

ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИНИ

УДК 681.121.833:543.275.1

DOI: 10.31471/1993-9981-2023-1(50)-31-40

КОНЦЕПЦІЯ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ВОЛОГИ НА РОБОТУ ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧНИХ СЕНСОРІВ

В. В. Ткачук, О. Є. Середюк*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15,
м.Івано-Франківськ, 76019, mivt@nung.edu.ua*

Розглянуто актуальність врахування впливу вологи у сфері витратометрії й обліку природного газу. Наведено результати аналізу відомих технічних рішень і концепцій щодо можливості створення установок і лабораторних стендів, які б реалізували фізичне моделювання впливу вологи на первинні вимірювальні перетворювачі та лічильники газу. Розкрито фізичний вплив вологості робочого середовища на функціонування термоанемометричних сенсорів шляхом зміни теплофізичних параметрів газового середовища, насамперед теплопровідності і теплоємності. Обґрунтовано можливість практичної реалізації лабораторної установки на базі пристрою з генеруванням вологи як компонента газового потоку лабораторної установки. При цьому для реалізації фізичного моделювання використано принцип масового вимірювання генерованої вологи і алгоритмічну залежність балансу масових витрат потоку газу на вході і виході розробленої установки. Розглянуто схему функціонування лабораторної установки, алгоритм її роботи з наведенням призначення і особливостей конструктивної реалізації окремих вузлів. Розроблений алгоритм функціонування лабораторної установки з наведенням розробленої методології розрахунку вологості, масової і об'ємної витрати генерованого робочого середовища відповідно до вибраних параметрів роботи установки. Здійснено математичне моделювання режимів роботи лабораторної установки і встановлено граничні режими її функціонування, які визначаються максимально можливим насиченням вихідного потоку водяною парою. Змодельовано вплив вологості вхідного потоку на вологість вихідного потоку з урахуванням генерованої витрати газу і генерованої масової витрати вологи. Наведено технічні характеристики розробленої лабораторної установки, які забезпечують відтворення робочих витрат повітря в діапазоні від 0,016 до 5 м³/год, генерування вологи в діапазоні від 0,1·10⁻⁵ до 1·10⁻⁴ кг/с, чим досягається можливість відтворення вологості вихідних потоків в діапазоні від реальної вологості навколишнього середовища до досягнення нею стовідсоткового значення відносної вологості. Розроблена установка дозволяє здійснити фізичне моделювання впливу вологи на роботу сенсорів опосередкованого вимірювання витрати, насамперед, термоанемометричних.

Ключові слова: волога, газ, повітря, масова витрата, об'ємна витрата, фізичне моделювання, лічильник, витратомір, лабораторна установка, термоанемометричний сенсор.

The relevance of taking into account the moisture influence in the field of flow measurement and accounting of natural gas was considered. The results of the analysis of known technical solutions and concepts regarding the possibility of creating installations and laboratory stands that would implement physical modeling of the effect of moisture on primary measuring transducers and gas meters. The physical influence of the humidity of the working environment on the functioning of thermo-anemometric sensors by changing the thermophysical parameters of the gaseous environment, primarily thermal conductivity and heat capacity. The possibility of practical implementation of a laboratory installation based on a device with moisture generation as a component of the gas flow of a laboratory installation was substantiated. At the same time, the principle of mass measurement of generated moisture and the algorithmic dependence of the mass flow balance of the gas flow at the entrance and exit of the developed installation were used to implement physical modeling. The diagram of the functioning of the laboratory installation, the algorithm of its work with the indication of the purpose and features of the constructive implementation of individual nodes have been considered. The algorithm of the functioning of the laboratory installation was developed with the guidance of the developed methodology for calculating humidity, mass and volume flow of the generated working

environment in accordance with the selected parameters of the installation. Mathematical modeling of the modes of operation of the laboratory installation was carried out and the limit modes of its functioning were established, which are determined by the maximum possible saturation of the output flow with water vapor. The influence of the humidity of the input flow on the humidity of the output flow was simulated, taking into account the generated gas flow rate and the generated mass flow rate of moisture. The technical characteristics of the developed laboratory installation were given, which ensure the reproduction of working air flows in the range from 0,016 to 5 m³/h, the generation of moisture in the range from 0,1·10⁻⁵ to 1·10⁻⁴ kg/s. This achieves the possibility of reproducing humidity output flows in the range from the real humidity of the environment until it reaches one hundred percent value of relative humidity. The developed installation allows physical modeling of the effect of moisture on the operation of indirect measurement flow sensors, primarily thermo-anemometric ones.

Key words: moisture, gas, air, mass flow, volume flow, physical modeling, meter, flow meter, laboratory installation, thermo-anemometric sensor.

Вступ. На сьогодні в питаннях енергетичного обліку промислового і побутового сектору України важливого значення набуває контроль якості, в тому числі природного газу. Одним із основних параметрів при цьому виступають його якісні характеристики як енергоносія, наприклад, теплота згоряння (вища та нижча) та вологість. В свою чергу, вологість, як правило, не визначається на нормативному рівні в абсолютних або відносних одиницях для споживачів. Інформативним параметром в цьому випадку виступає температура точки роси при відповідних значеннях тиску та температури газу.

Щоб відповідати вимогам до чистого, сухого, повністю газоподібного палива, придатного для транспортування по трубопроводах і подачі до споживачів, газ повинен пройти через кілька етапів обробки, включаючи видалення рідин з газу, а саме осушення для зменшення вмісту водяної пари. Дегідратація природного газу має суттєве значення для ефективної економічної діяльності споживачів.

Також термін служби трубопроводу залежить від швидкості корозії, яка безпосередньо пов'язана з наявною вологістю в газі та сприяє окисленню металу і його руйнуванню. З цих причин стандартною практикою на підприємствах з видобутку і транспортуванню природного газу є безперервне вимірювання вмісту вологи в природному газі в критичних

точках, щоб забезпечити надійне та правильне його транспортування до споживачів.

Водночас внаслідок пошкоджень трубопроводів або порушенню їх герметичності, в тому числі підземних, можливе попадання вологи в газопроводи. Це може призвести до зміни точності функціонування засобів обліку природного газу після точок контролю його вологості. Аналіз напрямків наукових досліджень показує, що практично відсутні результати досліджень впливу вологи на роботу лічильників газу, наприклад, турбінних, роторних, вихрових, термоанемометричних та інших.

Таким чином, актуальним є дослідження впливу вологи на функціонування засобів обліку природного газу, зокрема лічильників або витратомірів різних типів та принципів дії.

Метою роботи є розроблення методології експериментального дослідження впливу вологи на роботу засобів вимірювання витрати газу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомими є нормативні документи, які регламентують вплив вологи на роботу засобів обліку газу, які використовують при вимірюванні метод змінного перепаду тиску [1]. Для їх функціонування необхідно знати вміст вологи, який визначається за допомогою відповідних вологомірів [2]. Тому практично вплив вологості враховується

при вимірюванні витрати методом змінного перепаду тиску з використанням звукувальних пристроїв. Стосовно впливу вологи на інші методи вимірювання, наприклад, турбінними чи роторними лічильниками, таких досліджень немає.

Нами було теоретично досліджено вплив вологи на роботу термоанемометричних перетворювачів. Результати, які нами викладені в роботі [3], показали, що волога суттєво впливає на результати вимірювання з використанням термоанемометричних перетворювачів, при їх роботі на середовищах природного газу і вологого повітря.

Відомі також дослідження щодо впливу вологи на результати вимірювання об'єму і витрати природного газу [4]. При цьому метою дослідження ставилося визначення впливу двофазового (рідинної та газової фази) складу природного газу на перепад тиску при стандартному і спеціальному звукувальному пристрої. Дослідження стосувалися стандартних діафрагм та спеціальних звукувальних пристроїв з різними формами і видами отворів в них, наприклад, секторно-кільцевого типу і декількох наборів отворів еліпсоподібного виду. Використовувані алгоритми в публікації стосуються вимірювання двофазних потоків в яких волога знаходиться вже в скрапленому стані, тобто в стані насичення. Дослідження не стосуються визначення впливу пароподібної частини вологи в потоці. В цій роботі досліджується двофазне середовище в якому волога є в рідкому стані, а природний газ в газоподібному стані, а метою нашого дослідження є перебування вологи і повітря у газовому стані. Тому цей результат не може бути використаний згідно поставленої нами задачі дослідження.

Пошук конкретних технічних рішень з генерації вологих газоплинних середовищ показали, що їх на сьогодні практично немає у вигляді спеціальних лабораторних установок. Аналіз патентних рішень

показав, що можуть бути принципово створені пристрої, які можуть вимірювати (проводити) облік вологого природного газу, наприклад [5]. Він реалізований на базі витратоміра змінного перепаду тиску, принципово забезпечує вимірювання маси, об'єму та масової витрати робочого середовища. Однак генерувати еталонний потік вологого середовища практично неможливо, оскільки як еталонний засіб використовується дзвонова установка, для функціонування якої використовується сухе повітря.

Також може бути застосоване технічне рішення на прикладі установки, яка функціонує на базі ємності із стиснутим газом [6]. Однак ця установка та аналоги також передбачає відсутність вологи у згенерованому середовищі, оскільки у них лінія подачі газу обладнана осушувачем газу. Можна також формально створювати установки на базі критичного сопла із системою забезпечення критичного потоку [7]. При цьому, вимірювання витрати вологого газу є алгоритмічно достатньо складним, оскільки для їх функціонування необхідно знати функцію критичних витрат вологого газу через сопло, а на даний час таких залежностей практично немає і нормативні документи, які зараз є відомими закордоном також не передбачають використання вологого робочого середовища.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми вказує на необхідність врахування впливу вологи у питаннях витратометрії термоанемометричними перетворювачами з використанням принципів технічної реалізації.

Формулювання цілей статті Розроблення лабораторної установки, яка могла би реалізувати концепцію фізичного моделювання впливу вологи та встановлення цього кількісного впливу на функціонування витратовимірювальної

техніки, у тому числі з використанням термоанемометричних сенсорів.

Виклад основного матеріалу. В роботі нами теоретично змодельовано вплив вологи на функціонування термоанемометричних сенсорів. Фізичне обґрунтування впливу полягає в тому, що термоанемометр вимірює швидкість потоку. Основним елементом давача є нагрівальний елемент, який може бути виготовлений з провідникових матеріалів із високою температуропровідністю (вольфрам, платина) та у різних конфігураціях (нитка, пластина та інші геометричні фігури) [8]. Термоанемометричні сенсори можуть працювати в режимах постійного струму або постійної температури. У більшості випадків нагрівальний елемент включений до мостової схеми, як один із балансувальних елементів. Головною особливістю термоанемометра з постійною температурою є той факт, що відповідний змінний резистор, який знаходиться у балансі із нагрівальним елементом є функцією температури. Відповідно при збільшенні чи зменшенні швидкості потоку газового середовища змінюється температура нагрівального елемента та відповідно опір змінного резистора.

Потік, в якому функціонує термоанемометричний сенсор, характеризується певними фізико-хімічними властивостями і вони, поряд з швидкістю потоку, також впливають на зміну вихідного сигналу сенсора. Тому основними для опису взаємодії нагрівального елемента є теплофізичні характеристики середовища в якому він функціонує [9]. Одним із основних теплофізичних параметрів газового середовища при його термоанемометричних дослідженнях є теплопровідність. Теплопровідність є властивістю, яка вказує на швидкість, з якою переноситься енергія в процесі теплопередачі, а параметр, що характеризує затримування тілом енергії є теплоємністю. Розрізняють ізобарну(при

постійному тиску системи) та ізохорну(при постійному об'ємі системи) теплоємності. Більш практичною при розрахунках тепло- та масообміну є ізобарна теплоємність, адже вона не потребує постійного об'єму системи, що в питаннях витратометрії з термоанемометричними сенсорами досить складно реалізувати. Ізобарною теплоємністю робочого тіла є відношення нескінченно малої кількості питомої теплоти при постійному тиску, яка підводиться до одиниці тіла або відводиться від неї в процесі нескінченно малої зміни температури цього тіла.

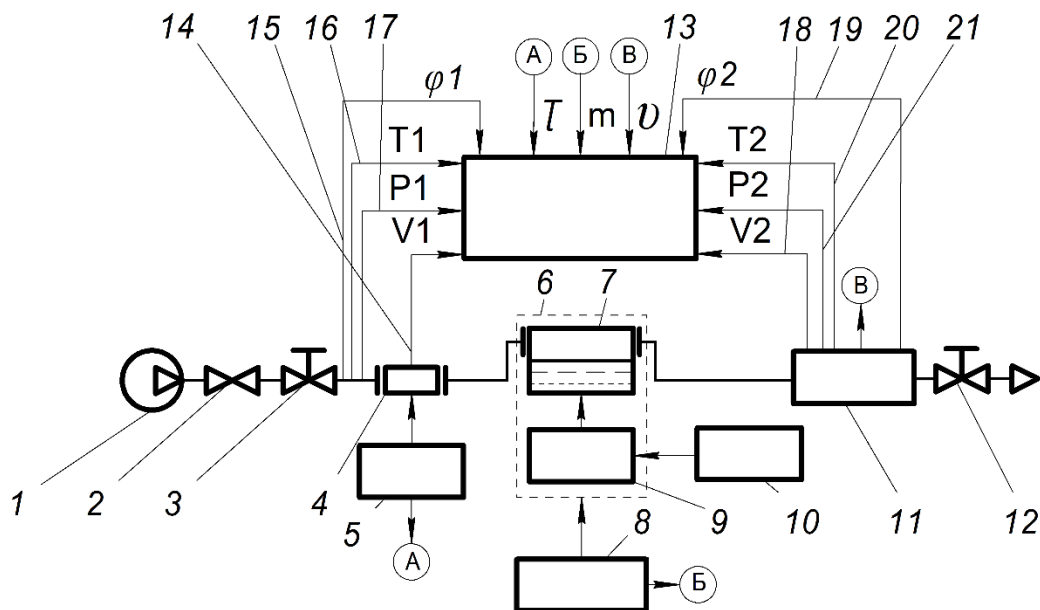
Отже, такі теплофізичні характеристики газового середовища як теплопровідність та теплоємність поряд із швидкістю потоку є визначальними при дослідженні взаємозв'язку нагрітого тіла та середовища в якому воно функціонує.

Нами розроблено макет лабораторної установки, який реалізує концепцію фізичного моделювання впливу вологи на роботу засобів обліку та складається з наступних секцій: генерування витрати, генерування вологи та досліджувальної. Для проведення спочатку аналітичних розрахунків та в подальшому для експериментальних досліджень авторами буде використано як газ повітря. Функціональна схема макету лабораторної установки наведена на рис. 1.

Установка функціонує наступним чином: перед початком випробувань відкривають відсічний клапан 2, за допомогою джерела витрати 1 і регулятора тиску 3 встановлюють режим функціонування лабораторної установки. Водночас за допомогою задавача 10 вибирають режим роботи ультразвукового генератора 9 відповідно до встановленої витрати на вході та вмикають лабораторну установку з попередньо заданими параметрами генерування витрати та вологи, відповідно до алгоритму роботи установки, який наведено далі за текстом. Газ поступає через вхідний трубопровід до

лічильника газу 4. Хронометром 5 формується тривалість вимірювального циклу установки. При цьому вхідний потік газу змішується із вологою, яка створена секцією генерації вологи 6. До складу секції генерації вологи входить ємність з водою 7, що розміщена на еталонній вазі 8 (індивідуального виготовлення, з ціною поділки 0.01 грама). Фіксація значення маси ємності з водою до та після проведення експерименту дає можливість визначити

масу генерованої водяної пари. Для здійснення водяної пари використовується ультразвукова мембрана 9, інтенсивність генерування водяної пари встановлюється задавачем 10. Після змішування вхідного потоку із вологою секції генерації вологи потік поступає на досліджувальну секцію установки 11, в якій встановлений перетворювач витрати, наприклад, термоанемометричний сенсор.



1 – джерело витрати; 2 – відсічний клапан; 3, 12 – регулятор тиску; 4 – лічильник газу; 5 – хронометр; 6 – вузол генерації вологи; 7 – ємність з водою; 8 – еталонні ваги; 9 – мембрана ультразвукового генератора; 10 – керувальний блок ультразвукового генератора; 11 – досліджувальна секція установки; 13 – обчислювальний блок установки; інформативні параметри: 14, 18 – об’єм, 15, 19 – вологість, 16, 20 – температура, 17, 21 – тиск на вході та виході із лабораторної установки, відповідно

Рисунок 1 – Функціональна схема установка для фізичного моделювання впливу вологи на роботу термоанемометричних сенсорів.

Всі інформативні параметри із вхідної та вихідної лінії установки поступають в обчислювальний блок 13. Визначаються такі параметри як: об’єм повітря 14, 18, вологість 15, 19, температура 16, 20, тиск 17, 21 – на вході та виході із лабораторної установки відповідно. Також фіксується хронометрично час (лінія А) експерименту, значення маси генерованої вологи секцією 6 (лінія Б) та швидкість потоку в досліджувальній секції установки (лінія В),

яка вимірюється, наприклад, досліджуванним термоанемометричним сенсором.

Після завершення експерименту формується команда закінчення вимірювального циклу та реалізується обробка вимірювальної інформації блоком 13.

Оскільки, попередні наші дослідження показали, що при незначній кількості генерованої вологи досягається 100% відносна вологість, а далі відбувається її

перетворення у рідку фазу. Також технічно важко реалізувати малу зміну генерованої вологи в одиницю часу при малій зміні діапазону робочих витрат. Тому в установці використаний ультразвуковий генератор індивідуального виготовлення, а для забезпечення точного визначення вологи, яка масово генерується зволожувальною установкою, використовуються ваги з цифровим відліком. Тому алгоритм роботи установки передбачає вимірювання об'ємної і масової витрати вологого газу в певному діапазоні при зміні як витрати так і вологості.

Алгоритм роботи установки описується рівнянням, виходячи із закону балансу масової витрати:

$$Q_{m \text{ вих}} = Q_{m \text{ вх}} + Q_{\text{в}}, \quad (1)$$

де $Q_{m \text{ вих}}$ – масова витрата на виході установки, кг/с; $Q_{m \text{ вх}}$ – масова витрата газу на вході установки, кг/с; $Q_{\text{в}}$ – масова витрата вологи (водяної пари) вузлом генерування вологи; кг/с.

Математично алгоритм (1) можна подати наступним виглядом [10]:

$$Q_{m \text{ вих}} = \frac{V}{\tau} \left(2,89 \cdot 10^{-3} \rho_{\text{с}} \frac{P - \phi_{\text{вх}} \cdot P_{\text{вп max}}}{T \cdot K} \right) + \frac{m_{\text{в}}}{\tau}, \quad (2)$$

де V – об'єм повітря на вході установки впродовж вимірювального циклу, м³; τ – тривалість вимірювального циклу, с; $\phi_{\text{вх}}$, P , T – відносна вологість, абсолютний тиск та абсолютна температура повітря за робочих умов установки (ϕ – у відносних одиницях; P – Па; T – К); $P_{\text{вп max}}$ – парціальний тиск водяної пари у насиченому стані за робочих умов установки, Па; K – коефіцієнт стисливості робочого середовища на вході установки (безрозмірна одиниця); $\rho_{\text{с}}$ – густина робочого середовища (повітря) за стандартних умов, кг/м³; $\rho_{\text{вп вх}}$ – густина водяної пари у повітрі на вході установки, кг/м³; $m_{\text{в}}$ – маса генерованої вологи в установці, кг.

Для визначення довідкових даних $P_{\text{вп max}}$ і $\rho_{\text{вп max}}$ за робочих умов установки можна використати такі отримані нами апроксимаційні залежності на базі відомих довідкових табличних даних [11], для значень вхідної температури від 0,1 до 30°C, з коефіцієнтами кореляції та детермінації рівними 1, відносною похибкою апроксимації 0,1%:

$$P_{\text{вп max}} = 0,05 \cdot t^3 + 0,93 \cdot t^2 + 47,74 \cdot t + 606,21 \text{ Па}; \quad (3)$$

$$\rho_{\text{вп max}} = 3 \times 10^{-7} \cdot t^3 + 74 \times 10^{-7} \cdot t^2 + 3523 \times 10^{-7} \cdot t + 48228 \times 10^{-7} \text{ кг/м}^3; \quad (4)$$

де t – температура повітря за робочих умов установки, °C; $\rho_{\text{вп max}}$ – густина водяної пари у насиченому стані за робочих умов установки, кг/м³.

В формулах (3) і (4) відсутні значення робочого тиску в установці, оскільки їх значення в розробленій моделі лабораторної установки становить (1...2) кПа надлишкового тиску, який визначається тиском джерела витрати. Це дає можливість нехтувати на фоні атмосферного тиску (близько 101кПа) і використовувати відомі довідкові дані для параметрів водяної пари при стандартних умовах.

Масова витрата газу на вході установки складається із масової витрати сухого повітря і масової витрати вологи, яка міститься в ньому. Тому алгоритм (2) роботи установки подамо у вигляді:

$$Q_{m \text{ вих}} = \frac{V \cdot (\rho_{\text{сух вх}} + \rho_{\text{вп вх}}) + m_{\text{в}}}{\tau}, \quad (5)$$

де $\rho_{\text{сух вх}}$ – густина сухої частки газу на вході установки, кг/м³.

Густина водяної пари повітря на вході установки розраховується як:

$$\rho_{\text{вп вх}} = \rho_{\text{вп max}} \cdot \phi_{\text{вх}}. \quad (6)$$

Таким чином, масу сухого повітря $m_{\text{сух г}}$ і масу вологи $m_{\text{в вих}}$ на виході установки впродовж вимірювального циклу можна записати:

$$m_{\text{сух.г}} = V \cdot \rho_{\text{сух.г}}, \quad (7)$$

$$m_{\text{в.вих}} = V \cdot \rho_{\text{вп.вх}} + m_{\text{в}}. \quad (8)$$

Тому абсолютна вологість згенерованого потоку газу на виході установки описується формулою:

$$W_{\text{вих}} = \frac{V \cdot \rho_{\text{вп.вх}} + m_{\text{в}}}{V}, \quad (9)$$

а його густину $\rho_{\text{вих.г}}$ можна обчислити за формулою:

$$\rho_{\text{вих.г}} = \rho_{\text{сух.г}} + \rho_{\text{вп.вх}} + \frac{m_{\text{в}}}{V}. \quad (10)$$

Оскільки при фізичному моделюванні роботи установки доцільно оперувати параметром відносної вологості газу φ , то необхідно отримати залежність зміни саме цього параметра від робочих умов роботи установки.

Для цього запишемо рівняння взаємозв'язку масової витрати вологи на виході та вході установки, оскільки об'ємна витрата сухого газу на вході і виході установки є незмінною:

$$Q_o \cdot \varphi_{\text{вих}} \cdot \rho_{\text{вп.пмах}} = Q_o \cdot \varphi_{\text{вх}} \cdot \rho_{\text{вп.пмах}} + Q_{\text{в}}, \quad (11)$$

де Q_o – об'ємна витрата сухого газу в установці, м³/с.

На базі (11) отримуємо:

$$\varphi_{\text{вих}} = \varphi_{\text{вх}} + \frac{Q_{\text{в}}}{Q_o \cdot \rho_{\text{вп.пмах}}}. \quad (12)$$

Так як вологість газу на виході залежить не тільки від маси генерованої вологи, але і від робочої витрати установки та вологи вхідного газу (навколишнє повітря), то доцільно здійснити моделювання робочих умов установки, бо очевидним є той факт, що генерування вологи може призвести до максимального насичення вологою вихідного газу.

Результати моделювання (рис. 2) реалізовані на базі залежності (12) для фіксованих об'ємних робочих витрат установки 1; 5; 10 м³/год (лінії 1, 2, 3 та 4, 5, 6 відповідно) при тривалості експерименту $\tau=100$ с і режимів генерування масової витрати вологи в діапазоні $Q_{\text{в}}$ (0...1·10⁵)кг/с. При цьому робочі умови в установці

прийняті $t=20^\circ\text{C}$, $P=103325$ Па (з врахуванням надлишкового тиску створюваним генератором витрати), а відносна вологість вхідного повітря приймалася 40% (лінії 1, 2, 3) та 60%(лінії 4, 5, 6).

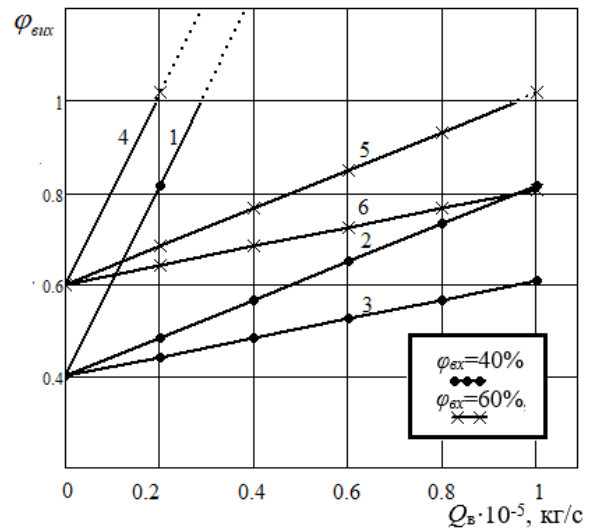


Рисунок 2 – Результати моделювання вологості вихідного потоку газу від робочих умов установки

Результати моделювання підтверджують вплив вологості навколишнього середовища на діапазон генерованої вологи в установці. Так зростання вологості навколишнього середовища призводить до зменшення максимальної генерованої витрати вологи, при якій досягається максимальне насичення вихідного потоку водяною парою, тобто до умов, коли $\varphi_{\text{вих}}=1$. Тому при витраті 1 м³/год і вхідній вологості 40% насичення потоку відбувається при генеруванні вологи 0,29·10⁻⁵ кг/с, а при вологості 60% цей самий ефект досягається вже при 0,19·10⁻⁵ кг/с. Вплив робочих витрат на вологість вихідного потоку показує, що при більших витратах 5 і 10 м³/год за умови вибраної максимальної генерованої витрати вологи 1·10⁻⁵ кг/с практично не досягається максимальне насичення вихідного потоку яке при меншій вхідній вологості 40% становить 81,8 і 60,9 % відповідно. Поряд з цим при більшій вхідній вологості 60% отримуємо

101,8%(насичення) і 80,9% при вказаних вище відповідних витратах. Це свідчить про необхідність правильного вибору режимів функціонування макету лабораторної установки при дослідженні витратомірів газу на вологих робочих середовищах.

Рівняння (12) за умови коли $\varphi_{\text{вих}}=1$ дає можливість визначити граничні умови досягнення максимального стану насичення (100% відносної вологості) з врахуванням умов функціонування установки та відповідно до витрати вихідного потоку установки. Згідно з проведеними математичними перетвореннями формули (12) отримаємо:

$$Q_{\text{вих}} = Q_0 \cdot \rho_{\text{вп.вих}} \cdot (1 - \varphi_{\text{вх}}). \quad (13)$$

Отримана залежність (13) дає можливість розраховувати максимально можливу інтенсивність генерації вологи для досягнення насиченого потоку вихідного газу в залежності від об'ємної витрати вхідного газу Q_0 та його вологості $\varphi_{\text{вх}}$. Наприклад, при відносній вологості вхідного потоку 40% і об'ємній витраті 5 м³/год максимальна генерація вологи в установці становитиме $1,44 \cdot 10^{-5}$ кг/с, а за цих же параметрів вхідного потоку і об'ємній витраті 10 м³/год генерація вологи не повинна перевищувати $2,88 \cdot 10^{-5}$ кг/с.

Для дослідження впливу вологи на роботу об'ємних витратомірів необхідно використовувати формулу, яка отримується шляхом ділення виразу (5) на вираз (10), що подається в наступному кінцевому формульному виразі:

$$Q_{V,\text{вих}} = \frac{V \cdot (\rho_{\text{сух.вх}} + \rho_{\text{вп.вх}}) + m_{\text{в}}}{\tau \cdot \rho_{\text{вих.г}}}. \quad (14)$$

Розроблений макет лабораторної установки, викладена його функціональна схема з наведенням запропонованих методик обчислення та відповідними засобами вимірювальної техніки розкриває можливості фізичного моделювання впливу вологи на роботу витратомірів в діапазоні об'ємних витрат від 0,016 до 5 м³/год при генерації вологи ультразвуковим

генератором у повітряному потоці в межах генерування вологи від $0,1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-4}$ кг/с.

Висновки. Розроблено модель макету лабораторної установки для дослідження впливу вологи на роботу витратовимірювальних засобів та викладено функціональну схему установки, яка може реалізовуватися на повітряному середовищі.

Розроблений алгоритм функціонування лабораторної установки з наведенням розробленої методології розрахунку вологості, масової і об'ємної витрати генерованого робочого середовища відповідно до вибраних параметрів роботи установки.

Здійснено математичне моделювання режимів роботи лабораторної установки і встановлені граничні режими його функціонування, які визначаються максимально можливим насиченням вихідного потоку водяною парою.

Експериментальні дослідження впливу вологи на роботу термоанемометричних перетворювачів будуть метою подальших наукових досліджень з використанням розробленого макету лабораторної установки.

Список використаних джерел

1. ДСТУ ГОСТ 8.585.2:2009 Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 2. Діафрагми. Технічні вимоги: [Чинний від 2010-04-01]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 2009. 92 с. (державний стандарт України).

2. Облік природного газу: довідник / М. П. Андрієшин, О. Є. Середюк, С. А. Чеховський [та ін.] / за ред. С.А.Чеховського. Івано-Франківськ: ПП «Сімик», 2008. 180 с.

3. Ткачук В. В., Середюк О. Є., Боднар Р. Т., Саманів Л. В. Моделювання впливу компонентного складу та вологості природного газу на його теплофізичні характеристики. *Перспективні технології*

та прилади: зб. наук. праць Луцького НТУ. 2021. №18. С. 129-137.

4. Tomaszewska-Wach B., Rzasza M. A Correction Method for Wet Gas Flow Metering Using a Standard Orifice and Slotted Orifices. *Sensors*. 2021. Vol. 21. No 7. P. 2291–2310.

5. Еталон передавання одиниці об'єму, маси та витрати природного газу / Середюк О. Є., Крук І. С., Рудько В. П., Чеховський С. А., Луцик Р. П., Прудніков Б. І.: пат. 25208 U Україна: МПК G01F 25/00 (2006). № u200704218; заявл. 16.04.2007; опубл. 25.07.2007, Бюл. № 11.

6. Установа для градування та перевірки витратомірів і лічильників газу / Середюк О. Є., Костинюк В. В., Прудніков Б. І.: пат. 27565 U Україна: МПК G01F 25/00 (2006). № u200705894; заявл. 29.05.2007; опубл. 12.11.2007, Бюл. № 1.

7. Установа для перевірки витратомірів і лічильників газу / Середюк О. Є., Петришин І. С.: пат. 54316 S2 Україна: МПК G01F 25/00 (2006). № 2002076003; заявл. 19.07.2002; опубл. 16.01.2006, Бюл. № 1.

8. Середюк О.Є., Криницький О.С., Ткачук В.В. Сучасні тенденції розвитку термоанемометрії у сфері обліку природного газу. *Український метрологічний журнал*. 2020. № 3. С. 51-55.

9. Ткачук В. В., Середюк О. Є. Дослідження впливу швидкості руху та складу газового потоку на чутливість термоанемометричних перетворювачів. *Інформаційно-вимірвальні технології IBT-2022*: зб. тез доп. міжнар. наук.-прак. конф. м. Львів, 9–10 листопада 2022 р., Львів: ЛПНУ, 2022. С. 127–128.

10. Serediuk O.Y., Malisevych V.V., Serediuk D.O., Tkachuk V.V., Dzividzinska I.S. Metrological model of the reference installation for the reproduction of moist air flow based on the concept of uncertainty. *Uncertainty in Measurement: Scientific, Normative, Applied and Methodical Aspects: XIX International Scientific and Technical*

Seminar, December 7–8 2022, Bulgaria, 2022. P. 38–40.

11. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85th Edition. Front Cover. David R. Lide. CRC Press LLC: Boca Raton, FL. 2004. 2712 p.

References

1. DSTU HOST 8.585.2:2009 Metrolohiia. Vymiriuvannia vytraty ta kilkosti ridyny y hazu iz zastosuvanniam standartnykh vzvzhuvalnykh prystroiv. Chastyna 2. Diafrahmy. Tekhnichni vymohy: [Chynnyi vid 2010-04-01]. Vyd. ofits. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy, 2009. 92 p. (derzhavnyi standart Ukrainy). [in Ukrainian]

2. Oblik pryrodnoho hazu: dovidnyk / M. P. Andriishyn, O. Ye. Serediuk, S. A. Chekhovskyi [ta in..] / za red. S.A.Chekhovskoho. Ivano-Frankivsk: PP «Simyk», 2008. 180 p. [in Ukrainian]

3. Tkachuk V. V., Serediuk O. Ye., Bodnar R. T., Samaniv L. V. Modeliuvannia vplyvu komponentnoho skladu ta volohosti pryrodnoho hazuna yoho teplofizyjni kharakterystyky. *Perspektyvni tekhnologii ta prylady: zb. nauk. prats Lutskoho NTU*. 2021. №18. P. 129-137. [in Ukrainian]

4. Tomaszewska-Wach B., Rzasza M. A Correction Method for Wet Gas Flow Metering Using a Standard Orifice and Slotted Orifices. *Sensors*. 2021. Vol. 21. No 7. P. 2291–2310.

5. Etalon peredavannia odyntsi obiemu, masy ta vytraty pryrodnoho hazu / Serediuk O. Ye., Kruk I. S., Rudko V. P., Chekhovskyi S. A., Lutsyk R. P., Prudnikov B. I.: пат. 25208 U Ukraina: МПК G01F 25/00 (2006). № u200704218; zaiavl. 16.04.2007; opubl. 25.07.2007, Biul. № 11. [in Ukrainian]

6. Ustanovka dlia hraduiuvannia ta perevirky vytratimiriv i lichylnykyv hazu / Serediuk O. Ye., Kostyniuk V. V., Prudnikov B. I.: пат. 27565 U Ukraina: МПК G01F 25/00 (2006). № u200705894; zaiavl. 29.05.2007; opubl. 12.11.2007, Biul. № 1. [in Ukrainian]

7. Ustanovka dlia perevirky vytratimiriv i lichylnykyv hazu / Serediuk O. Ye., Petryshyn I. S.: пат. 54316 S2 Ukraina: МПК G01F 25/00

(2006). № 2002076003; zaiavl. 19.07.2002; opubl. 16.01.2006, Biul. № 1. [in Ukrainian]

8. Serediuk O.Ie., Krynytskyi O.S., Tkachuk V.V. Suchasni tendentsii rozvytku termoanemometrii u sferi obliku pryrodnoho hazu. *Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal*. 2020. № 3A. S. 51-55. [in Ukrainian]

9. Tkachuk V. V., Serediuk O. Ye. Doslidzhennia vplyvu shvydkosti rukhu ta skladu hazovoho potoku na chutlyvist termoanemometrychnykh peretvoriuvachiv. Informatsiino-vymiriuvalni tekhnolohii IVT-2022: zb. tez dop. mizhnar. nauk.-prak. konf. m. Lviv, 9–10 lystopada 2022 r., Lviv: LPNU, 2022. S. 127–128. [in Ukrainian]

10. Serediuk O.Y., Malisevych V.V., Serediuk D.O., Tkachuk V.V., Dzividzinska I.S. Metrological model of the reference installation for the reproduction of moist air flow based on the concept of uncertainty. *Uncertainty in Measurement: Scientific, Normative, Applied and Methodical Aspects: XIX International Scientific and Technical Seminar, December 7–8 2022, Bulgaria, 2022*. P. 38–40.

11. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85th Edition. Front Cover. David R. Lide. CRC Press LLC: Boca Raton, FL. 2004. 2712 p.