

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-291-5-88-94>

УДК 544.7

МЕТОД ГРАДУЮВАННЯ ПРОБНИХ РІДИН ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ ЕНЕРГІЇ МЕТОДОМ ОУЕНСА-ВЕНДТА

Страшенко В.К., Миронюк О.В.

CALIBRATION METHOD FOR TEST LIQUIDS FOR MEASURING SURFACE ENERGY BY THE OWENS-WENDT METHOD

Strashenko V.K., Myroniuk O.V.

У представленій науковій роботі здійснено комплексне дослідження поверхневих характеристик сумішевих рідин з використанням методики графічного аналізу, розробленої Оуенсом і Вендтом, що дозволяє кількісно розділити загальний поверхневий натяг на два основні компоненти — дисперсну та полярну складові. З метою підвищення точності та надійності результатів розрахунків у роботі запропоновано використання ряду полімерних матеріалів із заздалегідь відомими поверхневими властивостями як калібрувальних субстратів для визначення контактних кутів змочування. Це дозволило розширити застосування графічного підходу Оуенса–Вендта до аналізу складних багатокомпонентних рідинних систем, зокрема таких, що містять як неполярні органічні розчинники, так і речовини з вираженим полярним або водневим зв'язком.

У ході дослідження було досліджено змочування різними сумішами полімерних поверхонь на основі поліетилену, поліпропілену, тefлону, полістиролу та інших полімерів, що мають різні співвідношення дисперсної та полярної складових поверхневого натягу. Отримані експериментальні значення контактних кутів дали змогу побудувати апроксимуючі прямі в координатах методу Оуенса–Вендта для кожної суміші та кожної поверхні. Завдяки цьому стало можливим обчислення окремих компонентів поверхневого натягу для досліджуваних рідинних систем із високим ступенем точності. Проаналізовано вплив складу сумішей на зміну величин полярної та дисперсної взаємодій на межі поділу фаз.

Крім того, продемонстровано, що збільшення кількості полімерних калібрувальних поверхонь призводить до зменшення похибок при лінійній апроксимації та дозволяє уникнути систематичних відхилень у визначенні параметрів поверхневої енергії. Отримані результати узгоджуються з

літературними даними, що підтверджує достовірність розробленого підходу. Представлена методика може бути ефективно застосована для оцінювання поверхневих властивостей нових композиційних матеріалів, рідких препаратів і функціональних рідин у різноманітних галузях хімії, біотехнології та матеріалознавства. Таким чином, дослідження не лише розширює можливості застосування класичного підходу Оуенса–Вендта, але й пропонує новий інструмент для точнішої та зручнішої оцінки міжмолекулярної взаємодії в системах із рідинною фазою.

Ключові слова: полімер, змочування, кут змочування, калібрування

Постановка проблеми. Поверхнева енергія твердих тіл є показником, який кількісно визначає потенціал поверхні до взаємодії з рідинами в процесах змочування, утворення адгезійного контакту, видалення рідини з поверхні, закипання, конденсації, тощо. В залежності від обраної моделі описання цього параметру (Зісмана, Оуенса–Вендта, Ван Осса і т.д.), визначається кількість його компонентів. А його вимірювання базується здебільшого на визначенні кутів змочування поверхні твердого матеріалу набором рідин з відомим значеннями (або додатково компонентами) поверхневого натягу. В якості таких рідин виступають індивідуальні розчинники з високим ступенем чистоти. Але, такий підхід не забезпечує достатньої дискретності значень поверхневого натягу для отримання системи моніторингу процесів змочування. Це обмеження може бути подолане за рахунок використання сумішевих розчинників, поверхневий натяг яких легко

може бути вимірянний методом сталагмометрії. Це забезпечує набір експериментальних даних для реалізації методу Зісмана, але не є достатнім для багатфакторних методів, наприклад, методу Оуенса-Вендта. Відповідно, основною проблемою, яка вирішується в даній роботі є розробка методу градування сумішевих поверхневих рідин за параметрами поверхневого натягу та його компонентів в рамках теорії Оуенса-Вендта.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Актуальність дослідження поверхневої енергії твердих тіл, зокрема полімерних матеріалів, зумовлена зростаючим попитом на високоефективні функціональні покриття, композити та біомедичні матеріали. Поверхнева енергія визначає змочуваність, адгезію, біосумісність, а також взаємодію матеріалу з іншими фазами — рідинами, газами чи твердими тілами. У випадку полімерів, які активно застосовуються в медицині, електроніці, упаковці та машинобудуванні, контроль поверхневих властивостей дає змогу цілеспрямовано змінювати експлуатаційні характеристики: від гідрофільності до бар'єрних властивостей[1,2].

Сучасні методи модифікації полімерних поверхонь — плазмова обробка[3,4] хімічне функціонування, нанесення наноструктур — вимагають точного розуміння впливу на поверхневу енергію. Це критично важливо для забезпечення адгезії в багатошарових структурах, стійкості до забруднення або біообростання, а також для покращення механічного з'єднання з іншими матеріалами[5]. Таким чином, дослідження поверхневої енергії є не лише фундаментально важливим, але й практично необхідним для розробки інноваційних матеріалів з прогнозованими властивостями.

Існує кілька основних теорій та моделей, які описують поверхневу енергію твердих тіл і дозволяють оцінити її на основі контактних кутів змочування. Серед найвідоміших і найуживаніших — моделі Зісмана, Оуенса-Вендта, Фоукса та ван Осса—Гуд—Чарт'є.

Теорія Зісмана є однією з найпростіших. Вона базується на побудові графіка залежності косинуса контактного кута від поверхневого натягу рідини. Точка перетину екстрапольованої прямої з віссю x (при $\cos\theta \rightarrow 1$) вказує на критичний поверхневий натяг — значення, що наближено дорівнює поверхневій енергії твердого тіла. Метод Зісмана найкраще підходить для низькоенергетичних,

гідрофобних, аполярних поверхонь, зокрема поліолефінів (поліетилен, поліпропілен), де міжмолекулярні взаємодії переважно дисперсійні[6].

Модель Оуенса-Вендта розділяє поверхневу енергію на дві складові — дисперсійну та полярну. Ця модель дозволяє глибше проаналізувати характер міжфазних взаємодій, що є особливо важливим для помірно полярних поверхонь, таких як поліестери, полікарбонати або модифіковані полімери. Для застосування методу потрібне вимірювання контактних кутів для щонайменше двох рідин з відомими компонентами поверхневого натягу[7].

Теорія Фоукса, яка є розвитком моделі Оуенса-Вендта, ґрунтується на термодинаміці адгезії та використовує енергетичну концепцію кислотно-основних взаємодій. Поверхнева енергія також поділяється на дисперсійну й полярну складові, з акцентом на хімічну природу міжмолекулярних сил. Модель Фоукса застосовують у дослідженнях інженерних полімерів, а також матеріалів з вираженою електронною полярністю.

Теорія ван Осса—Гуда—Чарт'є (van Oss—Chaudhury—Good) є найбільш комплексною, вона поділяє поверхневу енергію на три компоненти: дисперсійну (Lifshitz—van der Waals), кислотну (електроноакцепторну) та основну (електронодонорну). Такий підхід дозволяє точно описувати адгезійні властивості поверхонь, особливо біоматеріалів, окиснених металів, склоподібних і керамічних субстратів. Теорія ван Осса є дуже популярною в біоінженерії, медицині та у сфері створення антибактеріальних покриттів, де кислотно-основні взаємодії відіграють ключову роль.

Таким чином, вибір теорії для аналізу поверхневої енергії залежить від типу досліджуваного матеріалу. Для аполярних полімерів доцільно використовувати модель Зісмана; для більшості органічних полімерів — Оуенса-Вендта або Фоукса; для складних, хімічно активних чи біологічно сумісних поверхонь — модель ван Осса. Кожна з теорій має свої обмеження і переваги, але разом вони утворюють потужний інструментарій для розуміння і модифікації поверхневих властивостей матеріалів.

Для точного визначення значень компонентів поверхневої енергії за теорією Оуенса-Вендта необхідно ретельно підібрати набір тестових рідин з відомими значеннями поверхневого натягу та його полярної і

дисперсійної складових. Ця модель передбачає розділення загальної поверхневої енергії твердої поверхні на дисперсійну та полярну компоненти, а для обчислень використовуються контактні кути змочування, виміряні для різних рідин. Щоб уникнути похибок у розрахунках, набір рідин повинен охоплювати якомога ширший діапазон співвідношень між полярною та дисперсійною складовими.

Особливо важливо, щоб ці рідини мали параметри поверхневого натягу, що варіюються з мінімальним кроком, тобто з плавним переходом від суто дисперсійних (наприклад, дийодметан) до високо полярних (наприклад, вода). Такий підхід дозволяє зменшити похибки, пов'язані з апроксимацією кривої в координатах моделі Оуенса-Вендта, та підвищує точність обчислення обох компонент енергії. У разі використання лише двох рідин або вибору рідин із близькими характеристиками, система рівнянь стає математично нестійкою, що призводить до значного розкиду результатів. Отже, чим ширший і краще підібраний набір рідин, тим надійнішим буде розрахунок поверхневої енергії твердої поверхні.

Мета роботи сформулювати метод, який дозволяє відградувати пробні рідини, включаючи суміші, за компонентами поверхневого натягу у відповідності до теорії Оуенса-Вендта.

Виклад основного матеріалу. Визначення поверхневого натягу градувальних поверхонь Рівняння Юнга (1) описує фактори - поверхневу енергію на різних межах поділу фаз, які визначають значення кута змочування θ . Індекс (ТВ-Г) відповідає поверхневій енергії на межі тверде тіло-газ і, відповідно, поверхневій енергії цього тіла, (ТВ-р) - поверхнева енергія на межі тверде тіло-рідина, (р) - на межі рідина газ, що еквівалентно поверхневому натягу рідини.

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{ТВ-Г} - \sigma_{ТВ-р}}{\sigma_p} \quad (1)$$

В роботі було використано теорію Оуенса-Вендта яка розглядає поверхневий натяг як двокомпонентний параметр. При цьому, загальне його значення є середнім геометричним дисперсної та полярної частини. Основне рівняння теорії (2) описує взаємозв'язок між значеннями кута змочування рідини на твердій поверхні та компонентами їх поверхневої енергії.

$$\sigma_p(1 + \cos\theta) = 2(\sqrt{\sigma_{пв}^D \sigma_p^D} + \sqrt{\sigma_{пв}^P \sigma_p^P}) \quad (2)$$

де σ_p загальний поверхневий натяг рідини. Відповідно до теорії Оуенса-Вендта його можна розділити на полярний (σ_p^P) та дисперсний (σ_p^D) поверхневий натяг рідини. Також в рівнянні наявні значення і для поверхонь, а саме полярний ($\sigma_{пв}^P$) та дисперсний $\sigma_{пв}^D$ показник поверхневого натягу для поверхні. Косинус кута змочування рідини з поверхнею виражено значення $\cos\theta$.

При умові використання рідин з відомим поверхневим натягом та його компонентами, визначення кута змочування рідиною обраної поверхні, в ньому залишаються два невідомих - компоненти поверхневої енергії. Останні можуть бути знайдені при використанні системи рівнянь (практично - використання набору пробних рідин). Ця задача може бути вирішена і в протилежну сторону - використовуючи набір поверхонь з відомими значеннями поверхневої енергії можливо знайти компоненти поверхневого натягу рідини при умові що загальний поверхневий натяг відомий (визначений, наприклад методом сталагмометрії). Найбільш практичним методом знайдення невідомих компонентів поверхневої енергії або натягу є графічний, сутність якого полягає у використанні зміненого рівняння Оуенса-Вендта (3), яке графічно є рівнянням прямої лінії.

$$\frac{\sigma_p(1+\cos\theta)}{2\sqrt{\sigma_p^D}} = \frac{\sqrt{\sigma_p^P}}{\sqrt{\sigma_p^D}} * \sqrt{\sigma_{пв}^P} + \sqrt{\sigma_{пв}^D} \quad (3)$$

На вісі абсцис розташоване співвідношення $(\frac{\sqrt{\sigma_p^P}}{\sqrt{\sigma_p^D}})$ для індивідуальних рідин, та по осі ординат $\frac{\sigma_p(\cos\theta+1)}{2\sqrt{\sigma_p^D}}$.

Побудовані в цих специфічних координатах точки апроксимуються прямою лінією, тангенс кута нахилу якої чисельно дорівнює $\sqrt{\sigma_{пв}^P}$, а відтинки від вісі ординат - $\sqrt{\sigma_{пв}^D}$.

На першому етапі роботи було визначено компоненти поверхневої енергії ряду полімерних зразків. Для цього використано 5 пробних рідин з відомим значенням

поверхневого натягу, а саме: вода, ксилол, етилацетат, етиленгліколь та диметилсульфоксид. Параметри які використовувалися для розрахунків наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Значення поверхневих натягів відомих речовин[8]

Рідина	Поверхневий натяг загальний	Поверхневий натяг дисперсійний	Поверхневий натяг полярний
Вода	72,44	22,10	50,70
Ксилол	30,10	30,10	0
Етиленацетат	23,90	23,90	0
Етиленгліколь	46,10	29,00	19,10
Диметилсульфоксид	44,50	36,50	8,00

Крайовий кут змочування визначали стандартним методом лежачої краплі за допомогою горизонтального мікроскопа з гоніометричною приставкою [9]. Для визначення кута змочування поверхонь досліджуваних матеріалів використано мікроскоп із цифровою камерою Delta Optical HCDE-50. Значення кута змочування визначали на підставі отриманих фотографій із використанням програмного продукту ScoreTeck View, з цифровим гоніометром.

На рис. 1 наведено графіки Оуенса-Вендта для досліджуваних поверхонь полімерів, апроксимовані прямими. На їх основі одержано значення компонентів поверхневої енергії (таблиця 2).

Оскільки всі використані в роботі полімери є відносно неполярними, їм характерні низькі значення полярної компоненти поверхневої енергії. За цим параметром вони можуть бути розташовані в ряд збільшення полярності тефлон - полідиметилсилоксан - поліетилен - поліетилентерефталат.

Визначені компоненти поверхневої енергії в подальшому використовувалися для встановлення компонент поверхневого натягу пробних рідин. Для цього застосовувалося обернене рівняння Оуенса-Вендта, в якому

місця аргументу та відтинку займали відповідно, корінь з полярної та дисперсної компоненти поверхневого натягу рідин.

$$\frac{\sigma_p(1+\cos\theta)}{2\sqrt{\sigma_{пв}^D}} = \frac{\sqrt{\sigma_{пв}^P}}{\sqrt{\sigma_{пв}^D}} * \sqrt{\sigma_p^P} + \sqrt{\sigma_p^D} \quad (3)$$

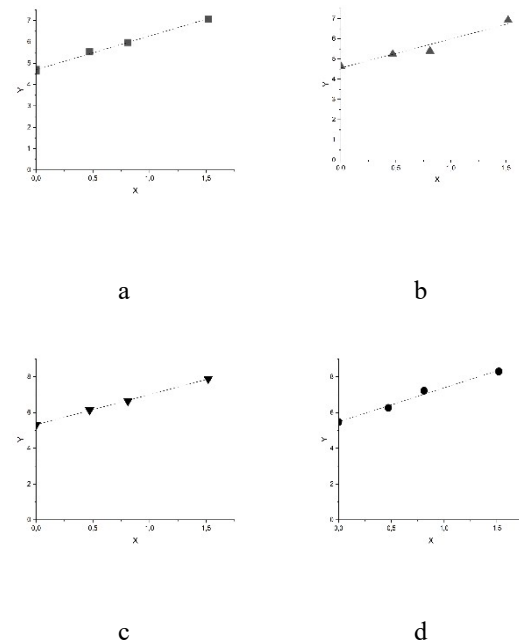


Рис. 1. Графіки для розрахунків поверхневого натягу поверхонь:
а – Силікон; б – Тефлон
с – Поліетилен d – Поліетилентерефталат

Таблиця 2

Компоненти поверхневої енергії зразків полімерів

Поверхня	Полірна компонента, мДж/м2	Дисперсна компонента, мДж/м2
Полідиметилсилоксан	2,49	22,07
Тефлон	2,06	20,76
Поліетилен	2,84	28,35
Поліетилентерефталат	3,62	30,07

На рисунку 2 представлено графіки всіх восьми пробних рідин, які являли собою водно-етанольні суміші з різним співвідношенням компонентів

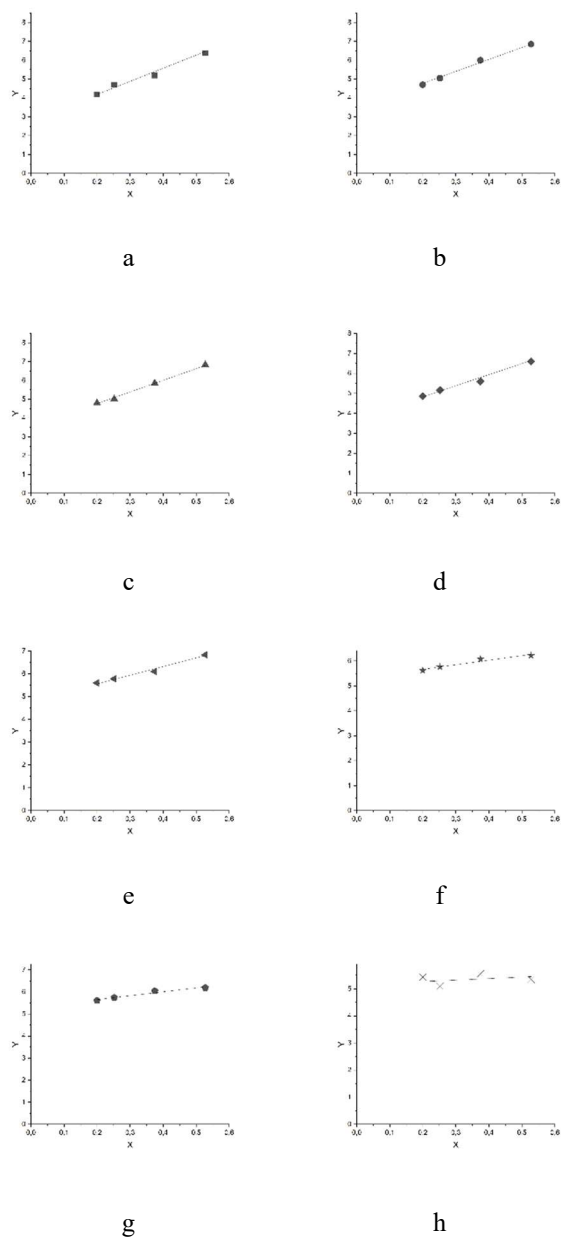


Рис. 2. Графіки для розрахунків поверхневого натягу індивідуальних речовин:
а – 1; б – 2; с – 3; д – 4; е – 5; ф – 6; г – 7; h – 8

Відповідні значення полірної та дисперсної компоеннт поверхневого натягу, які були визначені графічно з апроксимаційних прямих Рис.2 наведено в Табл.3. Очевидно, що при збільшенні концентрації етилового спирту зменшується загальний поверхневий натяг, а

також зменшується полярна його складова, що є очікуваним, оскільки власна полярна складова етилового спирту значно нижче ніж у воді.

Таблиця 3

Поверхневий натяг пробних рідин

№	Співвідношення, мас. %		Густина, г/см ³	Загальний поверхневий натяг, мН/м	Поверхневий натяг полярний мН/м	Поверхневий натяг дисперсний мН/м
	Вода	Етиловий спирт				
1	96	4	0,9910	56,08	48,26	7,82
2	94	6	0,9865	52,40	40,07	12,23
3	92	8	0,9819	50,80	38,36	12,44
4	90	10	0,9770	44,74	30,97	13,77
5	84	16	0,9647	37,48	13,49	22,99
6	80	20	0,9546	32,85	6,88	25,97
7	76	24	0,9481	32,34	6,12	26,22
8	60	40	0,9139	28,47	2,05	26,42

Висновок. Сформульовано метод градування компонентів поверхневого натягу пробних рідин в рамках підходу Оуенса-Вендта на прикладі водно-етанольних сумішей. Суть методу полягає у виборі еталонних полімерних поверхонь, визначенні компонентів їх поверхневої енергії при використанні рідин з відомим поверхневим натягом класичним методом Оуенса-Вендта та використанні отриманих значень в оберненому рівнянні для одержання компонент поверхневого натягу розчинів.

Метод дозволяє одержати набір пробних рідин для визначення характеристик змочування у вузьких інтервалах поверхневого натягу, що може бути корисним для характеристики особливих станів змочування, наприклад, стану Касі супергідрофобних поверхонь, або переходів між різними станами змочування.

Література

1. Rodney Marcelo Do Nascimento, Joao Elias F.S. Rodrigues. A novel framework for evaluating the surface free energy and depinning forces of invasive medical tubes. *Chemical Engineering Science*. 2025. T. 312.
2. You Chen, Zhibin Jiao. Elsevier Chemical Engineering Journal Volume 506, 15 January 2025, 160041 Chemical Engineering Journal Bio-inspired anti-glare and self-cleaning surface for optical/tissue residue pollution treatment of medical device surface. *Chemical Engineering Journal*. 2025. T. 506 : 160041. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.160041>.
3. P. Dimitrakellis, E. Gogolides. Atmospheric plasma etching of polymers: A palette of applications in cleaning/ashing, pattern formation, nanotexturing and superhydrophobic surface fabrication. *Microelectronic Engineering*. 2025. T. 194. C. 109–115.
4. Alexane Vital, Marylène Vayer. Polymer masks for structured surface and plasma etching. *Applied Surface Science*. 2015. T. 332. C. 237–246.
5. Anatoly E. C. Adhesion and Energy Characteristics of Rigid-Chain Polymer Surface: Polyamidoimides. *Polymer Structure and Property III*. 2020. T. 2956.
6. S. Siboni. The solid surface free energy calculation: II. The limits of the Zisman and of the “equation-of-state” approaches. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004. T. 271. C. 454–472.
7. Anna R. Analysis for determining surface free energy uncertainty by the Owen–Wendt method. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2009. T. 29 : 4. C. 451–457.
8. Carel J. Van Oss. Interfacial Forces in Aqueous Media. Boca Raton : 2nd Edition, 2006. 456 c.
9. Особенности оценки смачивания полимерных поверхностей / МIRONJUK та ін. Східно-Європейський журнал передових технологій. 2014. Т. 67. С. 23–26.

References

1. Rodney Marcelo Do Nascimento, Joao Elias F.S. Rodrigues. A novel framework for evaluating the surface free energy and depinning forces of invasive medical tubes. *Chemical Engineering Science*. 2025. T. 312.
2. You Chen, Zhibin Jiao. Elsevier Chemical Engineering Journal Volume 506, 15 January 2025, 160041 Chemical Engineering Journal Bio-inspired anti-glare and self-cleaning surface for optical/tissue residue pollution treatment of medical device surface. *Chemical Engineering Journal*. 2025. T. 506 : 160041. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.160041>.
3. P. Dimitrakellis, E. Gogolides. Atmospheric plasma etching of polymers: A palette of applications in cleaning/ashing, pattern formation, nanotexturing and superhydrophobic surface fabrication. *Microelectronic Engineering*. 2025. T. 194. C. 109–115.
4. Alexane Vital, Marylène Vayer. Polymer masks for structured surface and plasma etching. *Applied Surface Science*. 2015. T. 332. C. 237–246.
5. Anatoly E. C. Adhesion and Energy Characteristics of Rigid-Chain Polymer Surface: Polyamidoimides. *Polymer Structure and Property III*. 2020. T. 2956.
6. S. Siboni. The solid surface free energy calculation: II. The limits of the Zisman and of the “equation-of-state” approaches. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004. T. 271. C. 454–472.
7. Anna R. Analysis for determining surface free energy uncertainty by the Owen–Wendt method. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2009. T. 29 : 4. C. 451–457.

8. Carel J. Van Oss. Interfacial Forces in Aqueous Media. Boca Raton : 2nd Edition, 2006. 456 c.

9. Особенности оценки смачивания полимерных поверхностей. MIRONJUK та ін. Східно-Європейський журнал передових технологій. 2014. Т. 67. С. 23–26

Strashenko V.K., Myroniuk O.V. Calibration method for test liquids for measuring surface energy by the Owens–Wendt method

This scientific paper presents a comprehensive study of the surface characteristics of mixed liquids using a graphical analysis method developed by Owens and Wendt, which allows the total surface tension to be quantitatively divided into two main components: the dispersive and polar components. In order to improve the accuracy and reliability of the calculation results, the paper proposes the use of a number of polymer materials with known surface properties as calibration substrates for determining contact wetting angles. This made it possible to extend the application of the Owens–Wendt graphical approach to the analysis of complex multicomponent liquid systems, in particular those containing both nonpolar organic solvents and substances with pronounced polar or hydrogen bonds.

The study investigated the wetting of various mixtures of polymer surfaces based on polyethylene, polypropylene, Teflon, polystyrene and other polymers with different ratios of dispersed and polar components of surface tension. The experimental values of the contact angles obtained made it possible to construct approximate straight lines in the Owens–Wendt method coordinates for each mixture and each surface. This made it possible to calculate the individual components of surface tension for the studied liquid systems with a high degree of accuracy. The influence of the composition of mixtures on the change in the values of polar and dispersive interactions at the phase boundary was analysed.

In addition, it was demonstrated that an increase in the number of polymer calibration surfaces leads to a reduction in errors in linear approximation and allows avoiding systematic deviations in the determination of surface energy parameters. The results obtained are consistent with the literature data, which confirms the reliability of the developed approach. The presented methodology can be effectively applied to evaluate the surface properties of new composite materials, liquid preparations and functional fluids in various fields of chemistry, biotechnology and materials science. Thus, the study not only expands the possibilities of applying the classical Owens–Wendt approach, but also offers a new tool for a more accurate and convenient assessment of intermolecular interactions in systems with a liquid phase. The presented scientific work carries out a comprehensive study of the surface characteristics of mixed liquids using the graphical analysis method developed by Owens and Wendt, which allows the total surface tension to be quantitatively divided into two main components — the dispersive (London) and polar (dipole-dipole) components. In order to improve the

accuracy and reliability of the calculation results, the paper proposes the use of a number of polymer materials with known surface properties as calibration substrates for determining contact wetting angles. This made it possible to extend the application of the Owens–Wendt graphical approach to the analysis of complex multicomponent liquid systems, in particular those containing both nonpolar organic solvents and substances with pronounced polar or hydrogen bonds.

The study investigated the wetting of various mixtures of polymer surfaces based on polyethylene, polypropylene, Teflon, polystyrene and other polymers with different ratios of dispersed and polar components of surface tension. The experimental values of the contact angles obtained made it possible to construct approximate straight lines in the Owens–Wendt method coordinates for each mixture and each surface. This made it possible to calculate the individual components of surface tension for the studied liquid systems with a high degree of accuracy. The influence of the composition of mixtures on the change in the values of polar and dispersive interactions at the phase boundary was analysed.

In addition, it was demonstrated that an increase in the number of polymer calibration surfaces leads to a reduction in errors in linear approximation and allows avoiding systematic deviations in the determination of surface energy parameters. The results obtained are consistent with the literature data, which confirms the

reliability of the developed approach. The presented methodology can be effectively applied to evaluate the surface properties of new composite materials, liquid preparations and functional fluids in various fields of chemistry, biotechnology and materials science. Thus, the study not only expands the possibilities of applying the classical Owens–Wendt approach, but also offers a new tool for a more accurate and convenient assessment of intermolecular interactions in systems with a liquid phase.

Ключові слова: polymer, wetting, wetting angle, calibration

Страшенко Володимир Костянтинович – аспірант, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", хіміко-технологічний факультет, кафедра хімічної технології композиційних матеріалів, strashenkowork17@gmail.com.

Миронюк Олексій Володимирович – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", хіміко-технологічний факультет, кафедра хімічної технології композиційних матеріалів, o.myronyuk@kpi.ua

Стаття подана 15.05.2025.