

УДК 004.75

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2023-22-04

Бойкиня А.О., Заворотний В.Ф.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДАТЧИК В'ЯЗКОСТІ ГАЗУ НА МІКРОКОНТРОЛЕРІ

У рамках даного дослідження здійснено розробку датчика в'язкості газу на основі сенсорної технології та мікроконтролера. Запропоновано використання мікрокантилевера, як найбільш спрощеного пристрою на основі MEMS. Наголошується, що молекули, адсорбовані на поверхні мікрокантилевера, можуть викликати зміни частоти коливань і відхилення мікрокантилевера, а отримані зміни частоти вібрації можна використовувати для вимірювання різних параметрів, таких як в'язкість, щільність і швидкість потоку. Саме цей ефект покладено в основу розробки. Підкреслено, що у даному дослідженні цифровий датчик в'язкості газу розроблений для фізичного експерименту на основі сенсорної технології та мікроконтролера. Конструкція цифрового датчика в'язкості газу складається з осцилюючого мікрокантилевера, пікова частота резонансного відгуку якого є основною динамічною характеристикою, яка дуже чутлива до щільності та в'язкості навколишнього середовища. П'єзоелектричний перетворювач інтегрований у верхній частині кантилевера, щоб забезпечити активацію. Наголошено, що п'єзоелектричний ефект, може вимірювати зміни маси на рівні від мікрограмів до нанограмів на одиницю площі. Представлено блок-схему програмного забезпечення системи. Зазначається, що спеціальна друкована плата містить чіп MEMS, датчики тиску та температури, точність системи визначається на основі результатів вимірювань і знання розмірів активного поля кристалу.

Ключові слова. Мікрокантилевер, мікроконтролер, в'язкість, температура, щільність, газ.

Вступ. Мікрокантилевери є найбільш спрощеними пристроями на основі MEMS, які використовувалися в різних програмах, для моніторингу рівня глюкози в крові [1], виявлення молекул газу та скринінгу захворювань [2,3]. Крім того, мікрокантилевери використовувалися в атомно-силовій мікроскопії для зображення топографії поверхні [4,5]. Теоретично мікрокантилеверні датчики MEMS реагують, вигинаючи свою структуру, через зміну маси, спричинену адсорбцією молекул на поверхні кантилеверів, що призводить до зміщення їх резонансної частоти [6,7].

Кантилевери використовувалися в різних навколишніх середовищах, від газоподібного до вакуумного [8-10]. Молекули, адсорбовані на поверхні мікрокантилевера, можуть викликати зміни частоти коливань і відхилення мікрокантилевера [11,12]. Зміни частоти вібрації можна використовувати для вимірювання різних параметрів, таких як в'язкість, щільність і швидкість потоку. Відхилення зазвичай пропорційне концентрації аналіту. Дослідження резонансних мікрокантилеверних датчиків було зосереджено на підвищенні та покращенні їх масової чутливості кількома методами, включаючи введення нового матеріалу з унікальними властивостями, зменшення масштабу та модифікацією їхньої структурної конфігурації [13,14].

Аналіз літературних джерел за темою дослідження. Вимірювання зміни резонансної частоти або відхилення кремнієвих пучків, викликаного реакцією адсорбції, вже було описано в літературі ще в 1968 році Wilfinger та ін. [15], який представив великий кремнієвий кантилевер зі структурами $50 \times 30 \times 8$ мм. Запропоновані пристрої склалися з кремнієвого кантилевера, який механічно відхилявся за рахунок електрично викликаного теплового розширення. Крім того, кремнієві п'єзорезистивні елементи використовувалися як елементи зчитування для виявлення напруги кантилевера та забезпечення електричного виходу.

Відтоді кантилевери широко використовувалися в різних додатках, мабуть, найпоширенішим застосуванням кантилеверів є датчики сили та переміщення. Перший кантилевер для атомно-силової мікроскопії, був представлений Біннінгом та ін. [16] ще в 1986 році, який вручну виготовив кантилевер, вирізавши тонку плівку золотої фольги. Крім того, кантилевер використовувався для приведення в дію різними методами, такими як електротермічний [17], п'єзоелектричний [18–20], магнітний [21] і електростатичний привід

[22]. Після появи кантилевера в 1968 році було проведено більше досліджень для вдосконалення та розробки кантилеверів для використання у якості датчиків. Літтрелл і Грош [23] досліджували та розробили MEMS на основі кантилевера з використанням п'єзоелектричних матеріалів як для зондування, так і для приведення в дію системи.

Крім того, Shin et al. [24] спроектували, дослідили, виготовили та перевірили масиви п'єзоелектричних мікрокантилеверів різної довжини та форми для оптимізації їх чутливості та резонансних властивостей.

Також варто відзначити такі роботи як: Sharan, Dr & Upadhyaya, Anup M & Srivastava, Maneesh [25], Bhatia, Deepak & Sharma, Himanshu & Meena, Dr & Palkar, V.R. [26], Zhang, Yawen & Shi, Feng & Zhang, Chenguang & Sheng, Xin & Zhong, Yunhao & Chong, Hui & Yang, Zhanjun & Wang, Chengyin [27], Li, Wei & Jiao, Yi & Jiang, Hai-Yang & Ren, Ying-Hui & Ibrahim, Ahmed [28] та інші.

Однак, незважаючи на масштабність наукових досліджень за окресленою тематикою, питання розробки датчика в'язкості газу на основі сенсорної технології та мікроконтролера залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

Мета дослідження. Розробити датчик в'язкості газу на основі сенсорної технології та мікроконтролера.

Основні результати дослідження. Автоматизація вимірювань за допомогою датчиків і цифрових технологій є одним із рішень, які можна застосувати для визначення параметрів газу. У цій роботі цифровий датчик в'язкості газу розроблений для фізичного експерименту на основі сенсорної технології та мікроконтролера.

Цифровий датчик в'язкості газу складається з осцилюючого мікрокантилевера, пікова частота резонансного відгуку якого є основною динамічною характеристикою, яка дуже чутлива до щільності та в'язкості навколишнього середовища. Таким чином, в'язкість і щільність газу можна визначити, аналізуючи частотну характеристику кантилевера, поміщеного в газове середовище.

Кварцові кристалічні мікроваги є надзвичайно чутливими до балансу маси, заснованого на п'єзоелектричному ефекті, який може вимірювати зміни маси на рівні від мікрограмів до нанограмів на одиницю площі. У таких пристроях технологія ґрунтується на кварцовому п'єзоелектричному диску. У пристроях використовується п'єзоелектричний ефект кристалічного матеріалу кварцу, поміщеного між двома металевими електродами на протилежних сторонах. Частина кварцового диска, що перекриваються, з електродами визначають активну чутливу поверхню.

Кварцовий п'єзоелектрик може коливатись з певною частотою, коли через металеві електроди проходить змінне електричне поле. Коливання і вібраційний рух п'єзоелектричних матеріалів кварцового диска створюють поперечну акустичну хвилю, яка може поширюватися кристалічними матеріалами і знову відбиватися на поверхню кристала. Тому, товщина п'єзоелектричної кварцової пластини визначає величину резонансної частоти.

Розрахунок резонансної частоти здійснюється за формулою:

$$\Delta f = \frac{2f_0^2}{A\sqrt{\rho_q \mu_q}} \Delta m \quad (1)$$

де Δf – резонансна частота;

f_0 – початкова частота;

A – п'єзоелектрично активна площа кристалу;

ρ_q – площа кристалу;

μ_q – модуль пружності;

Δm – зміна маси.

Теплотворна здатність газу розраховується як:

$$H = \frac{1}{100} (H_1 f_1 + H_2 f_2 + H_3 f_3 + \dots + H_n f_n) = \frac{1}{100} \sum_{r=1}^n H_r f_r \quad (2)$$

де H – теплотворна здатність газу (висока теплотворна здатність H_s і низька теплотворна здатність H_i), МДж/м³;

H_r – теплотворна здатність r горючого компонента в газі, МДж/м³;

f_r – об'ємна частка горючого компонента в газі, %.

Коефіцієнт взаємозамінності або індекс Воббе, вимірює взаємозамінність газоподібної речовини. Формула розрахунку:

$$W = \frac{H}{\sqrt{d}} \quad (3)$$

де W – індекс Воббе (високий індекс Воббе W_s і низький індекс Воббе W_i);

H – теплотворна здатність газу, МДж*м⁻³;

d – густина газу відносно повітря.

Консольний резонатор MEMS (ядро датчика) приводиться в дію п'єзоелектрично. П'єзоелектричний перетворювач (рис. 1) інтегрований у верхній частині кантилевера, щоб забезпечити активацію. Платина (Pt) використана для верхнього і нижнього металевих контактів, між якими розміщено AlN, щоб сформувати активний і чутливий електроди, а також датчик температури, оскільки під час оцінки теплофізичних властивостей газу необхідно вимірювати температуру та контролювати її, потрібно розмістити датчик температури якомога ближче до датчиків щільності та в'язкості.

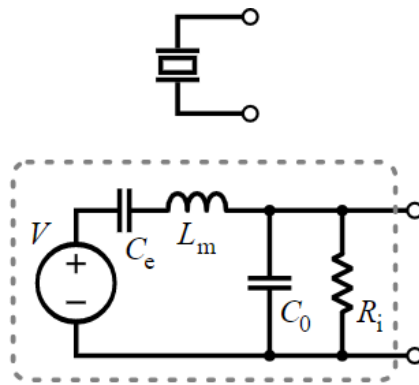


Рисунок 1 – П'єзоелектричний перетворювач

Мікроконтролер Arduino – це електронний компонент, який можна програмувати на виконання програми. Мікроконтролер, оснащений допоміжними периферійними пристроями, як комп'ютер на рівні мікросхеми. Простий мікроконтролер – це мікросхема, яка містить RAM, ROM, паралельний вхід/вивід, лічильник і тактову схему.

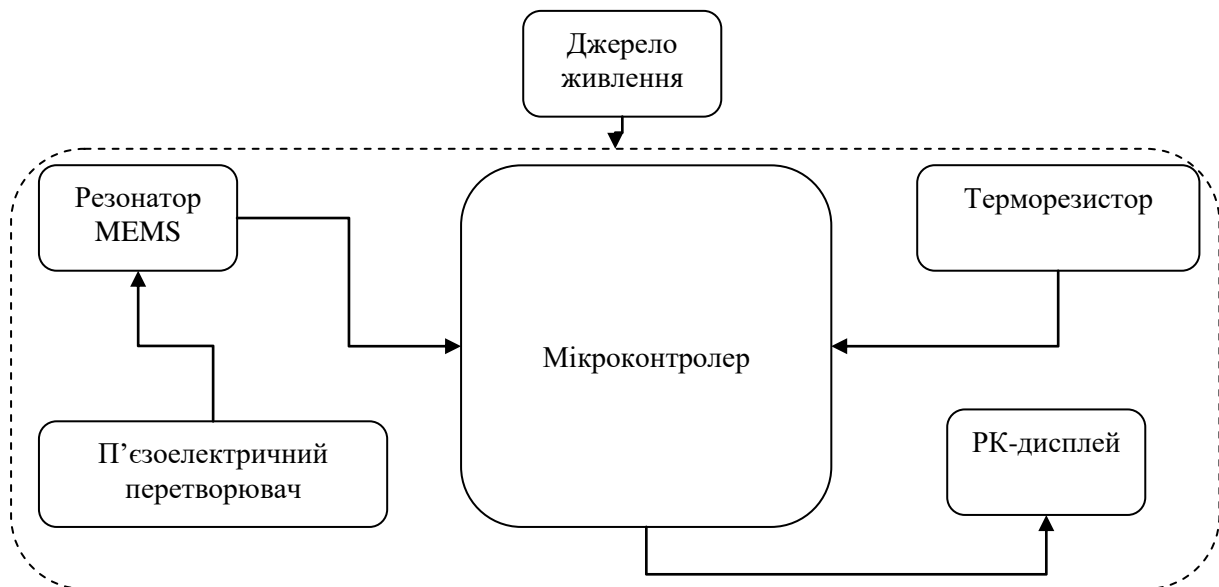


Рисунок 2 – Блок-схема цифрового датчика в'язкості газу

Мікроконтролер – це мікропроцесорна система, в якій вже є центральний процесор, постійна пам'ять (ROM), оперативна пам'ять (RAM), вхід-вихід, таймери, переривання, годинники та внутрішнє обладнання, яке вже взаємопов'язане та добре організоване в одній мікросхемі, готовій до використання.

Arduino – це плата мікроконтролера, інтегрована з мікроконтролером ATmega328. Дані Arduino відобразатимуться на модулі рідкокристалічного дисплея. РК-дисплей – це дисплей з плоским екраном або інший оптичний пристрій з електронною модуляцією, який використовує світломодуючі властивості рідких кристалів.

Цифровий датчик в'язкості газу, побудований за допомогою кількох схем і електронних компонентів. Блок-схема цифрового датчика в'язкості газу показана на рисунку 2.

У цій конструкції Arduino служить для отримання даних від датчиків для визначення в'язкості газу. Схема програми всередині Arduino представлена на блок-схемі наведеної на рисунку 3.

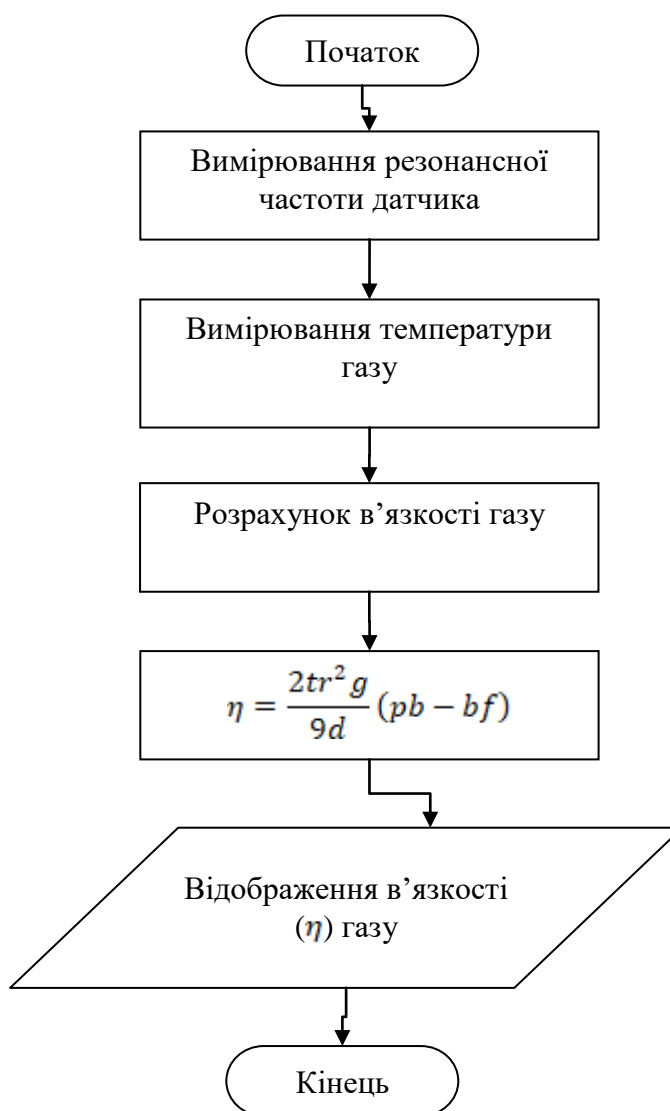


Рисунок 3 – Блок-схема програмного забезпечення системи

Спеціальна друкована плата містить чіп MEMS, датчики тиску та температури, точність системи визначається на основі результатів вимірювань (рис. 4) і знання розмірів активного поля кристалу. Кожен із зразків газу вимірюють і порівнюють з його стандартним коефіцієнтом в'язкості. Тим часом визначення прецесії системи виконується шляхом проведення вимірювань, повторених десять разів для кожного зразка газу. За результатами визначається середнє значення, стандартне відхилення, абсолютна та відносна похибки.

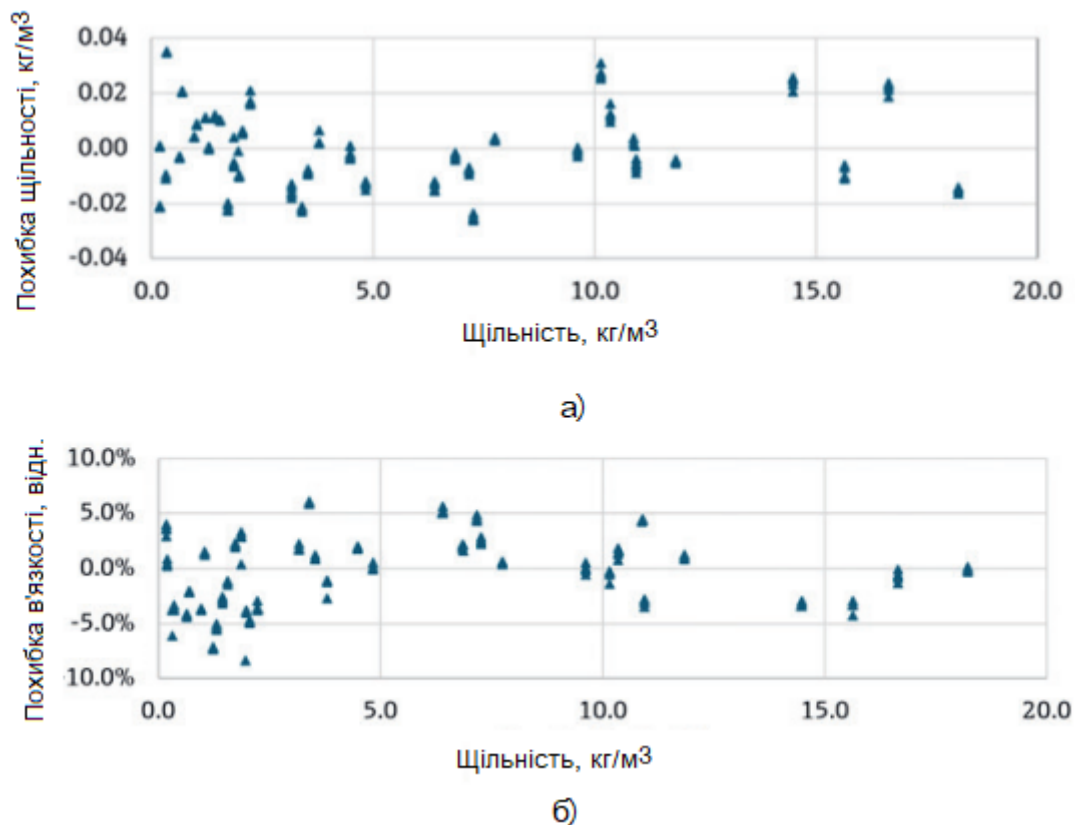


Рисунок 4 – Точність вимірювання щільності (а) і в'язкості (б)

Висновки. У роботі запропоновано датчик в'язкості газу на основі сенсорної технології та мікроконтролера. Представлений датчик є оригінальним рішенням з максимально зменшеною конструкцією. Цифровий датчик в'язкості газу на основі сенсорної технології здатний з максимальною точністю виміряти показник в'язкості газу. Використання мікрокантилевера на основі MEMS з інтеграцією п'єзоелектричного перетворювача у верхню частину кантилевера, для активації, дозволяє вимірювати зміни маси на рівні від мікрограмів до нанограмів на одиницю площі.

Перспективами подальших досліджень є формування комплексної моделі визначення в'язкості та густини газу з урахуванням зовнішніх чинників впливу.

Інформаційні джерела

1. Lakshmi, Guttikonda & Karumuri, Srinivasa Rao & Kondavitee, Girija & Lay-Ekuakille, Aime. (2023). Design and Performance Analysis of a Microbridge and Microcantilever-Based MEMS Pressure Sensor for Glucose Monitoring. *IEEE Sensors Journal*. PP. 1-1. 10.1109/JSEN.2023.3234594.
2. Kabir, Hannaneh & Merati, Mohsen & Abdekhodaie, Mohammad. (2021). Design of an effective piezoelectric microcantilever biosensor for rapid detection of COVID-19. *Journal of Medical Engineering & Technology*. 45. 1-11. 10.1080/03091902.2021.1921067.
3. Thorat, Bali & Jadhav, Mukti. (2022). Simulation of Cantilever Biosensor for Rapid Detection of Mycobacterium Tuberculosis.
4. Engelhardt, Konrad & Preis, Eduard & Bakowsky, Udo. (2023). Visualization and Characterization of Liposomes by Atomic Force Microscopy. 10.1007/978-1-0716-2954-3_23.
5. Kim, Chungman & Hong, Sunghoon & Shin, Dongha & An, Sangmin & Zhang, Xingcai & Jhe, Wonho. (2022). Sorting Gold and Sand (Silica) Using Atomic Force Microscope-Based Dielectrophoresis. *Nano-Micro Letters*. 14. 13. 10.1007/s40820-021-00760-x.
6. Ghosh, Dipannita & Rahman, Md Ashiqur & Ashraf, Ali & Islam, Nazmul. (2022). Hydrogel and Graphene Embedded Piezoresistive Microcantilever Sensor for Solvent and Gas Flow Detection. 10.1115/MSEC2022-85544.

7. Chen, Yongzhang & Zheng, Yiwen & Xiao, Haibing & Liang, Dezhi & Zhang, Yufeng & Yu, Yongqin & Du, Chenlin & Ruan, Shuangchen. (2022). Optical Fiber Probe Microcantilever Sensor Based on Fabry-Perot Interferometer. *Sensors (Basel, Switzerland)*. 22. 10.3390/s22155748.
8. Gil-Santos, Eduardo & Ramos, Daniel & Pini, Valerio & Martinez, Javier & Jana, Anirvan & Garcia, Ricardo & Raman, Arbin & Paulo, Alvaro & Calleja, Montserrat & Tamayo, Javier. (2023). Novel paradigms for biological sensing based on nanomechanical systems.
9. Alvarez, Mar & Lechuga, Laura. (2010). Microcantilever-based platforms as biosensing tools. *The Analyst*. 135. 827-36. 10.1039/b908503n.
10. Wang, Jingjing & Xu, Baozheng & Shi, Libo & Zhu, Longyang & Wei, Xi. (2022). Prospects and Challenges of AI and Neural Network Algorithms in MEMS Microcantilever Biosensors. *Processes*. 10. 1658. 10.3390/pr10081658.
11. Wang, Jingjing & Xu, Baozheng & Zhu, Yinfang & Zhao, Junyuan. (2023). Microcantilever sensors for biochemical detection. *Journal of Semiconductors*. 44. 023105. 10.1088/1674-4926/44/2/023105.
12. Mouro, João & Pinto, Rui & Paoletti, Paolo & Tiribilli, Bruno. (2020). Microcantilever: Dynamical Response for Mass Sensing and Fluid Characterization. *Sensors*. 21. 115. 10.3390/s21010115.
13. Ghaderi, Reza & Dehkordi, Behnam & Fard, Arezoo. (2021). Vibration and sensitivity analysis of double-layered non-uniform piezoelectric microcantilever as a self-sensing mass sensor. *Physica Scripta*. 96. 10.1088/1402-4896/ac129a.
14. Saengow, Treetep & Silapunt, Rardchawadee. (2023). Geometry-Dependent Magnetoelectric and Exchange Bias Effects of the Nano L-T Mode Bar Structure Magnetoelectric Sensor. *Micromachines*. 14. 360. 10.3390/mi14020360.
15. Wilfinger, R. & Bardell, P. & Chhabra, D.. (1968). The Resonistor: A Frequency Selective Device Utilizing the Mechanical Resonance of a Silicon Substrate. *IBM Journal of Research and Development*. 12. 113 - 118. 10.1147/rd.121.0113.
16. Binning G, Quate C, Gerber C. Atomic force microscope. *physical review letters*. *Phys Rev Lett*. 1986;56(9).
17. Xu, Lei & Xi, Jingqian & Gao, Lu & Li, Fangzheng & Pi, Jianyuan & Li, Chengxin & Wang, Kunfeng & Xiong, Xingyin & Wang, Yuan & Liu, Huafeng & Zou, Xudong & Zhao, Chun. (2022). A Closed-loop System for Resonant MEMS Sensors Subject to Blue-sideband Excitation. *Journal of Microelectromechanical Systems*. 31. 10.1109/JMEMS.2022.3183021.
18. Guo, Kai & Jiang, Bo & Liu, Bingrui & Xingeng, Li & Wu, Yaping & Tian, Shuang & Gao, Zhiyue & Zong, Lijun & Yao, Shuo & Zhao, Mingzhe & Mi, Chunxu & Zhu, Gengzeng. (2021). Study on the progress of piezoelectric microcantilever beam micromass sensor. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 651. 022091. 10.1088/1755-1315/651/2/022091.
19. Bobade, C & Raut, Vanita & Jadhav, P & Dhongade, D & More, R & Mohite, Uttam. (2022). Higher H2S Gas Sensing Performance of Cadmium Zinc Mixed Oxide Thin Films Compared to Tin Doped and Pure Cadmium Oxide Thin Films Synthesized by Spray CVD Method. 1380-1385.
20. Yuan, Yanhui & Chow, Kun & Du, Hejun & Wang, Peihong & Zhang, Mingsheng & Yu, Shengkai & Liu, Bo. (2013). A ZnO thin-film driven microcantilever for nanoscale actuation and sensing. *International Journal of Smart and Nano Materials*. 4. 10.1080/19475411.2012.749959.
21. Vancura, C & Rüegg, M & Li, Y & Hagleitner, Christoph & Hierlemann, Andreas. (2005). Magnetically Actuated Complementary Metal Oxide Semiconductor Resonant Cantilever Gas Sensor Systems. *Analytical chemistry*. 77. 2690-9. 10.1021/ac048378t.
22. Martinez, Miguel & Caruntu, Dumitru. (2022). Frequency-Amplitude Response of Parametric Resonance of Electrostatically Actuated MEMS Cantilever Beams Driven by Fringe Effect. 10.1115/DETC2022-89962.
23. Littrell, Robert & Grosh, Karl. (2012). Modeling and Characterization of Cantilever-Based MEMS Piezoelectric Sensors and Actuators. *IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems - J MICROELECTROMECHANICAL SYST*. 21. 406-413. 10.1109/JMEMS.2011.2174419.
24. Shin, Sang Hun & Song, Sangguen & Lee, Youngsik & Lee, Nae-Eung & Park, Joon Shik & Park, Hyoderk & Lee, Jaichan. (2003). Fabrication and Sensing Behavior of Piezoelectric Microcantilever for Nanobalance. *Japanese Journal of Applied Physics*. 42. 10.1143/JJAP.42.6139.
25. Sharan, Dr & Upadhyaya, Anup M & Srivastava, Maneesh. (2022). MOEMS Based Microcantilever Sensor for Biosensing application. *Journal of the Optical Society of America B*. 39. 10.1364/JOSAB.455702.

26. Bhatia, Deepak & Sharma, Himanshu & Meena, Dr & Palkar, V.R.. (2016). A novel ZnO piezoelectric microcantilever energy scavenger: Fabrication and characterization. Sensing and Bio-Sensing Research. 9. 10.1016/j.sbsr.2016.05.008.

27. Zhang, Yawen & Shi, Feng & Zhang, Chenguang & Sheng, Xin & Zhong, Yunhao & Chong, Hui & Yang, Zhanjun & Wang, Chengyin. (2022). Detection of avian influenza virus H9N2 based on self-driving and self-sensing microcantilever piezoelectric sensor. Chinese Chemical Letters. 34. 10.1016/j.ccllet.2022.07.043.

28. Li, Wei & Jiao, Yi & Jiang, Hai-Yang & Ren, Ying-Hui & Ibrahim, Ahmed. (2022). Investigation of mechanical force acting on the surface modified-substrate layer area during the chemical-mechanical micro-grinding of monocrystalline silicon. International Journal of Mechanical Sciences. 228. 107482. 10.1016/j.ijmecsci.2022.107482.

Boikynia Artur, Zavorotnyi Viktor

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

GAS VISCOSITY SENSOR ON THE MICROCONTROLLER

As part of this study, a gas viscosity sensor was developed based on sensor technology and a microcontroller. The use of a microcantilever as the most simplified MEMS-based device is proposed. It is emphasized that molecules adsorbed on the surface of the microcantilever can cause changes in the vibrational frequency and deflection of the microcantilever, and the resulting changes in the vibrational frequency can be used to measure various parameters such as viscosity, density, and flow rate. This effect is the basis of development. It is emphasized that the researched digital gas viscosity sensor is designed for a physical experiment based on sensor technology and a microcontroller. The design of the digital gas viscosity sensor consists of an oscillating microcantilever, the peak frequency of the resonant response of which is the main dynamic characteristic, which is very sensitive to the density and viscosity of the environment. A piezoelectric transducer is integrated at the top of the cantilever to enable actuation. It is emphasized that the piezoelectric effect can measure mass changes at the microgram to nanogram per unit area level. A block diagram of the system software is presented. It is noted that the special printed circuit board contains a MEMS chip, pressure and temperature sensors, the accuracy of the system is determined based on the results of measurements and knowledge of the dimensions of the active field of the crystal.

Keywords. Microcantilever, microcontroller, viscosity, temperature, density, gas.