

УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА І ПРИЛАД ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ МІЖФАЗНОГО НАТЯГУ МЕТОДОМ ОБЕРТОВОЇ КРАПЛІ

© Кісіль Р. І., Чеховський С. А., 1999

Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу

Запропонована методика вимірювання міжфазного натягу на границі розділу рідина 1 - рідина 2, яка виключає вплив оптичного коефіцієнту збільшення системи рідина 1 - рідина 2 - прозорі стінки вимірювального капіляру на результати розрахунку значення міжфазного натягу, а також структурна схема приладу, який реалізує вказану методику.

Відома методика Воннегута [1] визначення міжфазного натягу (МН) методом обертової краплі вимагає вимірювання найбільшого діаметру обертової краплі при умові, що її довжина є в чотири і більше разів більшою за діаметр обертової краплі. Незважаючи на те, що ця методика є надзвичайно простою, виміряне значення найбільшого діаметру краплі є більшим від її фактичного діаметру в M разів, де M - коефіцієнт збільшення оптичної системи, який залежить від властивостей досліджуваних рідин і конструктивних розмірів капіляру.

Методика Принсена [2] не вимагає вимірювання розмірів обертової краплі, які пов'язані з її діаметром в процесі обертання. Однак вимагає задання краплі певного наперед відомого об'єму, що є досить важкою процедурою і тому практично така методика не знайшла використання.

Методика Слаттері [3] також як і методика Воннегута вимагає вимірювання діаметру обертової краплі в процесі визначення МН і тому має такі ж недоліки, як і методика Воннегута.

Тому актуальною є розробка такої методики визначення МН, яка б не вимагала ні задання краплі заданого об'єму, ні попереднього визначення коефіцієнту збільшення вказаної оптичної системи M , ні досягнення умови, що довжина обертової краплі повинна бути більшою від її діаметру в чотири і більше разів.

Суть запропонованої методики полягає в наступному (рис.1). В процесі обертання краплі невідомого об'єму вимірюють найбільший її радіус $y_{\text{вим.0}}$, який з реальним її радіусом $y_{p,0}$ пов'язаний таким чином:

$$y_{\text{вим.0}} = M \cdot y_{p,0} \quad (1)$$

де $y_{\text{вим.0}}$ і $y_{p,0}$ - відповідно виміряне і реальне значення радіусу обертової краплі.

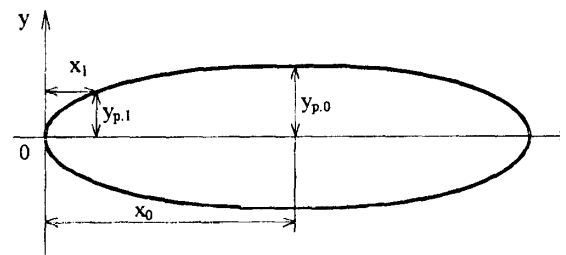


Рис. 1. Удосконалена методика визначення МН методом обертової краплі.

Вимірюють також віддалі x_0 від омболічної точки т.О обертової краплі до її найбільшого радіусу (x_0 - половина всієї довжини обертової краплі, виміряне значення якої не залежить від коефіцієнту M , оскільки всі розміри краплі, які вимірюються в площині, яка проходить вздовж капіляру). Крім цього вимірюють радіус цієї ж обертової краплі $y_{\text{вим.1}}$ на певній віддалі x_1 від омболічної точки О, яка є меншою від x_0 , наприклад, $x_1 = 0.1 x_0$. При цьому

$$y_{\text{вим.1}} = M \cdot y_{p,1} \quad (2)$$

Значення $y_{\text{вим.1}}/y_{\text{вим.0}}$, яке дорівнює відношенню $y_{p,1}/y_{p,0}$, не залежить від коефіцієнта M при умові, що відношення внутрішнього радіуса вимірювального капіляру до його зовнішнього радіусу не буде більшим від 0.3, а відношення y_0 до внутрішнього радіуса трубки не буде більшим 0.8 [4]. Для обертових крапель різних розмірів вказане відношення при вказаній вище умові буде залежати тільки від параметру a^3 , який в свою чергу визначається на основі міжфазного натягу σ , різниці густин рідких фаз $\Delta\rho$ і частоти обертання краплі ω таким чином [5]:

$$a^3 = \frac{\sigma}{\Delta\rho \cdot \omega^2} \quad (3)$$

Пропонується значення σ визначати на основі

конкретних значень $\Delta\rho$, ω і відношення $u_{вим.1}/u_{вим.0}$ для заданого відношення x_1/x_0 .

З метою одержання конкретного виду залежності $\sigma = (\Delta\rho, \omega, x_0, y_{p.1}/y_{p.0})$ для заданого значення відношення x_1/x_0 для всіх можливих значень a^3 пропонується наступне. Для кожного із значень заданого безрозмірного параметра R_0/a , де R_0 - радіус кривизни обертової краплі в т.) і який може змінюватися в діапазоні від 0.5 до $2 \cdot \sqrt[3]{4}/3$ в процесі розрахунку геометричних параметрів обертової краплі:

- визначають безрозмірну половину довжини всієї обертової краплі x_0/a і відповідні їй значення $y_{p.0}/a$. Для цього в процесі розрахунку параметрів обертової краплі (рис. 1) кут ϕ змінюють від 0 до $\pi/2$ шляхом його збільшення на величину $\Delta\phi$,

- задаються і визначають значення x_1/a , наприклад, $x_1/a = 0.1 \cdot x_0/a$;

- повторно для цього ж значення R_0/a знову розраховують геометричні параметри обертової краплі до тих пір, поки параметр x/a в процесі розрахунку не стане дещо більшим раніше визначеного значення x_1/a ;

- з метою визначення значення $y_{p.1}/a$ саме для значення x_1/a , яке було раніше визначено, здійснюють додаткові розрахунки в околиці точки x_1/a до тих пір, поки різниця між значенням x_1/a і значенням x/a не буде меншою наперед заданого значення, наприклад, $|x/a - x_1/a|/(x_1/a) \leq 10^{-6}$;

- знаходять для заданого значення параметра R_0/a відношення $y_{p.1}/a$ до $y_{p.0}/a$, тобто $y_{p.1}/y_{p.0}$;

- аналогічні розрахунки здійснюють для всіх інших можливих значень безрозмірного параметра R_0/a ;

- аналогічні розрахунки здійснюють для інших значень $x_1/a = f(x_0/a)$, наприклад, $(x_1/a)/(x_0/a) = 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6$;

- визначають, для якого із відношень $(x_1/a)/(x_0/a)$ найбільшою є зміна параметра $y_{p.1}/y_{p.0}$;

- для найбільшого відношення $(x_1/a)/(x_0/a)$ на основі отриманих значень x_0/a отримують апроксимаційну залежність виду $x_0/a = f(y_{p.1}/y_{p.0})$;

- так як з одного боку $a^3 = \sigma(\Delta\rho \cdot \omega^2)$, а з іншого $a = x_0/f(y_{p.1}/y_{p.0})$, отримаємо, що

$$\sqrt[3]{\sigma(\Delta\rho \cdot \omega^2)} = x_0 / f(y_{p.1}/y_{p.0}), \quad (4)$$

звідки

$$\sigma = \Delta\rho \cdot \omega^2 \cdot x_0 / f(y_{p.1}/y_{p.0}). \quad (5)$$

Результати розрахунку значень $y_{p.1}/y_{p.0}$ для різних значень x_1/x_0 від 0,1 до 0,6 через $\Delta(x_1/x_2) = 0,1$ приведені в табл. 1. Аналіз цих даних показав (рис. 2), що найбільша зміна параметру $y_{p.1}/y_{p.0}$ при певній зміні x_0/a має місце

для $(x_1/a)/(x_0/a) = x_1/x_0 = 0,1$.

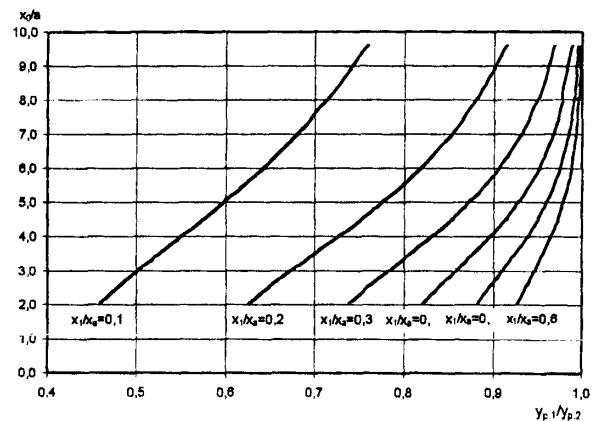


Рис. 2. Залежність $x_0/a = f(y_{p.1}/y_{p.0})$ для різних відношень обертової краплі x_1/x_0 .

Тому для подальшої апроксимації вибираємо із даних табл. 1 тільки дані x_0/a і y_1/y_0 для $x_1/x_0 = 0.1$. Апроксимацію вказаних даних здійснюємо за допомогою параболічної і кубічної залежностей методом найменших квадратів. Слід відмітити, що для апроксимації був вибраний діапазон зміни даних x_0/a від 1,9979 до 9,5952 і діапазон y_1/y_0 від 0.45937 до 0.75909. Це відповідає зміні параметру x_0/y_0 від 1,4808 до 6,0448.

Результати апроксимації залежностями виду

$$x_0/a = f(y_{p.1}/y_{p.0}) = \sum_{i=1}^n (y_{p.1}/y_{p.0})^i \cdot a_i, \quad (6)$$

де $n=2$ для квадратичної залежності і $n=3$ для кубічної залежності разом із абсолютними похибками в точках і сумами квадратів відхилень на всьому діапазоні значень $y_{p.1}/y_{p.0}$ приведені в табл. 2.

Отримані значення коефіцієнтів квадратичної і кубічної залежностей виду

$$x_0/a = \sum_{i=0}^n a_i (y_{p.1}/y_{p.0})^i \text{ є такими:}$$

- квадратична залежність: $a_0 = -1,3737$; $a_1 = -2,3250$; $a_2 = 21,6262$;

- кубічна залежність: $a_0 = -35,5217$; $a_1 = 173,0161$; $a_2 = -274,2075$; $a_3 = 164,1571$.

З результатів табл. 2, в якій наведені дані метрологічного аналізу видно, що кубічна залежність має значно меншу похибку, ніж квадратична залежність. Про це свідчать значення величини суми квадратів відхилень S , яку розраховують так

$$S = \sum_{i=1}^n [(x_0/a)_i - (x_0/a)_i]^2, \quad (7)$$

Таблиця 1 — Значення y_1/y_0 при різних співвідношеннях обертової краплі x_1/x_0

0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	x_0/a	x_0/y_0
0,4593685	0,6262971	0,7387341	0,8207080	0,8818559	0,9274384	1,9979	1,480854
0,4614566	0,628649	0,7409418	0,8225759	0,8833798	0,9284143	2,0557	1,50777
0,4638572	0,6313411	0,7434540	0,8246899	0,8849641	0,9295713	2,1217	1,538926
0,4668124	0,6346715	0,7466131	0,8273242	0,8870332	0,9309727	2,1984	1,575796
0,4704621	0,6387729	0,7504777	0,8305852	0,8895336	0,9327011	2,2904	1,620765
0,4751901	0,644087	0,7554594	0,8347868	0,8926952	0,9349055	2,4052	1,678071
0,4817945	0,6514863	0,7623395	0,8405980	0,8970962	0,9378733	2,5585	1,756375
0,486308	0,6565297	0,7670385	0,8445110	0,9000816	0,9399402	2,6599	1,80921
0,4922652	0,6631908	0,7732077	0,8496802	0,9040054	0,9425783	2,7902	1,87820
0,5008578	0,6727406	0,7820709	0,8570193	0,9095564	0,9463323	2,9730	1,977085
0,5157774	0,6891653	0,7971194	0,8693944	0,9187561	0,9525368	3,2820	2,148678
0,526774	0,7012271	0,8080245	0,8782055	0,9253392	0,9568915	3,5051	2,275589
0,5491146	0,6500065	0,8294623	0,8952907	0,93870066	0,9649686	3,9579	2,539416
0,5583861	0,6598887	0,8380331	0,9020398	0,9425196	0,9680926	4,1465	2,651350
0,574174	0,6766185	0,8523139	0,9130434	0,9502196	0,9729455	4,4728	2,847210
0,5900064	0,6932107	0,8659899	0,9232869	0,9572335	0,9772843	4,8085	3,051031
0,5911946	0,6944744	0,8669670	0,9240626	0,9577491	0,9776058	4,8338	3,066554
0,5951753	0,6985989	0,8702847	0,926520	0,9594243	0,9786344	4,9198	3,119198
0,6019445	0,7056625	0,8759184	0,9306436	0,9621232	0,9803010	5,0675	3,209732
0,6088982	0,7128662	0,8815265	0,9346876	0,9648750	0,9818998	5,2214	3,304433
0,6151783	0,7193271	0,8864787	0,9382115	0,9671136	0,9832406	5,3631	3,391882
0,6241974	0,7285137	0,8933898	0,9431244	0,9702983	0,9851491	5,5693	3,5195
0,6359791	0,7405443	0,9021811	0,9491698	0,9741113	0,9873714	5,8472	3,6227
0,6498201	0,8258565	0,9119187	0,955707	0,9781058	0,9895893	6,1849	3,902484
0,6775942	0,8507754	0,9298953	0,9672803	0,9849325	0,9933174	6,9051	4,353153
0,6814801	0,8541352	0,9322365	0,9686712	0,9856908	0,9936965	7,0134	4,421042
0,6857233	0,8578002	0,9346990	0,9701859	0,9865742	0,9941381	7,1306	4,494587
0,6905963	0,8619690	0,9375394	0,9718886	0,9875205	0,9946426	7,2663	4,579750
0,6962879	0,8667045	0,9407576	0,9737821	0,9885927	0,99514721	7,4313	4,683326
0,7025648	0,8718886	0,9441049	0,9757389	0,9896024	0,9956519	7,6138	4,797984
0,7114682	0,879080	0,9487082	0,9783869	0,9909893	0,9963453	7,8863	4,969286
0,7227647	0,8880348	0,9542562	0,9814126	0,992565	0,9971016	8,02341	5,188075
0,7590878	0,9145719	0,9695711	0,989227	0,9962201	0,998677	9,5952	6,044805

де $(x_0/a)_i$ - значення параметру $(x_0/a)_i$, яке розраховують за допомогою відповідної квадратичної чи кубічної залежностей в i -й точці; n - кількість точок.

Таким чином для подальшого використання приймаємо таку залежність між x_0/a і $y_{p,1}/y_{p,0}$:

$$x_0/a = -35.5217 + 173.0161 \cdot (y_{p,1}/y_{p,0}) - 274.2075 \cdot (y_{p,1}/y_{p,0})^2 + 164.1571 \cdot (y_{p,1}/y_{p,0})^3. \quad (8)$$

Значення міжфазного натягу на основі (8) розраховують таким чином:

$$\sigma = \Delta\rho \cdot \omega^2 \cdot x_0^3 / (x_0/a), \quad (9)$$

де (x_0/a) - значення, які розраховують на основі вимірних значень $y_{p,1}$ і $y_{p,0}$ за допомогою (8).

Структурна схема удосконаленого приладу для вимірювання міжфазного натягу методом обертової краплі, яка реалізує запропоновану методу, приведена на рис. 3 і включає такі основні блоки і вузли:

1 - вимірювальна камера, в якій встановлений

калібрована по внутрішньому і зовнішньому діаметрах трубка 8;

2 - вимірювальна фоточувлива лінійка із зарядним зв'язком ЛФ33, яка дозволяє вимірювати відповідні раніше вказані параметри обертової краплі із високою точністю ($\Delta \leq 10^{-6}$ м);

3 - блок вимірювання діаметра обертової краплі на основі її зображення через фокусуючу оптичну систему 14;

4 - кроковий двигун, який призначений для переміщення лінійки 2 в процесі вимірювання розмірів обертової краплі;

5 - блок керування роботою крокового двигуна в процесі вимірювання розмірів обертової краплі;

6 - електронний блок задання частоти обертання вимірювальної трубки із досліджуваними рідинами;

7 - синхронний двигун для безпосереднього обертання вимірювальної трубки 8;

Таблиця 2 - Результати обчислення похибок квадратичної та кубічної залежностей

Вхідні дані		Квадратична залежність			Кубічна залежність		
Yi/Yo	Xo	X'o	X'o-Xo	(X'o-Xo) ²	X''o	X''o-Xo	(X''o-Xo) ²
0,459369	1,9979	2,1218	0,1239	1,5351E-02	2,00601	8,0872E-03	6,5402E-05
0,461457	2,0557	2,1585	0,1028	1,0573E-02	2,0580	2,3079E-03	5,3264E-06
0,463857	2,1217	2,2010	0,0793	6,2859E-03	2,1173	-4,3912E-03	1,9283E-05
0,466812	2,1984	2,2536	0,0552	3,0461E-03	2,1896	-8,8136E-03	7,7680E-05
0,470462	2,2904	2,3191	0,0287	8,2279E-04	2,2778	-1,2615E-02	1,5914E-04
0,47519	2,4052	2,4048	-0,0004	1,7369E-07	2,3904	-1,4836E-02	2,012E-04
0,481795	2,5585	2,5261	-0,0324	1,0490E-03	2,5446	-1,3863E-02	1,9219E-04
0,486308	2,6599	2,6101	-0,0498	2,4786E-03	2,6482	-1,1702E-02	1,3694E-04
0,492265	2,7902	2,7223	-0,0679	4,6056E-03	2,7827	-7,4668E-03	5,5753E-05
0,500858	2,973	2,8869	-0,0861	7,4124E-03	2,9729	-1,3399E-04	1,7954E-08
0,515777	3,282	3,1802	-0,1018	1,0355E-02	3,2937	1,1701E-02	1,3692E-04
0,526774	3,5051	3,4026	-0,1025	1,0505E-02	3,5242	1,9134E-02	3,6610E-04
0,549115	3,9579	3,8705	-0,0874	7,6439E-03	3,9830	2,5056E-02	6,781E-04
0,558386	4,1465	4,0710	-0,0755	5,7038E-03	4,1716	2,5091E-02	6,957E-04
0,574174	4,4728	4,4210	-0,0518	2,6871E-03	4,4935	2,0740E-02	4,3013E-04
0,590006	4,8083	4,7828	-0,0255	6,5219E-04	4,8207	1,2383E-02	1,5333E-04
0,591195	4,8338	4,8104	-0,0234	5,4979E-04	4,8455	1,17E-02	1,3728E-04
0,595175	4,9198	4,9032	-0,0166	2,7460E-04	4,9291	9,726E-03	8,5981E-05
0,601945	5,0675	5,0627	-0,0048	2,669E-05	5,0726	5,0673E-03	2,5678E-05
0,608898	5,2214	5,2287	0,0073	5,726E-05	5,2221	6,9904E-04	4,8866E-07
0,615178	5,3631	5,3803	0,0172	2,9607E-04	5,3593	-3,8328E-03	1,4690E-05
0,624197	5,5693	5,6011	0,0318	1,0098E-03	5,5603	-9,0084E-03	8,1151E-05
0,635979	5,8472	5,8948	0,0476	2,2628E-03	5,8311	-1,6065E-02	2,5809E-04
0,64982	6,1849	6,2475	0,0626	3,9144E-03	6,1633	-2,1633E-02	4,799E-04
0,677594	6,9051	6,9802	0,0751	5,6399E-03	6,8853	-1,9766E-02	3,9071E-04
0,68148	7,0134	7,0854	0,0720	5,1808E-03	6,9932	-2,020E-02	4,0822E-04
0,685723	7,1306	7,2010	0,0704	4,9524E-03	7,1131	-1,7506E-02	3,0645E-04
0,690596	7,2663	7,3347	0,0684	4,6766E-03	7,2536	-1,686E-02	1,6094E-04
0,696288	7,4313	7,4922	0,0609	3,7041E-03	7,4217	-9,5911E-03	9,1989E-05
0,702565	7,6138	7,6675	0,0537	2,8789E-03	7,6123	-1,411E-03	2,3751E-06
0,711468	7,8863	7,9190	0,0327	1,0709E-03	7,8923	6,0039E-03	3,6046E-05
0,722765	8,2341	8,2431	0,0090	8,1754E-05	8,2651	3,0988E-02	9,6024E-04
0,75908,8	9,5952	9,3227	-0,2725	7,4238E-02	9,6122	1,7036E-02	2,9024E-04
				S ₂ =0,20			S ₃ =6,99E-03

9 - блок стробоскопа, який призначений для синхронізованого короткочасного освітлення трубки 8 в процесі її обертання з метою вимірювання відповідних розмірів обертової краплі;

10 - електронний блок керування роботою стробоскопа з метою вимірювання і задання частоти

обертання трубки 8 в діапазоні частот від 10 до 250 Гц;

11 - електронний блок вимірювання та стабілізації заданого значення температури у вимірвальній камері 1;

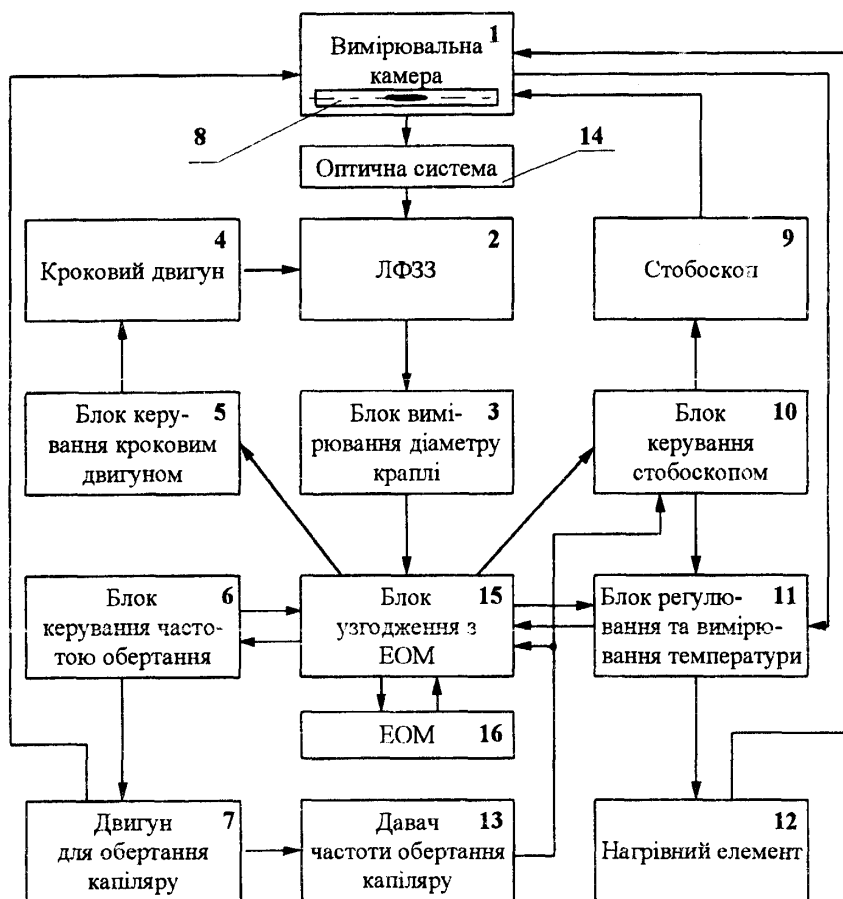


Рис. 3. Структурна схема удосконаленого приладу для вимірювання міжфазного натягу методом обротової краплі.

12 - нагрівний елемент, який розміщений безпосередньо в камері 1 і який безпосередньо здійснює стабілізацію заданого значення температури в камері 1;

13 - первинний перетворювач реальної частоти обертання трубки 8 із досліджуваними рідинами;

15 - електронний блок узгодження електронних блоків приладу із вхідними блоками персонального комп'ютера;

16 - персональний комп'ютер, який здійснює відповідну обробку всіх вхідних сигналів і розрахунок значення σ згідно залежності (9).

Значення різниці густин досліджуваних рідких фаз $\Delta\rho$ вводиться в оперативну пам'ять персонального комп'ютера безпосередньо за допомогою його клавіатури.

1. Vonnegut B. Rotating Bubble Method for Determination of Surface and Interfacial Tension.- *Rev. Sci. Instrum.*, No. 13, 1942, P. 6-9.

2. Princen H. M., Zia I. Y. Z., Mason S. G. Measurement of Interfacial Tension from the Shape of a Rotating Drop.- *J. Colloid Interface Sci.* No. 23, 1967., P. 99-107.

3. Slattery J. C., Chen J.-D. Alternative Solution for Spinning Drop Interfacial Tensiometer.- *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 64, No. 2, 1978, P. 371-373.

4. Кісіль Р. І. Вплив коефіцієнта збільшення оптичної системи на результати вимірювання міжфазного натягу методом обротової краплі // *Методи та прилади контролю якості.* - 1998. - № 2. - С. 6-8.

5. Адамсон А. *Физическая химия поверхностей.* - М.: Мир, 1979.