

Учреждение образования
«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе
_____ О.М. Демиденко
« ____ » _____ 2022

ОТЧЕТ

о работе студенческой научно-исследовательской лаборатории

«Вакуумно-плазменные технологии»

за 2022 год

Декан факультета физики и ИТ

Д.Л.Коваленко

Зав. кафедрой оптики

В.Е. Гайшун

Научный руководитель

Н.Н. Федосенко

Гомель 2022

СОДЕРЖАНИЕ

1. ИНФОРМАЦИЯ О СНИЛ
2. СОСТАВ СНИЛ
3. ИССЛЕДОВАНИЯ, ВЫПОЛНЕННЫЕ В СНИЛ
 - 3.1 Методика определения поверхностного натяжения на границе раздела
 - 3.2 Метод Вильгельми
 - 3.3 Метод капиллярного поднятия
 - 3.4 Метод прикрепленного пузырька
 - 3.5 Метод счета капель
 - 3.6 Методы определения поверхностной энергии твердых материалов на основе измерения краевого угла лежащей капли
 - 3.7 Метод Зисмана
 - 3.8 Метод ОВРК (метод Оунса, Вендта, Рабеля, Кьельбле)
 - 3.9 Исследование влияния типа покрытия на угол смачивания и адсорбционные свойства
4. КОНФЕРЕНЦИИ, ПУБЛИКАЦИИ И АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ.

1. ИНФОРМАЦИЯ О СНИЛ

В конце 2014 года в целях повышения эффективности студенческой научной деятельности на кафедре проведена реорганизация студенческого конструкторского бюро «Проектирование систем управления лазерным лучом», которое преобразовано в студенческую научно-исследовательскую лабораторию «Вакуумно-плазменные технологии» (далее СНИЛ).

Научным руководителем СНИЛ с сентября 2015 г. является доцент кафедры оптики, кандидат технических наук Федосенко Николай Николаевич. За СНИЛ закреплены аудитории 1-11, 1-5, 1-14 уч. корп. № 5.

Деятельность СНИЛ направлена на улучшение качества подготовки высококвалифицированных специалистов посредством привлечения студентов к активной научно-исследовательской и научно-производственной деятельности.

Основные направления деятельности СНИЛ:

- изучение высокоэффективных технологических процессов напыления углеродных, диэлектрических, металлических и полупроводниковых материалов;
- разработка физико-химических основ формирования покрытий с требуемыми и управляемыми физическими свойствами;
- совершенствование и дальнейшее развитие методов ионно-лучевых, ионно-плазменных, корпускулярно-фотонных технологий с целью создания высокотехнологичных и конкурентно способных вакуумных установок.

Результаты научных исследований, выполненных студентами в рамках СНИЛ как правило ложатся в основу их курсовых и дипломных работ.

Студенты, активно работающие в СНИЛ, проявившие склонность к научной работе и имеющие хорошие показатели в учёбе, могут быть в

установленном порядке рекомендованы для поступления в магистратуру и аспирантуру.

2. СОСТАВ СНИЛ

Слепенчук И.О., Болунов А.А., Зинкевич Э.Д. (факультет физики и информационных технологий, 3 курс); Садовский А.А., Пархоменко Ф.Т., Бондаренко Е.В., Грищенко К.И., Мятенко М.А. (факультет физики и информационных технологий, 4 курс).

3. ИССЛЕДОВАНИЯ, ВЫПОЛНЕННЫЕ В СНИЛ

3.1 Методика определения поверхностного натяжения на границе раздела

Все методы измерения поверхностного натяжения на границе раздела фаз жидкость – газ, жидкость – жидкость и жидкость – твердое тело могут быть разделены на статические, полустатические и динамические.

В статических методах поверхностное натяжение определяется на основе изучения равновесного состояния, к которому самопроизвольно приходит изучаемая система. В практикуме используются статические методы уравнивания пластинки (метод Вильгельми), капиллярного поднятия, метод лежащей или висящей капли (пузырька).

3.2 Метод Вильгельми

Метод Вильгельми является универсальным методом, подходящим для измерения поверхностного натяжения в течение длительного промежутка времени. Измеряется усилие, возникающее в процессе отрыва стеклянной пластины от поверхности жидкости. При погружении пластины с периметром сечения (L) в смачивающую жидкость вес пластины (G) определяется равенством:

$$G = G_0 + L\sigma \cos \theta, \quad (1)$$

где G_0 – вес сухой пластины, σ – поверхностное натяжение жидкости, θ – краевой угол смачивания.

3.3 Метод капиллярного поднятия

В основе капиллярного метода лежит свойство искривленной границы раздела, которое заключается в том, что давление в жидкости под искривленной и плоской поверхностями неодинаково и отличается на величину капиллярного давления (рисунок 1).

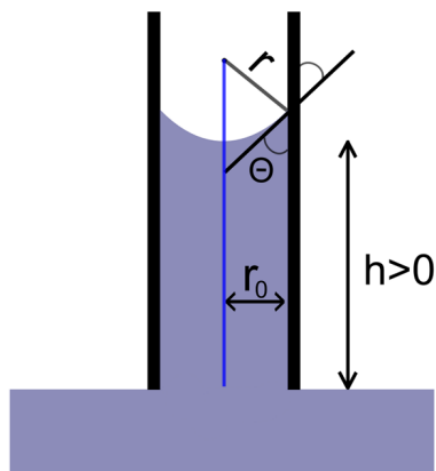


Рисунок 1 – Расчет по формуле Жюрена (Борелли - Жюрена)

Капиллярное давление является движущей силой поднятия или опускания жидкости в капиллярах, частично погруженных в эту жидкость. При смачивании жидкостью поверхности капилляра в нем образуется вогнутая поверхность, давление под которой меньше, чем под плоской поверхностью жидкости в сосуде. Под действием этой разности давлений жидкость в капилляре поднимается выше ее уровня в сосуде до тех пор, пока гидростатическое давление столба жидкости не уравнивает капиллярное давление. Если жидкость не смачивает поверхность капилляра, то в нем образуется выпуклая поверхность, давление под которой больше, чем под плоской поверхностью. Вследствие этого жидкость в капилляре опускается ниже ее уровня в сосуде. Для точного определения поверхностного натяжения жидкости по высоте поднятия кроме радиуса капилляра необходимо измерить краевой угол. В этом заключается основной недостаток метода. Для воды и многих органических жидкостей краевой угол близок к нулю, поэтому необходимость в его определении отпадает. Расчет высоты поднятия столба жидкости (h) производится по формуле Жюрена:

$$h = \frac{2\sigma \cos\theta}{\rho g r}. \quad (2)$$

где σ – поверхностное натяжение жидкости; θ – угол смачивания капилляра; g – ускорение свободного падения; ρ – плотность жидкости; r – радиус капилляра.

3.4 Метод прикрепленного пузырька

Преимуществом метода прикрепленного пузырька (по сравнению с методом лежащей капли) является полная гидратация исследуемой поверхности твердого тела. Таким образом, поверхностная энергия между водой и твердой поверхностью не будет изменяться в ходе измерения геометрических параметров пузырька воздуха на границе раздела твердое тело-вода. Измерения краевых углов производится в трехфазной системе, состоящей из воды, анализируемой поверхности и пузырька воздуха или октана (рисунок 2).

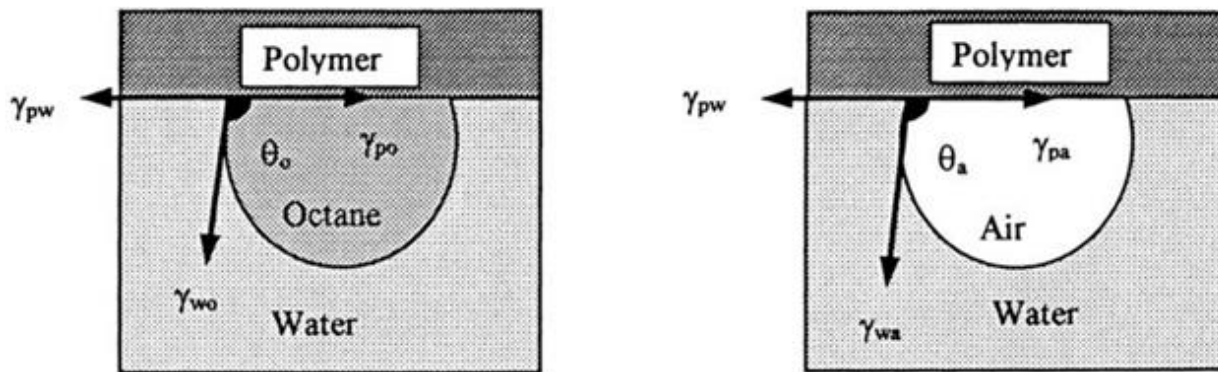


Рисунок 2 – Метод прикрепленного пузырька

Для определения краевого угла смачивания θ необходимо измерить высоту капли h и диаметр основания капли d (радиус), прикрепленной с нижней стороны мембраны.

Полустатическими называются методы определения поверхностного натяжения границы раздела фаз, возникающей и периодически обновляемой в процессе измерения (метод максимального давления пузырька и сталагмометрический метод), а также методы отрыва кольца и втягивания пластины. Эти методы позволяют определить равновесное значение поверхностного натяжения, если измерения производятся в таких условиях, что время, в течение которого происходит формирование поверхности раздела, значительно больше времени установления равновесия в системе.

3.5 Метод счета капель (сталагмометрический)

Физические основы сталагмометрического метода заключаются в следующем. В момент отрыва капли жидкости от нижнего конца вертикальной трубки ее вес уравнивается силой поверхностного натяжения, которая действует вдоль периметра шейки капли и препятствует ее отрыву.

Для определения числа капель, образуемых при вытекании определенного объема жидкости, пользуются сталагмометром, представляющим стеклянную трубку с расширением посередине, заканчивающуюся капилляром (рисунок 3).

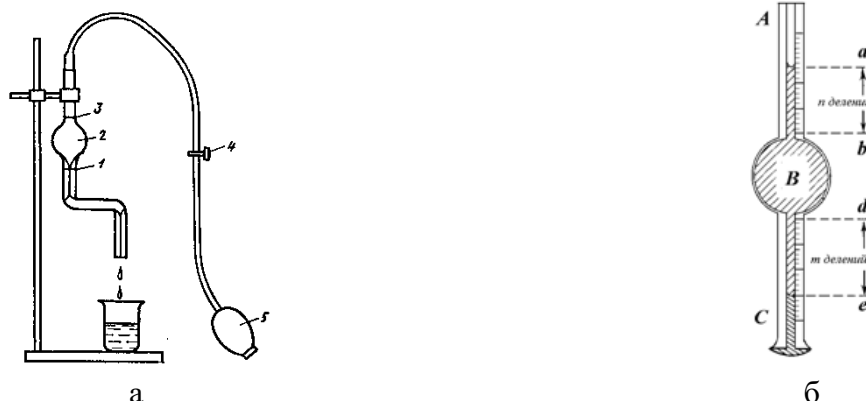


Рисунок 3 – Сталагмометрическая установка: а – внешний вид установки; б – схема простейшего сталагмометра

Выше и ниже расширения нанесены метки, ограничивающие объем V . Для расчета поверхностного натяжения определяют число капель n_0 и n , которые образуют, соответственно, стандартная жидкость (обычно дистиллированная вода) и исследуемая жидкость при вытекании от верхней до

нижней метки. Сталагмометрическая установка изображена схематически на рисунке 3.

Исследуемую жидкость наливают в стакан, который поднимают так, чтобы конец капилляра погрузился в жидкость. С помощью груши набирают жидкость выше верхней метки 3 (рисунок 3, а), избегая образования пузырьков воздуха. Закрывают зажим. Опускают стакан на стол, открывают осторожно зажим, и жидкость начинает капать из капилляра. Когда уровень жидкости совпадает с верхней меткой 3, начинают счет капель. При совпадении уровня жидкости с нижней меткой 1, счет капель заканчивают.

Первоначально определяют объем одной капли из числа подсчитанных вытекших из сталагмометра капель N :

$$V = \frac{V_k + (m + n)v_e}{N}, \quad (3)$$

где V_k – объем сферического пузырька сталагмометра; v_e – объем каждого деления на калибровочных капиллярах; n – деление, соответствующее верхнему мениску в капилляре А (n делений от метки а); m – количество делений от метки d в капилляре С (рисунок 3, б). В дальнейшем рассчитывается поверхностное натяжение (σ) по формуле:

$$\sigma = \sigma_0 \frac{V\rho}{V_0\rho_0}, \quad (4)$$

где σ_0 - поверхностное натяжение калибровочной жидкости; V_0 - объем сферического пузырька калибровочной жидкости; ρ_0 - плотность калибровочной жидкости; V - объем исследуемой жидкости; ρ - плотность исследуемой жидкости.

К недостаткам сталагмометрического метода можно отнести возможность испарения жидкости с поверхности капель при их длительном образовании и необходимость введения поправочных коэффициентов для точного определения поверхностного натяжения. При учете всех поправок погрешность сталагмометрического метода не превышает 1 %. Метод используется для измерения полустатического поверхностного натяжения при продолжительности образования капли 2–10 с.

3.6 Методы определения поверхностной энергии твердых материалов на основе измерения краевого угла лежащей капли

Основной сложностью анализа поверхностной энергии твердых материалов на основе измерения краевого угла смачивания является правильный подбор тестовых жидкостей для получения максимально достоверных результатов. В большинстве случаев для неполярных поверхностей используют неполярные жидкости и теории, которые не придают особого значения межмолекулярным взаимодействиям, для полярных поверхностей применяются полярные жидкости и теории, основанные на взаимодействии активных центров поверхности с газовой или жидкой фазой. Основными теориями, используемыми в расчетах по величине краевого угла

смачивания, являются: метод Зисмана, метод ОВРК (метод Оунса, Вендта, Рабеля и Кьельбле), метод Фоукса, метод Ву, метод Шульца, метод Оусса и Гуда.

Степень взаимодействия на границе твёрдой и жидкой фаз (смачивание) обычно оценивается по величине косинуса угла смачивания твёрдой поверхности жидкостью ($\cos \theta$). Полному смачиванию поверхности соответствует значение $\cos \theta = 1$; гидрофильной считается поверхность при значениях $\cos \theta$ в диапазоне от 0 до 1, гидрофобной – от (-1) до 0. Отмеченные значения косинуса связаны с интерпретацией уравнения Юнга-Дюпре, которое может быть записано в следующем виде:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{ТВ} - \sigma_{ТВ-Ж}}{\sigma_{Ж}} \quad (5)$$

где $\sigma_{ТВ}$ – поверхностное натяжение на границе твёрдая поверхность – газ; $\sigma_{ТВ-Ж}$ – поверхностное натяжение на границе жидкость – твёрдая поверхность; $\sigma_{Ж}$ – поверхностное натяжение на границе жидкость – газ. Смачивание происходит в том случае, если $\sigma_{ТВ-Ж} < \sigma_{ТВ}$ (наблюдается уменьшение свободной поверхностной энергии), в противном случае – поверхность не смачивается, поскольку создание межфазного контакта требует повышения энергии затронутой поверхности (разность энергий Гиббса ΔG положительна). Уравнение Юнга-Дюпре носит термодинамический характер и позволяет делать феноменологические заключения, не вдаваясь в подробности процессов, происходящих на поверхности межфазного контакта. Отмеченный термодинамический характер снижает точность прогнозирования взаимодействий при применении данной модели.

Скорость установления равновесного краевого угла зависит от многих факторов, в том числе – от шероховатости и химической однородности твёрдой поверхности. Чувствительность θ к энергетической неоднородности поверхности, связанной с ее микрорельефом, зависит от концентрации и морфологии дефектов, а также от ориентации дефектов (впадин и выступов) по отношению к периметру смачивания и составляет от нескольких нанометров до нескольких микрон. Величина краевого угла на шероховатой поверхности $\theta_{ш}$ связана с величиной угла на идеально гладкой поверхности θ_0 уравнением Венцеля – Дерягина:

$$\cos(\theta_{ш}) = K \cos(\theta_0), \quad (6)$$

где K - коэффициент шероховатости поверхности; $K = S_{ш}/S_0$, где $S_{ш}$ и S_0 – площади реальной и идеально гладкой поверхностей, соответственно. Как правило, при смачивании увеличение шероховатости поверхности способствует уменьшению краевого угла, а в случае плохого смачивания, краевой угол увеличивается при увеличении шероховатости.

Возможность оценить степень энергетической неоднородности твёрдой поверхности, с точки зрения наличия на ней участков с различной смачиваемостью (в том числе – из-за химической неоднородности), даёт теория смачивания гетерогенных поверхностей. В самом простом случае, если

поверхность состоит из двух типов участков, краевой угол на ней определяется уравнением Касси-Бакстера:

$$\cos \theta = x \cos \theta_1 + (1 - x) \cos \theta_2, \quad (7)$$

где x – доля участков, характеризующихся краевым углом θ_1 , $(1 - x)$ – доля участков с краевым углом θ_2 .

3.7 Метод Зисмана

Теория Зисмана использует уравнение Юнга-Дюпре в качестве базового, по этой причине соответствующий метод определения значения удельной поверхностной энергии является достаточно точным только для поверхностей с низкой полярностью. Согласно теории Зисмана свободная энергия твердой поверхности пропорциональна поверхностному натяжению жидкости, полностью смачивающей эту поверхность (т.е. $\theta = 0^\circ$). Для использования метода Зисмана необходимо получить зависимость $\cos \theta = f(\sigma)$ для различных жидкостей. С этой целью строят график в координатах $\cos \theta$ (ось Y) – θ (ось X) для жидкостей с последующей экстраполяцией в усредненную кривую до $\cos \theta = 1$; полученное значение σ является характеристикой поверхностной энергии единицы поверхности твердой фазы (рисунок 4).

Теория Зисмана показывает хорошие результаты для неполярных поверхностей (полиэтилен, полипропилен). Однако для полярных поверхностей (стекло, керамика и металлы) теория Зисмана не адекватна, т.к. она основана на однопараметрической модели. Полимерные поверхности, прошедшие плазменную и термическую обработку, как правило, содержат полярные центры, так же как и полярные полимеры (полиамиды, полиэферы, полиакрилаты, поликарбонаты и др.). В теории Зисмана игнорируются межмолекулярные взаимодействия между жидкостью и твердым телом, очень сильные для приведенных в качестве примера полярных веществ. Наиболее ярким примером сказанного является тот факт, что поверхностное натяжение смачивания органосиликатных материалов по Зисману отражает лишь часть поверхностной энергии, а именно дисперсионную составляющую поверхностных сил (Фоукс теоретически показал, что межфазное натяжение является суммой вкладов различных молекулярных сил на поверхности раздела: дисперсионной и полярной составляющих).

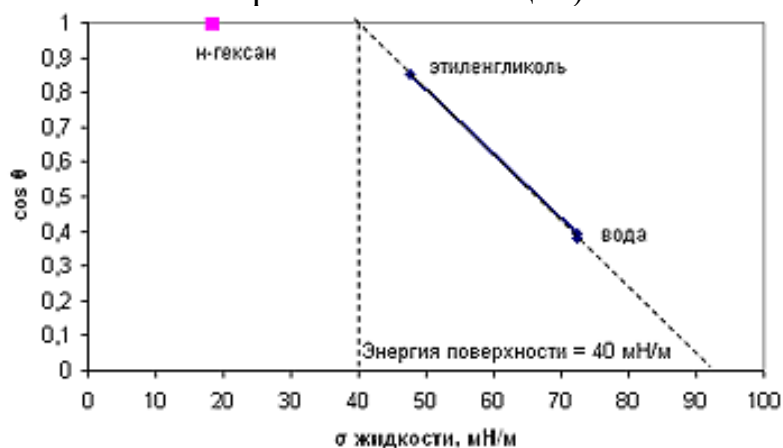


Рисунок 4 – Пример построения графика Зисмана

Необходимо отметить, что согласно Зисману, если жидкость не растекается на поверхности высокой поверхностной энергии, то это свидетельствует о наличии на ней адсорбционного слоя, снижающего поверхностную энергию настолько, что поверхность ведет себя подобно поверхности с низкой энергией. Это достигается в результате адсорбции газов, летучих веществ или примесей в поверхностном слое.

3.8 Метод ОВРК (метод Оунса, Вендта, Рабеля, Кьельбле)

Оунс, Вендт, Рабель и Кьельбле рассматривали поверхностное натяжение с точки зрения полярной и дисперсионной составляющих. Они представили, что энергия поверхности твердого тела включает две составляющие: дисперсионную и полярную. Дисперсионная составляющая включает силы Ван-дер-Ваальса и другие неспецифические взаимодействия, полярная составляющая – сильные взаимодействия и водородные связи. На основе этих представлений было выведено уравнение:

$$\begin{aligned} \sigma_L \cdot (1 + \cos \theta) &= 2 \cdot ((\sigma_L^D \cdot \sigma_S^D)^{0,5} + (\sigma_L^P \cdot \sigma_S^P)^{0,5}); \\ \sigma_L &= \sigma_L^D + \sigma_L^P; \\ \sigma_S &= \sigma_S^D + \sigma_S^P; \\ \frac{\sigma_L(\cos \theta + 1)}{2\sqrt{\sigma_L^D}} &= \frac{\sqrt{\sigma_S^P} \cdot \sqrt{\sigma_L^P}}{\sqrt{\sigma_L^D}} + \sqrt{\sigma_S^D}; \end{aligned} \quad (8)$$

где σ_L – поверхностное натяжение жидкости; σ_S – свободная поверхностная энергия твердого тела; σ_S^D , σ_L^P – полярная составляющая свободной поверхностной энергии твердого тела и жидкости, соответственно, которая определяется электростатическим взаимодействием, водородными связями и кислотно-основным взаимодействием Льюиса; σ_S^D , σ_L^P – дисперсионная составляющая свободной поверхностной энергии твердого тела и жидкости соответственно, определяемая Ван-дер-Ваальсовым взаимодействием; θ – краевой угол смачивания. Для расчета по модели (ОВРК) кроме поверхностного натяжения жидкости и краевого угла смачивания, необходимо иметь данные о дисперсионной и полярной составляющих поверхностной энергии. Для установления последних используют поверхность с известными данными, например, тефлон (ПТФЭ). Предполагается, что свободная поверхностная энергия чистого тефлона равна 18,0 мДж/м², и у него отсутствует полярная составляющая. Значения полярной и дисперсионной составляющей для некоторых жидкостей имеются в справочной литературе. Зная составляющие жидкости, можно определить составляющие исследуемой твердой поверхности. График расчета методом ОВРК применительно к полиметилметакрилат (ПММА) представлен на рисунке 5.

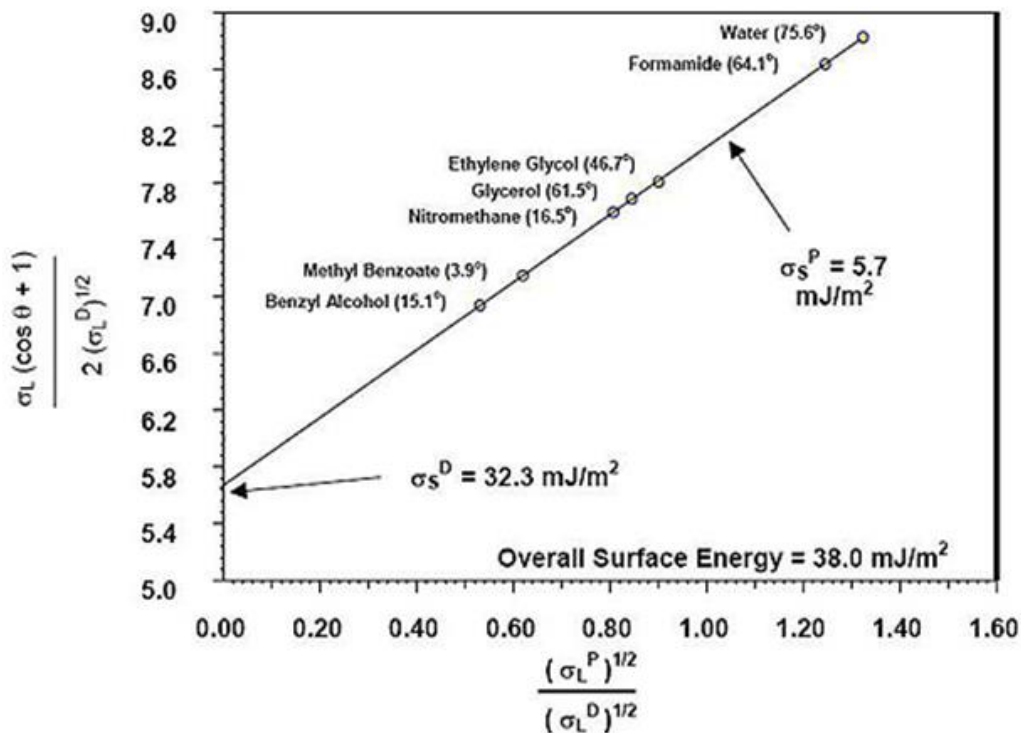


Рисунок 5 – Графический расчет методом ОВРК

При проведении анализа следует учитывать тот факт, что силы Ван-дер-Ваальса могут действовать на глубину порядка 100 нм.

3.9. Исследование влияния типа покрытия на угол смачивания и адсорбционные свойства

Адсорбционную активность поверхностей, получаемых различными способами, оценивали путем расчета поверхностной энергии и ее составляющих. Расчет производили на основании результатов измерений краевых углов смачивания поверхности образцов двумя различными жидкостями: глицерином и дистиллированной водой фиксированного объема (5 мкл). Захват и распознавание изображения лежащей капли жидкости проводился с помощью специально разработанной программно-аппаратной системы «Капля-2» на базе микроскопа МБС-6 с частотой 1 Гц в течение 1,5 мин (рисунок 6).



Рисунок 6 – Установки для измерения краевого угла смачивания «Капля-2»

Краткие технические характеристики установки для измерения краевого угла смачивания «Капля-2» представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики установки для измерения краевого угла смачивания «Капля-2»

Размеры образца, мм	120x90
Интервал измерения краевых углов, град	6–176
Интервал измерения поверхностного натяжения, мН/м	1–100
Оптическая система	USB-камера
Увеличение линзы	^x 12
Габаритные размеры, мм	220x294x540
Масса, кг	6

Полная свободная энергия поверхности образуется из вкладов различных межмолекулярных сил, действующих на исследуемой поверхности, и ее величину можно записать в следующем виде:

$$\sigma = \sigma^d + \sigma^p, \quad (28)$$

где σ^d – дисперсионная составляющая поверхностной энергии, Н/м; σ^p – полярная составляющая поверхностной энергии, Н/м.

Расчет поверхностной энергии равной сумме ее дисперсионной и полярной составляющих проводили по двухжидкостной методики Owen, Wendt, Rabel and Kaelble (OWRK). Составляющие сил свободной энергии поверхности твердого тела σ_s^d , σ_s^p и жидкости σ_x^p , σ_x^d можно связать со значением косинуса угла смачивания θ твердого тела выражением:

$$W_a = \sigma_x (1 + \cos \theta) = 2 \left(\sqrt{\sigma_x^p \sigma_s^d} + \sqrt{\sigma_x^d \sigma_s^p} \right). \quad (9)$$

Зная значения полных и составляющих поверхностных натяжений двух различных жидкостей, и решив систему из двух уравнений, можно найти составляющие и полную поверхностную энергию твердого тела. Решение системы из двух уравнений проводили средствами Excel.

В качестве тестовых жидкостей использовали глицерин и воду, поверхностное натяжение и ее компоненты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Поверхностное натяжение тестовых жидкостей и ее компоненты

Жидкость	Дисперсионный компонент, мДж/м ²	Полярный компонент, мДж/м ²	Поверхностное натяжение, мДж/м ²
Вода	21,8	50,8	72,6
Глицерин	37	26,4	63,4

Применение метода исследования смачивания актуально как для изучения фундаментальных проблем физикохимии поверхности, таких как получение информации о структуре и свойствах поверхности раздела фаз и проходящих с ее участием процессов, так и для технологических приложений, связанных, в частности, с выбором наиболее эффективных функциональных покрытий сельскохозяйственной техники. Установленные значения краевых углов смачивания, рассчитанные на их основе адсорбционные и термодинамические характеристики поверхности и проанализированные факторы, влияющие на их значения, позволят выбрать наиболее подходящее покрытие для узлов сельскохозяйственной техники, не проводя трудоемкие и затратные испытания самих узлов.

Качественный анализ полученных данных указывает, что величины краевого угла смачивания воды и глицерина в целом соответствуют друг другу (рисунок 7). Данный факт подтверждает правильность выбора тестовых жидкостей глицерина и воды, с одной стороны, и наличие дисперсионных и полярных компонентов у тестовой жидкости «сок кормов», с другой.

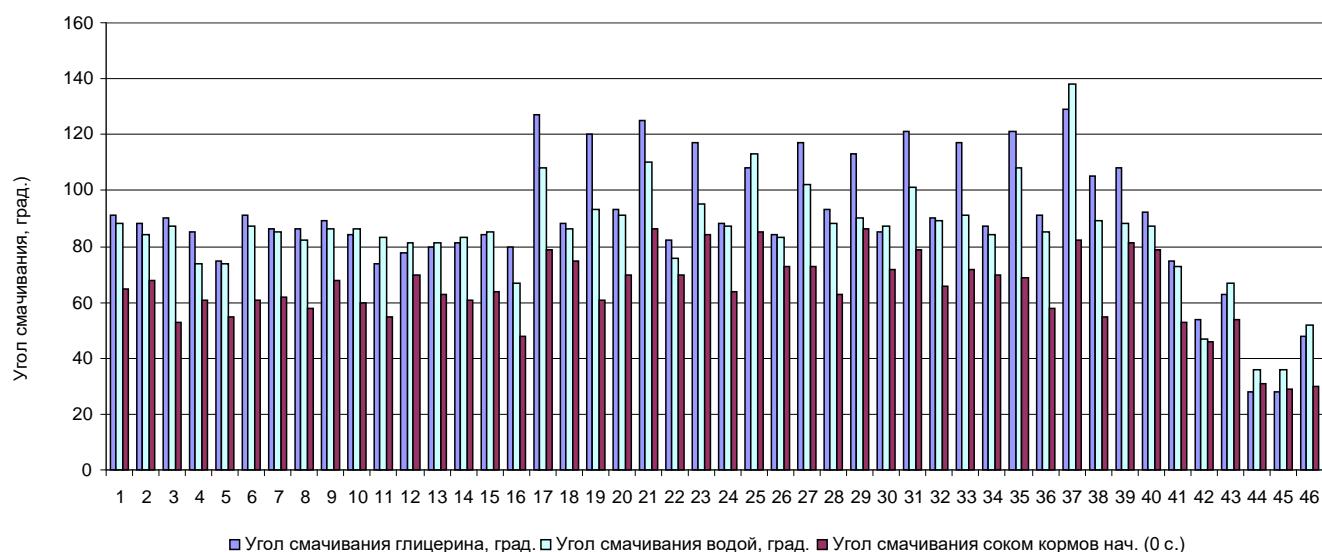


Рисунок 7 – Значения краевого угла смачивания образцов

Минимальные значения краевого угла смачивания водой имели образцы 44, 45, а максимальные значения образцы 17, 21, 25, 27, 31, 37. Минимальные значения краевого угла смачивания глицерином имели также образцы 44, 45, а максимальные значения образцы 17, 21. Для исследуемых жидкостей минимальные значения краевого угла смачивания имели образцы 44, 45, 46, а максимальные значения образцы 21, 23, 25, 29, 37, 39.

Заключение

В работе показаны основные статические, полустатистические и динамические методы определения поверхностного натяжения. Среди представленных методов метод лежащей капли является наиболее применимым для твердых гетерогенных поверхностей с целью определения их адгезионных или антиадгезионных свойств. Использование приближения метода ОВРК (метод Оунса, Вендта, Рабеля и Кьельбле) позволяет по измеренным краевым углам смачивания двух известных тестовых жидкостей (глицерина и воды) найти полную поверхностную энергию поверхности, а также ее составляющие: дисперсионную и полярную. Установленная величина поверхностной энергии может коррелировать также со степенью адгезионного взаимодействия подложки с другими жидкостями сложного химического состава, например красителей. В частности, более высокие значения краевых углов смачивания свидетельствуют о меньшей поверхностной энергии и, соответственно, больших антиадгезионных свойствах. Кроме того, установление изменения во времени краевого угла смачивания позволяет определить степень энергетической гетерогенности твердой поверхности.

4. КОНФЕРЕНЦИИ, ПУБЛИКАЦИИ И АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ

1. **Пархоменко, Ф.Т.** Разработка автоматизированной системы учета средств измерений и ТНПА / Ф.Т. Пархоменко // Дни студенческой науки: материалы LI студ. науч.- практ. конф., Гомель, май 2022 г.: ГГУ имени Ф. Скорины. – Гомель, 2022. – Ч.1. – С. 97 – 98.
2. **Дубовская, В.А.** О применении интернет-сервиса КАНООТ на уроках физики / В.А. Дубовская // Дни студенческой науки: материалы LI студ. науч.- практ. конф., Гомель, май 2022 г.: ГГУ имени Ф. Скорины. – Гомель, 2022. – Ч.1. – С. 93 – 94.
3. **Садовский, А. А.** Прецизионное определение слабого угла смешивания Вайнберга в экспериментах на электрон-позитронных коллайдерах следующего поколения / А.А. Садовский // Актуальные вопросы физики и техники, посвященная 100-летию со дня рождения академика Белого Владимира Алексеевича: материалы XI Республиканской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 21 апреля 2022 г. / редк.: Д. Л. Коваленко (гл. ред.) [и др.]. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2022.– Ч.1, С230-233.

*Отчет утвержден на заседании кафедры оптики
Протокол № __ от " __ " декабря 2022.*

