

УДК 691.3.07

DOI 10.31471/1993-9981-2022-1(48)-36-43

## АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНОГО ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ МЕТОДОМ ПУЛЬСУЮЧОГО МЕНІСКА

О. Г. Малько<sup>1)</sup>, А. О. Малько<sup>2)</sup>, Г. В. Григорчук<sup>1)</sup>

<sup>1</sup>Інститут інформаційних технологій, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, [malko.pochta@gmail.com](mailto:malko.pochta@gmail.com)

<sup>2</sup>Товариство з обмеженою відповідальністю «СЛОТ»,  
вул. Незалежності, 67, м. Івано-Франківськ, 76000, [kokakola@ukr.net](mailto:kokakola@ukr.net)

Шляхом математичного моделювання квазістатички капілярних поверхонь типу лежача крапля отримана методологічна база дослідження поверхнево-активних речовин за динамікою поверхневого натягу методом пульсуючого меніска. Сутність методу полягає в тому, що, шляхом прямої і зворотної подачі газу у меніск, реалізується процес пульсації меніска в околі максимального тиску в ньому, значення якого однозначно визначає поверхневий натяг на кожному циклі. Ефект полягає в тому, що меніск, при кожному циклі вимірювання, не захоплюється після моменту досягнення максимального тиску у ньому, а переходить у новий стійкий стан рівноваги, тобто процес адсорбції поверхнево-активних речовин не припиняється. Завдяки цьому запропонований метод відповідає точності вимірювання поверхневого натягу за методом максимального тиску у бульбашці і оперативності методу лежачої краплі. Можливість реалізації запропонованого методу теоретично обґрунтовано шляхом розробки математичної моделі процесу пульсації меніска в околі максимального тиску у ньому в системі замкнутій відносно кількості газової фази. На основі теоретичних досліджень результатів моделювання запропоновано структурну схему і розроблено алгоритм процесу визначення динамічних характеристик поверхневого натягу.

Управління процесом контролю здійснюється персональним комп'ютером через проміжний пристрій збору даних NI USB-6009. Це обумовлює необхідність розроблення алгоритму керування процесом вимірювання, а також забезпечення коректної обробки отриманих даних за описаною вище методикою. Дана умова була реалізована у програмному середовищі у вигляді віртуального приладу. Віртуальна складова приладу виконана за допомогою графічного програмного забезпечення LabVIEW, то замість коду в ньому використовується візуальні складові. Зручне керування роботою процесом вимірювання досягнуте тим, що на передню панель програми виведено усі налаштовуванні параметри у вигляді віртуальних кнопок, перемикачів, вікон вводу і вибору вхідної інформації, які відповідають конструкції установки. Для ефективної роботи підійде будь-який персональний комп'ютер, що має вільний USB – порт і встановлену програму LabVIEW, що забезпечить роботу даної конструкції.

**Ключові слова:** рідинний меніск, капілярна поверхня, гістерезис, пульсація, поверхневий натяг, структура, алгоритм, система.

By mathematical modeling of quasi-statics of capillary surfaces of the lying drop type, the methodological basis for the study of surfactants on the dynamics of surface tension by the method of pulsating meniscus was obtained. The essence of the method is that, by direct and reverse supply of gas to the meniscus, the process of pulsation of the meniscus in the vicinity of the maximum pressure in it, the value of which uniquely determines the surface tension on each cycle. The effect is that the meniscus, with each measurement cycle, does not close after reaching the maximum pressure in it, but goes into a new steady state of equilibrium, ie the process of adsorption of surfactants does not stop. Due to this, the proposed method corresponds to the accuracy of measuring the surface tension by the method of maximum pressure in the bubble and the efficiency of the lying drop method. The possibility of implementing the proposed method is theoretically justified by developing a mathematical model of the process of pulsation of the meniscus in the vicinity of the maximum pressure in the system closed relative to the amount of gas phase. Based on theoretical studies of the simulation results, a block diagram is proposed and an algorithm for the process of determining the dynamic characteristics of surface tension is developed.

The control process is controlled by a personal computer via an intermediate data acquisition device NI USB-6009. This necessitates the development of an algorithm for controlling the measurement process, as well as ensuring the correct processing of the obtained data according to the method described above. This condition was implemented in the software environment in the form of a virtual device. The virtual component of the device is made using the graphics software LabVIEW, then instead of code it uses visual components. Convenient control of the measurement

process is achieved by the fact that the front panel of the program displays all the settings in the form of virtual buttons, switches, input windows and selection of input information that corresponds to the design of the installation. Any personal computer with a free USB port and LabVIEW software installed to ensure this operation will work effectively.

**Key words:** liquid meniscus, capillary surface, hysteresis, pulsation, surface tension, structure, algorithm, system.

### Вступ.

Поверхнево-активні властивості мають більшість органічних сполук (поверхнево-активні речовини - ПАР): спирти, кислоти, аміни, гідроперекиси, кетони, ефіри, солі карбонових кислот та ін [1]. Таким чином, інформація про вміст у воді ПАР може також служити інтегральною оцінкою ступеня її чистоти на предмет органічних включень.

Найбільш поширеними на теперішній час є методи, засновані на аналізі форми краплі або бульбашки, практично не мають обмежень за часом контролю процесу адсорбції, що дає можливість визначення концентрацій органічних включень. Однак даний метод має ряд істотних недоліків: вплив випаровування рідини на зміну обсягу меніска бульбашки при тривалому процесі дослідження; неможливість оперативного контролю концентрації органіки; неможливість використання в автоматизованих системах контролю.

За результатами математичного моделювання процесу пульсації рідинного меніска в околиці максимального тиску в системі замкнутої щодо кількості газової фази [2] запропоновано новий метод визначення динамічного поверхневого натягу (ПН) за вимірним тиску в пульсуючому меніску. Структура системи контролю органіки у природній і питній водах, та загальний алгоритм її функціонування наведені у роботі [3].

### Опис процесу пульсації меніска

Сутність методу полягає в тому, що шляхом прямого і зворотного подачі газу у газовий пухирець, реалізується процес пульсації меніска в околиці максимального тиску, значення якого однозначно визначає поверхневий натяг на кожному циклі. Ефект полягає в тому, що бульбашка при кожному циклі не зривається після проходження максимального тиску, а переходить в новий стійкий стан рівноваги, тобто процес адсорбції ПАР здійснюється не безперервно на одну і ту ж поверхню розділу фаз.

Спрощену імітаційну схему процесу пульсації меніска капілярної поверхні бульбашки шляхом зміни її об'єму показано на рис.1, де зміна об'єму капілярної поверхні здійснюється шляхом переміщення плунжера.

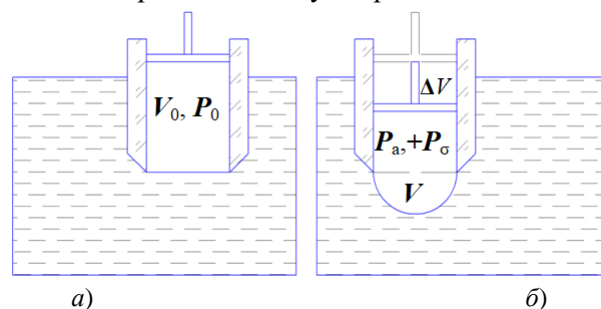


Рисунок 1 – Процес формування меніска

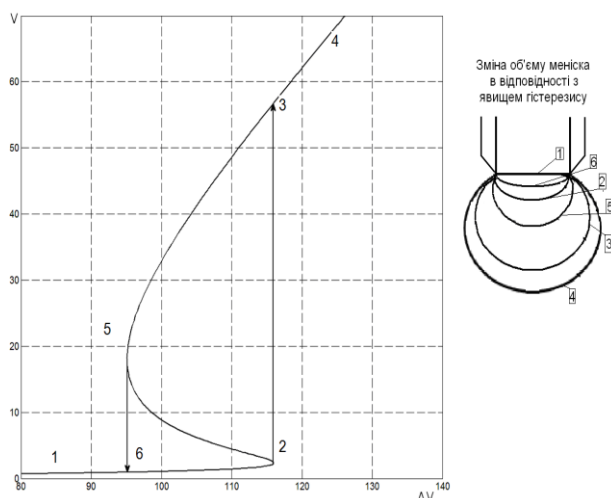
При переміщенні плунжера вниз із первинного положення (рис.1, а) газова фаза переходить із системи подачі і формує меніск зростаючого об'єму (рис.1, б). При зворотному ході плунжера навпаки, газова фаза переходить з меніска в систему подачі. З термодинамічної точки зору описаний процес можна вважати ізотермічним, оскільки об'єм бульбашки зневажливо малий по відношенню до об'єму рідини, а теплоємність рідини значно більша від теплоємності газової фази

При переміщенні плунжера вниз із первинного положення (рис.1, а) газова фаза переходить із системи подачі і формує меніск зростаючого об'єму (рис.1, б). При зворотному ході плунжера навпаки, газова фаза переходить з меніска в систему подачі. З термодинамічної точки зору описаний процес можна вважати ізотермічним, оскільки об'єм бульбашки зневажливо малий по відношенню до об'єму рідини, а теплоємність рідини значно більша від теплоємності газової фази

В результаті чисельного моделювання квазістатички еволюції капілярних поверхонь типу лежача крапля на основі рівняння капілярності Лапласа у диференціальній формі [2] отримані залежності об'єму газового меніска  $V$  від зміни об'єму системи подачі газу  $\Delta V$ . На

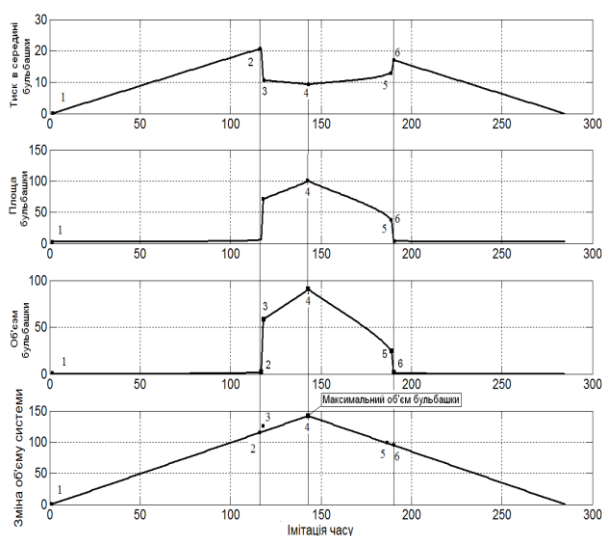
рис.2 наведено фрагмент залежності об'єму газового мениска  $V$  від зміни об'єму системи подачі газу  $\Delta V$  з вираженим вигином і відповідна їй візуалізація положень об'єму мениска для , що пояснює процес гістерезису.

При витискуванні газу об'єм мениска зростає у напрямі 1-2. У точці 2 відбувається перехід 2-3, тобто стрибкоподібне зростання об'єму мениска. Наступна подача газу приводить до росту мениска у напрямі 3-4. Зворотній хід поршня від точки 4 відбувається по шляху 4-3-5. У точці 5 відбувається різке зменшення об'єму мениска по напрямку 5-6. При подальшому зменшенню об'єму системи (втягування газу) процес йде по шляху 6-1. При циклічному процесі витискування – втягування відбувається виражений ефект гістерезису по всіх характеристиках мениска (об'єму, тиску, площі поверхні тощо). Причому амплітуда петлі гістерезису залежить від радіуса вимірювального капіляра, початкового об'єму системи подачі і ПН досліджуваної рідини.



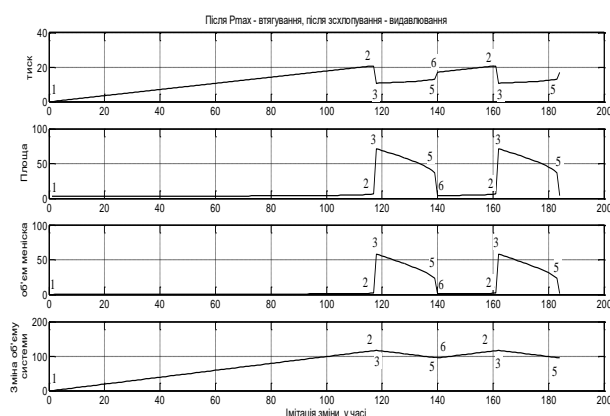
**Рисунок 2 – Гістерезис зміни об'єму бульбашки від об'єму витискування і втягування поршнем (приріст 1-2-3-4, спад 4-3-5-6-1)**

На рис. 3 представлено результати моделювання процесу пульсації мениска при рівномірному зростанні  $\Delta V$  до максимально можливого значення, з наступним рівномірним падінням до нуля. Точками 1, 2, 3, 4, 5, 6 позначено відповідні положення згідно рис. 1.



**Рисунок 3 – Процес пульсації бульбашки при рівномірному зростанні  $\Delta V$  від нуля до максимально можливого значення, з наступним рівномірним спаданням до нуля**

На рис. 4 представлено результати моделювання циклічного процесу пульсації мениска, де в режимі витискування після проходження максимального тиску і його стрибкоподібного падіння (точки 2–3) здійснюється реверс (витискування – втягування), і в режимі втягування при стрибкоподібному зростанні тиску (точки 5–6) здійснюється реверс (втягування – витискування). Точками 1, 2, 3, 5, 6 позначено відповідно положення згідно рис. 2.



**Рисунок 4 – Процес пульсації з реверсами в моменти стрибкоподібної зміни тиску в мениску**



### Алгоритм функціонування процесу вимірювання

Управління процесом контролю здійснюється персональним комп'ютером через проміжний пристрій збору даних NI USB-6009, розглянутий [4]. Це обумовлює необхідність розроблення алгоритму керування процесом вимірювання, а також забезпечення коректної обробки отриманих даних за описаною вище методикою. Дана умова була реалізована у програмному середовищі [83–84, 86–95] у вигляді віртуального приладу.

Узагальнена блок-схема алгоритму програми керування процесом вимірювання та обробки даних, врахуванням специфіки функціонування блоку збору даних NI USB-6009, показана на рис.5. Задана тактова частота виконання простих операцій програми в даному випадку рівна 40 кГц.

Послідовність операцій алгоритму програми є наступною.

1) На початку функціонування програми необхідно задати основні параметри, які визначають критерії виконання керуючих функцій алгоритму. Їх значення обумовлені апріорною інформацією про область зміни динамічного поверхневого натягу досліджуваної рідини. До даних параметрів слід віднести: приблизний час досягнення рівноважного поверхневого натягу, радіус вимірювального капіляра, що обумовлює чутливість вимірювань, наявність шумів сигналу вимірювань і т. п. Завдання параметрів може здійснюватись: введенням з клавіатури або зчитуватися з файлу, який попередньо введено у програмний модуль. В даному випадку задаються наступні параметри:

–  $dP_v$  – значення критерію досягнення максимального тиску у бульбашці в процесі зростання її об'єму, який визначає мінімальну величину стрибкоподібного спаду тиску після проходження максимуму (перехід 2–3, рис.2);

–  $dP_n$  – значення критерію досягнення моменту стрибкоподібного спадання об'єму бульбашки в процесі зменшення її об'єму, який визначає мінімальну величину стрибкоподібного зростання тиску (перехід 5–6, рис.2.);

–  $n$  – значення зсуву номерів у послідовності вимірювань для визначення

умови досягнення рівноважного поверхневого натягу;

–  $s$  – значення критерію досягнення рівноважного поверхневого натягу, який визначає максимальну різницю значень у послідовності вимірювань з різницею номерів  $n$ .

2) Здійснюється обнуління лічильника кількості циклів вимірювання –  $k$  і значення попереднього виміру  $P_1$  у послідовності  $P_1, P_2$  – вимірів надлишкового тиску у рідинному меніску, з метою коректності їх подальшого порівняння.

3) Процес вимірювання починається з команди на витискування бульбашки, що реалізується поданням імпульсу логічної одиниці на відповідний цифровий вихід блоку збору даних NI USB-6009.

4) На кожному такті здійснюється вимірювання тиску у рідинному меніску  $P_2$ , що реалізується усередненням вибірки з п'яти послідовних вимірів.

5) Результати вимірювання тиску  $P_2$ , за бажанням користувача, відображаються на моніторі у вигляді осцилограми розгорнутої в часі.

6) Після кожного наступного вимірювання тиску  $P_2$  здійснюється порівняння з попереднім значенням  $P_1$ , у разі стрибкоподібного спадання тиску на величину більше ніж  $dP_v$  (досягнення максимального тиску), процес видавлювання бульбашки припиняється, у протилежному випадку, після переприсвоєння послідовності вимірів  $P_1, P_2$  процес витискування продовжується (перехід до п.3)

7) При досягненні максимального тиску фіксується його значення  $P_{max}$ , проводиться переприсвоєння значень послідовності вимірів  $P_1, P_2$ , та здійснюється операція декрементування лічильника  $k$ .

8) За отриманим значенням  $P_{max}$  здійснюється розрахунок поверхневого натягу  $\sigma$  згідно залежностей [], побудовані для конкретного радіуса вимірювального капіляра.

9) Результати обчислень значення поверхневого натягу  $\sigma$  виводяться на монітор у вигляді осцилограми розгорнутої в часі (рис. 3.8) і, за бажанням користувача, записуються у файл для можливості наступної обробки.

10) Здійснюється оцінка на можливість перевірки досягнення рівноважного стану –

кількість проведених послідовних вимірів ПН  $k$  повинна бути більша від  $n$ .

11) При виконанні попередньої умови п.10 здійснюється порівняння значень двох вимірів  $\sigma$  у послідовності вимірювань з різницею номерів  $n$ .

12) Якщо неможливо зробити перевірку досягнення рівноважного стану ( $k < n+1$ ), або стан рівноважного поверхневого натягу  $\epsilon$  не досягнутий, то подається команда на втягування бульбашки, що реалізується поданням імпульсу логічної одиниці на відповідний цифровий вихід блоку збору даних NI USB-6009.

13) Аналогічно як в п.4 проводиться вимірювання тиску у бульбашці  $P_2$ , що реалізується усередненням вибірки з п'яти послідовних вимірів.

14) Після кожного вимірювання тиску  $P_2$  здійснюється порівняння з попереднім значенням  $P_1$ , у разі стрибкоподібного зростання тиску на величину більше ніж  $dP_n$  (стрибкоподібне зменшення об'єму бульбашки) процес втягування бульбашки припиняється, і проводиться перехід до режиму витискування (перехід до п.3).

15) У протилежному випадку, після переприсвоєння послідовності вимірювань  $P_1, P_2$  процес втягування продовжується (перехід до п.12).

16) Якщо модуль різниці цих вимірювань є меншим значення критерію досягнення рівноважного поверхневого натягу  $s$ , то вважається, що досягнуто стан рівноважного поверхневого натягу.

17) За отриманою динамічною характеристикою  $\sigma(t)$  розраховується концентрація ПАР –  $C$ .

18) Результати розрахунку виводяться на екран комп'ютера та можуть бути записані у заданий файл.

19) Процес вимірювання закінчено.

Для полегшення роботи оператора з приладом і програмою було розроблено зручний інтерфейс (рис.6). На екран монітора інформація виводиться графічно, у вигляді сигналу значення поверхневого натягу в часі, а керування роботою вимірювальної установки здійснюється за допомогою віртуальних клавіш. Розроблена програма може працювати у двох режимах: «ручному» і «автоматичному». Вибір варіанту режиму роботи здійснюється перед

початком роботи за допомогою перемикача, що знаходиться на віртуальному інтерфейсі програмного забезпечення і відмічається спеціальним «індикатором режиму роботи». Для початку вимірювання тиску необхідно натиснути віртуальну кнопку «пуск».

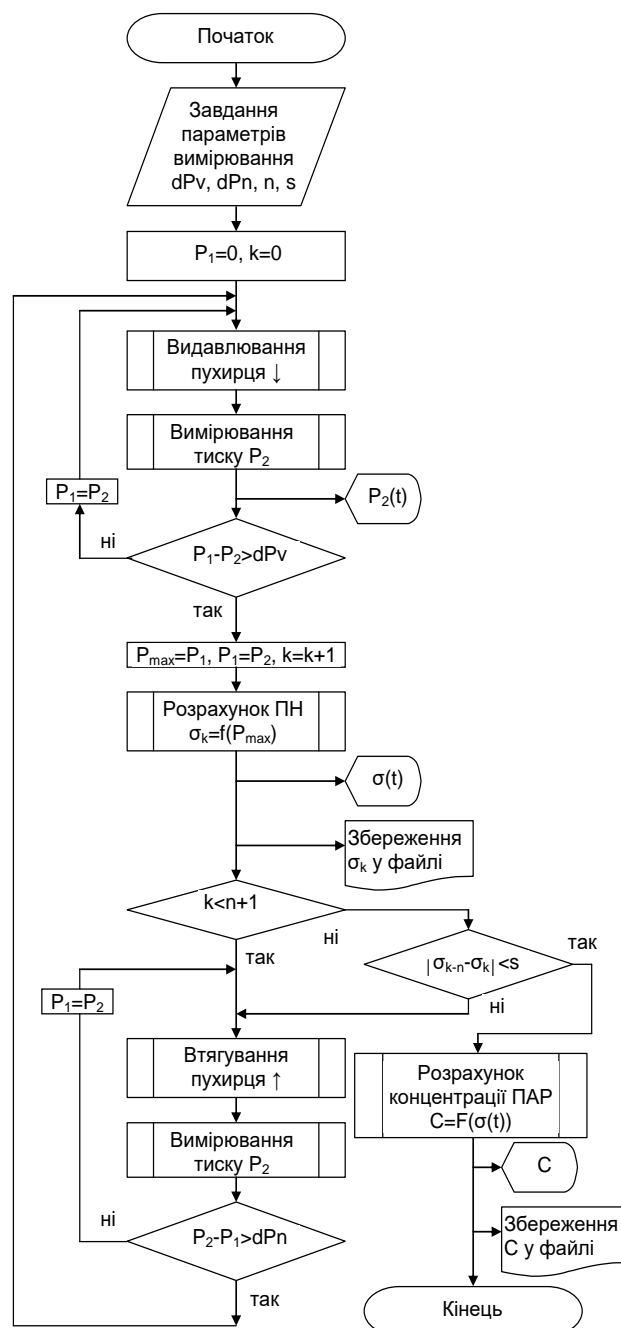


Рисунок 6 – Блок схема алгоритму програми керування процесом вимірювання та обробки даних

Обидва режими вмикаються шляхом натискування на віртуальний перемикач «включити подачу». Після чого поступає імпульс на контролер двигуна, запускаючи рух плунжера. Вимірювання можна починати як з витискування, так і з всмоктування, для цього потрібно натиснути відповідну віртуальну кнопку «почати з витискування» або «почати з втягування».

При роботі програми у «ручному» режимі керування рухом двигуна здійснюється оператором за допомогою перемикача «втягування»–«витискування» на інтерфейсі програми. Максимальне значення тиску і поверхневий натяг фіксується візуально за допомогою виведеного на екран графічного сигналу. Для припинення роботи натискається віртуальна кнопка «Стоп».

При вибраному автоматичному режимі роботи, керування установкою проходить під керівництвом комп'ютера, який самостійно фіксує максимальні значення тиску і перемикає рух двигуна у протилежному напрямі. В цьому випадку для початку роботи достатньо натискання віртуальної кнопки «включити подачу». Для припинення роботи приладу потрібно натиснути віртуальну клавішу «Стоп». Напрямок руху плунжера можна дізнатися за допомогою «індикатора руху поршня».

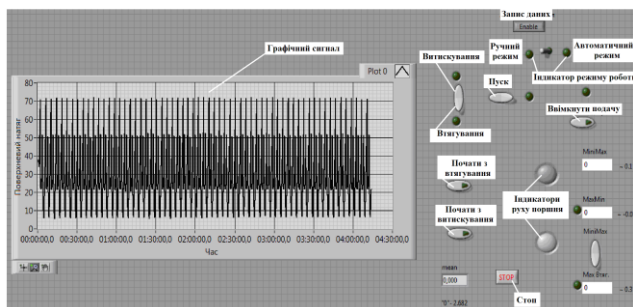


Рисунок 7 – Інтерфейс програми керування процесом вимірювання і обробки даних

Віртуальна складова приладу виконана за допомогою графічного програмного забезпечення [6], то замість коду в ньому використовується візуальні складові. Графічні зображення тексту програми показано на рис. 7 і рис. 8 (для автоматичного і ручного режиму роботи з приладом).

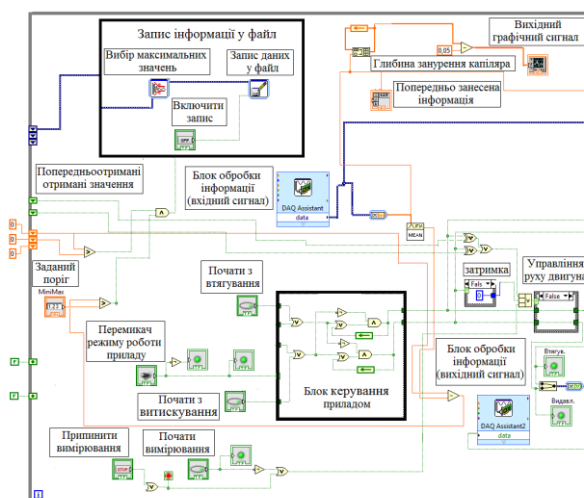


Рисунок 8 – Графічне відображення робочої програми для роботи в автоматичному режимі

Зручне керування роботою системи вимірювання досягнуте тим, що на передню панель програми виведено усі налаштовуванні параметри у вигляді віртуальних кнопок, перемикачів, вікон вводу і вибору вхідної інформації, які відповідають конструкції установки.

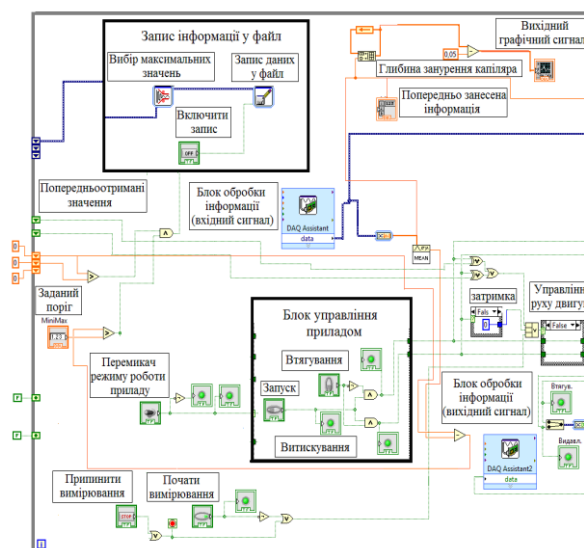


Рисунок 9 – Графічне відображення робочої програми при роботі у ручному режимі

Також слід зазначити, що розроблена програма проводить запис отриманої інформації у числовій формі в форматі txt та графічно, що значно полегшує наступну обробку результатів вимірювання і використання її в обчисленнях. Запам'ятовування розпочинається після

натискання віртуальної клавіші «запис даних» на екрані.

#### **Висновки.**

На основі визначеного алгоритму функціонування системи вимірювання динамічного поверхневого натягу на предмет контролю органіки у природній і питній водах розроблена і апробована графічна програма у середовищі LabView. Апробація програми проведена на реальній системі за допомогою багатофункціонального пристрою введення-виведення USB 6009

#### **Список використаних джерел**

1. В. Б. Файнерман, В. Я. Уманський, Б. С. Горелік, Д. О. Ластков, О. Г. Козаков, О контроле содержания органических соединений в питьевой и природной воде методом межфазной тензиометрии. - Вестн. гиг. эпид. – 2006. – Т. 10, № 1. – С. 181 - 185.
2. О. Г. Малько, А. О. Малько, Математичне моделювання процесу пульсації рідинного меніска в околі максимального тиску: 6 -та Міжнародна науково-практична конференція ІТКІ - 15, Прикарпатський національний університет, Івано-Франківськ, 2015. – С. 214 – 216.
3. О. Г. Малько, А. О. Малько, Система оперативного контролю органіки у природній і питній водах. : 8-ма Міжнародна науково-практична конференція ІТКІ - 17, Прикарпатський національний університет, Івано-Франківськ, 2017. – С. 426-429.
4. Руководство пользователя и технические характеристики USB-6008/6009 [електронний ресурс] – Режим доступу: [ftp://ftp.ni.com/pub/branches/russia/daq/ni\\_usb\\_6008\\_6009.pdf](ftp://ftp.ni.com/pub/branches/russia/daq/ni_usb_6008_6009.pdf) – Назва з екрану.

5. Ю. С. Магда. LabVIEW: практический курс для инженеров и разработчиков. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 208 с.

#### **References**

1. V. B. Faynerman, V. YA. Umans'kyu, B.S. Horelik, D.O. Lastkov, O.H.Kozakov, O kontrole soderzhanyya orhanycheskykh soedynenyy v pyt'evoy u pryrodnoy vode metodom mezhfaznoy tenzyometryy. - Vestn. hyh. epyd. – 2006. – Т. 10, № 1. – S. 181 - 185.
2. О. Н. Mal'ko, А. О. Mal'ko, Matematychnе modelyuvannya protsesu pul'satsiyi ridynnoho meniska v okoli maksymal'noho tysku: 6 -ta Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiya ITKI - 15, Prykarpат-s'kyu natsional'nyy universytet, Ivano-Frankivs'k, 2015. – S. 214 – 216.
3. О. Н. Mal'ko, А. О. Mal'ko, Systema operatyvnoho kontrolyu orhaniky u pryrodniy i pytniy vodakh. : 8-ma Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiya ITKI - 17, Prykarpат-s'kyu natsional'nyy universytet, Ivano-Frankivs'k, 2017. – S. 426-429.
4. Rukovodstvo pol'zovatelya y tekhnicheskyye kharakterystyky USB-6008/6009 [elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu: [ftp://ftp.ni.com/pub/branches/russia/daq/ni\\_usb\\_6008\\_6009.pdf](ftp://ftp.ni.com/pub/branches/russia/daq/ni_usb_6008_6009.pdf) – Nazva z ekranu.
5. YU. S. Mahda. LabVIEW: praktycheskyy kurs dlya ynzhenerov y razrabotchykov. – M.: DMK Press, 2012. – 208 s.