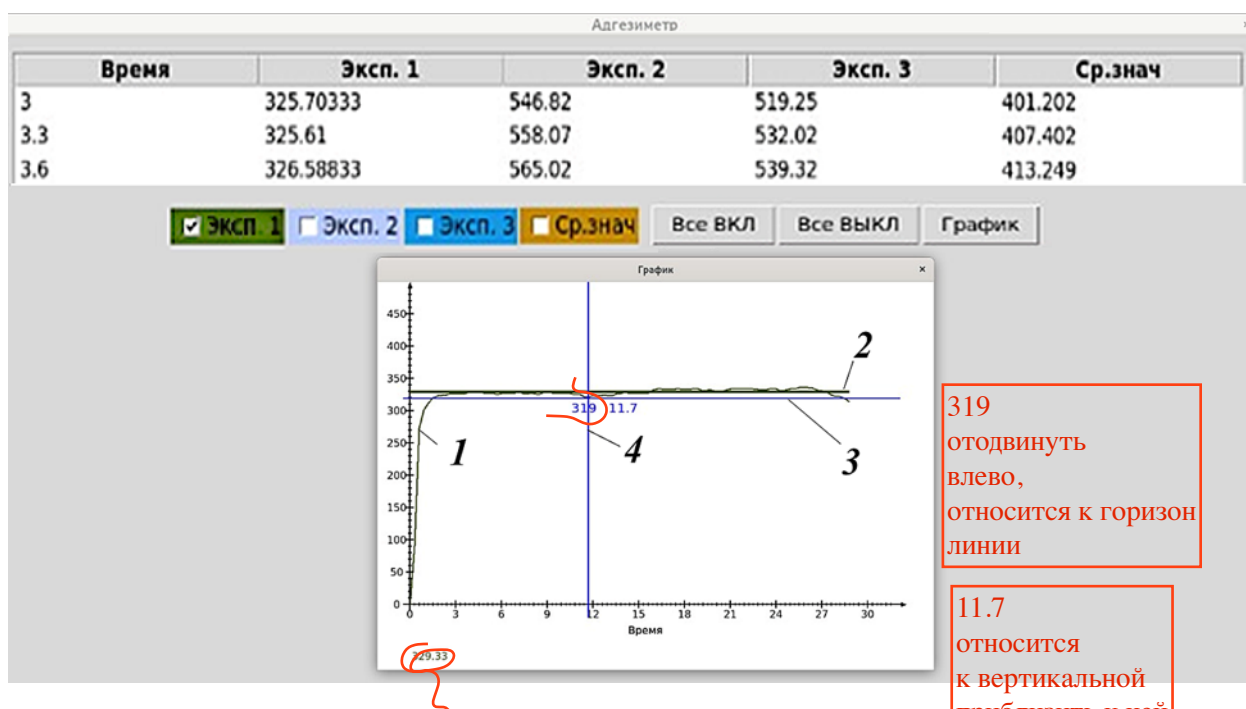
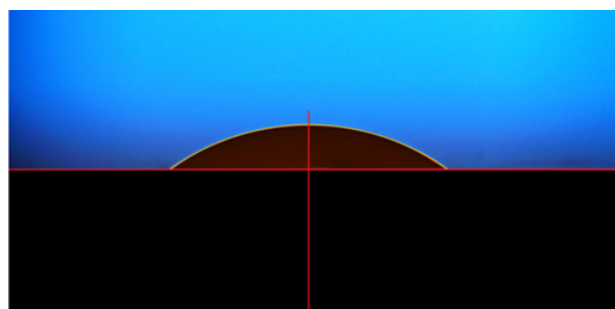
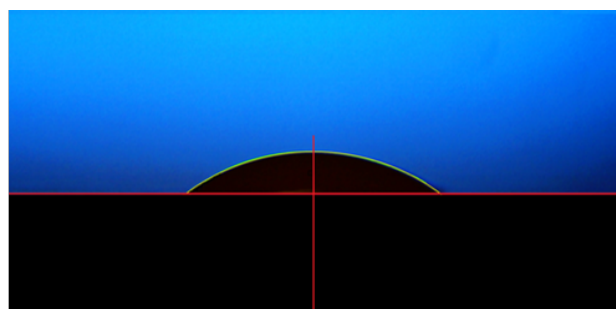


Рис. 4.



Расчет капли 1_2.jpg
 Контактный угол левый: 36,524 правый: 36,524 среднее: 36,524

(а)



Расчет капли 1_4_л2.jpg
 Контактный угол левый: 36,702 правый: 36,702 среднее: 36,702

(б)

Рис. 5.

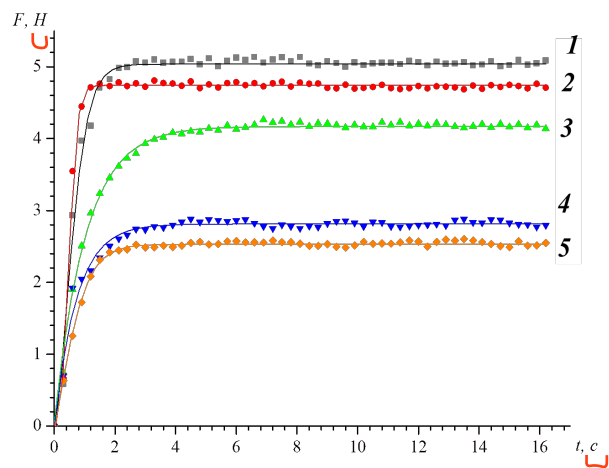


Рис. 6.

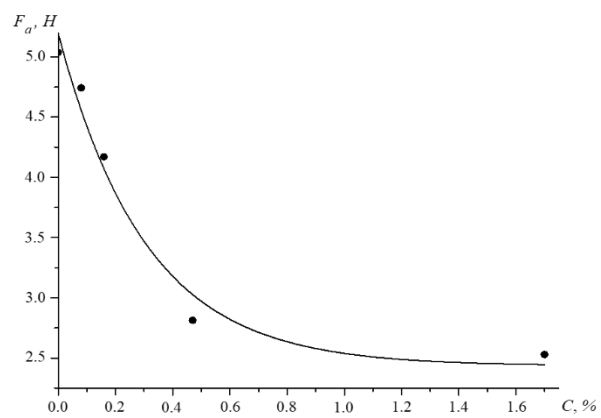


Рис. 7.