

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БИЦЬ ОКСАНА МИХАЙЛІВНА

УДК 681.125: 681.121.84

ДИСЕРТАЦІЯ

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ
ВИМІРЮВАННЯ КІЛЬКОСТІ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ
ВИТРАТОМІРІВ ЗМІННОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ**

151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

15 Автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ / О. М. Биць /

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник

Матіко Федір Дмитрович,

доктор технічних наук, професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Львів - 2020

АНОТАЦІЯ

Биць О.М. Автоматизація проектування систем вимірювання кількості теплової енергії на основі витратомірів змінного перепаду тиску. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».- Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2020.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального завдання в галузі автоматизації та приладобудування – розробленню теоретичної бази для проектування систем вимірювання кількості теплової енергії та розробленню системи автоматизованого проектування (САПР) засобів вимірювання кількості теплової енергії, у складі яких застосовують витратоміри зі стандартними звужувальними пристроями потоку.

Розроблена система автоматизованого проектування дає можливість спростити процес проектування засобів вимірювання кількості теплової енергії, зменшити його трудомісткість, контролювати відповідність проектних рішень вимогам нормативних документів щодо вимірювання кількості теплової енергії.

У дисертації представлено аналіз нормативних документів, які визначають вимоги до комерційного обліку теплової енергії. Розглянуто основні положення щодо здійснення контролю за станом засобів вимірювальної техніки, вимоги до метрологічних та технічних характеристик лічильників теплової енергії. Встановлено, що зазначені документи не містять вимог до систем вимірювання витрати та кількості теплової енергії, що складаються з обчислювача, витратомірів, вимірювальних перетворювачів тиску та температури, що виконані як окремі прилади. Розглянуто переваги та недоліки витратомірів змінного перепаду тиску і відзначено, що завдяки універсальності застосування, простоті реалізації первинного перетворювача витрати, стандартизації визначень, технічних вимог та методів виконання вимірювань такі витратоміри набули

широкого застосування в промислових вимірюваннях. Зокрема, витратоміри змінного перепаду тиску широко застосовують в системах обліку теплової енергії на промислових підприємствах та теплопостачальних організаціях. Для проектування витратомірів змінного перепаду тиску застосовують САПР «Расход-РУ», Arian ISO-5167 Flow CAD software. Проте ці програмні пакети не призначені для проектування систем вимірювання кількості теплової енергії, тому розроблення САПР засобів вимірювання кількості теплової енергії є актуальним завданням, яке вирішено у дисертаційній роботі.

Структура системи вимірювання кількості теплової енергії, а відповідно й рівняння визначення кількості теплової енергії залежать від схеми розташування вимірювальних перетворювачів. В дисертаційній роботі виконано класифікацію систем теплопостачання та проаналізовано можливі структури систем вимірювання кількості теплової енергії. Розглянуто рівняння для визначення кількості теплової енергії для типових схем систем обліку на джерелах теплової енергії та в схемах теплопостачання споживачів. Встановлено, що основою алгоритму розрахунку кількості теплової енергії для будь-якої структури системи вимірювання її витрати та кількості є алгоритм обчислення інтегральної кількості енергії між двома точками системи теплопостачання, так як рівняння для обчислення кількості теплової енергії містять складові, які є результатом інтегрування добутку витрати теплоносія на різницю ентальпій потоку теплоносія у різних точках схеми теплопостачання.

Визначено основні функції, які є достатніми для формування та зручного представлення вимірюваного значення кількості теплової енергії і які незалежно від структури має реалізувати система вимірювання кількості теплової енергії.

На основі повної математичної моделі витратоміра змінного перепаду тиску, рівнянь визначення кількості теплової енергії та рівнянь визначення властивостей теплоносія розроблено математичну модель системи вимірювання кількості теплової енергії, що дає можливість дослідити вплив конструктивних характеристик витратоміра, параметрів теплоносія на результат вимірювання кількості теплової енергії.

Розроблено алгоритм розрахунку кількості теплової енергії для систем із застосуванням витратомірів змінного перепаду тиску, який реалізує повну математичну модель витратоміра, зокрема, ітераційний алгоритм розрахунку витрати теплоносія.

Розроблено рівняння невизначеності вимірюваного значення кількості теплової енергії. Розроблене рівняння дає можливість обчислити невизначеність для конфігурації системи вимірювання з двома витратомірами, а також оцінити невизначеність кількості теплової енергії з врахуванням невизначеностей вимірюваних значень параметрів потоку (температури, тиску, витрати) та застосованих методик розрахунку параметрів теплоносія.

Проведено аналіз існуючих методик розрахунку термодинамічних властивостей теплоносія (води, водяної пари). Зокрема, методик розрахунку ентальпії, густини, динамічної в'язкості води та водяної пари. За результатами проведеного аналізу встановлено, що для автоматизованого проектування систем вимірювання кількості теплової енергії доцільно застосовувати методики IAPWS IF-97.

На основі термодинамічних залежностей та рівнянь IAPWS IF-97 розроблено нове рівняння для обчислення показника адіабати перегрітої водяної пари, що в сукупності з відомими рівняннями густини дає можливість обчислити параметри стану водяної пари під час вимірювання її витрати методом змінного перепаду тиску. За результатами опрацювання цього рівняння розроблено спрощене рівняння та алгоритм для розрахунку показника адіабати перегрітої пари для тиску пари від лінії насичення до 100МПа та температури від 97°C до 800°C. Виконано перевірку розробленого спрощеного рівняння шляхом порівняння результатів обчислення показника адіабати за спрощеним рівнянням із зразковими значеннями, отриманими за рівняннями IAPWS-IF97 та встановлено, що відносне відхилення значень показника адіабати, отриманих за спрощеним рівнянням, від зразкових значень показника адіабати не перевищує для діапазону зміни температури від 97 до 350 °C - 0,72% ; для діапазону зміни температури від

350 до 590 °C - 2,62% ; для діапазону зміни температури від 590 до 800 °C - 1,19%.

На основі теорії оцінювання невизначеності та рівнянь розрахунку ентальпії води (водяної пари) розроблено рівняння для розрахунку невизначеності ентальпії води (водяної пари). Застосування цього рівняння дає можливість врахувати методичну невизначеність розрахунку ентальпії та невизначеності параметрів стану води (водяної пари) для області параметрів стану теплоносія, що охоплює технологічні умови застосування систем вимірювання кількості теплової енергії.

Розроблено спрощені аналітичні залежності для обчислення відносних коефіцієнтів чутливості невизначеності ентальпії до невизначеності результатів вимірювання тиску та температури води, що дає можливість розробити спрощену методику оцінювання невизначеності ентальпії.

Удосконалено метод проектування системи вимірювання кількості теплової енергії, який полягає у пошуку параметрів витратоміра, що забезпечують мінімальну невизначеність вимірюваного значення витрати із одночасним врахуванням граничного значення втрат тиску, що дає можливість зменшити втрати тиску у системах постачання теплової енергії.

Запропоновано нові підходи щодо автоматизованого проектування систем вимірювання кількості теплової енергії, що дають можливість реалізувати розрахунок конструктивних та метрологічних характеристик системи вимірювання кількості теплової енергії із врахуванням технологічних та нормативних обмежень.

Шляхом програмної реалізації алгоритмів, розроблених на основі рівнянь обчислення кількості теплової енергії, математичної моделі системи вимірювання кількості теплової енергії з витратомірами змінного перепаду тиску, методів визначення властивостей води та водяної пари, розроблених методики обчислення показника адіабати водяної пари, методики оцінювання сумарної відносної розширеної невизначеності ентальпії води, водяної пари та методики оцінювання сумарної відносної розширеної невизначеності результату вимірювання кількості

теплової енергії, розроблено САПР засобів вимірювання кількості теплової енергії.

Представлено особливості реалізації підсистем введення та перевірки коректності вхідних даних, вікон САПР для введення характеристик вимірювального трубопроводу, засобів вимірювань тиску, перепаду тиску, температури, що входять до складу системи вимірювання кількості теплової енергії.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає в тому, що на основі зразкових значень показника адіабати, отриманих за новим рівнянням, розроблено спрощені залежності та алгоритм розрахунку показника адіабати для їх застосування у обчислювачах кількості теплової енергії; розроблено алгоритми розрахунку кількості теплової енергії, що реалізують математичну модель системи вимірювання кількості теплової енергії та дають можливість обчислити кількість теплової енергії для різних конфігурацій систем вимірювання; удосконалено алгоритм проектування системи вимірювання кількості теплової енергії, який забезпечує мінімальну невизначеність вимірюваного значення витрати із одночасним врахуванням граничного значення втрат тиску та дає можливість зменшити втрати тиску, а отже й підвищити ефективність систем постачання теплової енергії; шляхом реалізації сукупності алгоритмів, що реалізують математичну модель системи вимірювання кількості теплової енергії, рівняння обчислення фізичних властивостей теплоносія, рівняння розрахунку невизначеності кількості теплової енергії розроблено програмний комплекс САПР "Теплова енергія" для автоматизованого проектування систем вимірювання кількості теплової енергії.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в підприємствах, що займаються проектуванням та інсталяцією об'єктів тепlopостачання, зокрема розроблений програмний пакет САПР "Теплова енергія" застосований для проектування систем вимірювання кількості теплової енергії у ТОВ "Сервіскотломонтаж-Львів" а також впроваджений у навчальний процес для

студентів спеціальності 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології".

Ключові слова: кількість теплової енергії, ентальпія теплоносія, витратомір змінного перепаду тиску, математична модель, алгоритм розрахунку, система автоматизованого проектування, оцінювання невизначеності.

ABSTRACT

Byts O.M. Computer-Aided Designing of Thermal Energy Metering Systems based on Differential Pressure Flowmeters.

The thesis for the Degree of Doctor of Philosophy in the specialty 151 – Automation and Computer Integrated Technologies. – Lviv Polytechnic National University. – Lviv, 2020.

The thesis is devoted to solving an important problem in the field of automation and instrumentation, i.e. development of theoretical base for designing the thermal energy metering systems and development of computer-aided design (CAD) system for designing the thermal energy metering devices, which include flowmeters with standard primary devices.

The developed CAD system simplifies the process of designing the thermal energy metering devices, reduces the labor intensity and controls the compliance of design solutions with the requirements of regulations on thermal energy metering.

The analysis of normative documents with the requirements to the custody transfer systems for metering the thermal energy is presented in the thesis. The main provisions for controlling the condition of metering devices, requirements to the metrological and technical characteristics of heat meters were considered. It was found that these documents do not contain the requirements to the systems of thermal energy flow rate and volume measurement, consisting of a computer, flowmeters, measuring transducers of pressure and temperature, which are made as separate devices.

The advantages and disadvantages of the differential pressure flowmeters were considered. It is noted that due to the universality of application, the simplicity of implementation of the primary transducers, standardization of definitions, technical requirements and metering methods, such flowmeters are widely used in the industrial measurements. In particular, the differential pressure flowmeters are applied for thermal energy metering at industrial enterprises and at heat supplying organizations. The following software is used for designing the differential pressure flowmeters: «Raskhod-RU» CAD, Arian ISO-5167 Flow CAD. However, these software packages are not intended for computer-aided design of thermal energy metering systems. Therefore, development of computer-aided design software for designing the thermal energy metering systems is an important task, which was solved in the thesis.

The structure of the thermal energy metering system and consequently the equation for determining the thermal energy volume depend on the location scheme of the measuring transducers. Classification of heat supplying systems was carried out in the thesis. The possible structures of thermal energy metering systems were analyzed. The equations for determining the thermal energy volume for typical schemes of metering systems at heat energy sources and in heat supplying networks were considered. It was found that the algorithm for determining the thermal energy volume for any kind of structure of the metering system is based on the algorithm for calculating the integral energy volume between two points of a heat supplying system, since the equations for calculating the thermal energy volume contain the components resulting from integration of the product of the heat carrier flow rate and the difference of enthalpies of the heat carrier in different points of the heat supplying scheme.

The main functions that have to be implemented in a thermal energy metering system independently of its structure are defined. These functions are sufficient for formation and convenient presentation of the measured value of the thermal energy volume.

The mathematical model of the thermal energy metering system was developed on the basis of a complete mathematical model of differential pressure flowmeters, equations for determining the thermal energy volume and equations for determining the

properties of a heat carrier. This model provides the possibility to study the influence of the design characteristics of the flowmeter and the parameters of the heat carrier on the result of thermal energy volume measurement.

The algorithm for calculating the thermal energy volume for systems based on differential pressure flowmeters was developed. The complete mathematical model of the flowmeter including the iterative calculation of the heat carrier flow rate was implemented in the developed algorithm.

The equation of uncertainty of the measured value of thermal energy volume was developed. This equation makes it possible to determine the uncertainty for the configuration of the metering system with two flowmeters, as well as to estimate the uncertainty of thermal energy volume taking into account the uncertainties of the measured values of the flow parameters (temperature, pressure, flow rate) and the uncertainties of the techniques applied for calculation of the heat carrier parameters.

The analysis of the existing methods for calculating of thermodynamic properties of the heat carrier (water, steam) was carried out. In particular, methods for calculating the enthalpy, density, dynamic viscosity of water and water steam were analyzed. Based on the results of the analysis, it was found that for the computer-aided design of a thermal energy metering system it is advisable to use the IAPWS IF-97 techniques.

New equations for calculating the isentropic exponent of superheated steam based on dependences and equations from IAPWS-IF97 (International Association for the Properties of Water and Steam) were developed. These equations in combination with known equations for calculating the density makes it possible to calculate the state parameters of the water steam during measurement of its flow rate by means of the differential pressure method. Based on processing of this equation, a simplified equation and algorithm for calculating the isentropic exponent of superheated steam for pressure from the saturation line to 100 MPa and temperature from 97 °C to 800 °C was developed. The developed simplified equation was verified by comparing the results of calculating the isentropic exponent using this equation with the reference values obtained using the IAPWS-IF97 equations. It was found that the relative deviation of

the isentropic exponent values obtained using the simplified equation from the reference isentropic exponent values does not exceed 0.72% for the temperature range from 97 to 350 °C, 2.62% for the temperature range from 350 to 590 °C and 1.19% for the temperature range from 590 to 800 °C.

The equation for calculating the uncertainty of the enthalpy of water (water steam) was developed on the basis of the uncertainty evaluation theory and equations for calculating the enthalpy of water (water steam). Application of this equation makes it possible to take into account the methodological uncertainty of enthalpy calculation and the uncertainty of water (steam) parameters for the range of heat carrier parameters covering the technical conditions for application of thermal energy metering systems.

Simplified analytical dependencies for determining the relative sensitivity coefficients of the enthalpy uncertainty to the uncertainty of the results of water pressure and temperature measurement were developed. It provides the possibility to develop a simplified method for evaluation of the enthalpy uncertainty.

The method of designing a thermal energy metering system was improved. The improvement consists in finding the parameters of the flowmeter that provide the minimum uncertainty in the measured value of the flow rate taking into account the pressure losses limit, which makes it possible to reduce pressure losses in thermal energy supply systems.

New approaches to computer-aided designing of a thermal energy metering system were proposed. These approaches make it possible to calculate the constructional and metrological characteristics of a thermal energy metering system taking into account the technological and normative constraints.

CAD software for designing the thermal energy metering systems was developed by implementing the algorithms developed on the basis of the equations for calculating the thermal energy volume, the mathematical model of the thermal energy metering system based on the differential pressure flowmeters, the methods for determining the properties of water and steam, the methods for calculating the isentropic exponent of steam, the methods for evaluation of total relative expanded

uncertainty of enthalpy of water and steam, as well as the methods for evaluating the total relative expanded uncertainty of thermal energy volume measurement result.

The peculiarities of implementation of CAD subsystems and windows for entering and verifying the input data are presented. The windows for entering the characteristics of the measuring pipeline, the instruments for measurement of pressure, differential pressure and temperature, which are part of the thermal energy metering system, are presented.

The practical significance of the thesis is that on the basis of reference isentropic exponent values, obtained by new equation, a simplified relation and algorithm for calculating the isentropic exponent was developed for its application in the calculators of thermal energy volume. The algorithms for calculation of thermal energy volume were developed with implementation of the mathematical model of the thermal energy metering system. These algorithms make it possible to calculate the thermal energy volume for different configurations of metering systems. The algorithm for designing the thermal energy metering system was improved, which provides minimal uncertainty of the measured value of the flow rate taking into account the pressure losses limit. Thanks to this algorithm the pressure losses can be reduced and, consequently, the efficiency of a thermal energy supplying system can be increased. "Thermal Energy" CAD software was developed for computer-aided design of thermal energy metering systems. The algorithms that implement a mathematical model of the thermal energy metering system, an equation for calculating the physical properties of the heat carrier, an equation for calculating the uncertainty of the thermal energy volume were applied in this software.

The results of the thesis are implemented in enterprises engaged in the design and installation of heat supply facilities. In particular the developed "Thermal Energy" CAD software is used for designing the thermal energy metering systems in "Serviskotlomontazh-Lviv" LLC. This software was also included into the educational process for students of specialty 151 "Automation and Computer-Integrated Technologies".

Keywords: thermal energy volume, enthalpy of heat carrier, differential pressure flowmeters, mathematical model, calculation algorithm, computer-aided design system, uncertainty evaluation.

Список публікацій здобувача:

Праці в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Matiko F. D., Slabyk O. M., Hutnyk M. V. (2018). Аналіз нормативного забезпечення систем вимірювання кількості теплової енергії. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2018. Вип. 28 (3). С. 105 – 110.

2. Matiko F., Slabyk O., Lesovoy L., Matiko H. Technique for evaluating the uncertainty of enthalpy of water and steam for thermal energy metering systems. *Energy Engineering and Control Systems*. 2018. Vol. 4, № 2. P. 79 – 86.

3. Слабик О. М., Матіко Ф. Д., Лесовой Л. В. Спрощений алгоритм розрахунку показника адиабати перегрітої пари для автоматизованих систем обліку теплової енергії. *Вісник КПІ. Серія: Приладобудування*. 2019. Вип. 57 (1). С. 72 – 78.

4. Слабик О. М., Матіко Ф. Д., Лесовой Л. В. Алгоритм визначення кількості теплової енергії для систем із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2019. Вип. № 36. С. 77 – 81.

5. Matiko F., Byts O., Lesovoy L., Matiko H. Computer-aided system for designing the thermal energy metering devices. *Energy Engineering and Control Systems*. 2020. Vol. 6, No. 1. P. 61 – 69.

6. Byts O., Kurytnik I., FedirMatiko F., Lesovoy L., Matiko H. Evaluating the uncertainty of the amount of thermal energy for metering systems with differential pressure flowmeters. *Napędy i Sterowanie*. 2020. No. 4. P. 57 – 63.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

7. Слабик О.М., Матіко Ф.Д. Автоматизація проектування систем вимірювання кількості теплової енергії на основі витратомірів змінного перепаду тиску. *Актуальні проблеми гуманітарних та природничих наук: матеріали IV*

Міжнародної науково-практичної конференції. 25-26 серпня 2017 р. Одеса, 2017. С. 156 – 158.

8. О. М. Слабик, Д. Матіко, Л. В. Лесовой. Проектування систем вимірювання кількості теплової енергії на основі витратомірів змінного перепаду тиску. *«Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (ВКДТС-2017)*: збірник тез доповідей Четвертої міжнародної наукової конференції. 31 жовтня – 2 листопада 2017 р. Вінниця, 2017. С. 237 – 238.

9. Матіко Ф. Д., Слабик О. М., Гутник М. Б. Аналіз стану приладового обліку кількості теплової енергії. *Приладобудування: стан і перспективи*: збірник тез доповідей XVII Міжнародної науково-технічної конференції. 15 – 16 травня 2018 р. Київ, 2018. С. 184.

10. Slabyk O.M., Matiko F.D., Lesovoy L.V. Technique for determining the properties of heat carrier for the automated design of measuring systems of thermal energy. *Автоматика/Automatics – 2018*: матеріали XXV Міжнародної конференція з автоматичного управління. 18–19 вересня 2018 р. Львів, 2018. С. 189 – 190.

11. Слабик О.М., Матіко Ф.Д., Лесовой Л.В. Спрощений алгоритм розрахунку показника адіабати перегрітої пари для автоматизованих систем обліку теплової енергії. *International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students Actual Problems of Automation and Control: conference materials*. 30 листопада 2018 р. Луцьк, 2018. №6. С. 49-54.

12. Слабик О.М., Матіко Ф.Д., Лесовой Л.В. Алгоритм визначення кількості теплової енергії для систем з витратоміром змінного перепаду тиску. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2019*: матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ – 2019). 23–24 квітня 2019 р. Київ, 2019. С. 68 – 69.

13. Слабик О.М., Матіко Ф.Д., Лесовой Л.В. Оцінювання невизначеності ентальпії теплоносія для метрологічного забезпечення систем обліку теплової енергії. *«Приладобудування: стан і перспективи»*: збірник тез доповідей XVIII Міжнародної науково-технічної конференції. 15 – 16 травня 2019 р. Київ, 2019. С. 172 – 173.

14. Биць О.М., Матіко Ф.Д., Лесовой Л.В. Програмний комплекс для автоматизованого проектування систем вимірювання кількості теплової енергії. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2020*: матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ-2020). 22 квітня 2020 р. Київ, 2020. С. 35 – 36.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	17
ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ОБЛІКУ КІЛЬКОСТІ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ, НОРМАТИВНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ КІЛЬКОСТІ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ПРОЦЕСУ ЇХ ПРОЕКТУВАННЯ.....	27
1.1. Аналіз стану приладового обліку теплової енергії та його нормативного забезпечення	27
1.2. Виділення невирішених завдань, визначення напрямків досліджень та формулювання завдань розроблення системи автоматизованого проектуювання	41
Висновки до Розділу 1	44
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ КІЛЬКОСТІ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ.....	46
2.1. Аналіз структури та функціональних ознак систем вимірювання кількості теплової енергії, їх класифікація.....	46
2.2. Розроблення математичних моделей систем вимірювання кількості теплової енергії на основі витратомірів змінного перепаду тиску.....	58
2.3. Розроблення алгоритму визначення кількості теплової енергії для систем із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв.....	64
2.4. Розроблення рівняння невизначеності вимірюваного значення кількості теплової енергії.....	68
Висновки до Розділу 2	77
РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЕПЛОНОСІЇВ.....	79
3.1. Аналіз методик визначення властивостей теплоносіїв (води, водяної пари) для систем вимірювання кількості теплової енергії.....	79
3.2. Розроблення методик визначення властивостей теплоносія (води,	

водяної пари) для окремих піддіапазонів зміни параметрів теплоносія.....	89
3.3. Перевірка адекватності розроблених методик. Оцінка невизначеності значень теплофізичних властивостей (показника адіабати, ентальпії) отриманих за розробленими методиками.....	97
Висновки до Розділу 3.....	106
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ.....	108
4.1. Розроблення структури САПР систем вимірювання кількості теплової енергії.....	108
4.2. Підсистема вводу характеристик та параметрів систем вимірювання кількості теплової енергії.....	113
4.3. Підсистема розрахунку та проектування системи вимірювання кількості теплової енергії.....	118
4.4. Підсистема інтерактивних та експертних повідомлень для сповіщення користувача про помилки під час введення вхідних даних, а також для усунення недоліків проектування.....	124
4.5. Підсистема оптимізації параметрів витратоміра та системи вимірювання кількості теплової енергії.....	139
4.6. Підсистема виведення та графічного представлення результатів розрахунку та проектування.....	148
Висновки до Розділу 4.....	152
ВИСНОВКИ.....	154
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	157
ДОДАТКИ.....	166

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

САПР	– система автоматизованого проектування
ТЕ	– теплова енергія
СВКТЕ	– система вимірювання кількості теплової енергії
ЗВТ	– засоби вимірювальної техніки
ВОТЕ	– вузол обліку теплової енергії
ВТ	– вимірювальний трубопровід
ЗП	– звужувальний пристрій
ППП	– пристрій підготовки потоку

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми наукового дослідження. Теплова енергія – один з найпоширеніших енергоносіїв, який широко використовується в промисловості та житлово-комунальному господарстві. На сьогодні у галузі теплозабезпечення нашої країни є велика кількість недоліків, починаючи від незадовільного технічного стану теплових мереж, половина з яких знаходиться в аварійному стані, завершуючи відсутністю повного обліку параметрів теплових потоків на джерелах теплової енергії та у споживачів.

Зважаючи на постійне зростання тарифів на послуги житлово-комунального господарства, в тому числі на теплову енергію, питання економії, раціонального використання та точного обліку енергоносіїв стають все більш актуальними, оскільки дають змогу зменшити використання різних видів палива, а відповідно, імпортозалежність нашої держави.

Точне вимірювання кількості теплової енергії можливе за умови застосування сучасних систем на основі мікропроцесорних контролерів, що здатні реалізувати складні алгоритми обчислення кількості теплової енергії за вимірюваними значеннями параметрів теплоносія. Під час проектування таких систем необхідно врахувати велику кількість технологічних та нормативних обмежень, тому процес проектування є складним та трудомістким, а отже для підвищення його ефективності доцільним є застосування програмного комплексу для автоматизації процесу проектування.

Розроблення теоретичної бази для проектування систем вимірювання кількості теплової енергії та розроблення програмного пакету для автоматизації проектування систем вимірювання кількості теплової енергії, в складі яких для вимірювання витрати теплоносія застосовують витратоміри змінного перепаду тиску зі стандартними звужувальними пристроями, є важливими завданнями, які є предметом вирішення цієї дисертаційної роботи.

Актуальність роботи. Сучасні системи вимірювання кількості теплової енергії є складними технічними та програмними комплексами, до складу яких

входять мікропроцесорні обчислювачі, вимірювальні перетворювачі тиску, температури, витрати. Залежно від технологічної схеми продукування чи споживання теплової енергії системи вимірювання можуть мати різноманітну структуру. Внаслідок цього змінюються і їх апаратна структура і алгоритми обчислення кількості теплової енергії.

Для реалізації алгоритмів обчислення кількості теплової енергії необхідно мати математичні моделі процесу її вимірювання, обмеження застосування цих моделей. Такі моделі сьогодні розроблені тільки частково: зокрема, немає рівнянь обчислення окремих фізичних властивостей теплоносія (показника адіабати), рівнянь обчислення невизначеності вимірюваного значення кількості теплової енергії. Тому виникає завдання розроблення математичних моделей систем вимірювання кількості теплової енергії і, на їх основі, теоретичної бази проектування таких систем.

До складу промислових систем вимірювання кількості теплової енергії у трубопроводах великих діаметрів часто входять витратоміри змінного перепаду тиску. Суттєвою перевагою цих витратомірів є те, що їх виготовляють без процедури калібрування, а коефіцієнти рівняння витрати визначають за відомими залежностями, що є справедливими при виконанні низки вимог до конструкції витратоміра та гідродинамічних умов потоку. Як наслідок, під час проектування систем вимірювання на основі витратомірів змінного перепаду тиску, необхідно виконати значну кількість вимог та обмежень, щодо застосування таких витратомірів. Внаслідок цього, процедура проектування систем вимірювання кількості теплової енергії на основі витратомірів змінного перепаду тиску є надзвичайно трудомісткою та потребує автоматизації.

Під час метрологічної перевірки діючих систем вимірювання кількості теплової енергії необхідно отримати масив зразкових точок, відносно яких перевіряють покази обчислювача. Тобто виникає потреба мати еталонний програмний засіб, що точно реалізує повну математичну модель системи вимірювання кількості теплової енергії з урахуванням вимог діючих нормативних документів.

Отже завдання розроблення теоретичної бази для проектування систем вимірювання кількості теплової енергії, а також автоматизація процесу проектування та розроблення програмного пакету для автоматизованого проектування систем на основі витратомірів змінного перепаду тиску, які вирішуються у цій роботі є актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана згідно з науковими програмами та планами науково-дослідних робіт кафедри «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» Національного університету «Львівська політехніка» у рамках наукового напрямку «Вдосконалення і розробка елементів і підсистем збору та первинної обробки інформації в АСК ТП». Дослідження за темою дисертації виконувались в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи ДБ "Енергія" "Розроблення системи автоматизованого проектування пристроїв вимірювання кількості природного газу в одиницях об'єму та енергії" (2020 р., номер держреєстрації 0120U102207), госпдоговірних науково-дослідних робіт: Г/д 0566 "Розроблення стандарту організації ПАТ "УКРТРАНСГАЗ", який регламентує вимоги щодо застосування витратомірів змінного перепаду тиску за умови невідповідності геометричних характеристик вимірювальних трубопроводів і діафрагм вимогам ДСТУ ГОСТ 8.586.1-5:2009", (2017-2018 рр., номер держреєстрації 0117U001457); Г/д 937 "Визначення об'ємної витрати газу через пальники котла для підігріву бітуму підприємства Шляхбудсервіс (м.Жидачів)", (2018 р.); зареєстрованої кафедральної тематики АТХП-6 «Дослідження складових невизначеності витрати середовища з врахуванням шорсткості внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу», (2017-2019 рр., номер держреєстрації 0117U004011).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення теоретичної бази для проектування систем вимірювання кількості теплової енергії та розроблення програмного пакету для автоматизації проектування систем вимірювання кількості теплової енергії, в складі яких для вимірювання витрати теплоносія застосовують витратоміри змінного перепаду тиску зі стандартними звужувальними пристроями.

Для досягнення цієї мети в роботі необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз типових схем систем вимірювання кількості теплової енергії та виконати їх класифікацію;
- розробити методики розрахунку властивостей теплоносія (води, водяної пари), зокрема методику розрахунку показника адіабати, для окремих піддіапазонів зміни параметрів теплоносія;
- розробити математичну модель системи вимірювання кількості теплової енергії;
- розробити рівняння та методики оцінювання невизначеності теплофізичних властивостей (ентальпії, показника адіабати);
- розробити рівняння для оцінювання невизначеності вимірюваного значення кількості теплової енергії;
- розробити алгоритми реалізації математичної моделі системи вимірювання кількості теплової енергії та алгоритми проектування систем вимірювання кількості теплової енергії;
- розробити програмний комплекс для автоматизованого проектування систем вимірювання кількості теплової енергії.

Об'єктом дослідження є процес автоматизованого проектування систем вимірювання кількості теплової енергії на основі витратомірів змінного перепаду тиску.

Предметом дослідження є система автоматизованого проектування засобів вимірювання кількості теплової енергії.

Методи дослідження. Під час виконання досліджень застосовано методи математичного моделювання на основі законів гідродинаміки, термодинаміки, теорії подібності. Розроблення рівнянь для оцінювання невизначеності показників фізичних властивостей та невизначеності кількості теплової енергії виконано із застосуванням теорії похибок та теорії невизначеності. Під час проектування витратомірів застосовано елементи теорії оптимізації. Для автоматизації проектування систем вимірювання застосовано методи лінійного програмування,

об'єктно-орієнтованого програмування для розроблення інтерфейсу програмного пакету та підсистеми виведення результатів проектування.

Наукова новизна отриманих результатів. У роботі отримані такі нові наукові результати:

1) розроблено нове рівняння для обчислення показника адіабати перегрітої водяної пари, отримане на основі базових термодинамічних залежностей та рівнянь IAPWS IF-97, що в сукупності з відомими рівняннями густини дає можливість обчислити параметри стану водяної пари під час вимірювання її витрати методом змінного перепаду тиску;

2) шляхом розгляду у сукупності повної математичної моделі витратоміра змінного перепаду тиску, рівнянь визначення кількості теплової енергії та рівнянь визначення властивостей теплоносія розроблено математичну модель системи вимірювання кількості теплової енергії, що дає можливість дослідити вплив конструктивних характеристик витратоміра, параметрів теплоносія на результат вимірювання кількості теплової енергії;

3) на основі теорії оцінювання невизначеності та рівнянь розрахунку ентальпії води (водяної пари) розроблено рівняння для розрахунку невизначеності ентальпії води (водяної пари), застосування якого дає можливість врахувати методичну невизначеність розрахунку ентальпії та невизначеності параметрів стану води (водяної пари) для області параметрів стану теплоносія, що охоплює технологічні умови застосування систем вимірювання кількості теплової енергії;

4) розроблено рівняння невизначеності вимірюваного значення кількості теплової енергії, що дає можливість обчислити невизначеність для конфігурації системи вимірювання з двома витратомірами;

5) розроблено новий метод проектування системи вимірювання кількості теплової енергії, який полягає у пошуку параметрів витратоміра, що забезпечують мінімальну невизначеність вимірюваного значення витрати із одночасним врахуванням граничного значення втрат тиску, що дає можливість зменшити втрати тиску у системах постачання теплової енергії;

б) запропоновано нові підходи щодо автоматизованого проектування систем вимірювання кількості теплової енергії, що дають можливість реалізувати розрахунок конструктивних та метрологічних характеристик системи вимірювання кількості теплової енергії із врахуванням технологічних та нормативних обмежень;

Практичне значення одержаних результатів. 1) на основі зразкових значень показника адіабати, отриманих за новим рівнянням, розроблено спрощені залежності та алгоритм розрахунку показника адіабати для їх застосування у обчислювачах кількості теплової енергії;

2) розроблено алгоритми розрахунку кількості теплової енергії, що реалізують математичну модель системи вимірювання кількості теплової енергії та дають можливість обчислити кількість теплової енергії для різних конфігурацій систем вимірювання;

3) розроблено алгоритм проектування системи вимірювання кількості теплової енергії, який забезпечує мінімальну невизначеність вимірюваного значення витрати із одночасним врахуванням граничного значення втрат тиску та дає можливість зменшити втрати тиску, а отже й підвищити ефективність систем постачання теплової енергії;

4) шляхом реалізації сукупності алгоритмів, що реалізують математичну модель системи вимірювання кількості теплової енергії, рівняння обчислення фізичних властивостей теплоносія, рівняння розрахунку невизначеності кількості теплової енергії розроблено програмний комплекс САПР "Теплова енергія" для автоматизованого проектування систем вимірювання кількості теплової енергії.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в підприємствах, що займаються проектуванням та інсталяцією об'єктів тепlopостачання, зокрема розроблений програмний пакет САПР "Теплова енергія" застосований для проектування систем вимірювання кількості теплової енергії у ТОВ "Сервіскотломонтаж-Львів" а також впроваджений у навчальний процес для студентів спеціальності 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології".

Особистий внесок здобувача. Розроблено математичну модель системи вимірювання кількості теплової енергії, яка об'єднує повну математичну модель витратоміра змінного перепаду тиску, рівняння кількості теплової енергії та рівняння властивостей теплоносія, що дає можливість дослідити вплив конструктивних характеристик витратомірів, параметрів теплоносія на результат вимірювання кількості теплової енергії.

Отримано нове рівняння для обчислення показника адіабати перегрітої пари, на основі базових термодинамічних залежностей та рівнянь, що в сукупності з відомими рівняннями густини дає можливість обчислити параметри стану водяної пари під час вимірювання її витрати;

Розроблено рівняння для оцінювання невизначеності кількості теплової енергії із врахуванням невизначеностей усіх параметрів, що входять до рівняння обчислення кількості теплової енергії.

Запропоновано нові підходи щодо автоматизованого проектування систем вимірювання кількості теплової енергії, що дають можливість реалізувати розрахунок конструктивних та метрологічних характеристик системи вимірювання кількості теплової енергії із врахуванням технологічних та нормативних обмежень.

В спільних роботах автору належить наступне: у роботах [45, 70, 72, 56, 79] виконано аналіз літературних джерел за темою дисертації та виділено невіршені завдання для досліджень; в роботі [45] визначено основні недоліки стану приладового обліку кількості теплової енергії та нормативного забезпечення систем вимірювання кількості теплової енергії; в роботі [70] розроблено спрощену методику оцінювання невизначеності ентальпії води та виконано перевірку похибки отриманих аналітичних залежностей; в роботі [72] розроблено нове рівняння для розрахунку показника адіабати перегрітої водяної пари, отримано масив зразкових значень показника адіабати на основі якого розроблено спрощені рівняння та алгоритм для застосування в обчислювачів витрати перегрітої водяної пари; в роботі [54] розроблено алгоритм обчислення кількості теплової енергії із застосуванням методу змінного перепаду тиску, в

роботі [56] розроблено рівняння для обчислення невизначеності вимірюваного значення кількості теплової енергії для системи вимірювання з двома витратомірами, в роботі [79] представлено функціональні можливості розробленого програмного комплексу для проектування засобів вимірювання кількості теплової енергії та характеристики основних підсистем програмного комплексу.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи були представлені на таких конференціях: IV Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні проблеми гуманітарних та природничих наук» (Одеса, Україна, 2017); Четверта міжнародна наукова конференція пам'яті професора Володимира Поджаренка Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (Вінниця, Україна, 2017); XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (Київ, Україна, 2018); XXV International Conference on Automatic Control «Automatics – 2018» (Lviv, Ukraine, 2018); International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students "Actual Problems of Automation and Control" (Lutsk, Ukraine, 2018); VI Міжнародна науково-практична конференція молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ-2019), (Київ, Україна, 2019); XVIII Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи» (Київ, Україна, 2019); VII Міжнародна науково-практична конференція молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ-2020), (Київ, Україна, 2020).

Також результати досліджень доповідались та обговорювались на наукових семінарах кафедри Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету «Львівська політехніка».

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 14 публікацій: 6 статей у фахових виданнях, з яких одна у закордонному фаховому виданні, 5 у виданнях, що входять до наукометричних баз даних, та 8 тез доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація містить вступ, огляд стану проблеми і постановку задачі досліджень, 4 розділи, висновок по роботі, список

використаних джерел із 87 найменувань. Дисертаційна робота викладена на 175 сторінках, основний зміст роботи становить 138 сторінок друкованого тексту, в тому числі 41 рисунок, 22 таблиці та 4 додатки.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ОБЛІКУ КІЛЬКОСТІ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ, НОРМАТИВНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ КІЛЬКОСТІ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ПРОЦЕСУ ЇХ ПРОЕКТУВАННЯ

1.1. Аналіз стану приладового обліку теплової енергії та його нормативного забезпечення

Нормативними документами, які визначають правила метрологічної діяльності, зокрема, ЗУ «Про метрологію та метрологічну діяльність» [1] облік ТЕ віднесено до сфери законодавчо-регульованої метрології. Тобто це вид діяльності, щодо якого здійснюється державне регулювання стосовно процедури вимірювання, одиниць вимірювання та характеристик ЗВТ. Згідно ЗУ «Про теплопостачання» [2] предметом державного контролю у сфері теплопостачання є господарська діяльність пов'язана з виробництвом, транспортуванням, постачанням і використанням ТЕ.

Нормативно-правове забезпечення галузі теплопостачання визначає основні положення щодо здійснення контролю за станом ЗВТ, методиками виконання вимірювань та дотриманням метрологічних вимог, встановлених до комерційного обліку (точності вимірювання, повірки ЗВТ).

В залежності від мети використання результатів вимірювання кількості ТЕ, а відповідно і від технічних, зокрема метрологічних характеристик застосованих ЗВТ та способів їх підтвердження приладові системи обліку поділяють на системи комерційного та технологічного обліку ТЕ [3]. Технологічний облік ТЕ – це облік кількості ТЕ всередині підприємств (для власних потреб підприємства). Такий облік не є підставою для комерційних розрахунків, тому згідно із законом України "Про метрологію та метрологічну діяльність" [1] оцінка відповідності засобів технологічного обліку (ЗВТ, які не застосовують у сфері законодавчо регульованої метрології) проводиться на добровільних засадах.

Згідно Закону України «Про комерційний облік ТЕ та водопостачання» [3] комерційний облік ТЕ здійснюють вузлами обліку на основі показань ЗВТ (приладовим методом) та при відсутності приладів обліку чи при їх виході з ладу – розрахунковим методом, відповідно до Методики розподілу між споживачами обсягів спожитих у будівлі комунальних послуг [4], затвердженої Мінрегіоном, з урахуванням середнього споживання ТЕ – протягом попереднього опалювального періоду або за фактичний час споживання протягом поточного опалювального періоду.

У технічній літературі та багатьох нормативних документах застосовують поняття «вузол обліку». Під вузлом обліку розуміють комплекс пристроїв (у тому числі ЗВТ, що відповідають вимогам технічних регламентів), що забезпечує визначення кількості спожитої ТЕ, а також служить для реєстрації та контролю параметрів теплоносія, який надходить на потреби опалення, гарячого водопостачання, вентиляції або виробничих потреб [3] (рис.1.1).

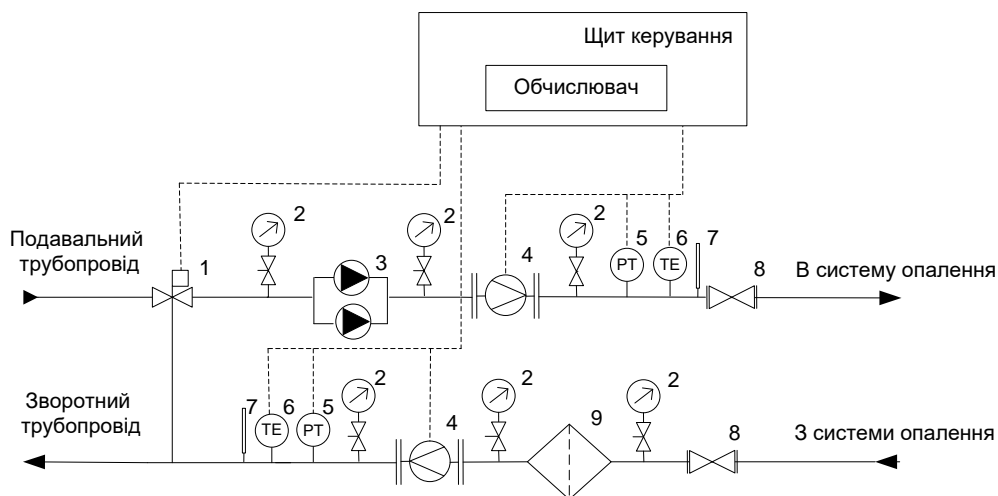


Рис.1.1 Структурна схема вузла обліку ТЕ: 1 – регулюючий клапан; 2 – манометр; 3 – насосна група; 4 – витратомір; 5 – перетворювач тиску; 6 – первинний вимірювальний перетворювач температури; 7 – термометр; 8 – дискові поворотні заслінки; 9 – фільтр.

Проектування вузлів обліку ТЕ в Україні виконують на основі технічних умов та завдання на проектування, що надаються замовником будівництва до початку виконання проектних робіт, обмірних креслень та матеріалів обстеження.

Для забезпечення єдності вимірювань у системах теплопостачання в процесі розроблення, погодження та затвердження проектної документації на облаштування вузлів обліку ТЕ в Україні користуються чинними нормативно-правовими документами: ДБН В.2.5-67:2013 [5]; ДБН В.2.5-39:2008 [6]; ДБН В.2.5-77:2014 [7]; НПАОП 0.00-1.81-18 [8]; ДСТУ-Н Б В.2.5-73:2013 [9]; ДБН В.2.5-64:2012 [10].

В Польщі для проектування вузлів обліку ТЕ застосовують рекомендації (вказівки) з проектування теплових вузлів «Wytyczne projektowania węzłów ciepłych» [11]. В даному документі визначають склад робочого проекту вузла обліку; умови до розташування приладів у вузлах обліку; технічні та метрологічні вимоги до засобів вимірювань та автоматики.

Вимоги до процесу вимірювань в тому числі й до вимірювання кількості ТЕ встановлені відповідними законами, стандартами та постановами, зокрема [12-15].

«Ustawa Prawo o miarach» [12], впроваджує обов'язковий правовий метрологічний контроль ЗВТ. Згідно «Ustawy O systemie zgodności» [13] всі засоби вимірювання, перед введенням в експлуатацію в кожній країні Європейського Союзу, підлягають оцінці відповідності суттєвим вимогам, які викладені у відповідних регламентах. Загальні вимоги, яким повинні відповідати лічильники ТЕ, визначені та у стандартах PN-EN 1434 [16, 17]. Вказані документи базуються на рекомендаціях Міжнародної організації законодавчої метрології OIML [18].

Основним елементом ВОТЕ є лічильник ТЕ - вимірювальний комплекс, який складається з окремих елементів, що пов'язані між собою лініями зв'язку (передачі вимірювальних сигналів). Основними конструктивними елементами лічильника ТЕ є: обчислювач ТЕ; вимірювальні перетворювачі витрати (витратоміри, лічильники); вимірювальні перетворювачі температури та тиску.

Для застосування в системах комерційного обліку ТЕ згідно з [3] тип лічильника ТЕ обов'язково повинен бути внесений до Державного реєстру затверджених типів ЗВТ. На даний час номенклатура теплोलічильників, які

застосовують в системах комерційного обліку, містить десятки найменувань приладів розроблених як вітчизняними: УНМ (ТОВ «НВП «Метрон», Київ); Ultracal 201 (ТОВ "ЦИММЕРСТЕК УКРАЇНА", Київ); WMZ-UA (ТОВ «НВП «Вимірювальні системи», Київ); СВТУ-11Т, СВТУ-10М (ТОВ ФІРМА “СЕМПАЛ Ко ЛТД”, Київ), так і зарубіжними: ULTRAHEAT T230 (Germany); SCYLAR (Germany); Supercal 739 (Switzerland); LQM-III-Elf..., Elf... (Apator Powogaz SA, Poland); MULTICAL 403(Kamstrup A/S Industrivej Denmark); SHARKY 775 (DIEHL METERING GmbH Industrie, Germany); PolluStat (Sensus Slovensko a.s. Nam. Dr. A. Schweitzera, Slovakia) виробниками. ДП "Укрметртестстандарт" впроваджено онлайн реєстр затверджених типів ЗВТ з якого можна отримати повну інформацію про найменування та місцезнаходження виробника, номер та термін дії сертифіката перевірки типу [19].

Технічні та метрологічні характеристики теплोलічильників повинні відповідати вимогам "Технічного регламенту ЗВТ" [20], що розроблений на основі Директиви 2014/32/ЄС Європейського Парламенту та Ради Європейського Союзу [21] – нормативного документу, який в Європейському Союзі застосовують для гармонізації та стандартизації законодавства країн – членів ЄС, у галузі виготовлення та експлуатації ЗВТ. Отже, істотні вимоги до технічних засобів вимірювання кількості ТЕ в Україні, так само як у країнах ЄС, визначено технічним регламентом та його додатками.

В Додатку 6 до Технічного регламенту представлені «Особливі вимоги до теплोलічильників», зокрема встановлені значення нормованих робочих умов, максимально допустимі похибки для теплोलічильників, допустимий вплив електромагнітних завад, довговічність та основні складові частини теплोलічильника.

Зокрема, ЗВТ, які входять до складу комерційного лічильника ТЕ, мають відповідати за їх технічними, конструктивними та метрологічними характеристиками вимогам ДСТУ EN 1434-1-6.:2019 (EN 1434-1:2015 + A1:2018, IDT) [22-27]. Комплексу стандартів, який складається із шести частин під загальною назвою «Теплोलічильники», які встановлюють вимоги до

характеристик лічильників ТЕ, правила їх монтажу, експлуатації та технічного обслуговування. Зокрема, Частина 1 містить класифікацію теплолічильників залежно від умов застосування їх технічні та метрологічні (клас точності, значення границь допустимих похибок) характеристики, вимоги до специфікації теплолічильника [22].

Частина 2 визначає вимоги до конструкції, маркування і пломбування єдиного теплолічильника, що не має окремих складових частин та складеного теплолічильника, що має окремі складові частини: перетворювач витрати перетворювачі температури, обчислювач. [23].

В частині 3 представлено технічні характеристики конструкції інтерфейсів для теплолічильників і протоколів зв'язку (передавання даних): EN 61107 і EN 60870-5. Встановлено умови обміну даними між теплолічильником і зчитувальним пристроєм, між декількома теплолічильниками і одним головним приладом у локальній мережі [24].

В частині 4 «Випробування для затвердження типу» встановлено правила проведення процедури випробування теплолічильників та його складових частин, зокрема наведено програму випробування та методи контролю похибок [25].

Частина 5 стандарту ДСТУ EN 1434-5:2019 визначає вимоги до первинної повірки, метою, якої є підтвердження, що метрологічні характеристики теплолічильника, який буде введено в експлуатацію, знаходяться у межах допустимих похибок і теплолічильник функціонує правильно [26].

Частина 6 стандарту ДСТУ EN 1434-5:2019 визначає вимоги до монтажу, введення в експлуатацію, контролю в експлуатації і технічного обслуговування теплолічильників [27].

Стандартом ДСТУ EN 1434-1-6.:2019 не встановлено вимог до систем вимірювання витрати та кількості ТЕ, що складаються з мікропроцесорного обчислювача, витратомірів, вимірювальних перетворювачів тиску та температури, що виконані як окремі прилади.

Сучасні мікропроцесорні системи обліку ТЕ дозволяють реалізувати обчислення в реальному часі кількості ТЕ з урахуванням теплофізичних

параметрів теплоносія та вимірних значень параметрів потоку. Важливими складовими систем обліку ТЕ є вимірювальні перетворювачі витрати.

Для вимірювання витрати теплоносія практичного застосування набули такі витратоміри:

- ультразвукові;
- тахометричні;
- електромагнітні;
- вихрові;
- змінного перепаду тиску.

Ультразвукові витратоміри переважно використовують для вимірювання витрати рідинних потоків: неелектропровідних рідин, нафтопродуктів, агресивних середовищ, суспензій. Основним вимірюваним параметром в режимі реального часу є швидкість звуку у потоці, що значно спотворюється при наявності домішок у вимірювальному середовищі, що є головним недоліком таких витратомірів. Оскільки, точність вимірювання швидкості звуку у потоці визначає точність роботи приладу в цілому [28].

Основними недоліками тахометричних витратомірів, що обмежують їх застосування є: вплив в'язкості вимірюваного середовища, із збільшенням в'язкості речовини діапазон їх лінійної характеристики зменшується; зношування опор при наявності механічних домішок у рідкому середовищі [29].

Принцип дії електромагнітних витратомірів полягає у вимірюванні величини електрорушійної сили, яка виникає при протіканні середовища (наприклад, води) через магнітне поле всередині приладу. Основним недоліком таких витратомірів є те, що середовище має бути електропровідним, крім того електричні та магнітні поля спричиняють виникнення електрохімічних процесів в потоці, що призводить до відкладення заряджених частинок на вимірювальних електродах. Зазначені фактори сприяють виникненню додаткових похибок вимірювання, знижують надійність таких витратомірів [28].

Суттєвими недоліками вихрових витратомірів є вплив вібрацій на точність вимірювання, неможливість використання таких приладів при невеликій швидкості потоку [30].

Оскільки, метою даної роботи є розроблення програмного комплексу для проектування систем вимірювання кількості ТЕ на основі витратомірів змінного перепаду тиску доцільно більш детально розглянути особливості таких приладів.

Витратоміри змінного перепаду тиску побудовано на залежності перепаду тиску на звужувальному пристрої, вмонтованому у трубопровід, від витрати середовища. Завдяки універсальності застосування, простоті реалізації первинного перетворювача витрати, стандартизації визначень, технічних вимог та методів виконання вимірювань, такий тип витратомірів набув широкого застосування в промислових вимірюваннях. За допомогою витратомірів змінного перепаду тиску проводять вимірювання витрати рідких та газоподібних середовищ у трубопроводах будь-якого діаметру за будь-яких тисків та температур із застосуванням уніфікованих вимірювальних перетворювачів.

Поряд зі всіма перевагами метод змінного перепаду тиску має ряд недоліків, серед яких найбільш суттєвими є: квадратична залежність перепаду тиску від витрати; необхідність встановлення прямолінійних ділянок трубопроводу до і після місця встановлення первинного перетворювача витрати [31].

В залежності від будови перетворювача витрати витратоміри змінного перепаду тиску поділяють на шість груп: зі звужувальними пристроями; витратоміри з гідравлічним опором; відцентрові; з напірним пристроєм; з напірним підсилювачем; струменеві.

Найбільшу частку витратомірів методу змінного перепаду тиску становлять витратоміри зі звужувальними пристроями, які поділяють на стандартні, спеціалізовані та нестандартні [31].

Основними видами звужувальних пристроїв у витратомірах змінного перепаду тиску є діафрагма, сопло і труба Вентурі.

Поширення діафрагм зумовлено простотою конструкції, а відповідно невисокою вартістю. Однак, в порівнянні з іншими стандартними звужувальними

пристроями, діафрагма має ряд недоліків. Передусім, це значні втрати тиску, що складають від 40% до 90% вимірюваного перепаду та збільшення похибки вимірювання після притуплення вхідного канта діафрагми.

За втратами тиску стандартне сопло має характеристики близькі до діафрагми, особливо при малих значеннях відносної площі $m=d^2/D^2$, де d - діаметр отвору ЗВ. На відміну від діафрагми сопло не має вхідного канту, який би підлягав швидкому затупленню.

Причиною втрат тиску на звужувальних пристроях є неактивні зони, які утворюються після звужувальних пристроїв [32]. Ці втрати можна зменшити, якщо будуть ліквідовані неактивні зони. Конструкція витратомірних труб власне передбачає останнє. Введення дифузора дозволяє в декілька разів зменшити втрати тиску на витратомірних трубах, що є їх основною перевагою.

Стандартні витратомірні труби за видом вхідної частини поділяють на труби Вентурі та сопла Вентурі.

Завдяки наявності на вході конфузора, який вирівнює потік, труби Вентурі значно менше ніж інші витратомірні труби чутливі до змін вхідного профілю швидкостей. Крім того труби Вентурі мають значно меншу чутливість до близькості місцевих опорів. Це дозволяє суттєво зменшити довжини прямих ділянок трубопроводів і є значною перевагою труб Вентурі [31].

Сопла Вентурі не мають таких переваг. Довжини прямолінійних ділянок трубопроводів, які вимагаються для сопел Вентурі є близькими до прямих ділянок діафрагм та стандартних сопел. Похибка коефіцієнта витрати сопел Вентурі, як і стандартних сопел та діафрагм залежить від відносної площі та шорсткості трубопроводу, тоді як для труб Вентурі похибка не залежить від цих параметрів. В робочій області чисел Рейнольдса похибка коефіцієнта витрати труб Вентурі не перевищує 0.5÷0.75%. В тій же області Re для сопел Вентурі вказана похибка досягає 1.1÷1.15% [32]. Єдиною перевагою сопла Вентурі є його менша довжина при однаковому розмірі дифузора.

Стандартизацію звужувальних пристроїв проведено [33-35] для таких діаметрів трубопроводів:

для діафрагм $0,05 \text{ м} \leq D \leq 1 \text{ м}$

для сопел ИСА 1932 $0,05 \text{ м} \leq D \leq 0,5 \text{ м}$

для еліпсних сопел $0,065 \text{ м} \leq D \leq 0,5 \text{ м}$

для сопел Вентурі $65 \text{ мм} \leq D \leq 500 \text{ мм}$

для труб Вентурі з обробленою входною конічною частиною $0,05 \text{ м} \leq D \leq 0,25 \text{ м}$;

для труб Вентурі із зварною входною конічною частиною з листової сталі $0,2 \text{ м} \leq D \leq 1,2 \text{ м}$

Для комерційного обліку енергоносіїв у вітчизняній промисловості застосовують витратоміри змінного перепаду тиску таких конфігурацій [38]:

1. З роздільним вимірюванням параметрів потоку.

У разі застосування витратомірів з роздільним вимірюванням параметрів потоку виміряне значення кожного параметра (перепаду тиску, тиску та температури) реєструють упродовж інтервалу вимірювання (переважно на діаграмній стрічці). Діаграму кожного окремого параметра опрацьовують та знаходять усереднене значення параметра упродовж інтервалу вимірювання. Значення витрати обчислюють за усередненими значеннями параметрів плинного середовища.

2. З обчислювачем витрати та кількості середовища.

Сигнали від вимірювальних перетворювачів параметрів середовища надходять до мікропроцесорного обчислювача, який за миттєвими значеннями цих параметрів розраховує миттєве значення витрати. Обчислювач формує архів миттєвих значень витрати та розраховує значення кількості плинного середовища упродовж інтервалу вимірювання шляхом інтегрування масиву значень витрати.

Характерною особливістю цієї конфігурації витратоміра є те, що похибку кожного із засобів вимірювань нормують окремо, а похибку витратоміра або невизначеність результату вимірювання витрати визначають на основі похибок окремих засобів вимірювань [37].

3. З вимірювальним комплексом.

Апаратна структура витратоміра з вимірювальним комплексом може бути такою ж, як і витратоміра з обчислювачем витрати та кількості середовища. Відмінним є спосіб нормування похибки такого витратоміра. Похибку вимірювального комплексу, який складається з обчислювача, вимірювальних перетворювачів перепаду тиску, тиску, температури нормують як похибку єдиного комплектного засобу вимірювань. Для цього на входах вимірювальних перетворювачів параметрів середовища за допомогою зразкових засобів формують зразкові значення параметрів. За показами обчислювача отримують вимірне значення витрати. Вимірне значення витрати порівнюють із зразковим значенням витрати, що обчислене за допомогою сертифікованого програмного пакету.

Проектування та розрахунок витратомірів змінного перепаду тиску виконують згідно вимог комплексу міждержавних стандартів ДСТУ ГОСТ 8.586.1-5:2009 [33-37]. В стандарті наведено рівняння витрати та його коефіцієнтів, умови застосування усіх складових витратоміра змінного перепаду тиску.

Скорочення прямолінійних ділянок ВТ призводить до появи додаткових систематичних похибок витратоміра. Тому під час проектування витратоміра важливо дотриматись вимог щодо довжин прямолінійних ділянок. Для витратомірів змінного перепаду тиску зі стандартними звужувальними пристроями вимоги щодо довжин прямолінійних ділянок та конфігурації ВТ також наведені в ДСТУ ГОСТ 8.586.1-5:2009 [33-37]. Вимоги щодо довжин прямолінійних ділянок та конфігурації ВТ для діафрагм наведено у ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 [33], для сопел - в ДСТУ ГОСТ 8.586.3:2009 [34], для труб Вентурі – в ДСТУ ГОСТ 8.586.4:2009 [35].

Для кожного виду ЗВ необхідно виконати вимоги щодо розміщення трьох місцевих опорів перед звужувальним пристроєм та першого місцевого опору після ЗВ. Крім того, окремі вимоги стосуються розміщення та конструктивних характеристик гільзи термоперетворювача. Важливо також врахувати вимоги до

різниці діаметрів суміжних секцій трубопроводу та зміщення цих секцій (уступів). Тому задача проектування ВТ витратоміра є складною, передбачає комбіноване застосування великої кількості умов та вимог і в окремих випадках складно піддається автоматизації. Відповідно одним із завдань цієї роботи є автоматизація проектування вимірювальних трубопроводів витратомірів змінного перепаду тиску.

Проектування витратомірів змінного перепаду тиску передбачає виконання таких задач [39]:

- 1) вибір ЗВ та його геометричних характеристик (оптимальний за точністю вимірювання витрати);
- 2) визначення геометричних характеристик трубопроводу (розміщення місцевих опорів, довжини прямолінійних ділянок ВТ);
- 3) розрахунок параметрів витратоміра;
- 4) вибір конфігурації витратоміра;
- 5) параметричну та структурну оптимізацію витратоміра.

З точки зору проектування витратоміри змінного перепаду тиску є складними тому що:

- витрата та інші параметри, що входять у рівняння витрати є взаємно залежними, зокрема, коефіцієнт витікання C , коефіцієнт шорсткості $K_{ш}$ є функціями числа Рейнольдса, а відповідно і витрати; тому під час розрахунку витрати необхідно реалізувати ітераційний процес її обчислення;

- для реалізації рівняння витрати необхідно обчислити параметри фізичних властивостей середовища (коефіцієнт стисливості, густину, показник адіабати, в'язкість); методи обчислення цих параметрів базуються на рівняннях стану газоподібних чи рідких середовищ; розв'язування рівнянь стану потребує застосування числових методів;

- рівняння для обчислення коефіцієнта витікання ЗВ C отримані для умов незбуреного потоку із симетричним неспотвореним профілем швидкості потоку; такі умови забезпечують за допомогою встановлення перед витратоміром прямолінійної ділянки трубопроводу визначеної довжини; тому для коректного

застосування математичної моделі витратоміра необхідно спроектувати вимірювальну ділянку трубопроводу відповідно до вимог діючих стандартів.

Тому застосування САПР витратомірів змінного перепаду тиску дозволяє підвищити точність розрахунків, якість технологічної документації, а також дозволяє скоротити процес проектування. В Україні метод змінного перепаду тиску є одним із небагатьох, що повністю стандартизований.

Для проектування витратомірів змінного перепаду тиску в Україні користуються САПР "Расход-РУ" [40]. Дана САПР забезпечена інтерактивними можливостями, завдяки чому в процесі розрахунку і проектування витратоміра кожен крок користувача аналізується і, в разі його помилки або будь-яких неправильних дій, САПР видає користувачеві відповідні підказки або рекомендації. Інтерактивність САПР полягає також у видачі рекомендацій з проектування витратомірів, реалізація яких забезпечить можливість спроектувати витратомір, відповідно до вимог комплексу стандартів ДСТУ ГОСТ 8.586.1-5:2009 [33-37] і, крім того, зменшити невизначеність результату вимірювання витрати. Запропоновані програмою рекомендації повинні реалізуватися шляхом відповідної корекції вхідних даних і їх подальшого введення.

САПР «Расход-РУ» дозволяє виконати чотири види розрахунків параметрів витратоміра, зокрема:

1. за заданим значенням верхньої границі вимірювання перепаду тиску;
2. за заданим значенням допустимої втрати тиску на звужувальному пристрої;
3. розрахунок параметрів витратоміра, який забезпечує мінімальну невизначеність результату вимірювання витрати середовища;
4. за заданими характеристиками ЗВ і ВТ.

Необхідною умовою побудови точного витратоміра змінного перепаду тиску є оптимальний вибір конструктивних характеристик ЗВ.

Оскільки в нормативних документах [33-37] вибір діаметра отвору ЗВ строго не регламентований, то існує певний діапазон його значень властивий для конкретного вузла та конкретних технологічних умов. Вибір діаметра отвору із

цього допустимого діапазону необхідно здійснити таким чином, щоб забезпечити мінімально можливу похибку вимірювання витрати в робочих умовах. Основні положення розрахунку оптимальних звужувальних пристроїв (оптимальної діафрагми) розроблені у ряді робіт, зокрема у праці [41]. Методика розрахунку викладена у [42], де наведені аналітичні залежності, які дозволяють обчислити відносний діаметр оптимальної за точністю вимірювання витрати діафрагми.

Методика розрахунку звужувальних пристроїв, які забезпечують мінімальну невизначеність вимірюваного значення витрати, базується на тому, що залежність невизначеності витрати від відносного діаметра отвору ЗВ має чітко виражений мінімум. До складових невизначеності результату вимірювання витрати середовища, які залежать від конструкції ЗВ, а саме від його відносного діаметра β , належать наступні :

- відносна розширена невизначеність U'_C (далі невизначеність) коефіцієнта витікання C , яка має для діафрагм мінімум відносно β (див. рис.1.2) ;

- невизначеність $U'_{K_{ш}}$ поправкового коефіцієнта $K_{ш}$ на шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу. Із зростанням значення відносного діаметра ЗВ невизначеність $U'_{K_{ш}}$ зростає (див. рис. 1.2);

- невизначеність $U'_{K_{п}}$ поправкового коефіцієнта $K_{п}$ на притуплення вхідного канта отвору діафрагми, яка зменшується із збільшенням значення відносного діаметра β отвору діафрагми;

- складова невизначеності U'_D результату вимірювання внутрішнього діаметра трубопроводу сумісно з коефіцієнтом впливу, тобто $\left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4}\right)U'_D$, збільшується із збільшенням відносного діаметра β ЗВ;

- складова невизначеності U'_d результату вимірювання діаметра отвору або горловини ЗВ сумісно з коефіцієнтом впливу, тобто $\left(\frac{2}{1-\beta^4}\right)U'_d$, незначно зростає із збільшенням відносного діаметра ЗВ;

- невизначеність U'_ε коефіцієнта розширення середовища, яка із збільшенням відносного діаметра ЗВ зменшується.

Як бачимо, похибка вимірювання витрати, яка залежить від конструктивного параметра ЗВ, а саме відносного діаметра β , має явно виражений мінімум (див. рис. 1.2). Отже розрахунок ЗВ оптимального за точністю вимірювання витрати полягає в тому, щоб знайти параметри ЗВ, які відповідають мінімуму залежності U'_q від β .

Залежності складових похибки вимірювання витрати від відносного діаметру ЗВ β , показані на рис. 1.2, побудовані на основі залежностей ДСТУ ГОСТ 8.586.5-2009.

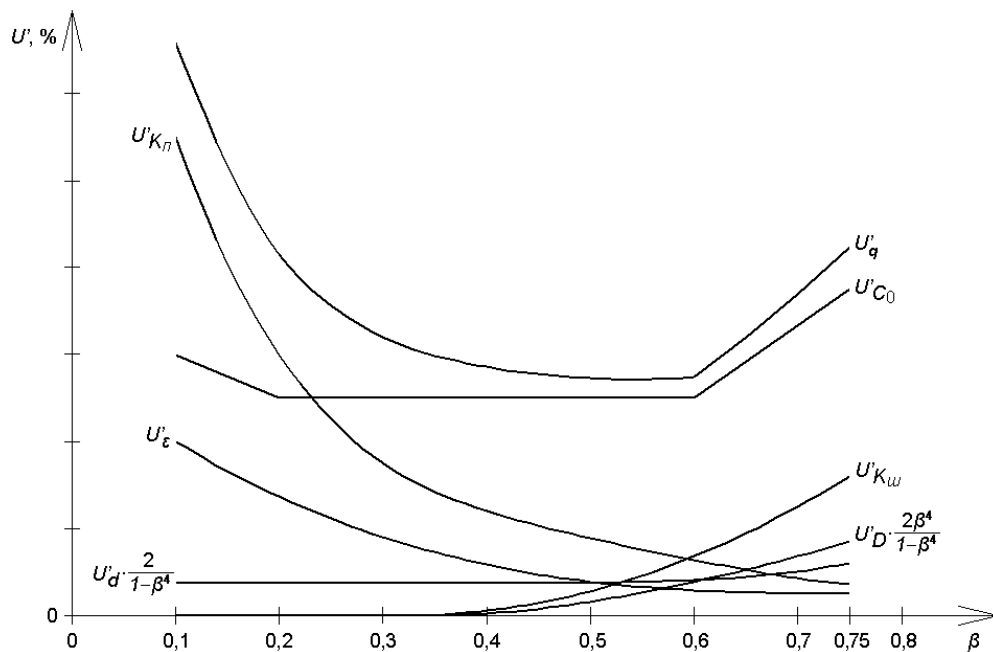


Рисунок 1.2. Залежності складових невизначеностей вимірюваного значення витрати від відносного діаметра ЗВ β : U'_q – відносна розширена невизначеність вимірюваного значення витрати; U'_{C_0} – невизначеність коефіцієнта витікання C ; $U'_{K_{ш}}$ – невизначеність поправкового коефіцієнта $K_{ш}$ на шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу; $U'_{K_{п}}$ – невизначеність поправкового коефіцієнта $K_{п}$ на притуплення вхідного канта отвору діафрагми; U'_D – невизначеність результату вимірювання внутрішнього діаметра трубопроводу; U'_d – невизначеність результату вимірювання діаметра отвору або горловини ЗВ; U'_ε – невизначеність коефіцієнта розширення середовища.

Методика розрахунку оптимального за точністю вимірювання витрати ЗВ реалізована у САПР «Расход - РУ» [42].

САПР «Расход - РУ» здійснює розрахунок невизначеності вимірювання витрати для вибраного програмою діапазону зміни відносного діаметра β та формує звіт про розрахунок.

Таким чином, САПР дозволяє автоматизувати процес розрахунку і проектування витратомірів змінного перепаду тиску та виконати всі необхідні перевірки умов застосування методу змінного перепаду тиску згідно з ДСТУ ГОСТ 8.586.1-5:2009 [33-37].

Ще однією близькою за своїми характеристиками до САПР "Расход-РУ" є програма «Arian ISO-5167 Flow CAD software» компанії «Arian Control & Instrumentation»[43]. Програмне забезпечення Arian Flow Cad дає можливість спроектувати систему вимірювання витрати за методом змінного перепаду тиску на основі стандартних звужувальних пристроїв (таких як діафрагми, сопла і труби Вентурі), відповідно до вимог стандарту ISO 5167 [44].

Однак вказані вище САПР не призначені для проектування систем вимірювання кількості ТЕ. Отже на сьогодні відсутні спеціалізовані програмні пакети, призначені для проектування систем вимірювання кількості ТЕ, тому розроблення САПР засобів вимірювання кількості ТЕ є актуальним завданням.

1.2 Виділення невирішених завдань, визначення напрямків досліджень та формулювання завдань розроблення системи автоматизованого проектування

За результатами огляду науково-технічної літератури щодо стану обліку кількості теплової енергії, нормативного забезпечення систем вимірювання кількості теплової енергії та процесу їх проектування, встановлено:

- під час вимірювання кількості теплової енергії залежно від виду теплової мережі, типу об'єкта (споживач або теплогенеруючий об'єкт), виду теплоносія застосовують різні схеми вимірювання кількості теплової енергії; однак відсутня чітка класифікація схем систем вимірювання кількості теплової енергії; у відомих джерелах представлені залежності, які дають можливість реалізувати обчислення кількості теплової енергії для різних структур систем обліку кількості ТЕ, що зустрічаються в практиці експлуатації об'єктів генерування ТЕ; однак, в цих джерелах не враховано всі особливості структури систем теплопостачання споживачів, тому необхідним є подальший аналіз схем теплопостачання споживачів та уточнення рівнянь для обчислення кількості ТЕ в таких системах;

- у науково-технічних джерелах, зокрема, у роботах Міжнародної організації властивостей води, водяної пари представлено методики обчислення густини, ентальпії, теплоємності, в'язкості води та водяної пари для області параметрів, що охоплює значення параметрів теплоносія під час обліку теплової енергії; однак, у відомих джерелах відсутня методика розрахунку показника адіабати перегрітої водяної пари;

- для розроблення системи автоматизованого проектування засобів вимірювання кількості теплової енергії необхідно розробити математичну модель системи вимірювання кількості теплової енергії, яка дасть можливість визначати вимірюване значення кількості теплової енергії на основі конструктивних характеристик складових системи з урахуванням значень параметрів стану теплоносія;

- в більшості конфігурацій систем обліку теплової енергії теплофізичні параметри води та водяної пари обчислюються в реальному часі на основі виміряних значень тиску і температури. Відповідно розрахунок кількості теплової енергії виконується на основі обчислених значень параметрів теплоносія та виміряних значень параметрів потоку. За умови застосування такого способу побудови систем обліку теплової енергії істотним є вплив невизначеностей результату обчислення теплофізичних властивостей

теплоносія на невизначеність вимірюваного значення кількості теплової енергії. Для застосування результатів обчислення теплофізичних властивостей води (водяної пари) у системах обліку теплової енергії, необхідно оцінити невизначеність обчислення цих параметрів. Тому актуальним є завдання розроблення залежностей для оцінювання невизначеності ентальпії, для їх застосування під час оцінювання невизначеності кількості теплової енергії;

- у жодному з відомих джерел немає методики оцінювання похибки (невизначеності результату вимірювання) кількості теплової енергії. Згідно з вимогами Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [1] результати вимірювань можуть бути використані у сфері законодавчо регульованої метрології тільки за умови, що для таких результатів відомі відповідні характеристики похибок або невизначеність вимірювань, тому розроблення таких методик є вкрай необхідним;

- для розроблення програмного комплексу для автоматизованого проектування систем вимірювання кількості теплової енергії необхідно запропонувати нові підходи щодо автоматизованого проектування систем вимірювання кількості теплової енергії, що дають можливість реалізувати розрахунок конструктивних та метрологічних характеристик системи вимірювання кількості теплової енергії із врахуванням технологічних та нормативних обмежень; розробити алгоритми розрахунку кількості теплової енергії для систем із застосуванням витратомірів змінного перепаду тиску.

Отже, для досягнення сформованої у роботі мети, а саме формування теоретичних засад проектування систем вимірювання кількості теплової енергії та розроблення програмного пакету для проектування систем вимірювання кількості теплової енергії, в складі яких для вимірювання витрати теплоносія застосовують витратоміри змінного перепаду тиску зі стандартними звужувальними пристроями, необхідно виконати такі завдання:

- провести аналіз типових схем систем вимірювання кількості теплової енергії та виконано їх класифікацію;

- розробити спрощений алгоритм розрахунку показника адіабати перегрітої пари для автоматизованих систем вимірювання кількості теплової енергії;

- на основі повної математичної моделі витратоміра змінного перепаду тиску, рівнянь визначення кількості теплової енергії та рівнянь визначення властивостей теплоносія розробити математичну модель системи вимірювання кількості теплової енергії;

- розробити рівняння для розрахунку невизначеності ентальпії води (водяної пари), що дасть можливість врахувати методичну невизначеність розрахунку ентальпії та невизначеності параметрів стану води (водяної пари);

- розробити рівняння невизначеності вимірюваного значення кількості теплової енергії;

розробити алгоритми розрахунку кількості теплової енергії для систем із застосуванням витратомірів змінного перепаду тиску;

- запропонувати нові підходи щодо автоматизованого проектування систем вимірювання кількості теплової енергії, що дають можливість реалізувати розрахунок конструктивних та метрологічних характеристик системи вимірювання кількості теплової енергії із врахуванням технологічних та нормативних обмежень;

- розробити програмний комплекс для автоматизованого проектування систем вимірювання кількості теплової енергії.

Висновки до розділу 1

1. Визначено основні недоліки галузі тепlopостачання, зокрема, відсутність повного вимірювання характеристик теплових потоків, починаючи від джерел генерації ТЕ та завершуючи її споживачами, як наслідок невідповідність тарифів реальним витратам на виробництво і постачання ТЕ; зношеність і застарілість систем тепlopостачання міст; відсутність нормативної бази, зокрема затвердженої у встановленому порядку методики визначення кількості ТЕ; методики

оцінювання невизначеності результату вимірювання кількості ТЕ. Зміна ситуації можлива за умови налагодження точного обліку ТЕ на всіх ділянках її виробництва, транспортування та споживання, що можливо тільки за наявності якісної нормативної бази та точних технічних засобів вимірювання кількості ТЕ. Налагодження точного обліку на основі вдосконалених методик та нормативних документів дозволить виявити проблемні ділянки, розробити заходи з реконструкції систем теплозабезпечення з метою підвищення їх економічної і енергетичної ефективності.

2. Проаналізовано нормативні документи, які встановлюють вимоги до метрологічних та технічних характеристик лічильників ТЕ та виявлено, що в цих документах не встановлено вимог до систем вимірювання витрати та кількості ТЕ, що складаються з мікропроцесорного обчислювача, витратомірів, вимірювальних перетворювачів тиску та температури, що виконані як окремі прилади.

3. Розглянуто переваги та недоліки витратомірів змінного перепаду тиску. Зокрема встановлено, що завдяки універсальності застосування, простоті реалізації первинного перетворювача витрати, стандартизації визначень, технічних вимог та методів виконання вимірювань, витратоміри змінного перепаду тиску набули широкого застосування в промислових вимірюваннях. Зокрема ці витратоміри широко застосовують в системах обліку ТЕ на промислових підприємствах та теплопостачальних організаціях. Тому актуальним є завдання автоматизації проектування систем вимірювання кількості ТЕ на основі витратомірів змінного перепаду тиску.

4. Проведено аналіз функціональних можливостей та основних характеристик САПР витратомірів змінного перепаду тиску, зокрема, САПР «Расход-РУ», Arian ISO-5167 Flow CAD software.

Встановлено, що існуючі програмні пакети не призначені для проектування систем вимірювання кількості ТЕ, тому розроблення САПР засобів вимірювання кількості ТЕ є актуальним завданням.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ КІЛЬКОСТІ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

2.1. Аналіз структури та функціональних ознак систем вимірювання кількості теплової енергії, їх класифікація

В залежності від потужності джерела теплової енергії розрізняють наступні види систем тепlopостачання: централізовані (більше 20 МВт), децентралізовані (від 1 до 3 МВт) і автономні (менше 1 МВт) [6].

Централізоване тепlopостачання є основним видом тепlopостачання будівель соціально-бюджетної сфери та адміністративних будівель. Перевагами таких систем тепlopостачання є: оснащення теплогенеруючих об'єктів системами безпеки, які забезпечують зупинку роботи обладнання в разі виникнення неприпустимих відхилень технологічних параметрів від заданих значень, що позитивно позначається на надійності такого варіанту тепlopостачання; безпечність для споживача, оскільки в житлові чи громадські приміщення не проникають шкідливі продукти згоряння.

Однак недоліки у такого способу тепlopостачання також є, і найбільш суттєві серед них це значні втрати тепла в таких системах, складність самостійного регулювання обсягів споживання тепла, розбалансування системи при зміні теплового навантаження (нові підключення, відключення, термомодернізація будівель).

Щодо систем децентралізованого тепlopостачання, то їх основними перевагами є зменшення втрат в теплових мережах [45] та витрат на обслуговування мереж і стійкість до змін теплового навантаження.

В автономних системах тепlopостачання, у яких джерело теплової енергії наявне безпосередньо у споживача (приватні будинки) засоби обліку теплової енергії, як правило не встановлюють. Однак для об'єктів обладнаних

індивідуальним тепловим пунктом (багатоквартирні будинки) встановлення вузлів обліку є необхідним.



Рис.2.1 Класифікація систем тепlopостачання

З огляду на вказані переваги та недоліки централізованих та децентралізованих систем тепlopостачання очевидно, що в таких системах необхідно проводити реконструкцію та модернізацію, забезпечувати точний комерційний облік кількості теплової енергії об'єктів тепlopостачання. Тільки таким чином можна звести баланс кількості теплової енергії відпущеної з джерел генерації тепла та теплової енергії розподіленої споживачам, а також визначити втрати енергії в теплових мережах.

Системи тепlopостачання за видом теплоносія поділяють на водяні та парові. Водяні системи тепlopостачання застосовуються для задоволення потреб споживачів щодо забезпечення санітарно-гігієнічних вимог температури в приміщеннях, вентиляції і гарячого водопостачання, а парові системи - для забезпечення технологічних потреб промислових підприємств. Вид теплоносія

визначає такі характеристики системи вимірювання кількості теплової енергії: тип та характеристики витратоміра, алгоритми розрахунку властивостей теплоносія, які необхідно врахувати під час розроблення систем обліку кількості теплової енергії.

За кількістю паралельно прокладених трубопроводів системи тепlopостачання поділяють на однотрубні, двотрубні, багатотрубні.

За способом використання мережної води системи тепlopостачання поділяють на дві групи – відкриті та закриті.

У відкритих системах тепlopостачання вода частково або повністю відбирається із системи споживачами теплової енергії.

Закрита – система тепlopостачання, в якій теплоносій, який циркулює в системі, із мережі не відбирається [46].

За схемою приєднання до теплової мережі системи тепlopостачання бувають двох видів: залежні (рис.2.2) – в яких теплоносій із теплової мережі надходить безпосередньо в систему теплоспоживання.

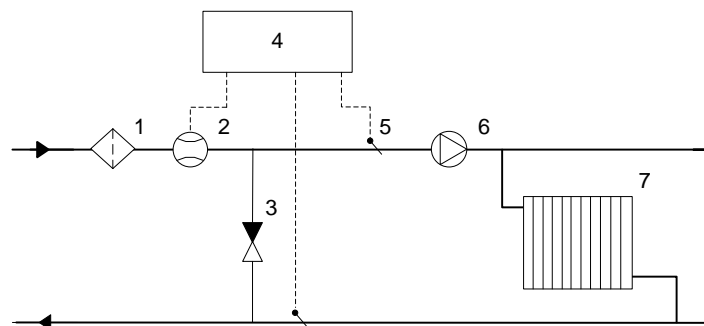


Рис.2.2 Принципова схема залежної системи тепlopостачання

1 – фільтр; 2 – витратомір; 3 – зворотний клапан; 4 – тепловий лічильник; 5 – первинний вимірювальний перетворювач температури; 6 – насос; 7 – опалювальний прилад

Незалежні (рис.2.3) – теплоносій із теплової мережі нагріває через теплообмінний апарат (водонагрівач) вторинний теплоносій, який подають в систему теплоспоживання.

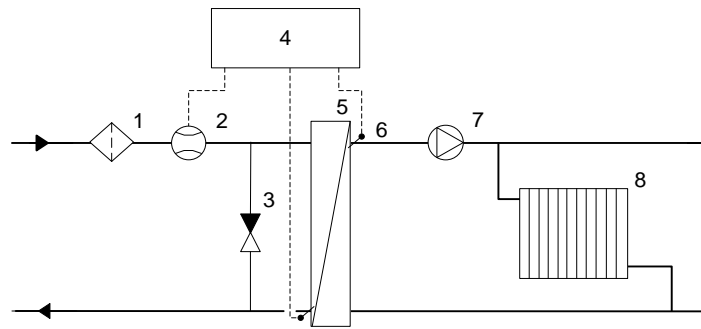


Рис.2.3. Принципова схема незалежної системи теплопостачання

1 – фільтр; 2 – витратомір; 3 – зворотний клапан; 4 – тепловий лічильник; 5 – теплообмінник 6 – первинний вимірювальний перетворювач температури; 7 – насос; 8 – опалювальний прилад

Структура системи вимірювання кількості теплової енергії, а відповідно й рівняння визначення кількості теплової енергії залежать від схеми розташування вимірювальних перетворювачів.

Проаналізуємо структуру систем вимірювання кількості теплової енергії на основних елементах централізованого теплопостачання, а саме:

- на виході джерела теплопостачання;
- в точках передавання теплової енергії безпосереднім споживачам.

Кількість теплової енергії, яка переноситься потоком теплоносія у трубопроводі за певний проміжок часу, визначають шляхом інтегрування добутку витрати теплоносія на ентальпію:

$$W = \int_{t_0}^{t_k} (q \cdot h) dt \quad (2.1)$$

де, W – кількість теплової енергії, яку передано від джерела або отримано споживачем; q – масова витрата теплоносія; h - питома ентальпія теплоносія, яка є функцією його параметрів (тиску та температури), $h = f(T, P)$; $t = t_k - t_0$ – інтервал часу обчислення кількості теплової енергії;

Однак, на практиці необхідно визначати не загальну кількість енергії, яку переносить потік теплоносія, а кількість, яка була відібрана від цього потоку. Зокрема для системи теплопостачання з двома витратомірами, встановленими у

подавальному і зворотному трубопроводах, кількість теплової енергії, яку отримано споживачем від джерела за певний інтервал часу, обчислюють як різницю кількості енергії що надходить подавальним трубопроводом і повертається зворотним трубопроводом:

$$W = \int_{t_0}^{t_k} q_{m1} h_1 dt - \int_{t_0}^{t_k} q_{m2} h_2 dt \quad (2.2)$$

де q_{m1} , q_{m2} – масова витрата теплоносія, відповідно у подавальному та зворотному трубопроводах;

h_1 , h_2 – питома ентальпія теплоносія у подавальному і зворотному трубопроводах.

Отже, для точного вимірювання кількості теплової енергії, що відібрана з такої системи тепlopостачання необхідно виміряти витрату теплоносія, його тиск та температуру в кожному з трубопроводів. В такому випадку потрібно застосувати велику кількість ЗВТ, що в свою чергу суттєво збільшує вартість системи вимірювання кількості теплової енергії, а також вартість її обслуговування. Тому під час розроблення системи вимірювання кількості теплової енергії для конкретних технологічних умов намагаються спростити їх структуру та зменшити кількість застосованих засобів вимірювання, погоджуючись на деяке підвищення похибки вимірювання кількості теплової енергії.

Відомі наступні реалізації спрощених СВК ТЕ:

1. Витрати теплоносія в подавальному та зворотному трубопроводі рівні, $Q_1=Q_2$ (для закритих систем):

$$W = \int_{t_0}^{t_k} Q(h_1 - h_2) dt \quad (2.3)$$

В таких системах застосовують один витратомір та вимірювальні перетворювачі тиску і температури в подавальному та зворотному трубопроводах.

2. Витрати теплоносія в подавальному та зворотному трубопроводі рівні, тиск в подавальному та зворотному трубопроводах постійний $h_1 = f(T_{\text{пр}}, P_{1\text{const}})$, $h_2 = f(T_{\text{зв}}, P_{2\text{const}})$.

$$W = \int_{t_0}^{t_k} Q(h_1(T_{\text{пр}}, P_{1\text{const}}) - h_2(T_{\text{зв}}, P_{2\text{const}})) dt \quad (2.4)$$

В таких системах застосовують один витратомір та вимірювальні перетворювачі температури в подавальному та зворотному трубопроводах. За такою структурою побудовано більшість систем обліку ТЕ невеликих споживачів.

Кількість теплової енергії W , відпущеної від джерела генерації теплової енергії в двотрубну магістраль теплової мережі, в залежності від розміщення витратоміра обчислюють за такими формулами [47]:

а) при використанні витратомірів на подавальному та підживлювальному трубопроводах:

$$W = \int_{t_0}^{t_k} q_1(h_1 - h_2)dt + \int_{t_0}^{t_k} q_{\text{п}}(h_2 - h_{\text{хв}})dt \quad (2.5)$$

де $q_{\text{п}}$ - масова витрата теплоносія, використаного на підживлення системи тепlopостачання;

$h_{\text{хв}}$ - питома ентальпія холодної води;

б) при використанні витратомірів на зворотному та підживлювальному трубопроводах:

$$W = \int_{t_0}^{t_k} q_2(h_1 - h_2)dt + \int_{t_0}^{t_k} q_{\text{п}}(h_2 - h_{\text{хв}})dt \quad (2.6)$$

де q_2 - масова витрата теплоносія у зворотному трубопроводі;

в) при використанні витратомірів на подавальному та зворотному трубопроводі:

$$W = \int_{t_0}^{t_K} q_1(h_1 - h_{XB})dt - \int_{t_0}^{t_K} q_2(h_2 - h_{XB})dt \quad (2.7)$$

Кількість теплової енергії, витраченої на гаряче водопостачання (рис.2.4) можна обчислити за формулою [47]:

$$W = \int_{t_0}^{t_K} q_{ГВП}(h_{ГВ} - h_{XB})dt - \int_{t_0}^{t_K} q_{Ц}(h_{Ц} - h_{XB})dt \quad (2.8)$$

де $q_{ГВП}$ - масова витрата теплоносія в подавальному трубопроводі гарячого водопостачання;

$h_{ГВ}$ - питома ентальпія теплоносія в подавальному трубопроводі гарячого водопостачання;

$q_{Ц}$ - масова витрата теплоносія в циркуляційному (зворотному) трубопроводі;

$h_{Ц}$ - питома ентальпія теплоносія в циркуляційному (зворотному) трубопроводі гарячого водопостачання;

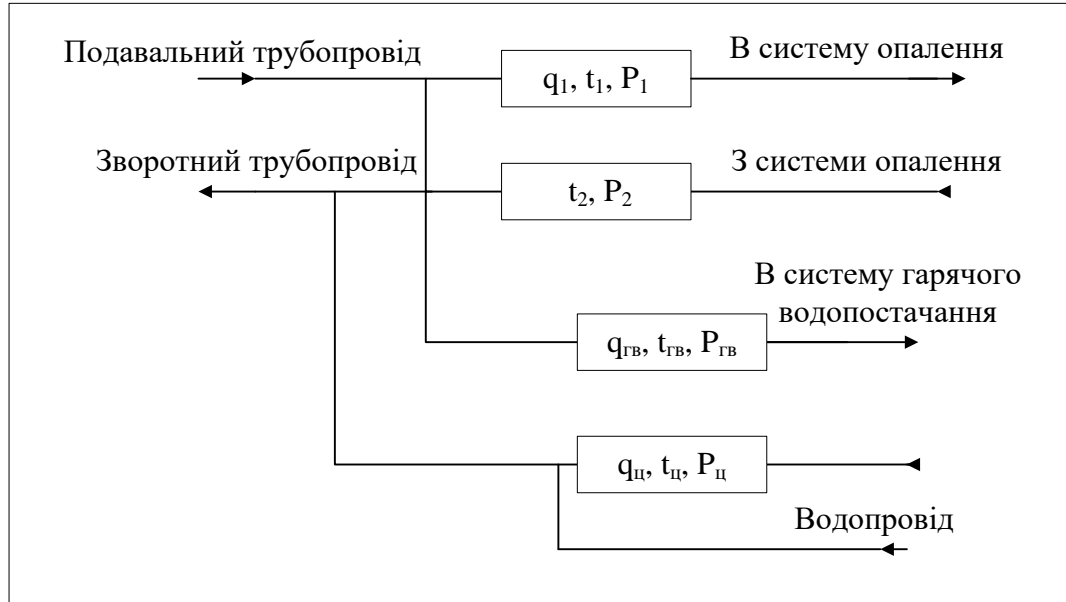


Рис.2.4 Принципова схема вузла обліку системи опалення та гарячого водопостачання

В загальному випадку на джерелі ТЕ може бути різна кількість подавальних, зворотних трубопроводів а також трубопроводів підживлення із різних джерел.

Система обліку ТЕ повинна враховувати всі потоки теплоносія. Для такого загального випадку рівняння обчислення кількості ТЕ має вигляд [47]:

$$W = \sum_{i=1}^a \int_{t_0}^{t_k} q_{1i} h_{1i} dt - \sum_{j=1}^b \int_{t_0}^{t_k} q_{2j} h_{2j} dt - \sum_{p=1}^m \int_{t_0}^{t_k} q_{\text{пр}} h_{\text{хвп}} dt \quad (2.9)$$

де a - кількість подавальних трубопроводів;

b - кількість зворотних трубопроводів;

m - кількість вузлів обліку на підживлювальних трубопроводах;

$q_{\text{пр}}$ - масова витрата теплоносія, використаного на підживлення системи по кожному підживлювальному трубопроводі.

Формули (2.5) - (2.9) дають можливість реалізувати обчислення кількості теплової енергії для різних структур систем вимірювання, що зустрічаються в практиці експлуатації об'єктів генерування теплової енергії.

Наведена класифікація систем обліку є умовною і лише одним з параметрів, за допомогою якого вибирається формула розрахунку кількості теплової енергії при налаштуванні параметрів вузла обліку.

Облік теплової енергії у споживачів ТЕ

В закритих системах теплоспоживання (рис.2.5), розрахункове теплове навантаження якої становить менше 2,5 МВт, в яких відсутній відбір теплоносія на ділянці між витратомірами на подавальному і зворотному трубопроводах ($q_1=q_2$) кількість теплової енергії можна обчислити згідно наведених нижче формул [48]:

$$W = \int_{t_0}^{t_k} q_1 (h_1 - h_2) dt \quad (2.10)$$

$$W = \int_{t_0}^{t_k} q_2 (h_1 - h_2) dt \quad (2.11)$$

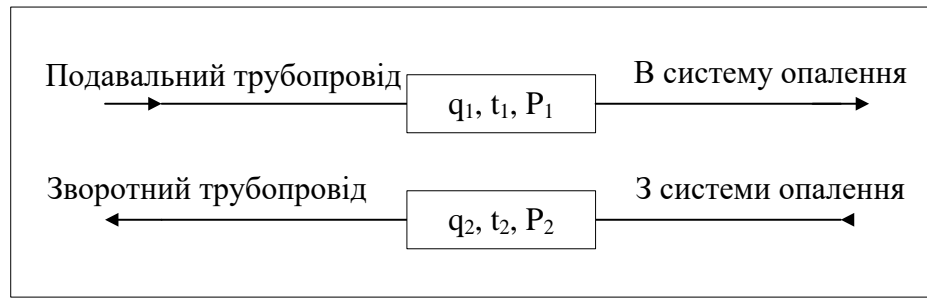


Рис.2.5 Закрита система теплопостачання з витратоміром в подавальному та зворотному трубопроводах і вимірюванням W через q_1 або q_2

Для визначення кількості теплової енергії W у закритих чи відкритих системах теплоспоживання, розрахункове теплове навантаження якої становить 2,5 МВт і більше доцільно застосовувати одне з наступних рівнянь [48]:

$$W = \int_{t_0}^{t_k} q_1(h_1 - h_{XB})dt - \int_{t_0}^{t_k} q_2(h_2 - h_{XB})dt \quad (2.12)$$

$$W = \int_{t_0}^{t_k} q_1 h_1 dt - \int_{t_0}^{t_k} q_2 h_2 dt - \int_{t_0}^{t_k} (q_1 - q_2) h_{XB} dt \quad (2.13)$$

$$W = \int_{t_0}^{t_k} q_2(h_1 - h_2)dt + \int_{t_0}^{t_k} (q_1 - q_2)(h_1 - h_{XB})dt \quad (2.14)$$

$$W = \int_{t_0}^{t_k} q_1(h_1 - h_2)dt + \int_{t_0}^{t_k} (q_1 - q_2)(h_2 - h_{XB})dt \quad (2.15)$$

Таблиця 2.1

Рівняння розрахунку кількості теплової енергії для поширених схем теплопостачання

Схема	Вимірювання витрати теплоносія для розрахунку кількості ТЕ				Рівняння розрахунку кількості ТЕ
	Q_1	Q_2	Q_3	Q_n	
Закрита ($\leq 2,5$ МВт)	+	-	-	-	$W = \int_{t_0}^{t_k} Q_1(h_1 - h_2)dt$
	-	+	-	-	$W = \int_{t_0}^{t_k} Q_2(h_1 - h_2)dt$

Закрита/Відкрита ($\geq 2,5$ МВт)	+	+	-	-	$W = \int_{t_0}^{t_k} q_1(h_1 - h_{XB})dt - \int_{t_0}^{t_k} q_2(h_2 - h_{XB})dt$
		+	-		$W = \int_{t_0}^{t_k} q_1 h_1 dt - \int_{t_0}^{t_k} q_2 h_2 dt - \int_{t_0}^{t_k} (q_1 - q_2) h_{XB} dt$
		+	--		$W = \int_{t_0}^{t_k} q_2(h_1 - h_2)dt + \int_{t_0}^{t_k} (q_1 - q_2)(h_1 - h_{XB})dt$
		+	-	-	$W = \int_{t_0}^{t_k} q_1(h_1 - h_2)dt + \int_{t_0}^{t_k} (q_1 - q_2)(h_2 - h_{XB})dt$
Джерело ТЕ	+	-	-	+	$W = \int_{t_0}^{t_k} q_1(h_1 - h_2)dt + \int_{t_0}^{t_k} q_{II}(h_2 - h_{XB})dt$
	-	+	-	+	$W = \int_{t_0}^{t_k} q_2(h_1 - h_2)dt + \int_{t_0}^{t_k} q_{II}(h_2 - h_{XB})dt$
	+	+	-	-	$W = \int_{t_0}^{t_k} q_1(h_1 - h_{XB})dt - \int_{t_0}^{t_k} q_2(h_2 - h_{XB})dt$
	+	+	-	+	$W = \sum_{i=1}^a \int_{t_0}^{t_k} q_{1i} h_{1i} dt - \sum_{j=1}^b \int_{t_0}^{t_k} q_{2j} h_{2j} dt - \sum_{p=1}^m \int_{t_0}^{t_k} q_{pp} h_{XBp} dt$

Для визначення відпущеної теплової енергії тепlopостачальними організаціями споживачам, у яких тимчасово відсутні прилади обліку для проведення комерційних та інших розрахунків можуть бути застосовані Норми та вказівки по нормуванню витрат палива та теплової енергії на опалення житлових та громадських споруд, а також на господарсько-побутові потреби в Україні [49].

Точність вимірювання кількості теплової енергії згідно наведених вище формул є різною, оскільки залежить від місця встановлення вимірювальних перетворювачів, їх характеристик та умов експлуатації.

Як видно з таблиці 2.1, рівняння для обчислення кількості теплової енергії містять складові, які є результатом інтегрування добутку витрати теплоносія на різницю ентальпій потоку теплоносія у різних точках схеми тепlopостачання. Отже, основою алгоритму обчислення кількості теплової енергії для будь-якої структури системи вимірювання її витрати та кількості є алгоритм обчислення

інтегральної кількості енергії між двома точками системи теплопостачання, який реалізує рівняння [50]:

$$W = \int_{t_0}^{t_k} q_w dt = \int_{t_0}^{t_k} Q_m (h_1 - h_2) dt \quad (2.16)$$

де q_w – потік теплової енергії Q_m – масова витрата теплоносія, $Q_1 = Q_2 = Q_m$; h_1 – питома ентальпія теплоносія в подавальному трубопроводі; h_2 – питома ентальпія теплоносія в зворотному трубопроводі; $t=t_k - t_0$ – інтервал часу обчислення кількості теплової енергії.

Отже, згідно рівняння (2.16) для точного вимірювання кількості теплової енергії, яка переноситься потоком теплоносія, необхідно визначати витрату теплоносія Q_m , ентальпію теплоносія в подавальному трубопроводі $h_1 = f(T_{\text{п}}, P_{\text{п}})$ та ентальпію теплоносія в зворотному трубопроводі $h_2 = f(T_{\text{зв}}, P_{\text{зв}})$. Тому до складу системи вимірювання кількості теплової енергії повинен входити витратомір, вимірювальні перетворювачі тиску та температури теплоносія у подавальному трубопроводі $(T_{\text{п}}, P_{\text{п}})$, вимірювальні перетворювачі тиску та температури теплоносія у зворотному трубопроводі $(T_{\text{зв}}, P_{\text{зв}})$.

Вище класифіковано структури систем вимірювання кількості теплової енергії та відповідні їм рівняння обчислення кількості теплової енергії за видом технологічної схеми теплопостачання. Залежно від приладового виконання кожна з таких структур може бути реалізована:

1. з обчислювачем кількості теплової енергії;
2. з роздільним вимірюванням параметрів потоку;
3. з єдиним лічильником теплової енергії.

Для системи вимірювання кількості ТЕ з обчислювачем, сигнали від вимірювальних перетворювачів параметрів середовища надходять до мікропроцесорного обчислювача, який за миттєвими значеннями цих параметрів розраховує миттєве значення кількості ТЕ. Обчислювач розраховує значення кількості плинного середовища упродовж інтервалу вимірювання шляхом інтегрування масиву значень витрати. Характерною особливістю цієї конфігурації

системи є те, що похибку кожного із засобів вимірювань нормують окремо, а невизначеність результату вимірювання кількості ТЕ визначають на основі похибок окремих засобів вимірювань.

У разі застосування системи вимірювання кількості ТЕ з роздільним вимірюванням параметрів потоку виміряне значення кожного параметра (перепаду тиску, тиску та температури) реєструють упродовж інтервалу вимірювання. Значення кількості ТЕ обчислюють за усередненими значеннями параметрів плинного середовища.

Структура системи вимірювання кількості ТЕ з єдиним лічильником теплової енергії може бути такою ж, як і системи вимірювання кількості ТЕ з обчислювачем витрати та кількості середовища. Відмінним є спосіб нормування похибки такої системи. Похибку єдиного теплотлічильника, який складається з обчислювача, вимірювальних перетворювачів перепаду тиску, тиску, температури нормують як похибку єдиного комплектного засобу вимірювань.

Незалежно від структури системи вимірювання кількості теплової енергії вона повинна реалізувати певний набір функцій, який є достатнім для формування та зручного представлення значення кількості теплової енергії. До цього набору слід віднести такі функції:

- 1) вимірювання параметрів теплоносія у кожному з трубопроводів (подавальному, зворотному, підживлення, гарячого водопостачання);
- 2) обчислення кількості теплової енергії;
- 3) формування архівів (реєстрація) параметрів потоку, кількості теплової енергії;
- 4) переналагодження системи у випадку зміни умов її застосування чи заміни окремих апаратних компонентів, що призводить до зміни технічних характеристик системи; введення значень характеристик системи чи її компонентів в обчислювач кількості теплової енергії для конфігурації з обчислювачем;
- 5) представлення архівів параметрів потоку, кількості теплової енергії у вигляді зручних для читання технічних звітів;

б) виведення оперативних значень параметрів потоку, кількості теплової енергії на пристрої відображення (цифрові індикатори, дисплеї) за запитом технічного персоналу.

Під час проектування системи вимірювання кількості теплової енергії необхідно забезпечити реалізацію основного набору функцій, а також додаткових функцій зумовлених технологічними умовами і потребами користувача.

Система автоматизованого проектування засобів вимірювання кількості теплової енергії повинна мати діалоговий інтерфейс, який дає можливість під час проектування реалізувати основний та додатковий набір функцій.

2.2. Розроблення математичних моделей систем вимірювання кількості теплової енергії на основі витратомірів змінного перепаду тиску

Система вимірювання кількості ТЕ повинна враховувати параметри усіх наявних потоків теплоносія, кількість яких залежить від структури системи тепlopостачання. Узагальнене рівняння, яке дає можливість обчислити кількість ТЕ для різних структур, має вигляд [47]:

$$W = \sum_{i=1}^a \int_{t_0}^{t_k} q_{m1i} h_{1i} dt - \sum_{j=1}^b \int_{t_0}^{t_k} q_{m2j} h_{2j} dt - \sum_{p=1}^m \int_{t_0}^{t_k} q_{пп} h_{хвр} dt \quad (2.17)$$

де q_{m1i} , q_{m2j} – масові витрати теплоносія, відповідно у кожному подавальному та зворотному трубопроводах; $q_{пп}$ – масова витрата теплоносія, використаного на підживлення системи по кожному p -му підживлювальному трубопроводу; h_{1i} , h_{2j} – питома ентальпія теплоносія у кожному подавальному і зворотному трубопроводах; $h_{хвр}$ – питома ентальпія холодної води, яку використовують на підживлення системи; t_k , t_0 – межі інтервалу часу обчислення кількості ТЕ; a – кількість подавальних трубопроводів; b – кількість зворотних трубопроводів; m – кількість підживлювальних трубопроводів.

В роботі розглянуто найбільш поширену у практиці експлуатації мереж тепlopостачання схему систем обліку ТЕ з двома витратомірами, встановленими

у подавальному і зворотному трубопроводах, рівняння для визначення кількості ТЕ для вказаної схеми вимірювання має вигляд:

$$W = \int_{t_0}^{t_k} q_{m1} h_1 dt - \int_{t_0}^{t_k} q_{m2} h_2 dt \quad (2.18)$$

Отже, згідно рівняння (2.17) для точного вимірювання кількості теплової енергії, яка переноситься потоком теплоносія, необхідно визначати масові витрати теплоносія у всіх вимірювальних трубопроводах, ентальпію теплоносія в подавальному трубопроводі $h_1 = f(T_{\text{п}}, P_{\text{п}})$ та ентальпію теплоносія в зворотному трубопроводі $h_2 = f(T_{\text{зв}}, P_{\text{зв}})$. Тому до складу системи вимірювання кількості ТЕ повинен входити витратомір, вимірювальні перетворювачі тиску та температури теплоносія у подавальному трубопроводі ($T_{\text{п}}, P_{\text{п}}$), вимірювальні перетворювачі тиску та температури теплоносія у зворотному трубопроводі ($T_{\text{зв}}, P_{\text{зв}}$).

У багатьох системах обліку ТЕ для вимірювання витрати теплоносія застосовують витратоміри змінного перепаду тиску зі стандартними звужувальними пристроями. Такі витратоміри реалізують рівняння [37]:

$$q_m = 0,25\pi d^2 K_{\text{cy}}^2 C E K_{\text{ш}} K_{\text{п}} \varepsilon (2\Delta p \rho)^{0,5}, \quad (2.19)$$

де d – діаметр отвору ЗП за робочої температури середовища; K_{cy} – коефіцієнт, який враховує зміну діаметра отвору ЗП, спричинену відхиленням температури середовища від 20 °С; C – коефіцієнт витікання; E – коефіцієнт швидкості входження; $K_{\text{ш}}$ – коефіцієнт, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу; $K_{\text{п}}$ – коефіцієнт, який враховує притуплення вхідного канта діафрагми; ε – коефіцієнт розширення; Δp – перепад тиску на ЗП; ρ – густина середовища.

Коефіцієнт витікання C є основною характеристикою звужувального пристрою. Для стандартних звужувальних пристроїв рівняння коефіцієнта витікання розроблені на основі результатів експериментальних досліджень та представлені у відповідних стандартах.

Для стандартної діафрагми:

- коефіцієнт витікання C є функцією відносного діаметра отвору звужувального пристрою β , числа Рейнольдса Re та внутрішнього діаметра вимірювального трубопроводу D :

$$C = f(\beta, Re, D)$$

- коефіцієнт розширення ε є функцією відносного діаметра отвору звужувального пристрою β , тиску вимірювального середовища p , перепаду тиску на звужувальному пристрої Δp та показника адіабати κ :

$$\varepsilon = f(\beta, p, \Delta p, \kappa)$$

- коефіцієнт K_{π} , що враховує притуплення вхідного канта діафрагми, є функцією діаметра отвору звужувального пристрою при робочій температурі d , радіуса вхідного канта діафрагми r_{κ} , часу експлуатації діафрагми з моменту визначення вхідного канта діафрагми τ_T :

$$K_{\pi} = f(d, r_{\kappa}, \tau_T)$$

- коефіцієнт $K_{ш}$, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу є функцією відносного діаметра отвору звужувального пристрою β , числа Рейнольдса Re , внутрішнього діаметра вимірювального трубопроводу D та еквівалентної шорсткості $R_{ш}$:

$$K_{ш} = f(\beta, Re, D, R_{ш})$$

Рівняння для обчислення коефіцієнта витікання, коефіцієнта розширення, коефіцієнта, що враховує притуплення вхідного канта діафрагми та коефіцієнта, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу для діафрагм представлене у стандарті ДСТУ ГОСТ 8.586.2 [33].

Для сопел ИСА 1932:

- коефіцієнт витікання C є функцією відносного діаметра отвору звужувального пристрою β та числа Рейнольдса Re :

$$C = f(\beta, Re)$$

- коефіцієнт розширення ε є функцією відносного діаметра отвору звужувального пристрою β , тиску вимірювального середовища p , перепаду тиску на звужувальному пристрої Δp та показника адіабати κ :

$$\varepsilon = f(\beta, p, \Delta p, \kappa)$$

- коефіцієнт $K_{ш}$, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу, обчислюють якщо значення середнього арифметичного відхилення профілю шорсткості Ra на ділянці вимірювального трубопроводу завдовжки не менше ніж $10D$ до сопла є більшим за значення, наведене в Таблиці 1 – Значення відносної шорсткості ВТ для сопел ИСА 1932, перевищення яких потребує обчислення $K_{ш}$ ДСТУ ГОСТ 8.586.3 [34], в іншому випадку $K_{ш}$ вважають таким, що дорівнює одиниці.

$$K_{ш} = f(\beta, D, Re, R_{ш})$$

Рівняння для обчислення коефіцієнта витікання, коефіцієнта розширення та коефіцієнта, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу для сопел ИСА 1932 представлено у стандарті ДСТУ ГОСТ 8.586.3 [34].

Для еліптичних сопел:

- коефіцієнт витікання C є функцією відносного діаметра отвору звужувального пристрою β та числа Рейнольдса Re :

$$C = f(\beta, Re)$$

- коефіцієнт розширення ε - аналогічно як для сопел ИСА 1932;

- коефіцієнт $K_{ш}$, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу, для еліптичних сопел дорівнює одиниці якщо $Ra / D \leq 3,2 \cdot 10^{-4}$.

Рівняння для обчислення коефіцієнта витікання та коефіцієнта розширення для еліптичних сопел представлено у стандарті ДСТУ ГОСТ 8.586.3 [34].

Для сопел Вентурі:

- коефіцієнт витікання C є функцією відносного діаметра отвору звужувального пристрою β та не залежить від числа Рейнольдса Re :

$$C = f(\beta)$$

- коефіцієнт розширення ε - аналогічно як для сопел ИСА 1932;

- коефіцієнт $K_{ш}$, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу, обчислюють аналогічно як для сопел ИСА 1932.

Рівняння для обчислення коефіцієнта витікання, коефіцієнта розширення та коефіцієнта, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу для сопел Вентурі представлено у стандарті ДСТУ ГОСТ 8.586.3 [34].

Для труб Вентурі з литою (без оброблення) вхідною конічною частиною коефіцієнт витікання C є функцією числа Рейнольдса Re :

$$C = f(Re)$$

Для труб Вентурі з обробленою вхідною конічною частиною коефіцієнт витікання C є функцією відносного діаметра отвору звужувального пристрою β та числа Рейнольдса Re :

$$C = f(\beta, Re)$$

Для труб Вентурі із зварною вхідною конічною частиною з листової сталі коефіцієнт витікання C є функцією числа Рейнольдса Re :

$$C = f(Re)$$

Коефіцієнт розширення ε для всіх видів труб Вентурі є функцією відносного діаметра отвору звужувального пристрою β , тиску вимірювального середовища p , перепаду тиску на звужувальному пристрої Δp та показника адіабати κ :

$$\varepsilon = f(\beta, p, \Delta p, \kappa)$$

Рівняння для обчислення коефіцієнтів витікання та коефіцієнтів розширення для всіх видів труб Вентурі представлені у стандарті ДСТУ ГОСТ 8.586.4 [35].

Формули для розрахунку теплофізичних властивостей теплоносія (ентальпії, динамічної в'язкості, показника адіабати, густини) розглянуто в розділі 3.

Повна модель витратоміра складається з:

- системи рівнянь для розрахунку значень: масової витрати середовища, зведеної до стандартних умов; коефіцієнтів рівняння витрати; параметрів середовища;

- системи умов застосування та обмежень витратоміра із стандартним звужувальним пристроєм

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta p}{p} \leq 0,25 \\ d \geq d_{\min} \\ D_{\min} \leq D \leq D_{\max} \\ \beta_{\min} \leq \beta \leq \beta_{\max} \\ Re_{\min} \leq Re \leq Re_{\max} \end{array} \right. , \quad (2.20)$$

де d_{\min} , D_{\min} , D_{\max} , β_{\min} , β_{\max} , Re_{\min} , Re_{\max} - мінімально допустиме значення діаметра отвору діафрагми при робочій температурі та відповідно мінімальні та максимальні значення внутрішнього діаметра ВТ при робочій температурі, відносного діаметра діафрагми та числа Рейнольдса.

Отже, повна математична модель системи вимірювання кількості ТЕ на основі витратомірів змінного перепаду тиску побудована шляхом сукупного застосування повної математичної моделі витратоміра змінного перепаду тиску, рівнянь обчислення теплофізичних параметрів теплоносія, а також рівняння обчислення кількості теплової енергії:

$$\left\{ \begin{aligned}
 W &= \sum_{i=1}^a \int_{t_0}^{t_k} q_{m1i} h_{1i} dt - \sum_{j=1}^b \int_{t_0}^{t_k} q_{m2j} h_{2j} dt - \sum_{p=1}^m \int_{t_0}^{t_k} q_{пп} h_{хвп} dt \\
 q_m &= f(d, K_{cy}, C, E, K_{ш}, K_{п}, \varepsilon, \Delta p, \rho) \\
 h &= f(R, p, T) \\
 \chi &= f(p, T, c_p, c_v) \\
 \rho &= f(R, p, T) \\
 C &= f(\beta, Re, D) \\
 \mu &= f(T, \rho) \\
 D &= (D_{20}, K_T) \\
 Re &= f(q_m, D, \mu) \\
 \alpha_{т3п} &= f(t) \\
 d &= f(d_{20}, K_{3п}) \\
 K_{3п} &= f(\alpha_{т3п}, t) \\
 \beta &= f(d, D) \\
 C &= f(\beta, Re, D) \\
 E &= f(\beta) \\
 K_{ш} &= f(\beta, R_{ш}, D, Re) \\
 K_{п} &= f(d, r_k, \tau_T) \\
 \varepsilon &= f(\beta, \Delta p, p, \kappa)
 \end{aligned} \right. \quad (2.21)$$

де, окрім позначень застосованих вище, μ – динамічна в'язкість середовища; $\alpha_{т3п}$ – температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу.

У підрозділі 2.4 цієї роботи математичну модель (2.21) буде доповнено рівняннями для обчислення невизначеності кількості теплової енергії.

2.3. Розроблення алгоритму визначення кількості теплової енергії для систем із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв

За участю автора розроблено алгоритм (див. рисунок 2.6) розрахунку потоку ТЕ q_w для системи у якій застосовано витратомір змінного перепаду тиску та який реалізує рівняння:

$$W = \int_{t_0}^{t_k} q_W dt = \int_{t_0}^{t_k} Q_m(h_1 - h_2)dt \quad (2.22)$$

У цьому алгоритмі реалізовано повну математичну модель витратоміра, зокрема, реалізовано ітераційний алгоритм розрахунку витрати теплоносія (див. рис.2.6).

В тілі ітераційного процесу виконується розрахунок тих коефіцієнтів та параметрів рівняння витрати (10), які залежать від витрати середовища, зокрема: коефіцієнта витікання C , поправкового коефіцієнта, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу $K_{ш}$, числа Рейнольдса Re . Розрахунок параметрів середовища: динамічної в'язкості μ , густини ρ , показника адиабати k (тільки для газоподібного середовища) [37] та ентальпій h_1, h_2 згідно [53] доцільно виконувати поза ітераційним процесом. Наприкінці тіла ітераційного процесу обчислюється відносне відхилення δq_m поточного значення масової витрати середовища q_{mi} від попереднього q_{mi-1} . Вихід з циклу здійснюється за умовою порівняння відносного відхилення витрати δq_m із значенням допустимої похибки розрахунку витрати. Як видно з рис.2.6, допустиме значення відносної похибки обчислення витрати прийнято рівним 0,001%. Результатом виконання цього алгоритму є значення потоку ТЕ за одиницю часу q_w .

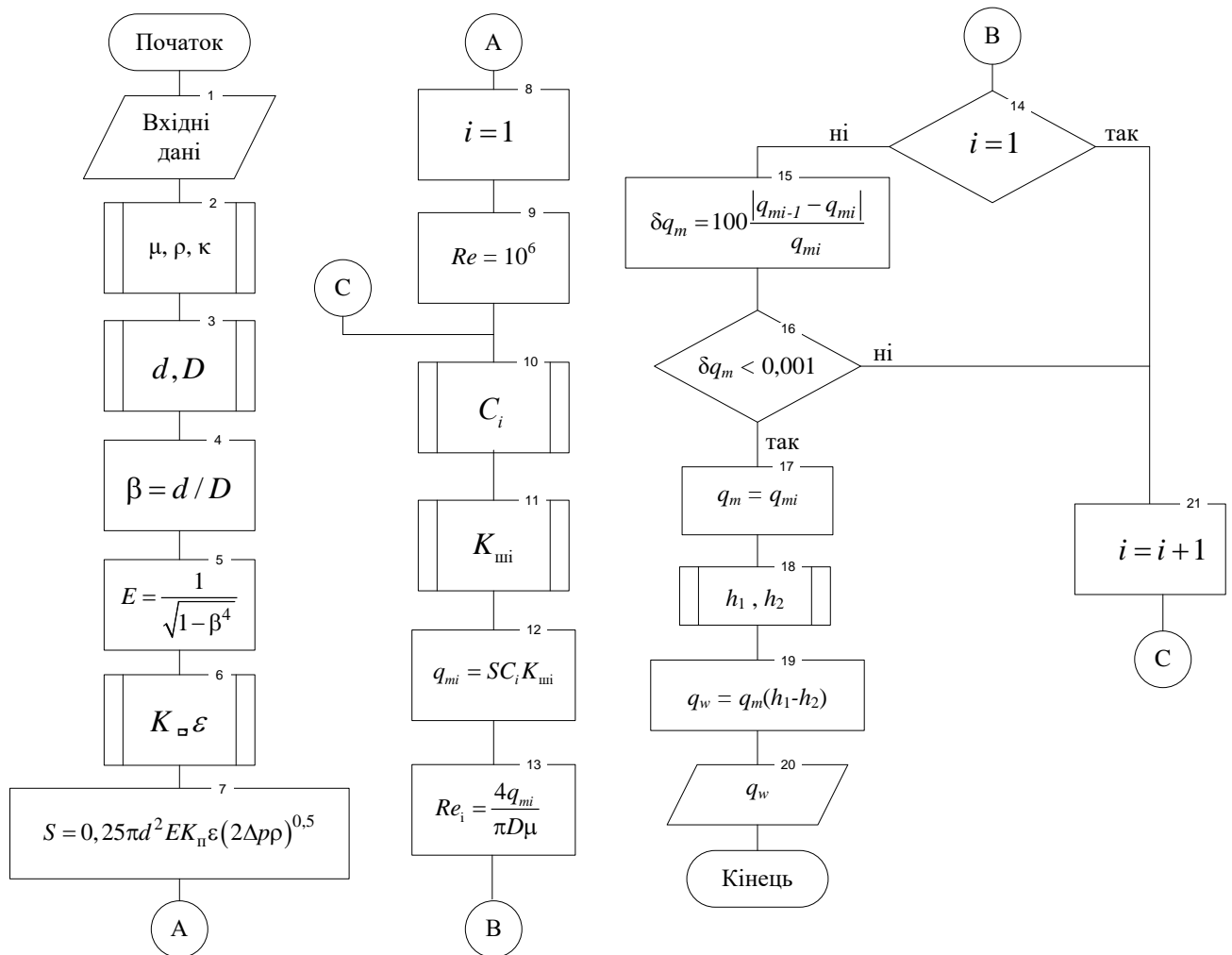


Рис. 2.6 Блок-схема алгоритму розрахунку потоку ТЕ за одиницю часу для системи на основі стандартного звужувального пристрою

Для обчислення кількості ТЕ W , що спожита за певний інтервал часу, слід виконати інтегрування потоку ТЕ за одиницю часу q_w . Оскільки в сучасних мікропроцесорних обчислювачах кількості ТЕ період опитування вимірювальних перетворювачів (період квантування в часі) а також тривалість циклу розрахунку потоку ТЕ q_w є достатньо малими, то для інтегрування застосовують прості методи, зокрема метод прямокутників.

Цей метод інтегрування реалізовано за допомогою алгоритму, блок-схема якого зображена на рисунку 2.7. Інтегрування виконується на інтервалі часу від t_0 до t_k з кроком Δt . Алгоритм передбачає введення значень параметрів теплоносія в точці 1 системи тепlopостачання (прямий трубопровід), а також в точці 2 (зворотний трубопровід) з кроком Δt (див. блок 3 на рис.2.7). Таке введення

виконується шляхом опитування вимірювальних перетворювачів параметрів теплоносія. На основі введених значень параметрів теплоносія в тілі ітераційного процесу виконується обчислення масової витрати за алгоритмом, блок-схема якого представлена на рис.2.6 (блок 4), ентальпії теплоносія в точці 1 (блок 5) та ентальпії теплоносія в точці 2 (блок 6) згідно з [53]. Розрахунок кількості ТЕ між двома точками системи тепlopостачання у певний момент часу здійснюється за формулою (9), (блок 7).

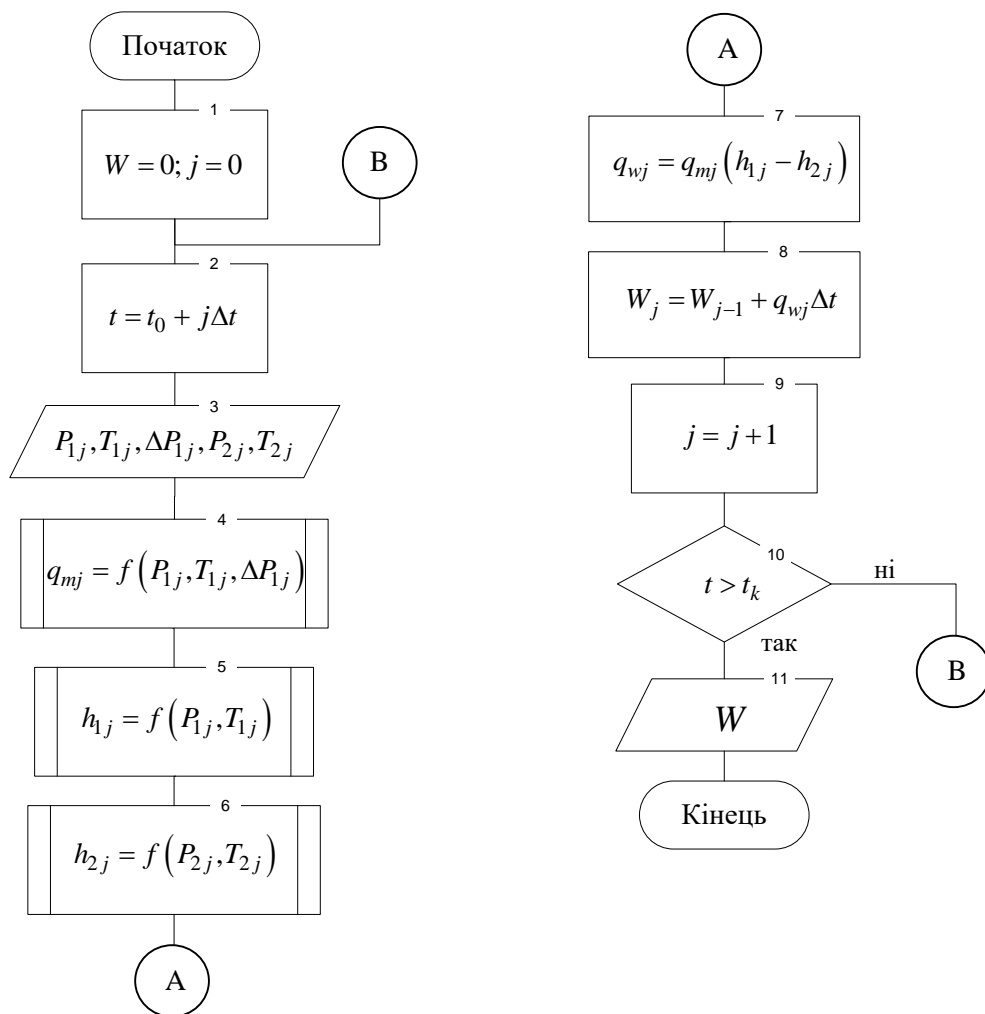


Рис. 2.7 Блок-схема алгоритму обчислення кількості ТЕ

Наприкінці ітераційного процесу за методом прямокутників [52] обчислюється значення інтегральної кількості ТЕ, використаної за певний інтервал часу (блок 8). Вихід з циклу здійснюється за умовою порівняння поточного значення часу t із значенням часу завершення розрахунку t_k (блок 10). Результатом виконання цього алгоритму є значення кількості ТЕ W , використаної

за визначений інтервал часу (блок 11). Межі інтервалу обчислення кількості ТЕ t_0 та t_k можуть бути визначені як межі контрактного інтервалу визначення кількості ТЕ (час початку контрактної доби, час завершення контрактної доби) .

Запропонований алгоритм [54] реалізовано у системі автоматизованого розрахунку кількості ТЕ на основі витратомірів змінного перепаду тиску, яку розроблено за участі автора. Також цей алгоритм пропонується до застосування у обчислювачах ТЕ, які є обов'язковим елементом теплових лічильників, що повинні бути встановлені у споживачів, приєднаних до системи централізованого теплопостачання [5] та на джерелах ТЕ.

2.4. Розроблення рівняння невизначеності вимірюваного значення кількості теплової енергії

Для систем комерційного обліку теплової енергії важливо отримати не тільки вимірне значення кількості теплової енергії, а й характеристику невизначеності цього значення. У даній роботі розроблено методику оцінювання невизначеності результату вимірювання кількості теплової енергії для систем обліку в яких для вимірювання витрати теплоносія застосовують витратоміри змінного перепаду тиску.

Методика передбачає застосування розроблених автором залежностей для обчислення відносної стандартної невизначеності кількості теплової енергії, ентальпії та витрати теплоносія. Рівняння для обчислення невизначеності ентальпії теплоносія розроблено із застосуванням залежностей методики IAPWS IF 97 [53]. Запропоновані автором підходи дають можливість розробити залежності для оцінювання невизначеності вимірюваного значення кількості теплової енергії для систем різної конфігурації, а також систем, у яких застосовано витратоміри та лічильники теплоносія різних типів.

Для точного вимірювання кількості теплової енергії застосовують автоматизовані системи на основі мікропроцесорних обчислювачів. Такі системи

реалізують обчислення кількості теплової енергії в реальному часі з урахуванням зміни теплофізичних параметрів теплоносія.

Вимірювальні перетворювачі витрати теплоносія є важливими складовими систем обліку теплової енергії. Для вимірювання витрати теплоносія у трубопроводах великих діаметрів часто застосовують витратоміри змінного перепаду тиску на основі стандартних звужувальних пристроїв.

Нормативними документами, які визначають правила метрологічної діяльності (зокрема, в Україні законом «Про метрологію та метрологічну діяльність» [1]) облік теплової енергії віднесено до сфери законодавчо-регульованої метрології. Відповідно до вимог Закону [1], результати вимірювань можуть бути використані у сфері законодавчо-регульованої метрології за умови, що для таких результатів відомі відповідні характеристики похибки або невизначеність результату вимірювання.

Технічні та метрологічні характеристики лічильників теплової енергії нормують відповідно до вимог "Технічного регламенту засобів вимірювальної техніки" [20], що розроблений на основі Директиви 2014/32/ЄС Європейського Парламенту та Ради Європи [21]. Зокрема, метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки, які входять до складу комерційного лічильника теплової енергії, мають відповідати вимогам ДСТУ EN 1434-1:2019 (EN 1434-1:2015 + A1:2018, IDT) [22]. Згідно з [22] границі допустимих значень відносної похибки єдиних теплолічильників визначають як суму границь допустимих відносних похибок складових частин (обчислювача, перетворювача витрати та пари перетворювачів температури). Однак у [22] відсутня методика оцінювання невизначеності вимірюваного значення кількості теплової енергії.

Для автоматизованих систем вимірювання кількості теплової енергії, у складі яких для вимірювання маси або об'єму теплоносія застосовано витратоміри змінного перепаду тиску, методика оцінювання невизначеності результату вимірювання витрати середовища встановлена стандартом ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009 [37]. Представлена в стандарті [37] методика розроблена на основі положень міжнародного стандарту ISO 5168 [55]. Однак у відомих джерелах

відсутня методика оцінювання невизначеності результату вимірювання кількості теплової енергії такими системами. Розроблення методики оцінювання невизначеності результату вимірювання кількості теплової енергії автоматизованими вимірювальними системами є предметом досліджень цієї роботи.

Вимірювання кількості теплової енергії виконують непрямим методом на основі обчислених значень параметрів теплоносія (зокрема ентальпії) і вимірних значень параметрів потоку. Тому для оцінювання невизначеності кількості теплової енергії насамперед необхідно оцінити невизначеність застосованих методик розрахунку параметрів теплоносія а також невизначеність вимірюваних значень параметрів потоку (температури, тиску, витрати). Результируюча залежність для оцінювання невизначеності вимірюваного значення кількості теплової енергії має базуватись на основі рівняння обчислення кількості теплової енергії, яке реалізоване у автоматизованій системі вимірювання, а також враховувати невизначеності усіх складових цього рівняння.

Кількість теплової енергії, що протікає через переріз трубопроводу за певний інтервал часу визначають шляхом інтегрування добутку витрати теплоносія на ентальпію. В системі вимірювання з двома витратомірами, встановленими у подавальному і зворотному трубопроводах, кількість теплової енергії, яку передано споживачеві, або отримано від джерела за цей інтервал часу, обчислюють як різницю кількості енергії що надходить подавальним трубопроводом і повертається зворотним трубопроводом (див. рівняння (2.18)).

Якщо розглянути вимірювання кількості теплової енергії за короткий інтервал часу, протягом якого витрати теплоносія та ентальпії можна вважати умовно-постійними, то отримаємо спрощену залежність для обчислення кількості теплової енергії [56]:

$$W = M_1 h_1 - M_2 h_2, \quad (2.23)$$

де M_1 , M_2 – маса теплоносія, що пройшла за аналізований інтервал часу через переріз відповідно подавального та зворотного трубопроводів.

Щоб обчислити похибку вимірювання кількості теплової енергії за рівнянням (2.23) часто застосовують спрощений підхід (див. [57], [58]), який полягає у диференціюванні залежності кількості теплової енергії від вхідних параметрів. Зокрема, застосувавши такий підхід до залежності (2.23), отримуємо:

$$\begin{aligned} \delta_W &= \frac{dW}{W} = \frac{dM_1 h_1 + M_1 dh_1 - (dM_2 h_2 + M_2 dh_2)}{M_1 h_1 - M_2 h_2} \\ &= \frac{\delta_{M_1} + \delta_{h_1} - \alpha\beta\delta_{M_2} - \alpha\beta\delta_{h_2}}{1 - \alpha\beta} \end{aligned} \quad (2.24)$$

де $\alpha = \frac{M_2}{M_1}$, $\beta = \frac{h_2}{h_1}$.

Формула (2.24), а також формули для обчислення похибок вимірювання кількості теплової енергії, отримані для інших рівнянь обчислення кількості теплової енергії із застосуванням такого спрощеного підходу, представлено у документах [57], [58].

Сучасна методологія оцінювання точності результату вимірювання передбачає оцінювання невизначеності цього результату [59]. Під час оцінювання невизначеності необхідно мати інформацію про основні та додаткові складові похибки вимірювання параметрів, або основні та додаткові складові невизначеностей, що вносяться відповідними засобами вимірювань, інформацію про вид функцій розподілу зовнішніх впливних величин. Однак часто доводиться виконувати оцінювання невизначеності результату вимірювання величини в умовах, коли окремі складові цієї інформації відсутні. Зокрема і під час оцінювання невизначеності вимірюваного значення кількості теплової енергії така ситуація є поширеною. Тому у цій роботі залежності для обчислення невизначеності кількості теплової енергії, а також для оцінювання невизначеностей її аргументів отримані із застосуванням таких припущень:

- всі вагомні систематичні явища враховано в результатах вимірювання;
- математичним сподіванням коефіцієнта чутливості вважають його унормоване максимально допустиме значення;

- між вхідними змінними рівняння витрати та рівняння кількості теплової енергії немає кореляційних зв'язків;

- розподіл ймовірності значень вимірюваних величин відповідає нормальному закону Гауса.

Як показано вище, кількість теплової енергії є функцією витрати теплоносія та його ентальпії, які в свою чергу є функціями вимірюваних параметрів теплоносія (тиску, температури), тому для оцінювання результуючої невизначеності кількості теплової енергії необхідно оцінити вплив невизначеностей вимірюваних параметрів теплоносія та характеристик засобів вимірювань на результуючу невизначеність кількості теплової енергії. Для цього необхідно проаналізувати функціональні залежності витрати теплоносія та ентальпії від параметрів теплоносія.

У системах обліку теплової енергії, в яких для вимірювання витрати теплоносія застосовують витратоміри змінного перепаду тиску на основі стандартних звужувальних пристроїв, масову витрату середовища обчислюють за формулою (2.19) [37].

Для того щоб отримати рівняння невизначеності вимірюваного значення витрати застосовують відомі підходи, викладені в ISO 5168 [55]. Зокрема, коефіцієнти впливу невизначеностей вхідних параметрів на комбіновану невизначеність вимірюваного значення витрати можуть бути знайдені відповідно до [55] за формулою:

$$C_i^* = \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{y}, \quad (2.25)$$

де C_i^* – безрозмірний коефіцієнт впливу невизначеності параметра x_i на невизначеність вихідної величини y .

Тоді за умови, що відомі коефіцієнти впливу всіх вхідних параметрів і вхідні параметри некорельовані, відносна сумарна невизначеність вихідної величини $u'_c(y)$ може бути обчислена за формулою [55]:

$$u'_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [C_i^* u'(x_i)]^2}, \quad (2.26)$$

де $u'(x_i)$ – відносна невизначеність вхідного параметру x_i .

Застосувавши підходи ISO 5168 [55] до оцінювання комбінованої стандартної невизначеності витрати, яку обчислюють за рівнянням (2.19), отримано таке рівняння невизначеності результату вимірювання витрати середовища u'_q [37]:

$$u'_q = \left\{ u'^2_{fc} + u'^2_c + u'^2_{KR} + u'^2_{Kes} + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4} \right)^2 u'^2_D + \left(\frac{2}{1-\beta^4} \right)^2 u'^2_d + 0,25(u'^2_{\Delta p} + u'^2_\rho) \right\}^{0,5}, \quad (2.27)$$

де u'_{fc} – відносна стандартна невизначеність (надалі невизначеність) реалізації залежності (2.19) обчислювачем витрати; u'_c – невизначеність результату вимірювання коефіцієнта витікання; u'_{KR} – невизначеність результату вимірювання поправкового коефіцієнта, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні ВТ; u'_{Kes} – невизначеність результату вимірювання поправкового коефіцієнта, який враховує притуплення вхідного канта діафрагми; β – відносний діаметр отвору ЗП; u'_D – невизначеність результату вимірювання внутрішнього діаметру ВТ або вхідної частини труби Вентурі за робочої температури середовища; u'_d – невизначеність результату вимірювання діаметру отвору ЗП за робочої температури середовища; $u'_{\Delta p}$ – невизначеність результату вимірювання перепаду тиску на ЗП; u'_ρ – невизначеність результату вимірювання густини середовища.

Для обчислення ентальпії теплоносія в системах вимірювання кількості теплової енергії та для автоматизованого проектування таких систем часто застосовують рівняння представлені в звіті IAPWS IF [53], або спрощені рівняння розрахунку (наприклад рівняння із [51]). Відхилення між значеннями ентальпії, обчисленими за рівняннями [51] і [53], є незначними.

Розроблені рівняння для оцінювання невизначеності ентальпії представлено у підрозділі 3.3.

Застосувавши формули (2.25), (2.26) для оцінювання комбінованої стандартної невизначеності кількості теплової енергії, яку обчислюють за рівнянням (2.18), отримано таке рівняння:

$$u'_w = \sqrt{u'^2_\tau + C_1^2 u'^2_{q1} + C_2^2 u'^2_{h1} + C_3^2 u'^2_{q2} + C_4^2 u'^2_{h2}} \quad (2.28)$$

де u'_τ - невизначеність вимірюваного значення інтервалу часу, протягом якого обчислюють кількість теплової енергії;

u'_{q_1}, u'_{q_2} - невизначеності результатів вимірювання витрати теплоносія відповідно у подавальному та зворотному трубопроводах;

u'_{h_1}, u'_{h_2} - невизначеності результатів вимірювання ентальпії теплоносія відповідно у подавальному та зворотному трубопроводах;

C_1, C_2, C_3, C_4 – коефіцієнти впливу, які слід обчислювати за формулами:

$$C_1 = \frac{\partial f}{\partial q_1} \frac{q_1}{W} = \frac{h_1 q_1}{W}; \quad C_2 = \frac{\partial f}{\partial h_1} \frac{h_1}{W} = \frac{q_1 h_1}{W}; \quad C_3 = \frac{\partial f}{\partial q_2} \frac{q_2}{W} = -\frac{h_2 q_2}{W}; \quad (2.29)$$

$$C_4 = \frac{\partial f}{\partial h_2} \frac{h_2}{W} = -\frac{q_2 h_2}{W}.$$

Відносну розширену невизначеність результату вимірювання кількості теплової енергії за 95% довірчого рівня слід обчислювати за формулою [37], [59], [60]:

$$U'_W = 2u'_w. \quad (2.30)$$

Доцільно порівняти значення відносної похибки вимірювання кількості теплової енергії, обчисленої за формулою (2.24), та значення відносної розширеної невизначеності кількості теплової енергії U'_W , обчисленої за (2.30). Нами виконано таке порівняння для системи вимірювання кількості теплової енергії, яка реалізує рівняння (2.18) для середньогодинних значень параметрів теплоносія, що представлені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Значення параметрів теплоносія у вимірювальних трубопроводах діючої системи вимірювання кількості теплової енергії

№	Вихідні параметри	Значення
1	Температура теплоносія в подавальному трубопроводі T_1 , °C	92,7
2	Температура теплоносія в зворотному трубопроводі T_2 , °C	54,8
3	Тиск теплоносія в подавальному трубопроводі p_1 , МПа	0.8306
4	Тиск теплоносія в зворотному трубопроводі p_2 , МПа	0.5374
5	Витрата теплоносія в подавальному трубопроводі q_1 ,	204,813

	тон/год	
6	Витрата теплоносія в зворотному трубопроводі q_2 , тон/год	200,00

Складові невизначеності, що входять до рівняння (2.28) обчислені таким чином: невизначеність витрати теплоносія - за рівнянням (2.27), невизначеність ентальпії - за рівнянням (3.75). Значення відносної похибки визначення ентальпії та похибки вимірювання витрати прийнято рівними за модулем відповідним значенням розширеної невизначеності, що обчислені на основі значень стандартної невизначеності за формулами, аналогічними до (2.29): $|\delta_{M1}| = U'_{M1}$; $|\delta_{h1}| = U'_{h1}$; $|\delta_{M2}| = U'_{M2}$; $|\delta_{h2}| = U'_{h2}$.

Однак відносна похибка може набувати як додатних, так і від'ємних значень, тому під час порівняння розглянуто набори значень складових похибки з додатним та з від'ємним знаками.

Результати порівняння представлені у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Порівняння значень відносної похибки та невизначеності вимірюваного значення кількості теплової енергії

Варіант	Значення відносної похибки вхідних параметрів, %				Відносна похибка кількості теплової енергії δ_w , %	Відносна розширена невизначеність кількості теплової енергії U_w , %
	δ_{M1}	δ_{h1}	δ_{M2}	δ_{h2}		
1	+1	+0.85	+1	+1.23	1.32	3.11
2	+1	+0.85	-1	-1.23	7.41	3.11
3	-1	-0.85	+1	+1.23	-7.41	3.11
4	+1	+0.85	-1	+1.23	4.05	3.11
5	-1	+0.85	+1	+1.23	-3.41	3.11

В першому варіанті відносні похибки усіх складових мають додатний знак. Саме для такого набору значень похибок вхідних параметрів відносна похибка кількості теплової енергії δ_w має мінімальне значення, оскільки досягається компенсація впливу похибок окремих параметрів, зокрема похибки визначення

витрати та ентальпії у подавальному трубопроводі скомпенсовані похибками визначення цих параметрів у зворотному трубопроводі (див. формулу (2.24)). В другому наборі значень похибок - відносні похибки параметрів зворотного потоку мають від'ємний знак. Це призводить до суттєвого зростання відносної похибки кількості теплової енергії δ_w , що обчислена за формулою (2.24). Таке ж збільшення за модулем похибки енергії δ_w спостерігається і для третього набору значень похибок, де похибки визначення параметрів прямого потоку мають від'ємний знак. У четвертому та п'ятому варіантах пара термоперетворювачів має добре узгоджені характеристики, тому похибки ентальпії мають один знак, похибки вимірювання витрати теплоносія мають різні знаки. Тут результуюча похибка δ_w набуває проміжних значень.

Отже, значення відносної похибки вимірювання кількості теплової енергії δ_w , обчисленої за (2.24), залежить від знаку відносних похибок вхідних параметрів. Під час практичного застосування формули (2.24) визначити знак відносних похибок не вдається, оскільки для більшості вимірювальних перетворювачів тиску, температури, витрати виробники надають границі основної зведеної похибки. Знак відносної похибки для кожного окремого вимірювання визначити не вдається. Тому застосувати формулу (2.24) для розрахунку похибки вимірювання кількості теплової енергії у діючих системах обліку надзвичайно складно.

Під час отримання формули (2.28) застосовано усталену практику оцінювання комбінованої стандартної невизначеності кількості теплової енергії, що відповідає рекомендаціям [55, 59]. Як видно з таблиці 2.3, застосування залежності (2.28) дає можливість однозначно оцінити невизначеність результату вимірювання кількості теплової енергії із врахуванням невизначеностей вхідних параметрів. Тому для характеристики результату вимірювання кількості теплової енергії в системах її обліку, що реалізують рівняння (2.18), на нашу думку, слід застосовувати саме залежність (2.28).

Отже, оцінювання невизначеності результату вимірювання кількості теплової енергії за допомогою системи вимірювання на основі витратомірів змінного

перепаду тиску, яка реалізує рівняння (2.18), пропонується виконувати за такою методикою:

1) обчислити невизначеність результату вимірювання витрати теплоносія відповідно у подавальному u'_{q1} та зворотному u'_{q2} трубопроводах за рівнянням (2.27);

2) обчислити невизначеність ентальпії теплоносія відповідно у подавальному u'_{h1} та зворотному u'_{h2} трубопроводах за формулами, що представлені у підрозділі 3.3;

3) обчислити значення комбінованої стандартної невизначеності кількості теплової енергії за рівнянням (2.28); значення коефіцієнтів впливу пропонується обчислити за формулами (2.29) на основі номінальних значень параметрів теплоносія;

4) за формулою (2.30) обчислити значення відносної розширеної невизначеності вимірюваного значення кількості теплової енергії.

Запропоновані автором підходи дають можливість розробити залежності для оцінювання невизначеності вимірюваного значення кількості теплової енергії для систем різної конфігурації, які реалізують рівняння вимірювання відмінні від рівняння (2.18).

Розроблене у цій роботі рівняння (2.28) може бути застосовано для оцінювання невизначеності результату вимірювання кількості теплової енергії для систем з витратомірами та лічильниками теплоносія різних типів.

Висновки до розділу 2

1. Виконано класифікацію систем тепlopостачання та проаналізовано можливі структури СВКТЕ. Розглянуто рівняння для визначення кількості теплової енергії для типових схем систем обліку на джерелах ТЕ та в схемах тепlopостачання споживачів. Встановлено, що основою алгоритму розрахунку кількості теплової енергії для будь-якої структури системи вимірювання її

витрати та кількості є алгоритм обчислення інтегральної кількості енергії між двома точками системи теплопостачання, так як рівняння для обчислення кількості теплової енергії містять складові, які є результатом інтегрування добутку витрати теплоносія на різницю ентальпій потоку теплоносія у різних точках схеми теплопостачання.

3. Визначено набір основних функцій, які є достатніми для формування та зручного представлення вимірюваного значення кількості теплової енергії і які незалежно від структури має реалізувати СВКТЕ.

4. На основі повної математичної моделі витратоміра змінного перепаду тиску, рівнянь визначення кількості теплової енергії та рівнянь визначення властивостей теплоносія розроблено математичну модель системи вимірювання кількості теплової енергії

5. Розроблено алгоритми розрахунку кількості теплової енергії для систем із застосуванням витратомірів змінного перепаду тиску.

6. Розроблено рівняння невизначеності вимірюваного значення кількості теплової енергії.

РОЗДІЛ 3

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЕПЛОНОСІЇВ

3.1. Аналіз методик визначення властивостей теплоносіїв (води, водяної пари) для систем вимірювання кількості теплової енергії

Сучасні мікропроцесорні системи обліку теплової енергії дозволяють реалізувати обчислення в реальному часі кількості теплової енергії з урахуванням теплофізичних параметрів теплоносія. На сьогоднішній день найпоширенішим та найдоступнішим теплоносієм в системах тепlopостачання є вода.

До основних теплофізичних параметрів води та водяної пари відносять [53]: густину; питомий об'єм; ентальпію; динамічну в'язкість; ентропію; ізобарну теплоємність; ізохорну теплоємність; показник адіабати; внутрішню енергію води та водяної пари; швидкість звуку води та водяної пари.

Для автоматизованого проектування систем вимірювання кількості теплової енергії необхідно обчислювати значення таких параметрів теплоносія: ентальпію, густину, показник адіабати водяної пари та динамічну в'язкість.

В різних країнах впродовж багатьох років проводяться дослідження теплофізичних властивостей води та водяної пари, які координуються Міжнародною некомерційною організацією властивостей води та водяної пари. В межах цієї організації проводяться дослідження за результатами яких розробляються міжнародні нормативні документи.

Області стану води та водяної пари, теплофізичні властивості яких описані рівнянням IAPWS97, поділяються на п'ять зон [53]:

- вода;
- перегріта пара до температури 800 °С;
- двостанова область, яка називається областю перегрітої води та охолодженої пари;
- область сухої насиченої пари;

- область перегрітої пари високої температури, значення якої знаходяться в межах від 800 °С до 2000 °С.

Область між паром і водою розділяється кривою насичення. Область між паром і льодом розділяється кривою сублімації. Область між водою та льодом розділяється кривою замерзання.

Області визначення теплофізичних параметрів води та водяної пари за рівняннями IAPWS97 [53] наведені на рис. 3.1, а межі областей описані нижче.

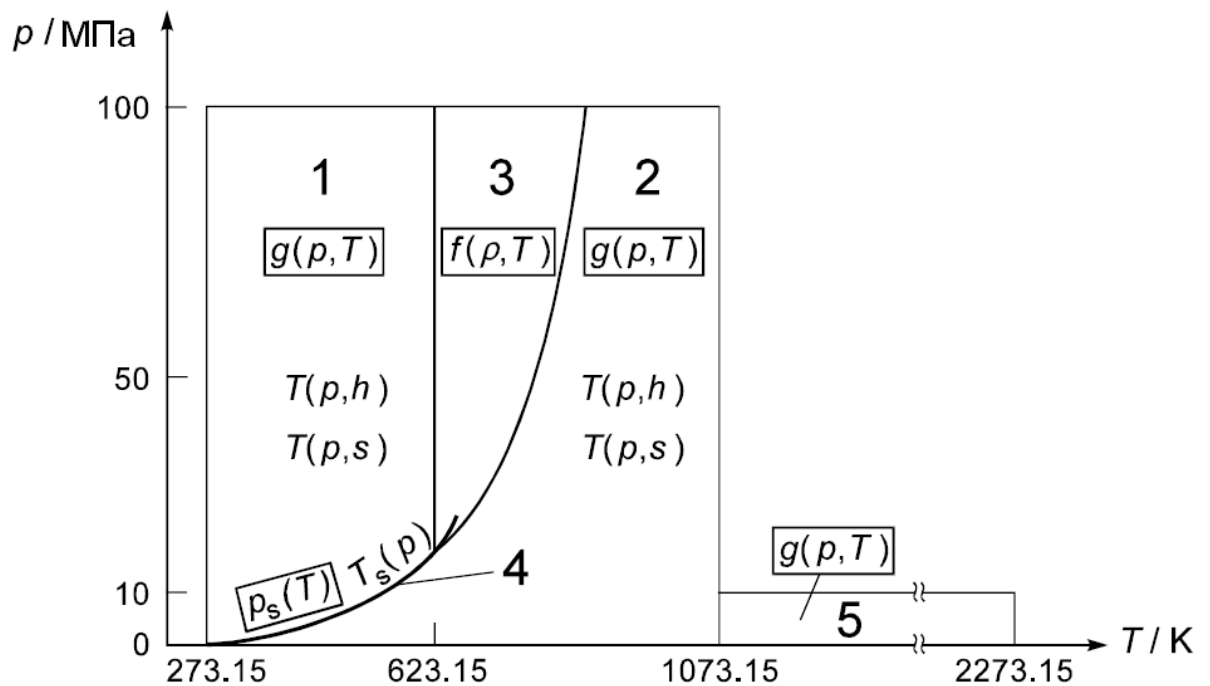


Рис. 3.1. Области визначення термодинамічних параметрів води та водяної пари

У 1995 році Міжнародним комітетом властивостей води та водяної пари було розроблене рівняння для розрахунку питомої вільної енергії Гельмгольца [61]. Це рівняння застосовується для розрахунку теплофізичних параметрів води та водяної пари для наукових цілей в такому діапазоні тисків і температур: $0 < p < 1000$ МПа та $-38,15 < t < 1000$ °С.

У 1997 році Міжнародним комітетом властивостей води та водяної пари було розроблено нове рівняння для розрахунку питомої вільної енергії Гельмгольца та Гіббса [53], на основі якого можна розраховувати термодинамічні параметри води

та водяної пари для інженерних цілей в діапазоні тиску $0 < p < 100$ МПа, $100 < p < 10$ МПа та температури $0 < t < 800$ °С і $800 < t < 2000$ °С відповідно.

В більшості конфігурацій систем обліку теплової енергії термодинамічні параметри води та водяної пари обчислюються в реальному часі на основі вимірних значень тиску і температури. Відповідно розрахунок кількості теплової енергії виконується на основі обчислених значень параметрів теплоносія та вимірних значень параметрів потоку.

Важливим параметром при визначенні кількості теплової енергії, який необхідно враховувати є ентальпія води (водяної пари).

Кожна область води та водяної пари описується своїми рівняннями вільної енергії Гіббса або Гельмгольца.

Для розрахунку теплофізичних параметрів води в області 1 (див. рис. 3.1) за рівнянням IAPWS97 застосовують формулу Гіббса [53]:

$$\frac{g(p, T)}{RT} = \gamma(\pi, \tau) = \sum_{i=1}^{34} n_i (7,1 - \pi)^{J_i} (\tau - 1,222)^{J_i}, \quad (3.1)$$

де π - псевдо приведений тиск, значення якого розраховується за рівнянням:

$$\pi = p / p^*, \quad (3.2)$$

p - абсолютний тиск води, МПа; p^* - псевдокритичний тиск (для даної області $p^* = 16,53$ МПа);

τ - псевдо приведена температура, значення якої розраховується за рівнянням:

$$T = T^* / \tau, \quad (3.3)$$

де T - термодинамічна температура води, К; T^* - псевдокритична температура (для даної області $T^* = 1386$ К);

I_i, J_i, n_i - постійні коефіцієнти, які наведені в [53].

Рівняння (3.1) описує область води, яка визначається такими межами тиску і термодинамічної температури:

$$p_s(T) \leq p \leq 100 \text{ МПа}; \\ 273,15 \text{ К} < T < 623,15 \text{ К}.$$

Лінія насичення описується тиском сухої насиченої пари $p_s(T)$ (див. рівняння 3.33).

Густина води розраховують за формулою [53]:

$$\rho = \frac{1}{(\partial g / \partial p)_T}; \quad (3.4)$$

$$\rho(\pi, \tau) = \frac{16,53}{RT\gamma_\pi}, \quad (3.5)$$

де R – універсальна газова постійна для води, $R = 461,526$ Дж/кг·К

Питому ентальпію води визначають за рівнянням [53]:

$$h = g - T(\partial g / \partial T)_p \quad (3.6)$$

$$h(\pi, \tau) = 1386R\gamma_\tau \quad (3.7)$$

Часткові похідні розраховуються за рівняннями [53]:

$$\gamma_\pi = \sum_{i=1}^{34} -n_i I_i (7.1 - \pi)^{I_i - 1} (\tau - 1.222)^{J_i}; \quad (3.8)$$

$$\gamma_\tau = \sum_{i=1}^{34} n_i (7.1 - \pi)^{I_i} J_i (\tau - 1.222)^{J_i - 1}; \quad (3.9)$$

$$\text{де } \gamma_\pi = \left[\frac{\partial \gamma}{\partial \pi} \right]_\tau, \gamma_\tau = \left[\frac{\partial \gamma}{\partial \tau} \right]_\pi.$$

Для розрахунку термодинамічних параметрів водяної пари до температури 800 °С (область 2, див. рис. 3.1) за рівнянням IAPWS97 застосовують формулу Гіббса [53]:

$$\frac{g(p, T)}{RT} = \gamma(\pi, \tau) = \gamma^0(\pi, \tau) + \gamma^r(\pi, \tau), \quad (3.10)$$

де π - псевдо приведений тиск, значення якого розраховується за рівнянням:

$$\pi = p / p^*; \quad (3.11)$$

p^* - псевдокритичний тиск (для даної області $p^* = 1$ МПа);

τ - псевдо приведена температура, значення якої розраховується за рівнянням:

$$\tau = T^* / T; \quad (3.12)$$

T^* - псевдокритична температура (для даної області $T^* = 540$ К);

Рівняння (3.1) складається з двох частин $\gamma^0(\pi, \tau)$, $\gamma^r(\pi, \tau)$, які мають вигляд [53]:

$$\gamma^0 = \ln \pi + \sum_{i=1}^9 n_i^0 \tau^{J_i^0} \quad (3.13)$$

$$\gamma^r = \sum_{i=1}^{43} n_i \pi^{I_i} (\tau - 0.5)^{J_i} \quad (3.14)$$

J_i^0, n_i^0 - постійні коефіцієнти, які наведені в [53];

I_i, J_i, n_i - постійні коефіцієнти, які наведені в [53].

Рівняння (3.14) описує область водяної пари, яка визначається такими межами тиску і термодинамічної температури:

$$273,15 \text{ К} \leq T \leq 623,15 \text{ К}; \quad 0 < p \leq p_s(T);$$

$$623,15 \text{ К} < T \leq 863,15 \text{ К}; \quad 0 < p \leq p_{ws}(T);$$

$$863,15 \text{ К} < T \leq 1073,15 \text{ К}; \quad 0 < p \leq 100 \text{ МПа};$$

$p_{ws}(T)$ визначають за формулою:

$$p_{ws}(T) = n_1 + n_2 T + n_3 T^2, \quad (3.15)$$

де $n_1 = 0,34805185628969 \times 10^3$;

$n_2 = -0,11671859879975 \times 10^1$;

$n_3 = 0,10192970039326 \times 10^{-2}$.

Густина водяної пари в області до 800 °С розраховують за рівнянням [53]:

$$\rho = \frac{1}{\left(\frac{\partial g}{\partial p}\right)_T} \quad (3.16)$$

$$\rho(\pi, \tau) = \frac{1}{RT(\gamma_\pi^0 + \gamma_\pi^r)} \quad (3.17)$$

Питому ентальпію водяної пари обчислюють за рівнянням [53]:

$$h = g - T(\partial g / \partial T)_p; \quad (3.18)$$

$$h(\pi, \tau) = 540R(\gamma_\tau^0 + \gamma_\tau^r). \quad (3.19)$$

Рівняння для обчислення показника адіабати відсутні у відомих джерелах. Тому показник адіабати водяної пари для діапазону температури до 800 °С (область

перегрітої пари, див. рис.3.1.) слід розраховувати застосувавши розроблений за автором спрощений алгоритм, який представлений у підрозділі 3.2 цього розділу.

Для розрахунку термодинамічних параметрів водяної пари високої температури в межах від 800 °С до 2000 °С за рівнянням IAPWS97 застосовують формулу Гіббса [53]:

$$\frac{g(p, T)}{RT} = \gamma(\pi, \tau) = \gamma^0(\pi, \tau) + \gamma^r(\pi, \tau), \quad (3.20)$$

де π - псевдо приведений тиск, значення якого розраховують за рівнянням:

$$\pi = p/p^*; \quad (3.21)$$

p^* - псевдокритичний тиск (для даної області $p^* = 1$ МПа);

τ - псевдо приведена температура, значення якої обчислюють за рівнянням:

$$\tau = T^*/T; \quad (3.22)$$

T^* - псевдокритична температура (для даної області $T^* = 1000$ К);

Рівняння (3.56) складається з двох частин $\gamma^0(\pi, \tau)$, $\gamma^r(\pi, \tau)$, які мають вигляд:

$$\gamma^0 = \ln \pi + \sum_{i=1}^6 n_i^0 \tau^{J_i^0} \quad (3.23)$$

$$\gamma^r = \sum_{i=1}^5 n_i \pi^{I_i} \tau^{J_i}. \quad (3.24)$$

J_i^0, n_i^0 , - постійні коефіцієнти, які наведені в [53];

I_i, J_i, n_i - постійні коефіцієнти, які наведені в [53].

Рівняння (3.56) описує область водяної пари високої температури, яка визначається такими межами тиску і термодинамічної температури:

$$1073,15 \text{ К} \leq T \leq 2273,15 \text{ К};$$

$$0 < p \leq 10 \text{ МПа}.$$

Густина водяної пари високої температури визначають за рівнянням [53]:

$$\rho = \frac{1}{(\partial g / \partial p)_T}; \quad (3.25)$$

$$\rho(\pi, \tau) = \frac{16,53}{RT(\gamma_{\pi}^0 + \gamma_{\pi}^r)}. \quad (3.26)$$

Питому ентальпію водяної пари високої температури обчислюють за рівнянням:

$$h = g - T(\partial g/\partial T)_p; \quad (3.27)$$

$$h(\pi, \tau) = 540R(\gamma_\tau^\circ + \gamma_\tau^r). \quad (3.28)$$

Часткові похідні розраховують за рівняннями:

$$\gamma_\pi^0 = \frac{1}{\pi} + 0; \quad (3.29)$$

$$\gamma_\tau^\circ = 0 + \sum_{i=1}^6 n_i J_i^\circ \tau^{J_i^\circ - 1} \quad (3.30)$$

де $\gamma_\pi^\circ = \left[\frac{\partial \gamma^\circ}{\partial \pi} \right]_\tau$, $\gamma_\tau^\circ = \left[\frac{\partial \gamma^\circ}{\partial \tau} \right]_\pi$

$$\gamma_\pi^r = \sum_{i=1}^5 n_i I_i \pi^{I_i - 1} \tau^{J_i} \quad (3.31)$$

$$\gamma_\tau^r = \sum_{i=1}^5 n_i \pi^{I_i} J_i \tau^{J_i - 1} \quad (3.32)$$

де $\gamma_\pi^r = \left[\frac{\partial \gamma^r}{\partial \pi} \right]_\tau$, $\gamma_\tau^r = \left[\frac{\partial \gamma^r}{\partial \tau} \right]_\pi$.

Суха насичена пара характеризується однозначною залежністю між тиском і температурою водяної пари. Дана область 4 (див. рис.3.1) являє собою лінію насичення. Оскільки лінію насичення ніколи досягти не можливо (при зменшенні температури пари ми переходимо у зону вологої водяної пари, а при збільшенні температури при тому самому тиску ми переходимо у зону перегрітої пари), то ця лінія є ідеальною.

Лінію насичення для сухої насиченої пари описують рівнянням [53]:

$$\beta^2 \vartheta^2 + n_1 \beta^2 \vartheta + n_2 \beta^2 + n_3 \beta \vartheta^2 + n_4 \beta \vartheta + n_5 \beta + n_6 \vartheta^2 + n_7 \vartheta + n_8 = 0, \quad (3.33)$$

де

$$\beta = (p_s/p^*)^{1/4}; \quad \vartheta = \frac{T_s}{T^*} + \frac{n_9}{\frac{T_s}{T^*} - n_{10}} \quad (3.34)$$

p^* – псевдокритичний тиск, значення якого дорівнює 1 МПа;

T_s – температура насичення;

T^* – псевдо критична температура, значення якої дорівнює 1 К;

n_i – постійні коефіцієнти, які наведені в [53].

Тиск сухої насиченої пари, як функція температури насиченої пари, описується рівнянням [53]:

$$\frac{p_s}{p^*} = \left[\frac{2C}{-B + (B^2 - 4AC)^{1/2}} \right]^4 \quad (3.35)$$

де

$$A = \vartheta^2 + n_1\vartheta + n_2; \quad (3.36)$$

$$B = n_3\vartheta^2 + n_4\vartheta + n_5; \quad (3.37)$$

$$C = n_6\vartheta^2 + n_7\vartheta + n_8. \quad (3.38)$$

Температура сухої насиченої пари, як функція тиску насиченої пари, описується рівнянням:

$$\frac{T_s}{T^*} = \frac{n_{10} + D - [(n_{10} + D)^2 - 4(n_9 + n_{10}D)]^{1/2}}{2} \quad (3.39)$$

де

$$D = \frac{2G}{-F - (F^2 - 4EG)^{1/2}} \quad (3.40)$$

$$E = \beta^2 + n_3\beta + n_6 \quad (3.41)$$

$$F = n_1\beta^2 + n_4\beta + n_7; \quad (3.42)$$

Рівняння (3.35) і (3.39) описують область сухої насиченої пари, яка визначається такими межами тиску і термодинамічної температури:

$$273,15 \text{ К} \leq T_s \leq 647,096 \text{ К};$$

$$611,213 \text{ Па} \leq p_s \leq 22,064 \text{ МПа}.$$

У документі ГСССД 187-99 [62] реалізовано розрахунок ентальпії води та водяної пари на основі рівнянь із методики IAPWS та сформовано таблиці значень ентальпії та абсолютної похибки визначення ентальпії для діапазону температури від 0 до 1000 °С та тиску від 0,001 до 1000 МПа. Проте застосування цих таблиць

під час автоматизованого проектування систем обліку теплової енергії є недоцільним та призводить до виникнення додаткових похибок визначення ентальпії. Тому при розрахунках параметрів теплоносія застосовують рівняння, які описують термодинамічні властивості води та водяної пари.

Спрощене рівняння для розрахунку ентальпії води представлено у методиці МИ 2412-97 [51]. Похибку значень ентальпії, отриманих за цим рівнянням, визначено відносно табличних значень [62]. Порівняння значень ентальпії із [62], а також значень обчислених за рівняннями із [51] та [53] представлено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Порівняння значень ентальпії обчислених за формулами IAPWS 97 [53] та Рекомендаціями по метрології МИ 2412-97 РФ 1997р [51] і ГСССД 187-99[62]

Значення температури, К та абсолютного тиску, МПа		Значення ентальпії, кДж/кг		
<i>T</i> , К	<i>P</i> , МПа	IAPWS 97	ГСССД 187-99	МИ 2412-97
323,15	0,5	209,7 6	209,75	209,75
348,15	1	314,7 5	314,73	314,87
373,15	0,5	419,4	419,36	419,45
423,15	1	632,5 7	632,6	632,11

Як видно із таблиці 3.1, розбіжність результатів обчислення ентальпії за наведеними методиками є незначною. З огляду на це, при автоматизованому проектуванні систем обліку теплової енергії доцільно застосовувати рівняння представлені в [51], [53].

Перша Міжнародна таблиця динамічної в'язкості була прийнята у 1964 р. Вона охоплювала область тисків від 0,1 до 50 МПа і температур від 0 до 700 °С [63].

У 1975 р. були проведені нові дослідження, які дозволили розширити і суттєво уточнити значення динамічної в'язкості, особливо у критичній області, на базі яких були отримані нові залежності для розрахунку динамічної в'язкості води та водяної пари [64].

У 1977 р. був прийнятий новий нормативний документ по динамічній в'язкості води та водяної пари для тисків до 100 МПа і температур від 0 до 800 °С [65].

На сьогоднішній день діють експериментальні дані динамічної в'язкості, які були отримані у 1975 р. На базі цих даних були розроблені рівняння для розрахунку динамічної в'язкості води та водяної пари [64-66].

У 1985 р. були отримані уточнені рівняння для розрахунку динамічної в'язкості води та водяної пари.

Розрахунок динамічної в'язкості води та водяної пари відповідно до IAPWS85 [67] здійснюється за рівняннями:

$$\mu = \mu^* \cdot \bar{\mu}_0 \cdot \bar{\mu}_1 \cdot \bar{\mu}_2 \quad (3.43)$$

де

$$\mu^* = 55,071 \cdot 10^{-6} \text{Па} \cdot \text{с} \quad (3.44)$$

$$\bar{\mu}_0 = \frac{\sqrt{\bar{T}_\mu}}{\sum_{i=0}^3 H_{0i} \cdot \bar{T}_\mu^{-i}} \quad (3.45)$$

$$\bar{T}_\mu = \frac{T}{T_*} \quad (3.46)$$

$$T_* = 647,226 \text{ K} \quad (3.47)$$

$$\bar{\mu}_1 = \exp \left[\bar{\rho}_\mu \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^6 H_{1ij} \left(\frac{1}{\bar{T}_\mu} - 1 \right)^i (\bar{\rho}_\mu - 1)^j \right] \quad (3.48)$$

$$\bar{\rho}_\mu = \frac{\rho}{\rho_*} \quad (3.49)$$

$$\rho_* = 317,763 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad (3.50)$$

$$\mu_2 = \begin{cases} 0,922 \cdot \chi_\mu^{0,0263} & \text{для } \chi_\mu \geq 21,93 \\ 1 & \text{для } \chi_\mu < 21,93 \end{cases} \quad (3.51)$$

$$\chi_\mu = \frac{22,115 \cdot \gamma_{\text{пп}}}{\rho^* \cdot \rho_*^2 \cdot v^2 \cdot \gamma_\pi} \quad (3.52)$$

H_{0i}, H_{1ij} - постійні коефіцієнти, значення яких наведено у [64]

За результатами проведеного аналізу методик визначення властивостей теплоносіїв (води, водяної пари) встановлено, що для реалізації повної математичної моделі системи вимірювання кількості теплової енергії необхідно розробити методику визначення показника адиабати перегрітої водяної пари.

3.2. Розроблення методик визначення властивостей теплоносія (води, водяної пари) для окремих піддіапазонів зміни параметрів теплоносія

Основними параметрами, які необхідно визначати під час обліку кількості теплової енергії, що переноситься перегрітою парою за певний проміжок часу, є ентальпія та витрата пари. Умови застосування витратомірів під час вимірювання витрати пари є складними, зокрема це високий тиск та температура, тому в таких випадках широко застосовують витратоміри змінного перепаду тиску [68]. Для реалізації рівняння витрати за методом змінного перепаду тиску необхідно визначати густину, динамічну в'язкість та показник адиабати середовища.

В СВКТЕ розрахунок витрати і кількості виконують на основі обчислених значень параметрів потоку. Отже, для реалізації алгоритмів обчислення витрати у таких системах необхідно застосувати точні методики розрахунку параметрів теплоносія.

Системи теплопостачання, в яких у якості теплоносія застосовують пару, в більшості випадків влаштовують у промислових котельнях для обігріву

виробничих та адміністративних приміщень через те, що характерною особливістю паропроводів є шум і висока температура опалювальних приладів. Згідно з [5], облік теплової енергії, яка постачається з перегрітою парою, здійснюють приладовим способом. Кількість відпущеної теплової енергії визначають за різницею показів теплових лічильників, які встановлені на паропроводі і конденсатопроводі. Облік теплової енергії, яка постачається з перегрітою парою, у разі відсутності засобів вимірювання витрати пари, що враховують наявність у ній рідкої фази, здійснюють розрахунковим способом.

Для промислового застосування розроблена методика IAPWS-IF97 [53], проте даний документ містить зміни, які доповнюють лише базове рівняння для області перегрітої пари високої температури, значення якої знаходяться в межах від 800°C до 2000°C та які не стосуються рівнянь для визначення термодинамічних параметрів областей води, насиченої та перегрітої пари до 800°C .

Отже, у відомих джерелах відсутні залежності для обчислення показника адіабати водяної пари, тому розроблення аналітичних залежностей та алгоритму обчислення показника адіабати для їх застосування під час вимірювання витрати водяної пари за методом змінного перепаду тиску є актуальним завданням.

Область параметрів перегрітої пари обмежена кривою насичення (див.рис.3.2), тому обчислюючи її теплофізичні параметри слід контролювати граничні значення тиску та температури пари на лінії насичення [69]. У документі IAPWS-IF97 [53], діапазон температури поділено на декілька піддіапазонів для досягнення вищої точності рівнянь розрахунку параметрів пари у кожному з піддіапазонів. Ці піддіапазони є такими: від 0°C до 350°C , від 350°C до 590°C , від 590°C до 800°C . Оскільки у даній роботі розглянуто промислові системи вимірювання витрати водяної пари, то нижню границю температури обмежено значенням 97°C . Тиск пари на лінії насичення для вказаних піддіапазонів температури визначено таким чином:

- для діапазону температури від 97°C до 350°C граничному значенню тиску перегрітої пари, (p) відповідає тиск сухої насиченої пари $p_c(T)$, який обчислюють з розв'язку рівняння лінії насичення сухої пари [70];

- для діапазону температури від 350°C до 590°C граничне значення тиску перегрітої пари визначають за формулою [53]:

$$p_{wc} = n_1 + n_2 T + n_3 T^2, \quad (3.53)$$

де T – температура перегрітої пари, K ;

n_1, n_2, n_3 – постійні коефіцієнти, на межі між областю перегрітої пари та двостановою областю перегрітої води та охолодженої пари [52];

- для діапазону температури від 590°C до 800°C за граничне значення тиску перегрітої пари приймаємо 100 МПа .

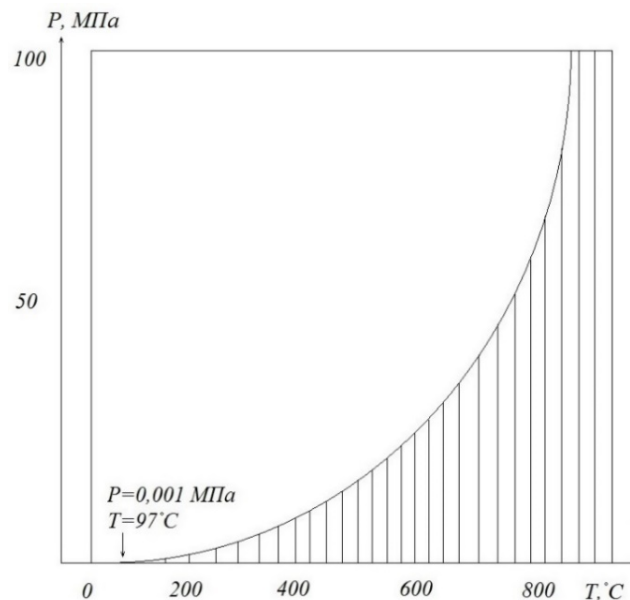


Рис.3.2. Лінія насичення та область перегрітої водяної пари

Якщо рівняння стану виражено залежністю питомого об'єму від тиску та температури перегрітої пари $v = v(p, T)$, то показник адіабати перегрітої пари доцільно визначати за рівнянням [71]:

$$\chi = -\frac{v}{p} \cdot \frac{c_p}{c_v} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T^{-1}, \quad (3.54)$$

де v – питомий об’єм перегрітої пари, c_p - питома ізобарна теплоємність перегрітої пари, c_v - питома ізохорна теплоємність перегрітої пари, p - тиск перегрітої пари, T – температура перегрітої пари.

Для визначення термодинамічних параметрів перегрітої водяної пари v , c_p , c_v для діапазону температури до 800 °С (область перегрітої пари, див. рис.3.1.) застосовано рівняння [53]. Зокрема, питомий об’єм водяної пари може бути обчислений за рівнянням з методики IAPWS-IF97 [53]:

$$v(\pi, \tau) \frac{p}{RT} = \pi(\gamma_{\pi}^0 + \gamma_{\pi}^r), \quad (3.55)$$

де $\pi = p/p^*$; $p^* = 1 \text{ МПа}$;

γ_{π}^0 , γ_{π}^r - часткові похідні питомого об’єму по тиску [53].

Питому ізобарну та ізохорну теплоємність водяної пари обчислюють за рівняннями [53]:

$$c_p = -\tau^2 R(\gamma_{\tau\tau}^0 + \gamma_{\tau\tau}^r), \quad (3.56)$$

$$c_v = R \cdot \left[-\tau^2(\gamma_{\tau\tau}^0 + \gamma_{\tau\tau}^r) - \frac{(1 + \pi\gamma_{\pi}^r - \tau\pi\gamma_{\pi\tau}^r)^2}{1 - \pi^2\gamma_{\pi\pi}^r} \right], \quad (3.57)$$

де τ – приведена температура, $\tau = T^*/T$, $T^* = 540 \text{ К}$.

Для формули (3.54) потрібно отримати відношення питомих теплоємностей c_p/c_v . Застосувавши вирази (3.56) і (3.57), отримуємо:

$$\frac{c_p}{c_v} = \frac{\tau^2(\gamma_{\tau\tau}^0 + \gamma_{\tau\tau}^r)(\gamma_{\pi\pi}^0 + \gamma_{\pi\pi}^r)}{((\gamma_{\pi}^0 + \gamma_{\pi}^r) - \tau(\gamma_{\pi\tau}^0 + \gamma_{\pi\tau}^r))^2 - \tau^2(\gamma_{\tau\tau}^0 + \gamma_{\tau\tau}^r)(\gamma_{\pi\pi}^0 + \gamma_{\pi\pi}^r)}. \quad (3.58)$$

Застосовуючи формулу (3.55), запишемо вираз відношення питомого об’єму до тиску пари у такому вигляді:

$$\frac{v}{p} = \frac{(\gamma_{\pi}^0 + \gamma_{\pi}^r)RT}{pp^*}. \quad (3.59)$$

На основі залежностей із [53] отримаємо вираз часткової похідної $\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T$:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T^{-1} &= \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T^{-1} \cdot \frac{p^*}{p^*} = \left(\frac{\partial v}{\partial \pi \cdot p^*}\right)_T^{-1} = \left[\frac{\partial \left(\frac{(\gamma_\pi^0 + \gamma_\pi^r)RT}{p^*}\right)}{\partial \pi \cdot p^*}\right]_T^{-1} \\ &= \left[\frac{RT}{(p^*)^2} \cdot \frac{\partial \gamma_\pi}{\partial \pi}\right]_T^{-1}, \end{aligned} \quad (3.60)$$

де $dp = p^* \cdot d\pi$.

Підставивши отримані вирази (3.58) – (3.60) у формулу (3.54), отримуємо:

$$\chi = \frac{\tau^2(\gamma_\pi^0 + \gamma_\pi^r)(\gamma_{\tau\tau}^0 + \gamma_{\tau\tau}^r)}{\pi[(\gamma_\pi^0 + \gamma_\pi^r) - \tau(\gamma_{\pi\tau}^0 + \gamma_{\pi\tau}^r)]^2 - \tau^2(\gamma_{\tau\tau}^0 + \gamma_{\tau\tau}^r)(\gamma_{\pi\pi}^0 + \gamma_{\pi\pi}^r)}. \quad (3.61)$$

Ввівши позначення $\gamma_1 = \gamma_\pi^0 + \gamma_\pi^r$, $\gamma_2 = \gamma_{\tau\tau}^0 + \gamma_{\tau\tau}^r$, $\gamma_3 = \gamma_{\pi\tau}^0 + \gamma_{\pi\tau}^r$, $\gamma_4 = \gamma_{\pi\pi}^0 + \gamma_{\pi\pi}^r$, запишемо формулу (3.61) у вигляді:

$$\chi = \frac{\tau^2 \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2}{\pi \cdot [(\gamma_1 - \tau \cdot \gamma_3)^2 - \tau^2 \cdot \gamma_4 \cdot \gamma_2]} \quad (3.62)$$

Розроблене рівняння (3.62) дає можливість обчислити значення показника адіабаты перегрітої водяної пари в діапазоні температури від 0°C до 800°C та тиску до 100 МПа. Рівняння (3.62) доповнює набір залежностей роботи IAPWS-IF97 [53], необхідних для обчислення параметрів перегрітої водяної пари під час вимірювання її витрати за методом змінного перепаду тиску. Однак, для застосування формули (3.62) необхідно обчислити значення часткових похідних питомого об'єму, що ввійшли до рівняння (3.62). Формули цих часткових похідних є поліномами, які містять до 56 членів, що в свою чергу призводить до опрацювання великих масивів коефіцієнтів, а, відповідно, до ускладнення алгоритму та збільшення часу розрахунку. Тому доцільно розробити спрощене рівняння для обчислення показника адіабаты, що дасть можливість спростити алгоритм його розрахунку.

Застосовуючи формулу (3.62) сформовано масив точних значень показника адіабаты для діапазону температури перегрітої водяної пари від 97°C до 800°C та тиску до 100 МПа. Похибка обчислення показника адіабаты за формулою (3.62) не

перевищує 0,5%, за винятком області високого тиску (більше 10 МПа), де похибка може бути дещо більшою.

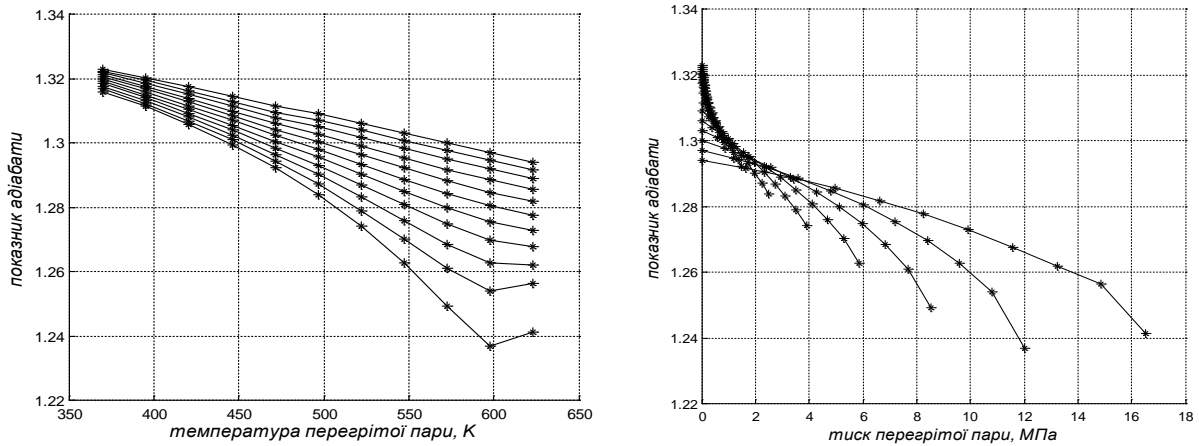


Рис.3.3. Графіки залежностей показника адіабати від зміни температури пари в діапазоні від 97°С до 350°С та зміни тиску від 0 до $p_c(T)$

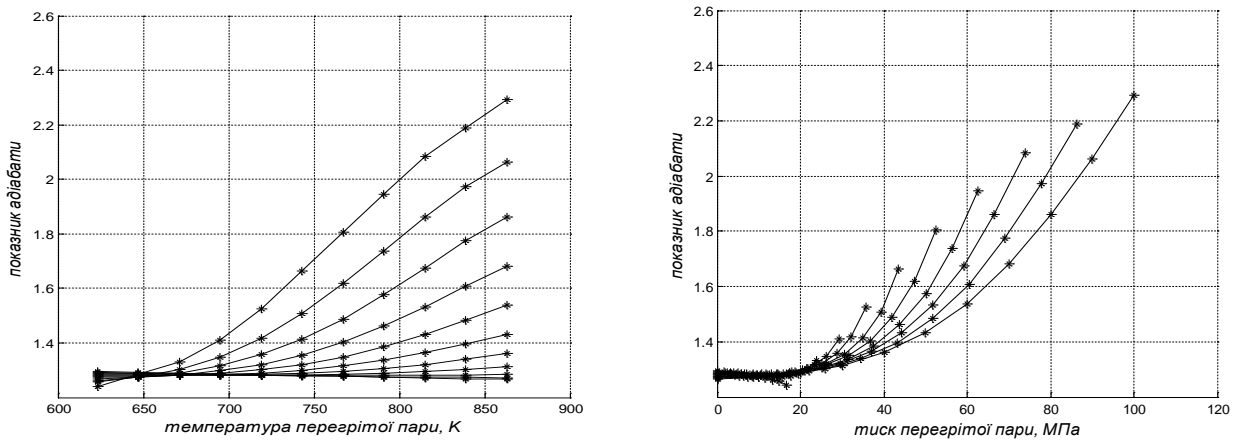


Рис.3.4. Графіки залежностей показника адіабати від зміни температури пари в діапазоні від 350°С до 590°С та зміни тиску від 0 до $p_{ws}(T)$

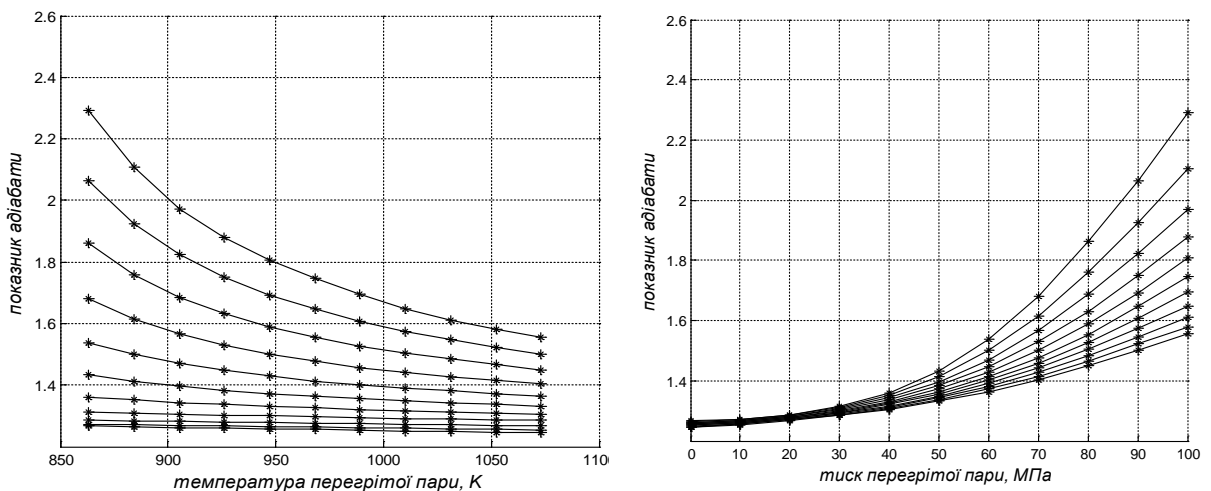


Рис.3.5. Графіки залежностей показника адіабати від зміни температури пари в діапазоні від 590°С до 800°С та зміни тиску від 0 до 100 МПа

На основі сформованого масиву точних значень показника адіабати автором розроблені спрощені залежності для обчислення цього показника в алгоритмах обчислювачів витрати перегрітої водяної пари [72]. Масив значень показника адіабати представлений у вигляді графіків залежностей показника адіабати перегрітої пари від зміни тиску та температури для трьох діапазонів зміни температури (див. рис.3.3-3.5).

В результаті аналізу залежностей значень χ від тиску та температури встановлено, що вплив тиску на показник адіабати $\chi=f(p,T)$ перегрітої пари можна описати квадратичною функцією:

$$\chi = a_0 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_2 \quad (3.63)$$

де p – тиск перегрітої пари, МПа.

Коефіцієнти рівняння (3.63) a_0 , a_1 , a_2 для вказаних діапазонів тиску та температури перегрітої пари визначено за методом найменших квадратів шляхом апроксимації масиву даних, сформованого за рівнянням (3.62).

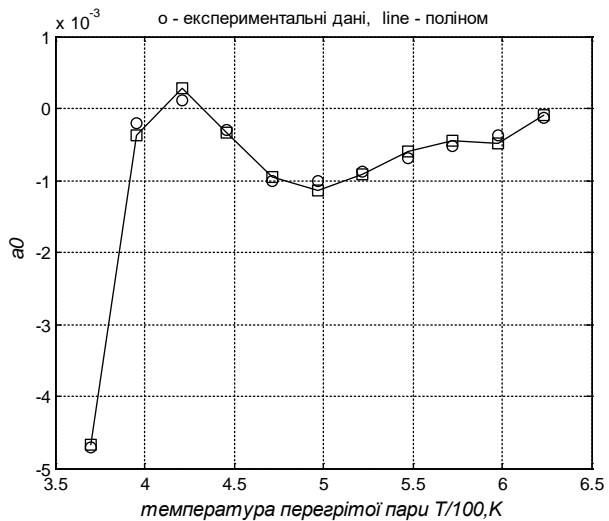
Залежності коефіцієнтів рівняння (3.63) від температури доцільно апроксимувати поліномами різного порядку. Зокрема для піддіапазону температури пари від 97°C до 350°C отримано такі поліноми:

$$a_0 = 2.2039 \cdot 10^{-3} t^5 - 5.7263 \cdot 10^{-2} t^4 + 5.9141 \cdot 10^{-1} t^3 - 3.0336 t^2 + 7.725 t - 7.8102, \quad t=T/100 \quad (3.64)$$

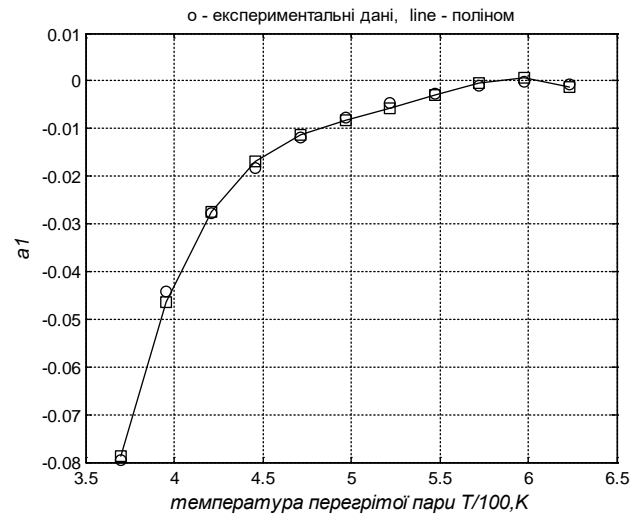
$$a_1 = -9.5634 \cdot 10^{-3} t^4 + 2.0267 \cdot 10^{-1} t^3 - 1.6089 t^2 + 5.6809 t - 7.5455, \quad (3.65)$$

$$a_2 = -4.399 \cdot 10^{-4} t^2 - 7.8874 \cdot 10^{-3} t + 1.3591. \quad (3.66)$$

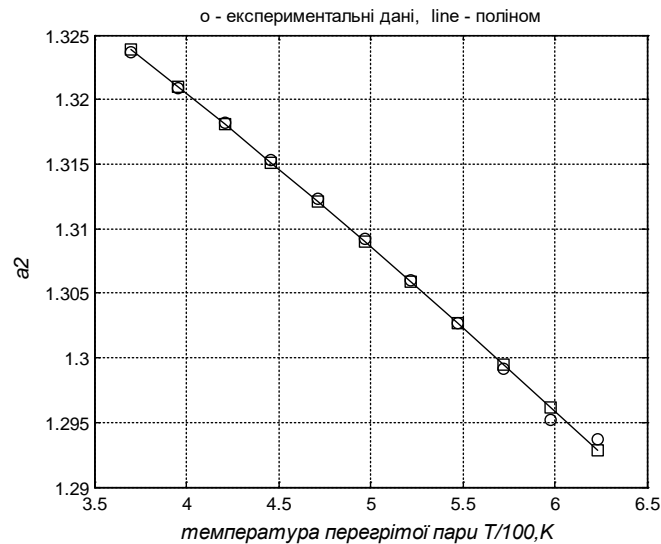
Результати наближення значень коефіцієнтів поліномами (3.64) – (3.66) представлено на рис.3.6.



а)



б)



в)

Рис.3.6. Результати апроксимації залежностей коефіцієнтів a_0 , a_1 , a_2 рівняння (3.63) від температури ($T = 97 \div 350$ °С)

Для інших двох піддіапазонів температури залежності коефіцієнтів рівняння (3.63) від температури апроксимовано такими поліномами:

- для температури від 350 °С до 590 °С

$$a_0 = 1,1773 \cdot 10^{-4} t^3 - 2,8718 \cdot 10^{-3} t^2 + 2,3125 \cdot 10^{-2} t - 6,1223 \cdot 10^{-2}, \quad (3.67)$$

$$a_1 = -1,5532 \cdot 10^{-3} t^4 + 4,7092 \cdot 10^{-2} t^3 - 5,2875 \cdot 10^{-1} t^2 + 2,6039 t - 4,7479, \quad (3.68)$$

$$a_2 = 2,2798 \cdot 10^{-3} t^4 - 7,9756 \cdot 10^{-2} t^3 + 1,0078 t^2 - 5,4924 t + 12,248. \quad (3.69)$$

- для температури від 590 °С до 800 °С

$$a_0 = -1.4095 \cdot 10^{-5} t^3 + 4.3459 \cdot 10^{-4} t^2 - 4.4885 \cdot 10^{-3} t + 1.5565 \cdot 10^{-2}, \quad (3.70)$$

$$a_1 = 5.6991 \cdot 10^{-4} t^3 - 1.7517 \cdot 10^{-2} t^2 + 1.8030 \cdot 10^{-1} t - 6.2141 \cdot 10^{-1}, \quad (3.71)$$

$$a_2 = 5.0151 \cdot 10^{-3} t^2 - 1.1572 \cdot 10^{-1} t + 1.9127. \quad (3.72)$$

Отже, спрощений алгоритм обчислення показника адіабати є таким:

- 1) задають вихідні значення температури та тиску перегрітої водяної пари;
- 2) визначають належність значення температури до одного з діапазонів застосування спрощеного алгоритму;
- 3) в залежності від обраного діапазону температури обчислюють значення коефіцієнтів a_0 , a_1 , a_2 застосовуючи рівняння (3.64) – (3.66) або (3.67) – (3.69) або (3.70) – (3.72).
- 4) маючи значення коефіцієнтів a_0 , a_1 , a_2 за рівнянням (3.63) обчислюють значення показника адіабати.

Встановлено, що запропонований алгоритм дає можливість обчислити показник адіабати з методичною похибкою, що не перевищує 2,62% для діапазону зміни температури пари від 97°C до 800°C та тиску – від тиску насичення до 100 МПа. Така точність розрахунку є достатньою для застосування спрощеного алгоритму у обчислювачах витрати перегрітої водяної пари.

3.3. Перевірка адекватності розроблених методик. Оцінка невизначеності значень теплофізичних властивостей (показника адіабати, ентальпії) отриманих за розробленими методиками

Після приєднання у 2003 України до «Угоди про взаємне визнання національних еталонів і сертифікатів калібрування та вимірювання, що видаються національними метрологічними інститутами (CIPM MRA)» виникла необхідність у переході до нової системи забезпечення єдності вимірювань [73]. Єдність вимірювань забезпечується державною системою вимірювань, яка базується на основоположних стандартах ДСТУ 2681-94 [74], ДСТУ 2682-94 [75]. Ці стандарти встановлюють терміни та поняття у галузі метрології та метрологічного

забезпечення, які є обов'язковими для використання в усіх видах нормативної документації, у довідковій, науково-технічній та навчально-методичній літературі, що належить до метрології та метрологічного забезпечення, а також для робіт зі стандартизації або при використанні результатів цих робіт, включаючи програмні засоби для комп'ютерних систем [76].

Для застосування в системах автоматизованого проектування СВКТЕ, необхідно розробити методику оцінювання невизначеності обчисленого значення ентальпії, що враховує вплив невизначеностей вимірюваних значень тиску та температури води (водяної пари) [70].

Рівняння для оцінювання невизначеності ентальпії отримано розглядаючи ентальпію як величину (y), яка визначається непрямим методом та пов'язана функціональною залежністю $y=F(y_1, y_2, \dots, y_n)$ з вимірюваними параметрами (y_i) (температурою і тиском) [59]:

$$u'_y = \left[u'^2_{MF} + \sum_i^n C_{y_i}^{*2} u'^2_{y_i} \right]^{0,5} \quad (3.73)$$

де u'_{MF} - відносна методична невизначеність функціональної залежності; u'_{y_i} - невизначеність результату вимірювання i -го параметра; $C_{y_i}^*$ - безрозмірний коефіцієнт впливу невизначеності параметра x_i на невизначеність вихідної величини y , який слід визначати також за формулою:

$$C_i^* = \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{y} \quad (3.74)$$

Застосувавши рівняння (3.73) до залежності ентальпії від тиску та температури пари $h=F(p, T)$ отримано рівняння для обчислення відносної стандартної невизначеності ентальпії:

$$u'_h = \left[u'^2_{Mh} + (C_{hT} u'_T)^2 + (C_{hp} u'_p)^2 \right]^{0,5} \quad (3.75)$$

де u'_{Mh} - методична невизначеність залежності $h=F(p, T)$, $u'_{Mh} = 0,15\%$ [53];

C_{hT} - відносний коефіцієнт впливу невизначеності вимірюваного значення температури води (водяної пари) на невизначеність ентальпії;

C_{hp} – відносний коефіцієнти впливу невизначеності тиску води (водяної пари) на невизначеність ентальпії;

u'_T - відносна стандартна невизначеність результату вимірювання температури води (водяної пари);

u'_p – відносна стандартна невизначеність результату вимірювання тиску води (водяної пари).

Відносні коефіцієнти чутливості C_{hT} , C_{hp} можуть бути обчислені за формулами (3.76), (3.78), що розроблені за участю автора із застосуванням рівнянь часткових похідних, наведених у [53]:

C_{hT} – відносний коефіцієнт чутливості невизначеності ентальпії до невизначеності вимірюваного значення температури води (водяної пари)

$$C_{hT} = \frac{\partial h}{\partial \tau} \cdot \frac{\tau}{h} = \frac{\tau \gamma_{\tau\tau}}{\gamma_{\tau}}; \quad (3.76)$$

$$\gamma_{\tau\tau} = \sum_{i=1}^{34} n_i (7.1 - \pi)^{l_i} j_i (J_i - 1) (\tau - 1.222)^{J_i - 2}; \quad (3.77)$$

C_{hp} – відносний коефіцієнти чутливості невизначеності ентальпії до невизначеності тиску води (водяної пари):

$$C_{hp} = \frac{\partial h}{\partial \pi} \cdot \frac{\pi}{h} = \frac{\pi \gamma_{\pi\pi}}{\gamma_{\tau}}; \quad (3.78)$$

$$\gamma_{\pi\pi} = \sum_{i=1}^{34} -n_i l_i (7.1 - \pi)^{l_i - 1} J_i (\tau - 1.222)^{J_i - 1}. \quad (3.79)$$

Перевірка коректності реалізації алгоритмів розрахунку ентальпії водяної пари за рівняннями (3.6), (3.7) відносно результатів контрольних розрахунків, наведених у [53], підтвердила їх повну збіжність (див.табл.3.2). Таким чином підтверджено також достовірність значень невизначеності ентальпії, обчислених за рівнянням (3.75) (див. табл. 3.2).

Таблиця 3.2

Значення ентальпії та відносної розширеної невизначеності ентальпії водяної пари

	h , кДж/кг	Uh , кДж/кг
$T=300$ К $P=3$ МПа	$0,115331273 \times 10^3$	1.834

$T=500$ К $P=4$ МПа	$0,975761419 \times 10^3$	0.383
$T=350$ К $P=1$ МПа	$0,322501226 \times 10^3$	0.716

Для того щоб реалізувати розрахунок невизначеності ентальпії за рівнянням (3.75), необхідно обчислити значення коефіцієнтів чутливості за формулами (3.76) і (3.78). Це вимагає виконання складних обчислень із застосуванням масивів коефіцієнтів I , J , n із [53] та контролю меж застосування рівнянь (3.1), (3.6) - (3.9), (3.77), (3.79) за допомогою визначення тиску та температури пари на лінії насичення із рівняння (3.33). Щоб спростити застосування рівняння (3.75) доцільно розробити спрощені залежності для обчислення коефіцієнтів C_{hT} , C_{hp} .

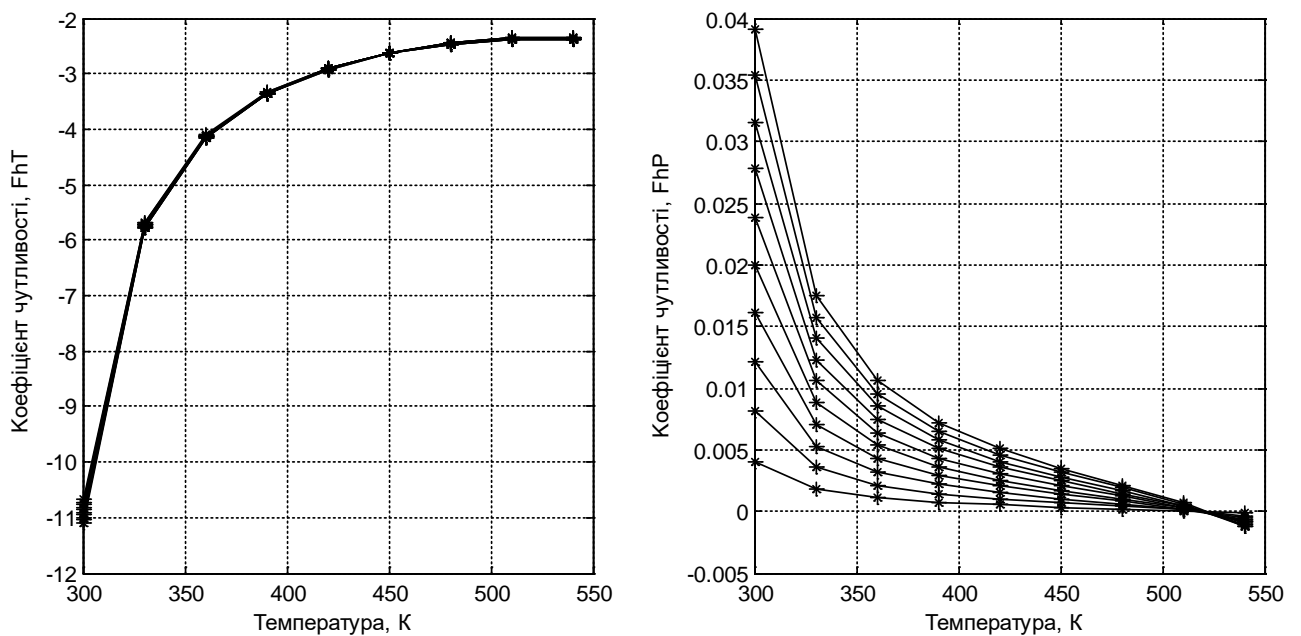


Рис.3.7. Графіки залежностей коефіцієнтів чутливості C_{hT} , C_{hp} від зміни температури теплоносія для фіксованих значень тиску у діапазоні від 0,5 МПа до 5 МПа

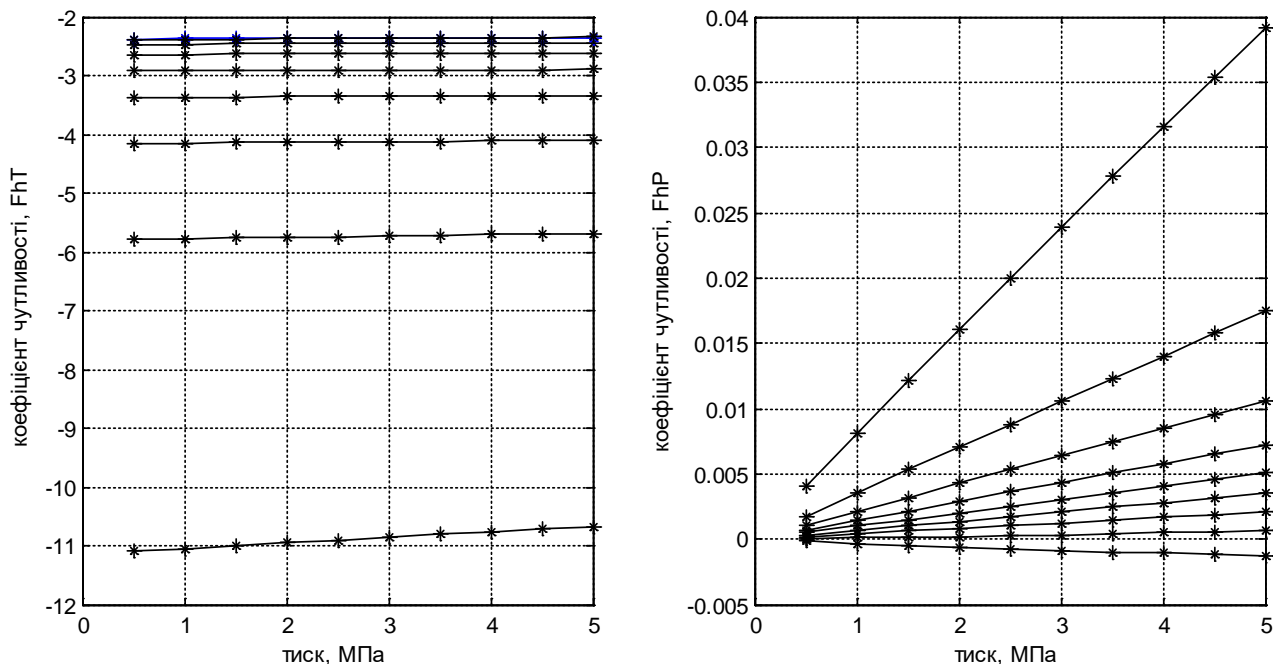


Рис.3.8. Графіки залежностей коефіцієнтів чутливості C_{hT} , C_{hp} від зміни тиску

Автором виконано аналіз залежностей $C_{hT} = F_1(p, T)$ та $C_{hp} = F_2(p, T)$ (рис. 3.7) [70] і встановлено, що залежність $C_{hT} = F_1(p, T)$ з достатньою для практичних задач точністю можна відтворити тільки залежністю від температури, а залежність $C_{hp} = F_2(p, T)$ має врахувати зміну і температури і тиску теплоносія. Спрощені залежності $C_{hT} = F_1(T)$ та $C_{hp} = F_2(p, T)$ розроблено шляхом апроксимації значень C_{hT} , C_{hp} , обчислених із застосуванням рівнянь [53]. У якості апроксимаційної функції застосовано кубічний поліном (рис.3.9-3.10). Спрощені залежності мають вигляд:

$$C_{hT} = 1.34710\Theta^3 - 19.87540\Theta^2 + 96.85850\Theta - 158.4162 \quad (3.80)$$

$$C_{hp} = 0.06p(-0.0265\Theta^3 + 0.3695\Theta^2 - 1.7163\Theta - 2.6647), \quad (3.81)$$

$$\Theta = T/100, K$$

Розроблені за участю автора спрощені залежності пропонується застосувати для визначення коефіцієнтів впливу невизначеностей температури та тиску води (водяної пари) на невизначеності ентальпії для діапазону тиску від 0 до 5 МПа та температури від 300 до 550 К.

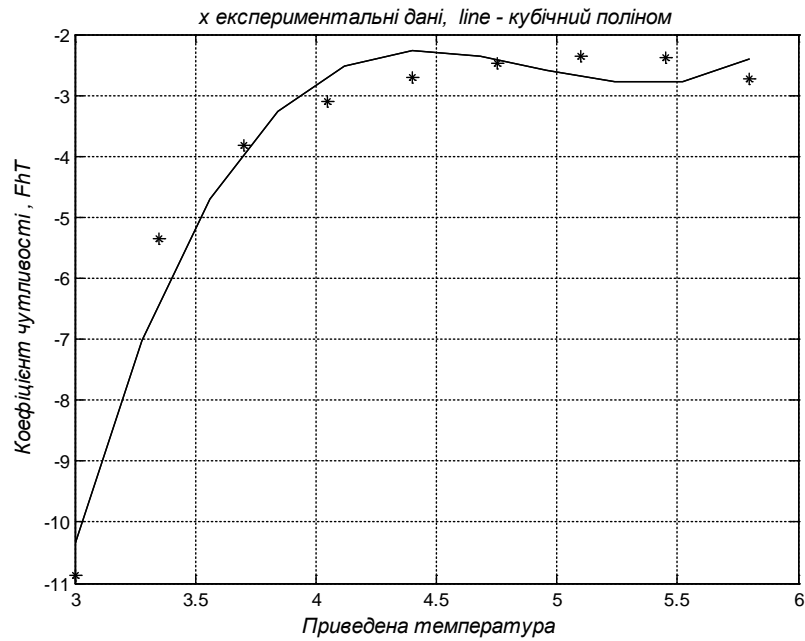


Рис.3.9 Графік залежності усереднених значень коефіцієнта чутливості F_{HT} від зміни температури теплоносія

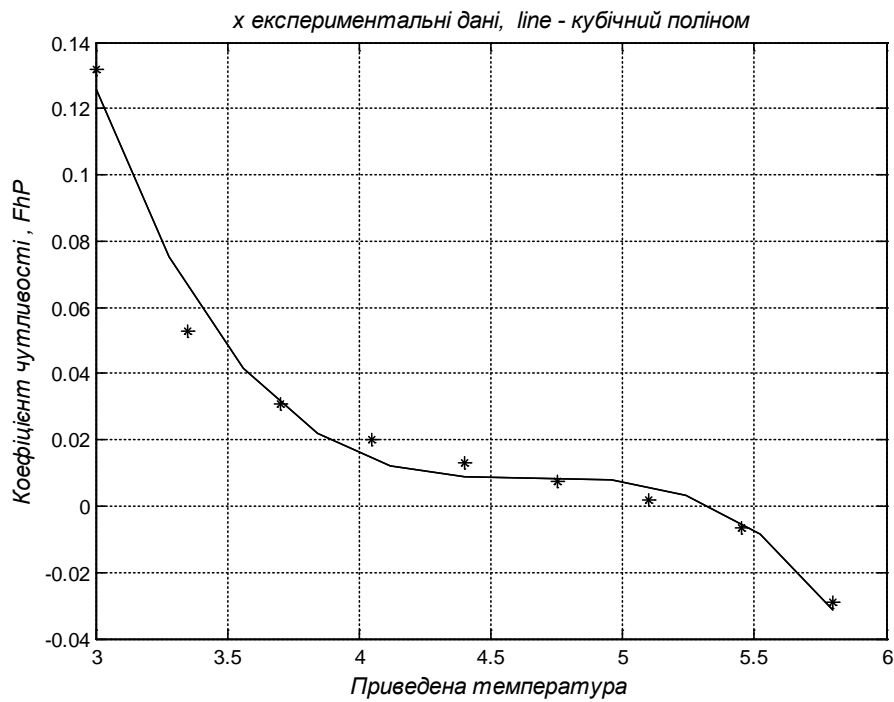


Рис.3.10. Графік залежності усереднених значень коефіцієнта чутливості F_{hp} від зміни температури теплоносія

Відносні відхилення значень C_{HT} , C_{hp} , отриманих за (3.80), (3.81) від значень, отриманих за формулами [53] при зміні температури від 300 К до 550 К становлять відповідно 0,48% і 0,56%.

Рівняння (3.75), (3.80), (3.81) є основою спрощеної методики оцінювання невизначеності ентальпії води (водяної пари), що може бути застосована під час оцінювання метрологічних характеристик систем вимірювання кількості теплової енергії, а також для їх автоматизованого проектування.

Розроблене рівняння (3.75) для розрахунку відносної розширеної невизначеності ентальпії води (водяної пари) із врахуванням методичної невизначеності обчислення ентальпії та невизначеностей результатів вимірювання температури та тиску води (водяної пари) є основою методики оцінювання невизначеності ентальпії і може бути застосоване незалежно від вибору рівняння розрахунку ентальпії.

Для визначення коефіцієнтів чутливості невизначеностей температури та тиску води (водяної пари) до невизначеності ентальпії для діапазону тиску від 0 до 5 МПа та температури від 300 до 550 К пропонується застосувати розроблені за участю автора спрощені залежності.

Застосування розробленої спрощеної методики оцінювання невизначеності ентальпії води (водяної пари) дає можливість спростити алгоритми системи автоматизованого проектування засобів вимірювання кількості теплової енергії [70].

Методичну похибку розрахунку показника адіабати (δ_m) за спрощеними залежностями визначено за рівнянням [77]:

$$\delta_m = [\delta_{\text{сист}}^2 + (2\delta_{\text{ст}})^2 + \delta_{\text{зр}}^2]^{0,5} \quad (3.82)$$

де $\delta_{\text{сист}}$ – систематичне відхилення розрахункових значень від зразкових значень показника адіабати:

$$\delta_{\text{сист}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_i \quad (3.83)$$

δ_i – відносне відхилення розрахункового значення показника адіабати від зразкового в i -й точці:

$$\delta_i = 100 [(\chi_p - \chi_{зр})/\chi_{зр}]; \quad (3.84)$$

$\delta_{ст}$ – стандартне відхилення:

$$\delta_{ст} = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\delta_i - \delta_{сист})^2 \right]^{0.5} \quad (3.85)$$

$\delta_{зр}$ – похибка зразкових значень показника адіабати, обчислених за рівнянням (3.62).

Результати порівняння значень показника адіабати, отриманих за спрощеним рівнянням (3.63), із значеннями, що отримані за рівнянням (3.62), представлені у вигляді графіків залежностей відносного відхилення δ_i від тиску для фіксованих значень температури (див. рис. 3.11).

Криві залежностей δ_i для кожної окремої температури на рис. 3.11 позначені такими символами:

- для діапазону зміни температури від 97 до 350°C (рис.3.11 а):

o – 370,15 К; Δ – 395,45 К; \times – 420,75 К; + – 446,05 К;

\triangleleft – 471,35 К; * – 496,65 К; \square – 521,95 К; \triangleright – 547,25 К; \diamond – 572,55 К;

∇ – 597,85 К; * – 623,15 К.

- для діапазону зміни температури від 350 до 590°C (рис.3.11 б):

o – 623,15 К; Δ – 647,15 К; \times – 671,15 К; + – 695,15 К;

\triangleleft – 719,15 К; * – 743,15 К; \square – 767,15 К; \triangleright – 791,15 К; \diamond – 815,15 К;

∇ – 839,15 К; * – 863,15 К.

- для діапазону зміни температури від 590 до 800°C (рис.3.11 в):

o – 863,15 К; Δ – 884,15 К; \times – 905,19 К; + – 926,19 К;

\triangleleft – 947,18 К; * – 968,18 К; \square – 989,17 К; \triangleright – 1010,17 К; \diamond – 1031,16 К;

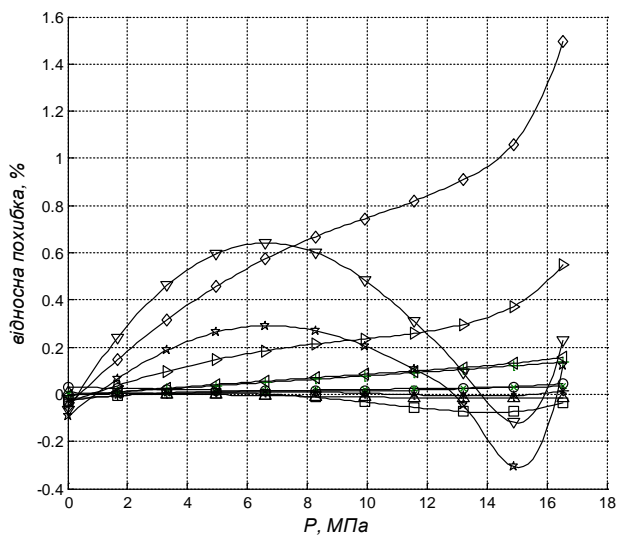
∇ – 1052,6 К; * – 1073,15 К.

Із графіків представлених на рис.3.11 видно, що відносне відхилення δ_i знаходиться в межах:

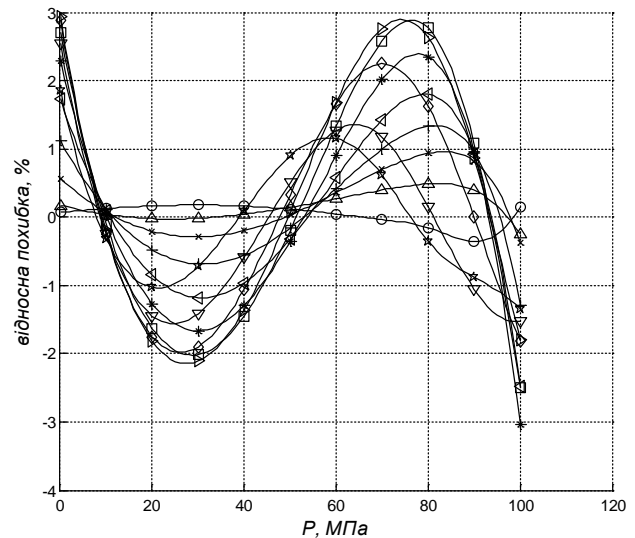
- для діапазону зміни температури від 97 до 350°C від $-0,3\%$ до $+1,5\%$;
- для діапазону зміни температури від 350 до 590°C від $-3,0\%$ до $+3,0\%$;
- для діапазону зміни температури від 590 до 800°C від $-1,5\%$ до $+1,5\%$.

Відповідно, методична похибка розрахунку показника адіабати за рівнянням (3.63), обчислена за формулою (3.82) становить:

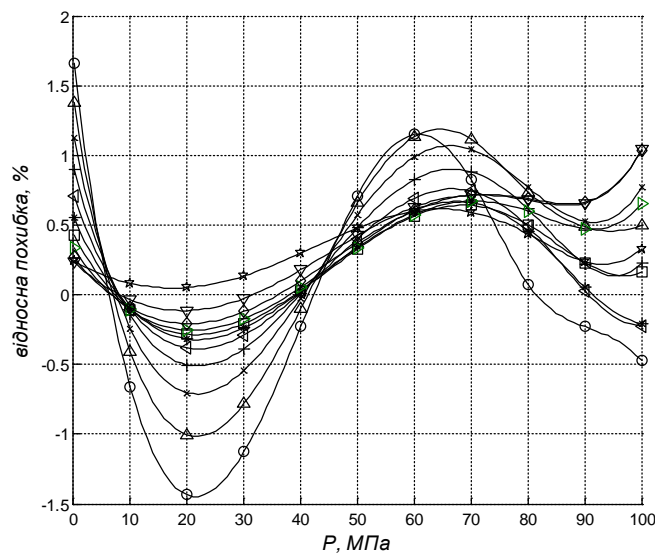
- для діапазону зміни температури від 97 до 350°C - $0,72\%$;
- для діапазону зміни температури від 350 до 590°C - $2,62\%$;
- для діапазону зміни температури від 590 до 800°C - $1,19\%$.



а)



б)



в)

Рис. 3.11. Залежності відносного відхилення значень показника адіабати, обчислених за розробленим алгоритмом, від значень отриманих за (3.62):

- а) $T=97\div 350^{\circ}\text{C}$, $p=0\div p_c$; б) $T=350\div 590^{\circ}\text{C}$, $p=0\div p_{wc}$;
в) $T=590\div 800^{\circ}\text{C}$, $p=0\div 100\text{ МПа}$

Оскільки показник адіабати не входить безпосередньо до рівняння витрати пари за методом змінного перепаду тиску, то вплив похибки його обчислення на невизначеність вимірюваного значення витрати є опосередкованим. Тому застосування спрощеного рівняння (3.63) не призведе до суттєвого збільшення невизначеності вимірюваного значення витрати [78], а отже, рівняння (3.63) може бути застосоване в алгоритмах обчислювачів витрати перегрітої водяної пари.

Висновки до розділу 3

1. Проведено аналіз існуючих методик розрахунку термодинамічних властивостей води, водяної пари за результатами якого визначено методики, які доцільно застосовувати для автоматизованого проектування СВКТЕ. Наведено рівняння розрахунку термодинамічних властивостей води та водяної пари.

На основі базових термодинамічних залежностей і рівнянь IAPWS-IF97 розроблено рівняння розрахунку точних значень показника адіабати. За результатами опрацювання цього рівняння розроблено спрощений алгоритм для розрахунку показника адіабати перегрітої пари для тиску пари від лінії насичення до 100МПа та температури від 97°C до 800°C. Виконано перевірку розробленого спрощеного рівняння шляхом порівняння результатів обчислення показника адіабати за спрощеним рівнянням із зразковими значеннями, отриманими за рівняннями IAPWS-IF97.

2. Розроблено спрощені аналітичні залежності для обчислення відносних коефіцієнтів чутливості невизначеності ентальпії до невизначеності результатів вимірювання тиску та температури води.

3. Розроблена спрощена методика оцінювання невизначеності ентальпії води (водяної пари) може бути застосована під час оцінювання метрологічних

характеристик систем вимірювання кількості теплової енергії, а також для їх автоматизованого проектування.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

4.1. Розроблення структури САПР систем вимірювання кількості теплової енергії

Налагодження точного обліку ТЕ є необхідною умовою її ефективного та економного використання. Точне вимірювання кількості ТЕ виконують за допомогою сучасних систем на основі мікропроцесорних контролерів, що здатні реалізувати складні алгоритми обчислення кількості ТЕ за вимірюваними значеннями параметрів теплоносія. Процес проектування та розрахунку таких систем є складним та трудомістким, тому для підвищення його ефективності доцільним є застосування програмного комплексу для автоматизації процесу проектування [79].

Системи автоматизованого проектування (англ. computer-aided design systems) - програмні комплекси для створення, редагування та оптимізації проектної і технологічної документації. Впровадження програмних комплексів для автоматизації процесів проектування забезпечує підвищення точності розрахунків, якості технологічної документації, а також дозволяє скоротити процес проектування. Системи автоматизованого проектування дають можливість на основі наукових досліджень вдосконалювати методологію проектування та теорію математичного моделювання складних систем та процесів [79].

Як показав аналіз ринку інформаційних технологій поширеними програмними пакетами для проектування, виконання моделювання та інженерних розрахунків є ANSYS, SolidWorks, FlowVision, Mathcad, Maple, а актуальними прикладними програмами для виконання графічної частини проектно-конструкторської документації - AutoCAD, КОМПАС та ін. [80]. Застосування цих програмних пакетів дає можливість вирішити широкий спектр задач моделювання та проектування. Однак такі програмні пакети не враховують ряду обмежень, що накладаються діючими нормативними документами на

конструкцію та умови роботи систем вимірювання кількості ТЕ, а тому під час їх застосування проєктант мусить власноруч контролювати велику кількість таких обмежень.

Для успішного застосування САПР засобів вимірювання кількості ТЕ повинна виконувати такі функції:

- автоматично виявляти найкращі проєктні рішення у всіх випадках, коли оптимізаційні задачі піддаються формалізації;

- автоматично виконувати перевірку коректності введених вхідних даних із врахуванням їх розмірності; формувати інтерактивні повідомлення за необхідності коректування введених даних;

- автоматично перевіряти сумісність рішень, прийнятих щодо різних частин проєктованої системи і здійснювати (коли це можливо) коректування несумісних рішень;

- автоматично видавати у звичній для проєктувальника формі проміжні результати;

- надавати проєктувальникові можливість вносити корективи в рішення, прийняті програмним комплексом, із врахуванням обмежень, що накладені фізичною суттю процесу та вимогами нормативних документів;

- формувати в інтерактивній формі експертні рекомендації для коректування невдалих рішень та покращення технічних чи метрологічних характеристик проєктованих технічних засобів;

- формувати результати проєктування у вигляді документів певної форми за вибором проєктувальника;

- бути придатною до удосконалення без її кардинального перероблення.

Для виконання перерахованих вище функцій САПР засобів вимірювання кількості ТЕ повинна містити такі підсистеми:

- підсистему введення та перевірки коректності вхідних даних;

- підсистему збереження даних на диску та завантаження цих даних;

- підсистему інтерактивних повідомлень для сповіщення користувача про помилки під час введення вхідних даних, а також під час проєктування;

- підсистему розрахунку характеристик та проектування СВКТЕ;
- підсистему оптимізації параметрів витратоміра та системи вимірювання кількості ТЕ;
- підсистему формування експертних повідомлень для усунення недоліків проектування;
- підсистему виведення та графічного представлення результатів розрахунку та проектування;
- підсистему друку документів, отриманих за результатами проектування.

Підсистема введення та перевірки коректності вхідних даних має містити такі процедури:

- вибір схеми вимірювання кількості ТЕ;
- введення параметрів теплоносія для СВКТЕ;
- введення параметрів і характеристик ЗП;
- введення параметрів і характеристик ВТ;
- введення параметрів і характеристик прямолінійних ділянок і оснащення ВТ;
- введення параметрів і характеристик засобів вимірювань і обчислень;
- введення загальних даних витратомірного вузла.

Підсистема збереження даних на диску та завантаження цих даних повинна містити процедуру збереження даних, введених користувачем для проектування, а також процедуру завантаження даних в робочу область пам'яті САПР для їх коректування та виконання таких операцій.

Підсистема інтерактивних повідомлень базується на виконанні таких процедур:

- формування ознаки події, для якої необхідно сформулювати повідомлення. Ознаку події пропонується розділити на два класи:
 - «помилка», при виникненні якої неможливо продовжити розрахунок та проектування СВКТЕ;
 - «зауваження», при виникненні якого розрахунок та проектування можна продовжити за наявності окремих недоліків проектованої системи;

- формування тексту повідомлення;
- виведення повідомлення на екран.

Підсистема розрахунку характеристик та проектування системи вимірювання кількості ТЕ має містити процедури:

- розрахунок властивостей теплоносія (ентальпії, густини, в'язкості, показника адіабати)
- розрахунок характеристик та проектування ЗП;
- розрахунок характеристик ВТ;
- проектування прямолінійних ділянок і оснащення ВТ: визначення характеристик та розміщення струминовипрямляча або ППП, місцевих опорів, гільзи термоперетворювача, уступів вимірювального трубопроводу до звужувального пристрою;
- перевірка коректності застосування методу та відповідності умов вимірювання вимогам діючих нормативних документів;
- розрахунок витрати теплоносія в кожному із ВТ для робочих значень параметрів теплоносія;
- розрахунок кількості ТЕ;
- розрахунок невизначеності результату вимірювання витрати та результату вимірювання кількості ТЕ.

Підсистема оптимізації параметрів витратоміра та системи вимірювання кількості ТЕ містить процедури визначення параметрів вузла вимірювання кількості теплової енергії, який забезпечує:

- мінімальну сумарну відносну розширену невизначеність вимірюваного значення витрати теплової енергії з врахування втрат тиску на ЗП;
- мінімальну сумарну відносну розширену невизначеність вимірюваного значення витрати теплової енергії без врахування втрат тиску на ЗП.

Підсистема формування експертних повідомлень для усунення недоліків проектування базується на виконанні таких процедур:

- формування ознаки події, для якої необхідно сформулювати повідомлення;
- формування тексту повідомлення;

- виведення повідомлення на екран.

Підсистема виведення та графічного представлення результатів розрахунку та проектування містить такі процедури:

- виведення переліку основних вхідних даних, введених користувачем, та результатів розрахунків на екран;
- формування та виведення на екран протоколу розрахунку, в тому числі графічної інформації про конфігурацію вимірювального трубопроводу та конструкцію і розміри звужувального пристрою;

Підсистема друку документів, отриманих за результатами проектування, базується на процедурах:

- формування документу для друку (на основі протоколу розрахунку);
- виклику стандартного вікна ОС Windows для налаштування параметрів друку документу.

Теоретичною основою для розроблення САПР СВКТЕ є рівняння обчислення кількості теплової енергії та розроблені за участю автора алгоритми визначення кількості теплової енергії, наведені у підрозділі 2.2, повна математична модель витратоміра змінного перепаду тиску [81], методи визначення властивостей води та водяної пари [53], методика обчислення показника адіабати водяної пари і методика оцінювання сумарної відносної розширеної невизначеності ентальпії води, водяної пари, розроблені за участю автора та наведені у розділі 3, методика оцінювання сумарної відносної розширеної невизначеності результату вимірювання кількості теплової енергії, наведена у розділі 2.4, запропоновані автором нові підходи щодо автоматизованого проектування СВКТЕ.

Розроблення САПР СВКТЕ реалізовано на мові програмування C++ [82-84] в середовищі Visual Studio, шляхом написання додаткового функціоналу до "САПР "Расход-РУ". Даний функціонал являє собою набір розроблених методів та функцій для розрахунку та проектування СВКТЕ.

Розроблена САПР (див. рис. 4.1) має простий та зручний користувацький інтерфейс, забезпечує інтерактивну взаємодію з користувачем, що дозволяє спростити процес проектування засобів вимірювання кількості ТЕ та зменшити

його трудомісткість. Крім того, під час проектування САПР контролює відповідність проектних рішень вимогам нормативних документів щодо вимірювання кількості ТЕ та щодо витратомірів змінного перепаду тиску.



Рис.4.1 – Вікно привітання САПР

4.2. Підсистема вводу характеристик та параметрів систем вимірювання кількості теплової енергії

Початкове меню САПР складається з двох підменю (рис.4.2): Файл і Допомога.

Для створення нового або відкриття існуючого файлу розрахунку в програмі застосовуються розділи підменю «*Файл*» початкового меню:

OnFileDialog() – метод, який реалізує стандартні методи Windows для відкриття файлів (підменю «Файл» – розділ «Відкрити файл даних»). Вказаний метод знаходиться в файлі "appdlg.cpp".

Метод «AddToRecentFileList(LPCTSTR lpszPathName)» викликається після вибору необхідного файлу розрахунку. Вхідним параметром параметром даного методу є повний шлях доступу до збереженого файлу розрахунку на диску комп'ютера, який треба відкрити. Даний метод знаходиться у файлі Flowmeter.cpp. У "AddToRecentFileList(LPCTSTR lpszPathName)" відбувається

опрацювання файлу розрахунку за результатами якого відкривається діалогове вікно відповідного типу розрахунку з попередньо збереженими даними.



Рис.4.2. Початкове меню САПР

- OnFileNew() – метод, який викликає діалогове вікно для вибору типу нового розрахунку (рис.4.3). Зазначений метод знаходиться у файлі Flowmeter.cpp. OnFileNew() не приймає жодного параметру, даний метод використовується для створення діалогового вікна з вибором типу розрахунку.

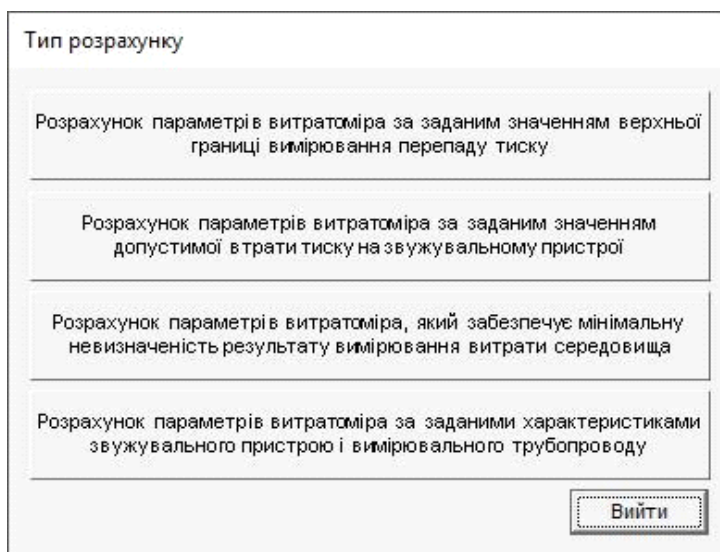


Рис.4.3. Вікно вибору типу розрахунку

Після вибору користувачем необхідного типу розрахунку виконується метод `CreateDocument(CString Type, int nType)`, який формує діалогове вікно для введення вхідних даних для вибраного типу розрахунку. Вхідними параметрами даного методу є назва типу розрахунку та його порядковий номер у діалоговому вікні вибору типу розрахунку. Метод `CreateDocument(CString Type, int nType)` знаходяться у файлі `ReserchType.cpp`.

Для виконання вказаних чотирьох типів розрахунків (рис. 4.3) у САПР застосовано такі процедури методи:

`Fdp` – процедура метод для розрахунку параметрів ЗП витратоміра за заданим перепадом тиску на ЗП;

`Fvt` – процедура для розрахунку параметрів ЗП витратоміра, який забезпечує мінімальну сумарну відносну розширену невизначеність вимірюваного значення витрати теплової енергії з врахування заданих втрат тиску на ньому;

`Fopt` – процедура для розрахунку параметрів витратоміра, що забезпечує мінімальну сумарну відносну розширену невизначеність вимірюваного значення витрати теплової енергії;

`Fqm` – процедура для розрахунку масової витрати середовища.

Введення і редагування вхідних даних у САПР СВКТЕ здійснюється за допомогою меню «*Правка*».

Підсистема введення даних автоматично виконує перевірку коректності введених вхідних даних із врахуванням вибраної користувачем розмірності та за необхідності формує інтерактивні повідомлення коректування введених даних.

Для перевірки на правильність введених користувачем вхідних даних у програмі реалізовано процедуру `Finput()`. Перевірка здійснюється шляхом порівняння введених користувачем даних з їх гранично допустимими значеннями. У випадку, якщо значення введеного параметру перевищує його граничне значення програма формує та видає повідомлення про помилку.

Вікно вводу параметрів і характеристик, необхідних для проведення розрахунку складається з таких розділів:

- 1) параметри і характеристики середовища;

- 2) параметри і характеристики звужувального пристрою;
- 3) параметри і характеристики вимірювального трубопроводу;
- 4) параметри і характеристики прямолінійних ділянок і оснащення вимірювального трубопроводу;
- 5) параметри і характеристики засобів вимірювань і обчислень;
- 6) загальні дані витратомірного вузла.

Зокрема, на рис.4.4 представлено діалогове вікно вводу значень параметрів теплоносія (середовища) для системи з двома витратомірами. У вікні передбачено можливість вибору типу теплоносія, відповідно до якого реалізовано вибір методів обчислення його параметрів (густини, в'язкості, ентальпії). В САПР СВКТЕ реалізовано обчислення параметрів для двох типів середовища: води та водяної пари.

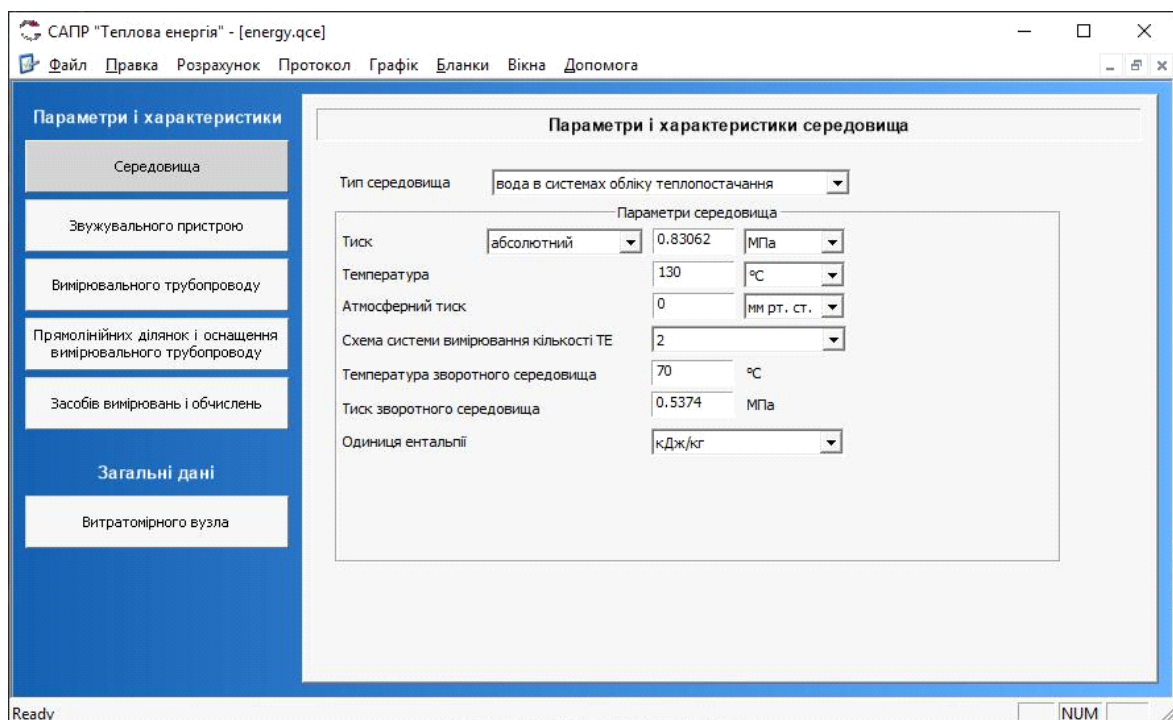


Рис.4.4. Вікно САПР для вводу параметрів і характеристик середовища

Введення параметрів і характеристик потрібно виконувати послідовно від першого до п'ятого розділу.

У САПР реалізовано вибір конфігурації витратоміра, зокрема може бути обрана конфігурація:

- «з обчислювачем витрати та кількості середовища»;

- «з вимірювальним комплексом».

Залежно від обраної конфігурації САПР модифікує вкладки для введення характеристик засобів вимірювання перепаду тиску, тиску, температури, а також реалізує відповідну методику обчислення сумарної відносної розширеної невизначеності вимірюваного значення витрати.

На рис. 4.5 представлено вікно введення характеристик засобів вимірювань і обчислень, зокрема вкладка «Параметри і характеристики засобів вимірювання і обчислень» перепаду тиску на ЗП для конфігурації витратоміра «з вимірювальним комплексом». На вкладці показано параметри вимірювального комплексу з двома нормованими за точністю діапазонами вимірювання перепаду тиску. Нормування похибки вимірювального комплексу для декількох діапазонів вимірювання перепаду тиску дає можливість розширити діапазон вимірювання витрати середовища. На цій вкладці також сформовано поле для введення вимірюваного значення перепаду тиску зворотного потоку теплоносія у системі вимірювання кількості теплової енергії, що реалізує рівняння (2.18).

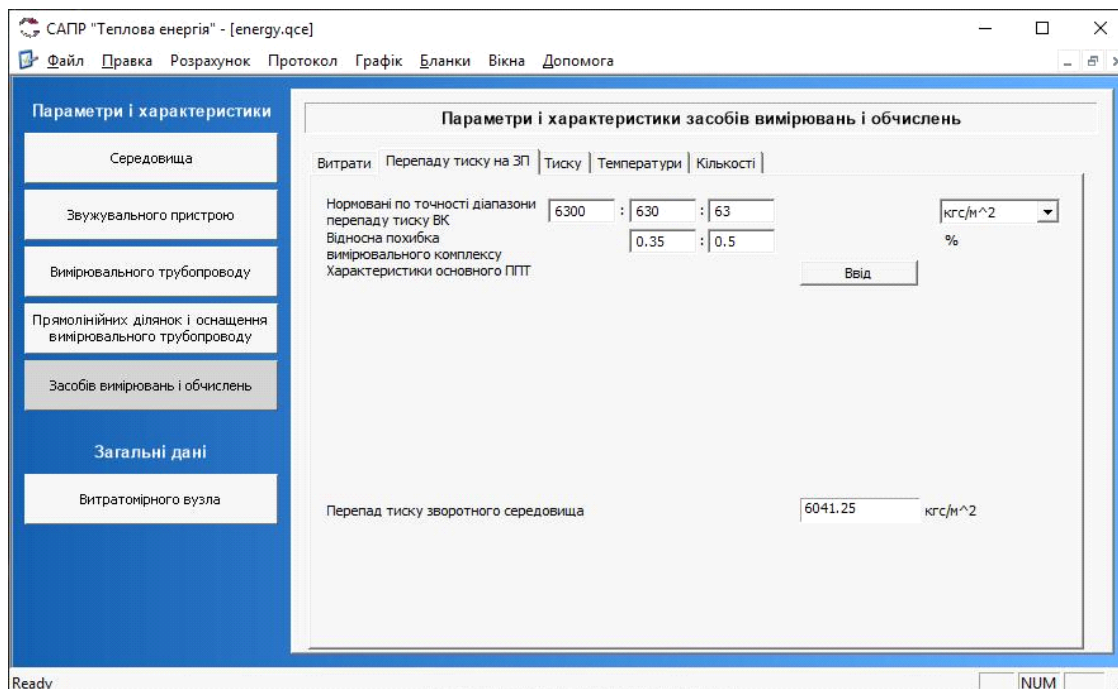


Рис.4.5. Вікно введення характеристик засобів вимірювань і обчислень

4.3. Підсистема розрахунку та проектування системи вимірювання кількості теплової енергії

Меню «Розрахунок» вибирається користувачем після того, коли введені всі необхідні параметри і характеристики.

Для ознайомлення користувача з основними результатами розрахунку параметрів та характеристик СВКТЕ у САПР реалізовано вікно основних результатів розрахунку. На рис. 4.6 подано вигляд цього вікна під час проектування системи вимірювання кількості теплової енергії, що реалізує рівняння (2.18). У вікні представлено параметри теплоносія у подавальному та зворотному трубопроводах, основні характеристики витратоміра, що розміщений у подавальному трубопроводі та витратоміра, розміщеного у зворотному трубопроводі, а також кількість теплової енергії, що відібрана в системах тепlopостачання.

Назва величини	Значення	Одиниця
Тип середовища	вода в системах обліку тепlopостачання	
Максимальна витрата середовища при заданих параметрах середовища	162.188	т/год
Мінімальна витрата середовища при заданих параметрах середовища	16.2712	т/год
Верхня границя вимірювань перепаду тиску на ЗП	6300	кгс/м ²
Абсолютний тиск середовища	0.83062	МПа
Термодинамічна температура середовища	403.15	К
Густина середовища в робочих умовах	935.123	кг/м ³
Динамічна в'язкість середовища в робочих умовах	0.00021309	Па*с
Ентальпія середовища в подавальному трубопроводі за робочих умов	546.767	кДж/кг
Внутрішній діаметр трубопроводу при робочій температурі середовища	207.174	мм
Відносний діаметр отвору звужувального пристрою	0.448773	-
Число Рейнольдса при максимальній витраті середовища	1299379	-
Коефіцієнт швидкості входу	1.02092	-
Коефіцієнт витікання при числі Рейнольдса, яке відповідає максимальній витраті	0.602307	-
Поправковий коефіцієнт, який враховує притуплення вхідного канта діафрагми	1.00395	-
Поправковий коефіцієнт, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні БТ	1	-
Втрата тиску на ЗП при максимальній витраті середовища	4916.2	кгс/м ²
Діаметр отвору діафрагми при робочій температурі середовища	92.9742	мм
Діаметр отвору діафрагми при температурі 20 °С	92.8	мм
Витрата теплоти подавального середовища	319244740	кДж/аїа
	----- ЗВОРОТНЕ СЕРЕДОВИЩЕ -----	
Максимальна витрата зворотного середовища при заданих параметрах середовища	162.177	т/год
Мінімальна витрата зворотного середовища при заданих параметрах середовища	16.2712	т/год
Верхня границя вимірювань перепаду тиску на ЗП для зворотного середовища	6041.25	кгс/м ²
Абсолютний тиск зворотного середовища	0.5374	МПа
Термодинамічна температура зворотного середовища	343.15	К
Густина зворотного середовища в робочих умовах	977.971	кг/м ³
Динамічна в'язкість зворотного середовища в робочих умовах	0.00040367	Па*с
Ентальпія зворотного середовища у зворотному трубопроводі за робочих умов	293.432	кДж/кг
Внутрішній діаметр трубопроводу при робочій температурі зворотного середовища	207.02	мм
Відносний діаметр отвору звужувального пристрою	0.448639	-
Число Рейнольдса при максимальній витраті зворотного середовища	686371	-
Коефіцієнт швидкості входу	1.02089	-
Коефіцієнт витікання при числі Рейнольдса, яке відповідає максимальній витраті зворотного середовища	0.602671	-
Поправковий коефіцієнт, який враховує притуплення вхідного канта діафрагми	1.00396	-
Поправковий коефіцієнт, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні БТ	1	-
Втрата тиску на ЗП при максимальній витраті зворотного середовища	4714.3	кгс/м ²
Діаметр отвору діафрагми при робочій температурі зворотного середовища	92.8773	мм
Діаметр отвору діафрагми при температурі 20 °С	92.8	мм
Витрата теплоти зворотного середовища	171316907	кДж/аїа
Втрата теплоти середовища в системах тепlopостачання	147927834	кДж/аїа

Рис.4.6. Вікно результатів розрахунку параметрів та характеристик системи вимірювання кількості теплової енергії

Процедура виконання розрахунку та проектування у САПР реалізована за допомогою таких основних методів:

- OnResearch() - запускає розрахунок (зчитує дані з діалогових вікон вводу параметрів і характеристик, необхідних для проведення обчислень). Даний метод знаходиться у підпрограмі FlowmeterView.cpp.

В процесі розрахунку OnResearch() викликає метод CalcIT(structMain* data).

- CalcIT(structMain* data) – метод, за допомогою якого всі вхідні дані, що введені користувачем у діалогових вікнах вводу параметрів і характеристик перетворюються у числовий тип даних для подальшого застосування у розрахунках (int, double);

Після виконання процедури CalcIT() виконується процедура FCalc().

- FCalc() – процедура для запуску процедури розрахунку. За допомогою даного методу в програмі реалізовано розрахунок витратоміра, параметрів теплоносія, витрати та кількості теплової енергії; Після виконання розрахунків викликається метод FillList () для виведення вікна результатів розрахунку параметрів та характеристик СВКТЕ;

- Frin(), FTin() – процедури для перетворення введених користувачем вхідних даних у необхідні для розрахунку одиниці вимірювання;

- Frout(), FTout() – процедури для перетворення вихідних даних у необхідні одиниці вимірювання;

- FH() – процедура для розрахунку ентальпії води (водяної пари), який реалізує залежності, що наведені у підрозділі 3.1 (рівняння (3.7), (3.19), (3.28));

У процедурі застосовуються такі розмірності величин:

- p - абсолютний тиск води, Па;
- T - термодинамічна температура води, К;
- ps - абсолютний тиск середовища при стандартних умов, Па;
- Ts - термодинамічна температура середовища при стандартних умов, К;
- R – універсальна газова постійна для води, Дж/кг·К;

• $F_{Ro}()$ – процедура для розрахунку густини, який реалізує залежності, що наведені у підрозділі 3.1 (рівняння (3.5), (3.17), (3.26));

У процедурі застосовуються такі розмірності величин:

- p - абсолютний тиск води, Па;
- T - термодинамічна температура води, К;
- p_s - абсолютний тиск середовища при стандартних умов, Па;
- T_s - термодинамічна температура середовища при стандартних умов, К;
- R – універсальна газова постійна для води, Дж/кг·К;

• $F_{кара}()$ – процедура для розрахунку показника адіабати перегрітої пари, який реалізує розроблені автором залежності, що наведені у підрозділ 3.2 (рівняння (3.63)).

У процедурі застосовуються такі розмірності величин:

- p - абсолютний тиск води, Па;
- T - термодинамічна температура води, К;
- p_s - абсолютний тиск середовища при стандартних умов, Па;
- T_s - термодинамічна температура середовища при стандартних умов, К;
- R – універсальна газова постійна для води, Дж/кг·К;

• $F_{mju}()$ – процедура для розрахунку динамічної в'язкості, який реалізує залежності, що наведені у підрозділі 3.1 (рівняння (3.43));

- p - абсолютний тиск води, Па;
- T - термодинамічна температура води, К;
- ρ_{oc} - густина середовища при стандартних умовах, кг/м³;

• $F_{QHout}(H * valueQ_{max})$ – процедура для розрахунку кількості теплової енергії; процедура викликає підпрограму $WaterCount()$, у якій реалізовано розрахунок кількості теплової енергії згідно розробленого алгоритму (див. підрозділ 2.2); підпрограма $WaterCount()$ представлена у Додатку Б.

• $F_{lin}()$ – процедура для перевірки коректності введених параметрів та характеристик прямолінійних ділянок і оснащення трубопроводу, містить всі типи помилок і зауважень, які виникають при проектуванні прямолінійних ділянок і оснащення трубопроводу (див. підрозділ 4.4).

Важливим завданням під час проектування СВКТЕ на основі витратомірів змінного перепаду тиску, є проектування конфігурації вимірювального трубопроводу (ВТ) та прямолінійних ділянок трубопроводу достатньої довжини до і після ЗП. Це зумовлено тим, що значення коефіцієнта витікання C ЗП (основного коефіцієнта, що входить у рівняння витрати середовища) залежить від епюри швидкості руху середовища в трубопроводі [85]. Розподіл швидкості середовища по перерізу трубопроводу залежить від шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу, а також від наявності місцевих опорів у ньому (місцевими опорами у ВТ є: коліно або група колін; трійник; перехідні ділянки труб; запірна арматура; велика ємність; суміщені місцеві опори; місцеві опори невизначеного виду) [33-37,86].

Для вирівнювання розподілу швидкостей по перерізу трубопроводу, нерівномірність якого була обумовлена наявністю місцевих опорів, застосовують [33-37,86] трубопроводи з нормованими характеристиками, які характеризуються певною довжиною прямолінійних ділянок трубопроводів. Довжина цих ділянок повинна бути достатньою, щоб забезпечити вирівнювання та стабілізацію епюри швидкості. Оскільки різні види місцевих опорів по-різному спотворюють вказану епюру швидкості, то для кожного типу місцевого опору встановлено окремі вимоги до довжини прямолінійних ділянок вимірювального трубопроводу [85].

Отже, конфігурація та геометричні розміри ВТ повинні бути спроектовані так, щоб забезпечити формування незбуреного симетричного профілю швидкості потоку перед звужувальним пристроєм. Для цього слід реалізувати вимоги до ВТ, викладені у відповідних частинах ДСТУ ГОСТ 8.586.1-5:2009. Зокрема, вимоги до ВТ із встановленим звужувальним пристроєм типу «діафрагма» визначені в ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 [33].

Під час проектування ВТ відповідно до вимог ДСТУ ГОСТ 8.586.1-5:2009 [33-37] необхідно визначити конструктивні характеристики таких елементів та обладнання ВТ (рис.4.7):

- види та розміри місцевих опорів, їх розміщення, довжини прямолінійних ділянок ВТ між ними;

- розміщення струминовипрямлячів або пристроїв підготовки потоку (ППП);
- розміри та розміщення гільзи термоперетворювача;
- розміри уступів та різниці діаметрів секцій ВТ, їх розміщення (за наявності).

Для вводу коректних даних по прямолінійних ділянках ВТ необхідно, насамперед, визначити, згідно із відповідними розділами стандарту, види МО. Види МО визначено такими розділами: для діафрагми згідно із ГОСТ 8.586.2-2009 [33]; для сопел і сопла Вентурі згідно із ГОСТ 8.586.3-2009 [34]; для труб Вентурі згідно із ГОСТ 8.586.4-2009[35].

Автоматизацію процесу проектування вимірювального трубопроводу виконано на основі таких підходів:

- види місцевих опорів та порядок їх розміщення відносно ЗП визначає проектувальник (користувач);
- довжини прямолінійних ділянок ВТ між місцевими опорами визначають на основі табличних даних ДСТУ ГОСТ 8.586.1-5:2009 [33-37]; для обчислення значень між «вузлами» таблиці застосовано метод інтерполяції;

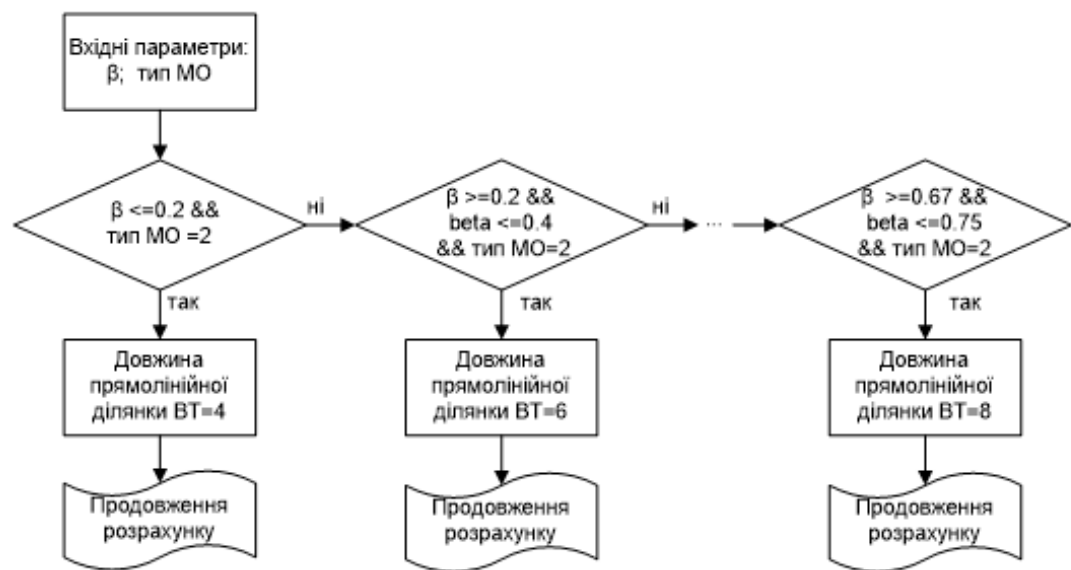


Рис.4.7 Блок-схема визначення довжин прямолінійних ділянок згідно табл. 4 ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009

- під час вибору значень довжин прямолінійних ділянок ВТ найвищий пріоритет мають значення довжин за варіантом А (див. табл.4 ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009) [33], які забезпечують вимірювання витрати без додаткової складової невизначеності.

В САПР СВКТЕ автоматизовано визначення довжин прямолінійних ділянок для систем вимірювання кількості ТЕ (див. рис. 4.7).

При заданні значень довжин прямолінійних ділянок ВТ (LenMO1, LenMO2, LenMOPop) програма аналізує відповідність цих довжин вимогам стандарту. При наявності невідповідностей САПР створює та надає відповідні повідомлення і рекомендації щодо їх усунення. Наприклад, для випадку некоректного введення користувачем відстані між першим МО і ЗП в програмі реалізовано такий функціонал для перевірки:

```

if (LenMO1 < 0 || LenMO2 < 0 || LenMO3 < 0 || LenMOPop < 0)
    {
        if (iqUpttab > 1) { iqpterr = 2; return 1; }
        err.string = CString(L"") + L "Конфігурація вимірювальної
ділянки задана некоректно";
        throw err;
    }

```

Якщо користувачем задано нульові значення довжин прямолінійних ділянок ВТ (LenMO1, LenMO2, LenMOPop), то САПР розраховує необхідні мінімальні довжини цих ділянок:

```

if (LenMO1 == 0 && LenMO2 == 0 && LenMOPop == 0)
    {
        valueLenMO1 = LMO1 * D20;
        valueLenMO2 = LMO2 * DMO2;
        valueLenMO3 = LMO3 * DMO23;
        valueLenGK = LMOGK * D20;
        valueLenMOPop = LMOP * D20;
        if (GTMO == 2 || GTMO == 3)
            valueLenMOPop = valueLt;
    }
else
    {
        valueLenMO1 = LenMO1;
        valueLenMO2 = LenMO2;
        valueLenMO3 = LenMO3;
        valueLenGK = LenGK;
        valueLenMOPop = LenMOPop;
    }

```

}

Вікно розробленої САПР, що містить вкладки для введення характеристик усіх елементів та обладнання ВТ, представлено на рис.4.8.

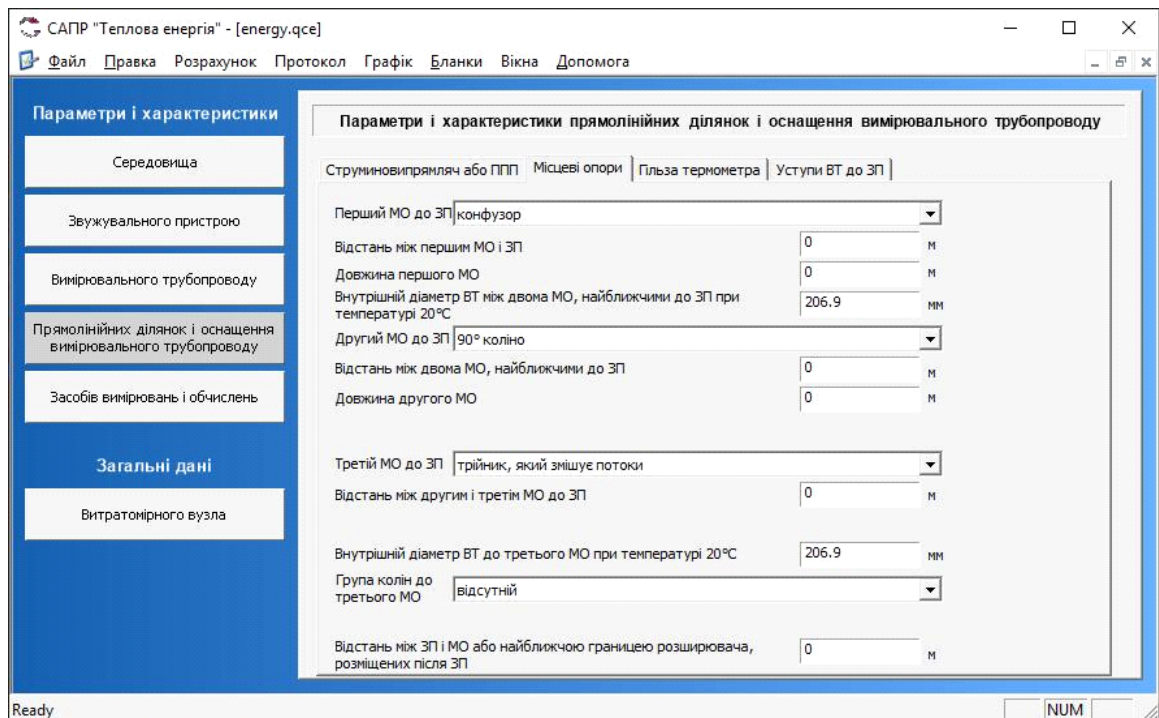


Рис.4.8. Вікно введення характеристик прямолінійних ділянок і оснащення ВТ

4.4. Підсистема інтерактивних та експертних повідомлень для сповіщення користувача про помилки під час введення вхідних даних, а також для усунення недоліків проектування

Під час проектування СВКТЕ необхідно виконати низку вимог до системи в цілому та її елементів, що встановлені нормативними документами. Зокрема, необхідно виконати вимоги до витратомірів із стандартним звужувальним пристроєм, що застосовані у складі СВКТЕ, визначені для кожного типу звужувального пристрою у відповідних частинах комплексу стандартів ДСТУ ГОСТ 8.586.1-5:2009 [33-37].

Тому під час реалізації математичної моделі витратоміра змінного перепаду тиску враховано умови та обмеження цього комплексу стандартів. Отже, проектування витратоміра, а також реалізація розрахунку витрати середовища для усіх трубопроводів системи вимірювання САПР виконує згідно з вимогами комплексу стандартів ДСТУ ГОСТ 8.586.1-5:2009 [33-37].

У випадку, коли не введено хоча б один із параметрів або характеристик, необхідних для виконання розрахунку та проектування СВКТЕ, а також у випадку, коли хоча б один із введених параметрів або характеристик є некоректним або не відповідає вимогам стандарту ДСТУ ГОСТ 8.586.1-5:2009 [33-37], САПР формує повідомлення про помилку.

У випадку, коли необхідно звернути увагу на наявність додаткової невизначеності коефіцієнта витікання, яка виникає при вимірюванні витрати та кількості середовища за допомогою проектованого витратоміра САПР видає зауваження [85]. У вікні зауваження програма пропонує рекомендації для усунення додаткової невизначеності коефіцієнта витікання з метою підвищення точності вимірювання витрати та кількості середовища. Програма видає зауваження під час виконання розрахунку, конвертування файлу даних, виведення протоколу або графіка.

Усі помилки, які формує програма САПР СВКТЕ, можна поділити на два типи: за причиною виникнення та за належністю до розділів та підрозділів програми САПР СВКТЕ (див. табл. 4.1)

Таблиця 4.1

Групи помилок у САПР

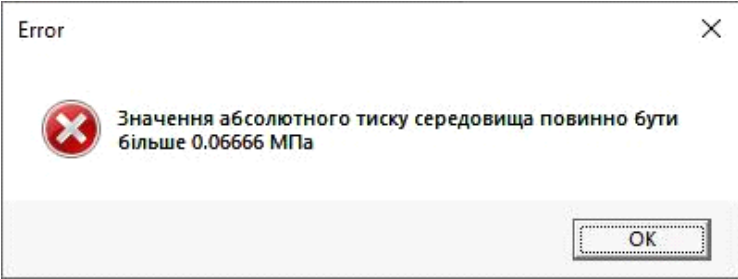

Групи помилок		
за причиною виникнення	помилки, які виникають внаслідок невідповідності введених вхідних даних діапазону їх застосування	
	помилки, які виникають внаслідок невідповідності введених вхідних даних вимогам стандарту ДСТУ ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5:2009	
за ознакою належності до розділів та підрозділів програми САПР	помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками середовища	
	помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками звужувального пристрою	
	помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками вимірювального трубопроводу	
	помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками прямолінійних ділянок і оснащення вимірювального трубопроводу	помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками струминовипрямлячів або ППП
		помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками місцевих опорів
		помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками гільзи термометра
		помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками уступів ВТ до ЗП
	помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками засобів вимірювань і обчислень	помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками засобів вимірювань і обчислень витрати середовища
		помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками засобів вимірювань і обчислень перепаду тиску на ЗП
		помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками засобів вимірювань і обчислень тиску середовища
		помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками засобів вимірювань і обчислень температури середовища
		помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками засобів вимірювань і обчислень кількості середовища

За ознакою належності до розділів та підрозділів програми САПР СВКТЕ помилки поділяють на такі групи.

Помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками середовища (див. таблиця 4.2).

Таблиця 4.2

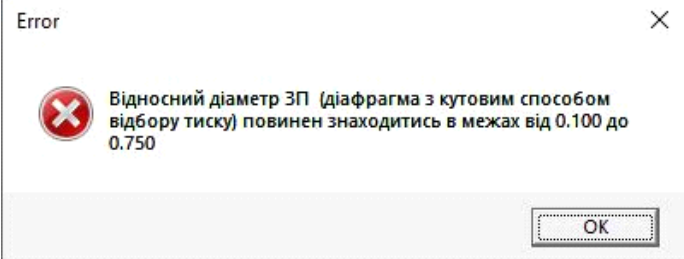
Помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками середовища

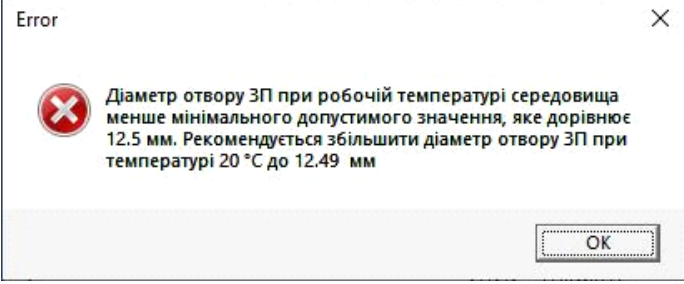
Вікно виведення помилки	Умова (причина) виникнення помилки
	<p>Помилка, яка виникає внаслідок невідповідності введеного значення абсолютного тиску середовища діапазону застосування методів для розрахунку властивостей середовища</p>
	<p>Помилка, яка виникає внаслідок невідповідності введених значень нижньої границі вимірювання температури та температури вимірювального середовища</p>

Помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками звужувального пристрою (див. таблиця 4.3).

Таблиця 4.3

Помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками звужувального пристрою

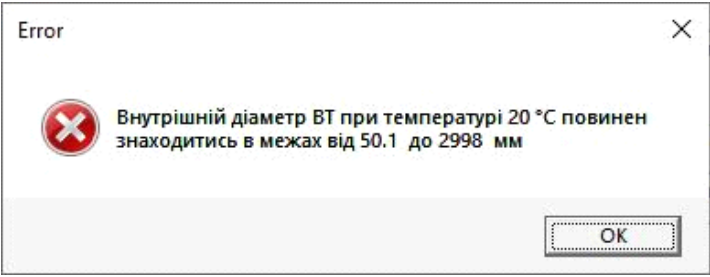
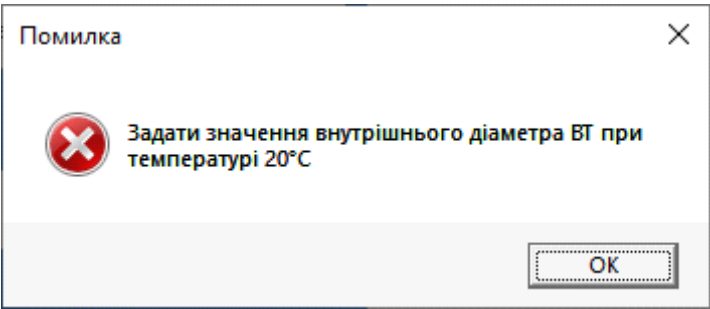
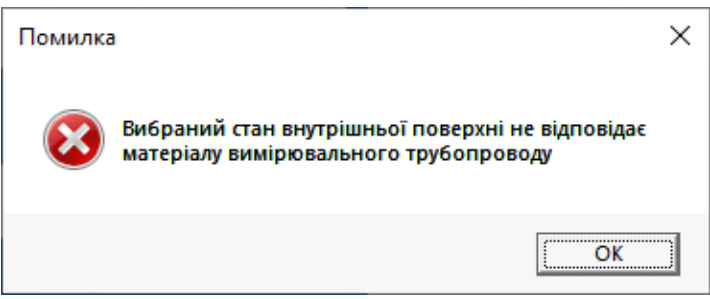
Вікно виведення помилки	Умова (причина) виникнення помилки
	<p>Помилка, яка виникла внаслідок невідповідності введеного значення відносного діаметра ЗП вимогам ДСТУ ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5:2009</p>

	<p>Помилка пов'язана з некоректним введенням параметра звужувального пристрою</p>
---	---

Помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками вимірювального трубопроводу (див. таблиця 4.4)

Таблиця 4.4

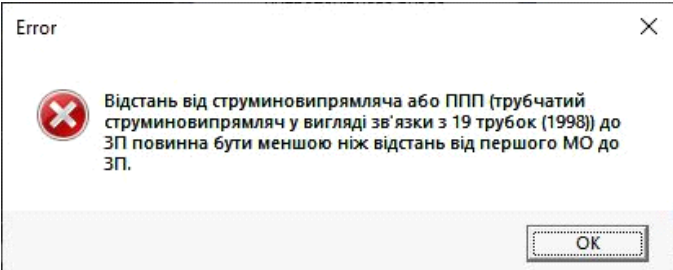
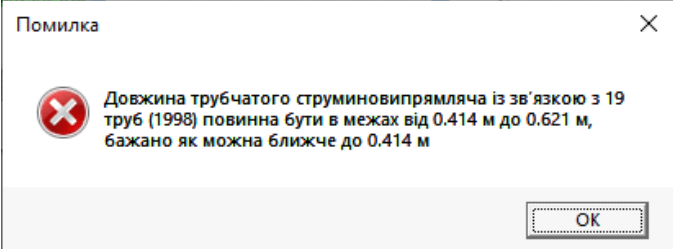
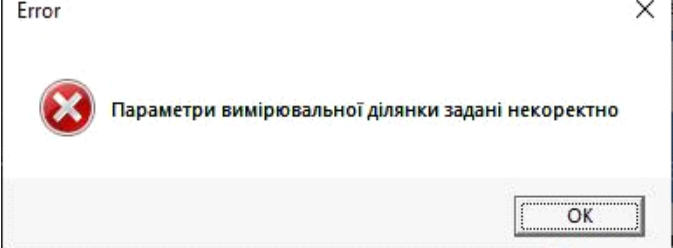
Помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками вимірювального трубопроводу

Вікно виведення помилки	Умова (причина) виникнення помилки
	<p>Помилка пов'язана з некоректним введенням діаметру ВТ</p>
	<p>Помилка, яка виникає при відсутності введено значення внутрішнього діаметра ВТ при 20°С</p>
	<p>Помилка, яка виникає при неправильному виборі матеріалу ВТ для заданого стану внутрішньої поверхні ВТ</p>

Помилки, які виникають при проектуванні прямолінійних ділянок і оснащення вимірювального трубопроводу представлено у таблицях 4.5-4.8.

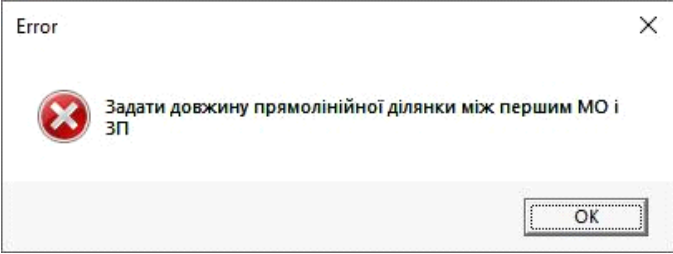
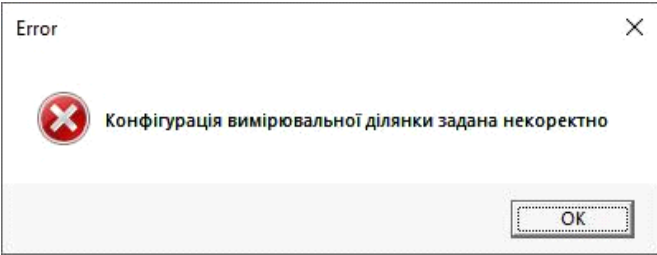
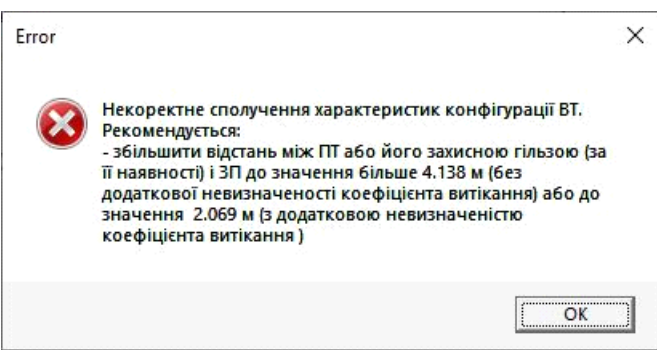

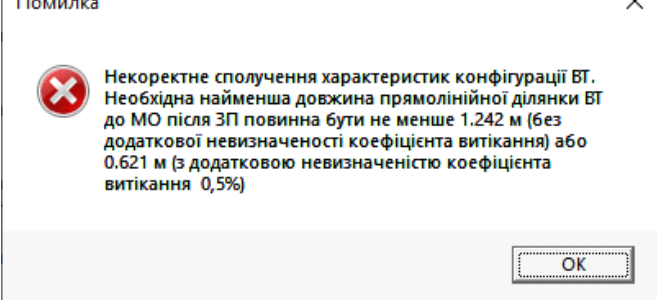
Таблиця 4.5

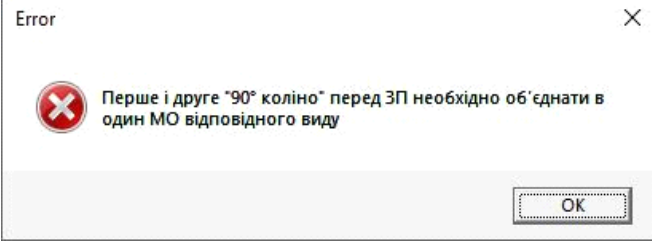
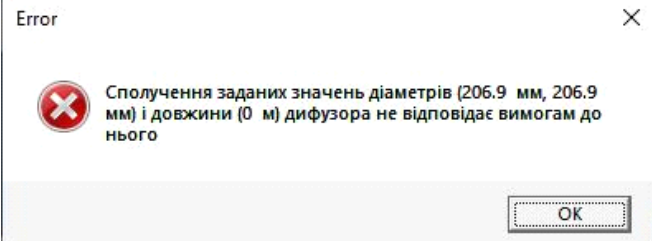
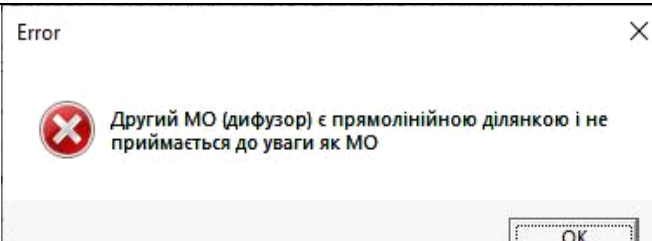
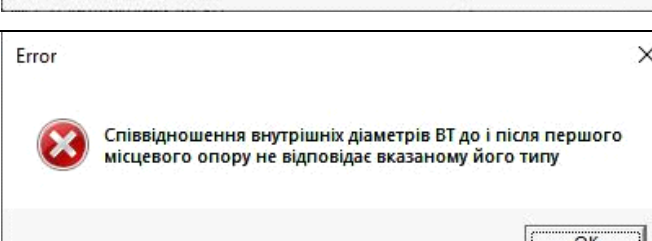
**Помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками
струминовипрямлячів або ППП**

Вікно виведення помилки	Умова (причина) виникнення помилки
	<p>Помилка пов'язана з некоректним введенням відстані між струминовипрямлячем (або ППП) і ЗП</p>
	<p>Помилка, пов'язана з некоректним введенням довжини струминовипрямляча у вигляді зв'язки з 19 трубок (1998)(додаткові можливості)</p>
	<p>Помилка, яка виникає при неправильному введенні параметрів ділянки ВТ (відстані між першим МО і ЗП та/або відстані між струминовипрямлячем (або ППП) та/або ЗП, відстані між ЗП і МО після ЗП</p>

Таблиця 4.6

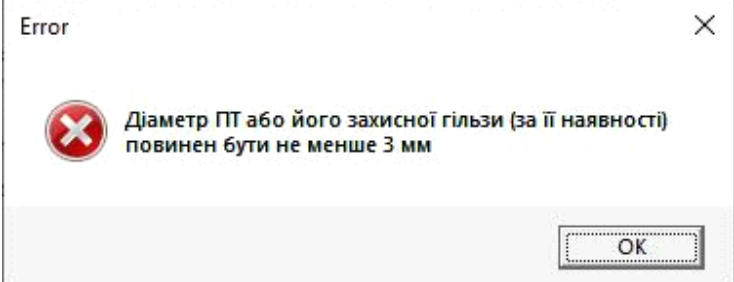
Помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками місцевих опорів

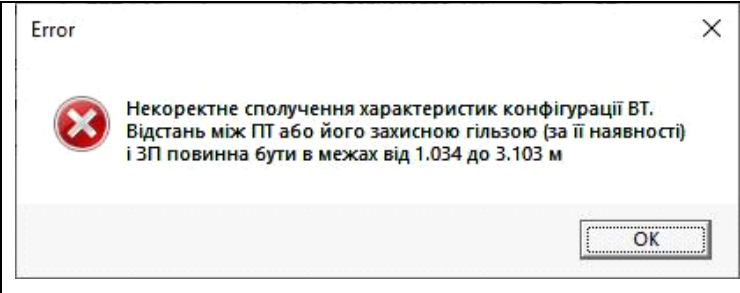

Вікно виведення помилки	Умова (причина) виникнення помилки
	Помилка, яка виникла у зв'язку з відсутністю введеного значення довжини прямолінійної ділянки між першим МО і ЗП
	Помилка пов'язана з некоректним введенням параметру ВТ
	Помилка та експертна рекомендація, яка виникає внаслідок зменшення відстані між ПТ або його захисною гільзою і ЗП
	Помилка та експертна рекомендація, що виникає внаслідок зменшення довжини ВТ між першим МО і ЗП
	Помилка та експертна рекомендація, що виникає внаслідок зменшення довжини ВТ між ЗП і першим МО після ЗП

	<p>Помилка та експертна рекомендація, що виникає внаслідок неправильної класифікації МО</p>
	<p>Помилка, що виникає внаслідок неправильної класифікації МО виду «дифузор»</p>
	<p>Помилка, що виникає внаслідок неправильної класифікації МО виду «дифузор»</p>
	<p>Помилка, що виникає внаслідок неправильної класифікації першого МО до ЗП</p>

Таблиця 4.7

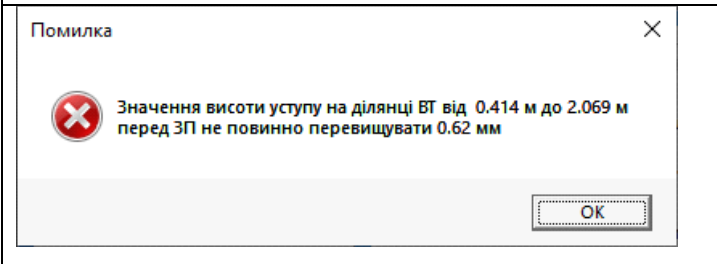
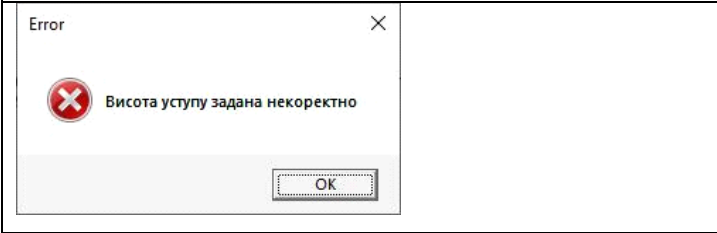
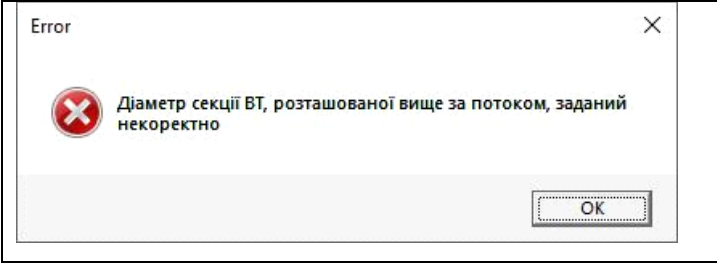
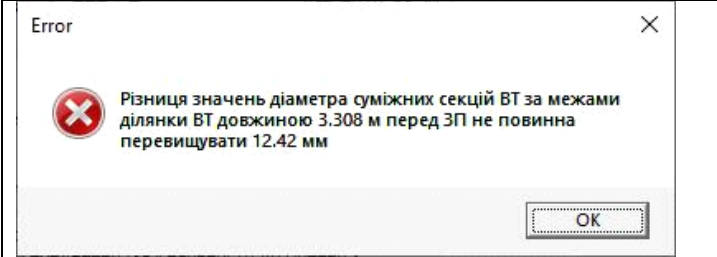
Помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками гільзи термометра

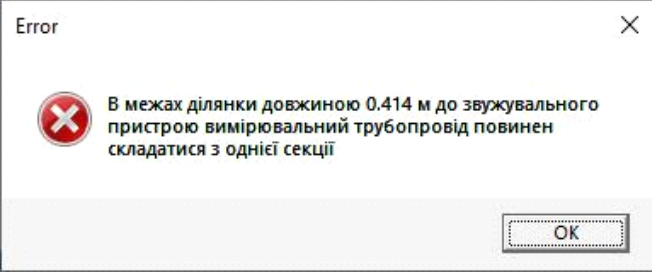
Вікно виведення помилки	Умова (причина) виникнення помилки
	<p>Помилка, яка виникла внаслідок невідповідності введеного значення діаметра ПТ (або його захисної гільзи) вимогам ДСТУ ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5:2009</p>

	<p>Помилки (рекомендації), пов'язані з некоректним введенням відстані між ПТ (або його захисною гільзою) і ЗП, що не відповідає вимогам ДСТУ ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5:2009</p>
	

Таблиця 4.8

Помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками уступів ВТ до ЗП

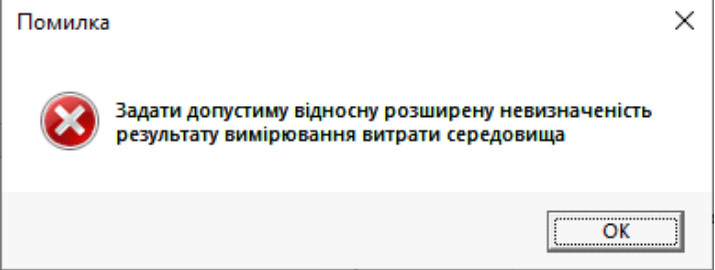
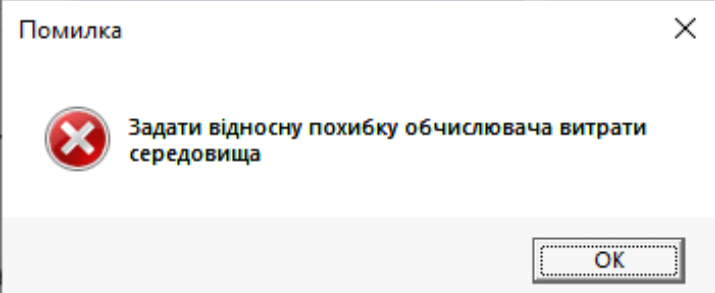
Вікно виведення помилки	Умова (причина) виникнення помилки
	<p>Помилка, яка виникає внаслідок невідповідності висоти уступу вимогам ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009</p>
	<p>Помилка, що виникає при некоректному введенні значення висоти уступу</p>
	<p>Помилка, що виникає внаслідок некоректного введення значення діаметру секції ВТ</p>
	<p>Експертна рекомендація щодо різниці значень діаметра суміжних секцій ВТ</p>

	<p>Помилка що виникає внаслідок недотримання вимоги 6.4.3 ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009</p>
---	--

Помилки, які виникають при проектуванні і розрахунку засобів вимірювань і обчислень представлено у таблицях 4.9-4.13.

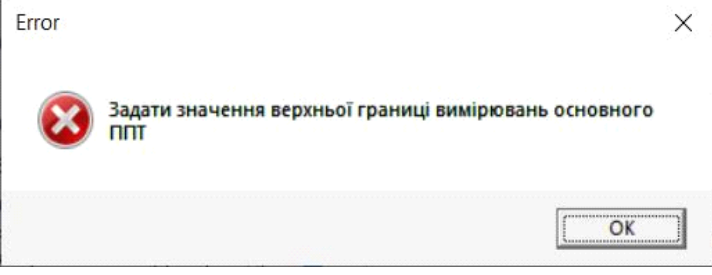
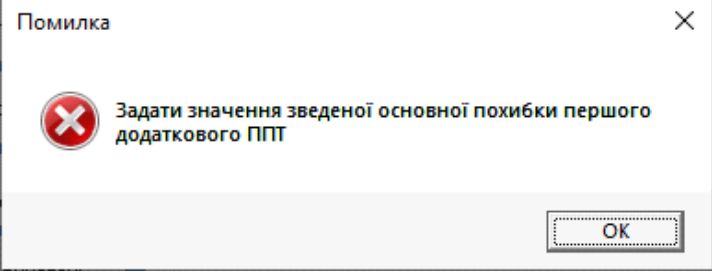
Таблиця 4.9

Помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками засобів вимірювань і обчислень витрати середовища

ікно виведення помилки	Умова (причина) виникнення помилки
	<p>Помилка, пов'язана з відсутністю введеного значення відносної розширеної невизначеності результату вимірювання витрати середовища</p>
	<p>Помилка, яка виникає у зв'язку з відсутністю введеного значення відносної похибки обчислювача витрати</p>

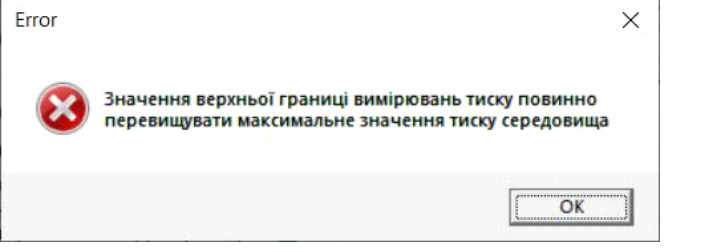
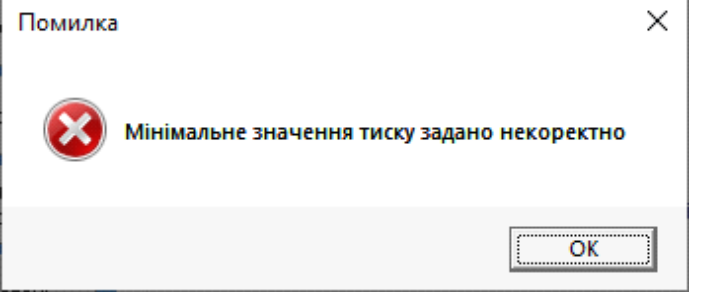
Таблиця 4.10

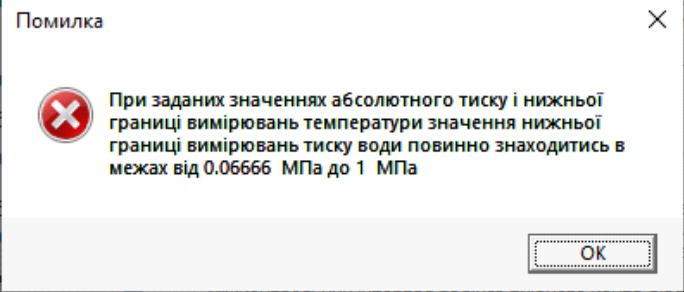
**Помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками засобів
вимірювань і обчислень перепаду тиску на ЗП**

Вікно виведення помилки	Умова (причина) виникнення помилки
	Помилка, яка виникає у зв'язку з відсутністю введеного значення верхньої границі вимірювань основного ППТ
	Помилка, яка виникає у зв'язку з відсутністю введеного значення зведеної похибки першого додаткового ППТ

Таблиця 4.11

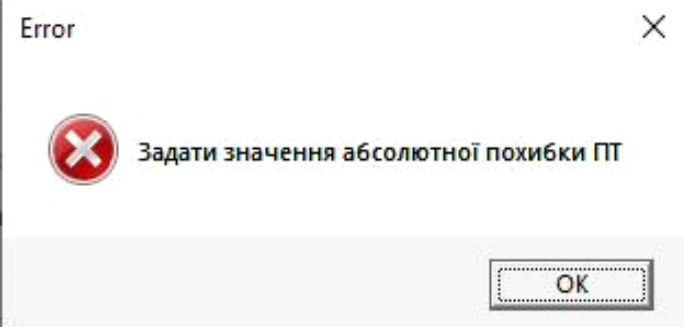
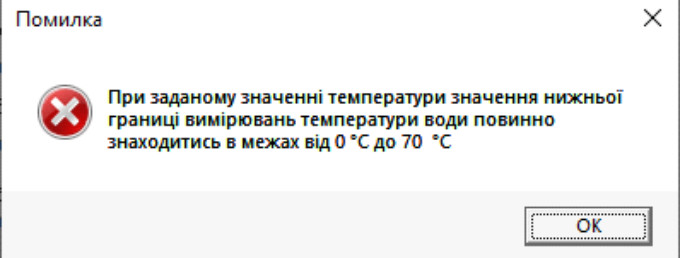
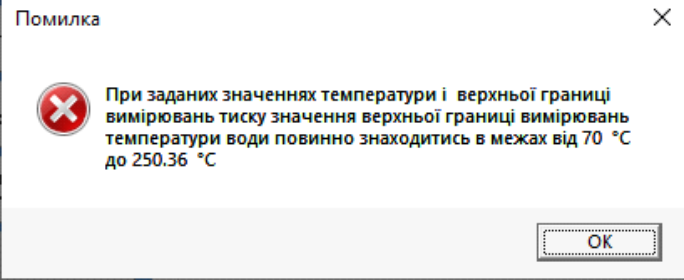
**Помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками засобів
вимірювань і обчислень тиску середовища**

Вікно виведення помилки	Умова (причина) виникнення помилки
	Вікно помилки, пов'язаної з параметрами і характеристиками засобів вимірювань і обчислень тиску середовища
	Помилка, пов'язана з некоректним введенням мінімального значення тиску

	<p>Помилка, яка виникає внаслідок невідповідності введеного діапазону тиску діапазону застосування методу розрахунку властивостей води</p>
---	--

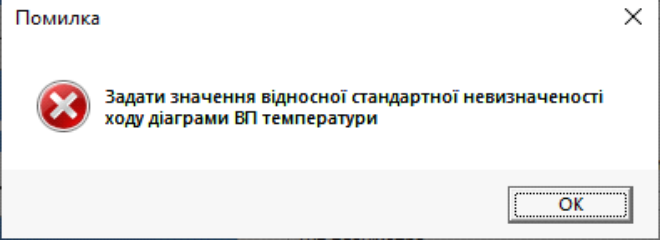
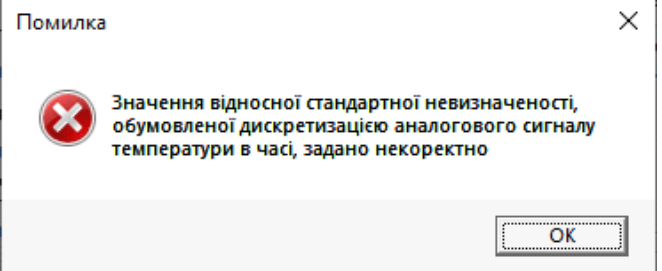
Таблиця 4.12

Помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками засобів вимірювань і обчислень температури середовища

Вікно виведення помилки	Умова (причина) виникнення помилки
	<p>Помилка, яка виникає у зв'язку з відсутністю введеного значення абсолютної похибки ПТ</p>
	<p>Помилка, яка виникає внаслідок некоректного введення значення нижньої границі вимірювання температури</p>
	<p>Помилка, яка виникає внаслідок невідповідності введеного діапазону температури діапазону застосування методу розрахунку властивостей води</p>

Таблиця 4.13

**Помилки, пов'язані з параметрами і характеристиками засобів
вимірювань і обчислень кількості середовища**

Вікно виведення помилки	Умова (причина) виникнення помилки
	Помилка, яка виникає у зв'язку з відсутністю введеного значення абсолютної похибки ПТ
	Помилка, пов'язана з некоректним введенням відносної стандартної невизначеності, обумовленої дискретизацією аналогового сигналу температури в часі

Програма САПР СВКТЕ формує такі види зауважень:

- зауваження про виникнення додаткової невизначеності коефіцієнта витікання, зумовленої наявністю ексцентриситету ЗП, відповідно до ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 [33] (рис. 4.21);
- зауваження про виникнення додаткової невизначеності коефіцієнта витікання, зумовленої скороченням відстані між струминовипрямлячем і ЗП відповідно до ДСТУ ГОСТ 8.586.2,3,4:2009 [33-35] (рис. 4.22);
- зауваження про виникнення додаткової невизначеності коефіцієнта витікання, зумовленої скороченням довжин прямолінійних ділянок ВТ між перетворювачем температури або його захисною гільзою (за її наявності) і ЗП, відповідно до ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009 [37] (рис. 4.23);
- зауваження про виникнення додаткової невизначеності коефіцієнта витікання, зумовленої наявністю уступу або різниці значень діаметра суміжних секцій ВТ, відповідно до ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009 [37] (рис. 4.24).

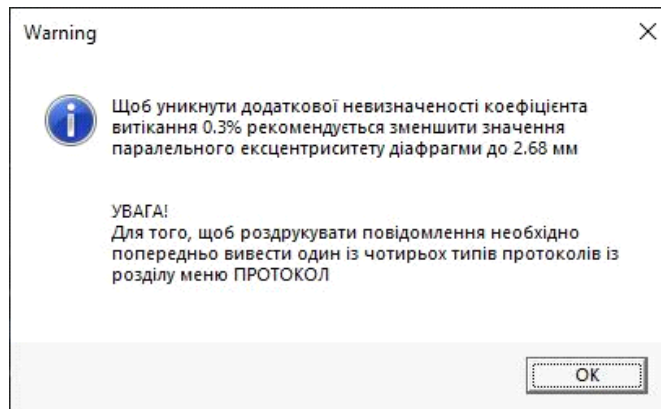


Рис. 4.9 Вікно зауваження при виникненні додаткової невизначеності коефіцієнта витікання, зумовленої наявністю ексцентриситету ЗП

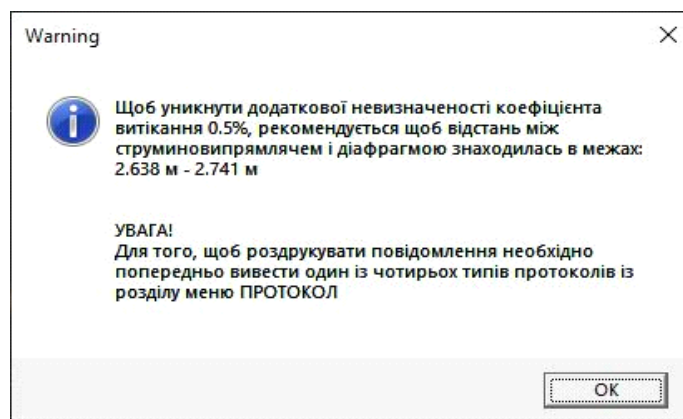


Рис. 4.10 Вікно зауваження при виникненні додаткової невизначеності коефіцієнта витікання, зумовленої скороченням відстані між струминовипрямлячем і ЗП

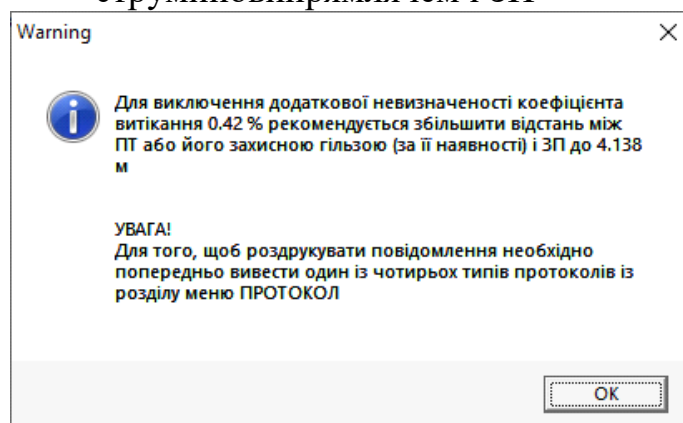


Рис. 4.11 Вікно зауваження при виникненні додаткової невизначеності коефіцієнта витікання, зумовленої скороченням довжини ділянки між термоперетворювачем і ЗП

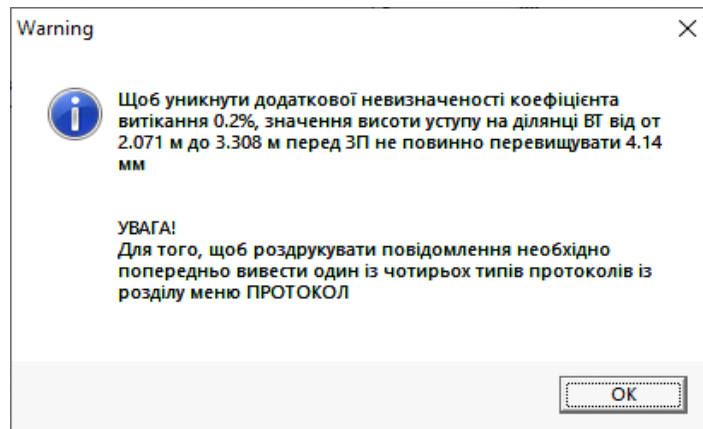


Рис. 4.12 Вікно зауваження при виникненні додаткової невизначеності коефіцієнта витікання, зумовленої наявністю уступів перед ЗП

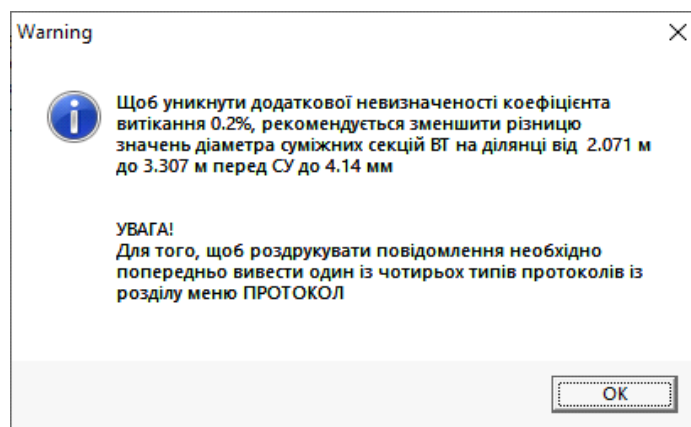


Рис. 4.13 Вікно зауваження при виникненні додаткової невизначеності коефіцієнта витікання, зумовленої різницею значень діаметрів суміжних секцій ВТ

4.5. Підсистема оптимізації параметрів витратоміра та системи вимірювання кількості теплової енергії

В підсистемі оптимізації параметрів витратоміра та системи вимірювання кількості теплової енергії реалізовано розрахунок ВЗПТ, який забезпечує мінімальну невизначеність результату вимірювання витрати та кількості теплоносія з врахуванням допустимої втрати тиску на ЗП. Зменшення втрат тиску на ЗП є надзвичайно важливим для систем постачання теплової енергії, оскільки це зменшує витрати на роботу мережевих (циркуляційних) pomp, а, відповідно, підвищує ефективність систем тепlopостачання.

Втрата тиску на ЗП є різницею статичного тиску середовища біля стінки ВТ [36,86,87] вимірюного перед ЗП на відстані $1 \cdot D$ від нього, де вплив абсолютного тиску середовища, зумовлений гальмуванням вхідного потоку безпосередньо перед ЗП, стає таким малим, що ним можна знехтувати, і вимірюного після ЗП на відстані $6 \cdot D$ від нього, де можна вважати повністю закінченим процес відновлення статичного тиску середовища, зумовлений розширенням струмини потоку.

Втрату тиску $\Delta\omega$ на діафрагмі будь-якого типу, соплі ISA 1932 або еліпсному соплі будь-якого типу визначають за формулою [33, 34, 86]:

$$\Delta\omega = \frac{\sqrt{\xi}}{\sqrt{\xi} + 2} \cdot \Delta p \quad (4.1)$$

де ξ – коефіцієнт гідравлічного опору діафрагми, сопла ISA 1932 або еліпсного сопла.

Значення коефіцієнта гідравлічного опору ξ розраховують за рівняннями:

– для діафрагми [33, 86]:

$$\xi = \left\{ \frac{\sqrt{1 - \beta^4 \cdot [1 - (C \cdot K_{ш} \cdot K_{п})^2]}}{C \cdot K_{ш} \cdot K_{п} \cdot \beta^2} - 1 \right\}^2 \quad (4.2)$$

– для сопла ISA 1932 або еліпсного сопла [34, 86]:

$$\xi = \left[\frac{\sqrt{1 - \beta^4 \cdot (1 - C^2)}}{C \cdot \beta^2} - 1 \right]^2 \quad (4.3)$$

Оптимізація параметрів витратоміра полягає у пошуку такого значення відносного діаметра β отвору ЗП, за якого невизначеність вимірюваного значення витрати, обчислена за рівнянням (2.27), є мінімальною, при цьому пропонується встановлювати обмеження "знизу" діапазону значень β значенням $\beta_{\text{ВТдоп}}$, яке відповідає заданому допустимому значенню втрат тиску на ЗП $\Delta\omega_{\text{доп}}$ (див.рис.4.14).

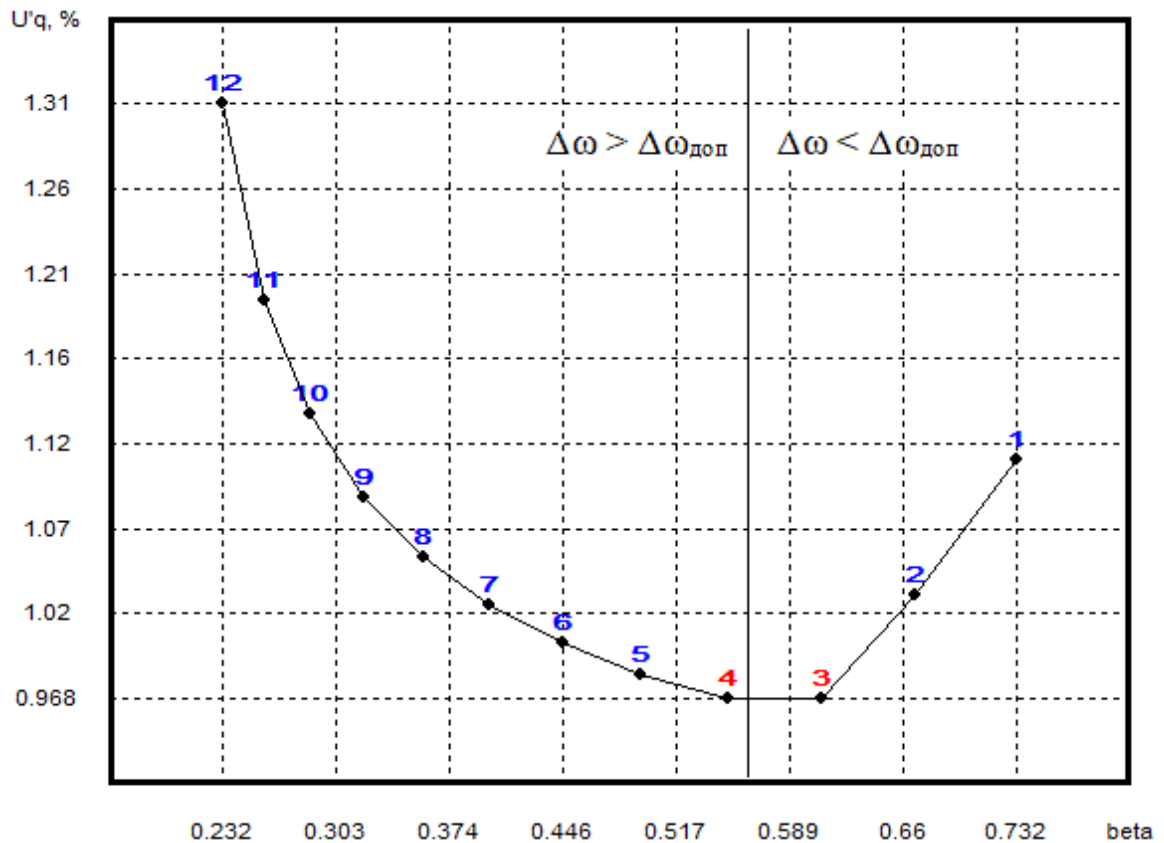


Рис. 4.14. Графік залежності відносної розширеної невизначеності результату вимірювання витрати як функції відносного діаметра отвору діафрагми

В результаті аналізу втрат тиску на діафрагмі залежно від відносного діаметра β встановлено, що залежність відносних втрат тиску від відносного діаметра β можна описати квадратичною функцією:

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta p} = a_2\beta^2 + a_1\beta + a_0 \quad (4.4)$$

Коефіцієнти рівняння (4.4) a_2 , a_1 , a_0 для діапазону значень відносного діаметра β до 0.75 визначено за методом найменших квадратів шляхом апроксимації залежності втрат тиску на діафрагмі від відносного діаметра β (див. рис.4.15).

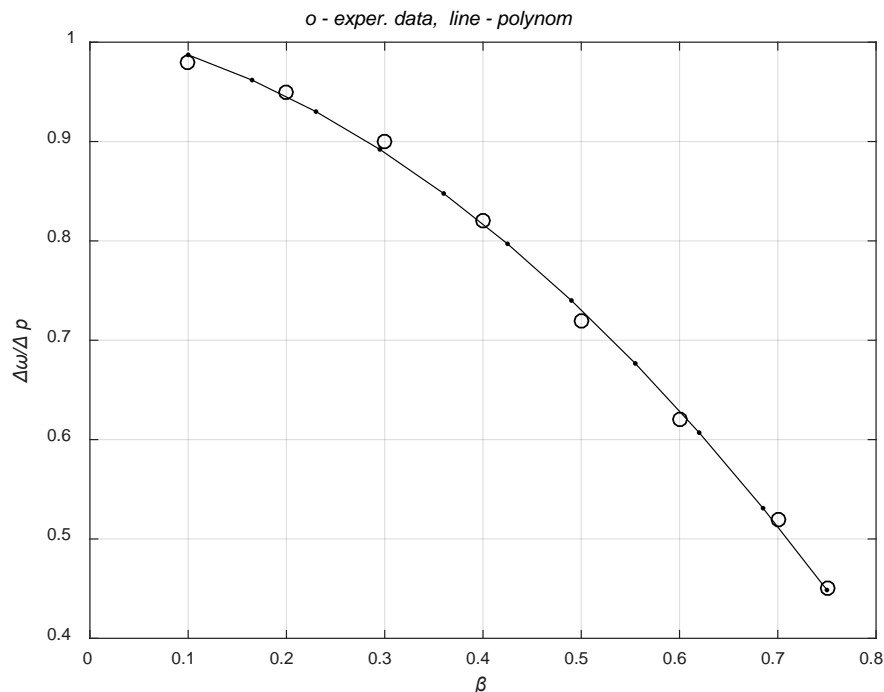


Рис.4.15. Залежність відносних втрат тиску $\Delta\omega/\Delta p$ від відносного діаметра отвору діафрагми β : "o" – значення, отримані за методикою ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009; "-" – апроксимаційний поліном

Шляхом розв'язування рівняння (4.4) отримано формули для обчислення значення відносного діаметра отвору β , яке відповідає заданому допустимому значенню втрат тиску на ЗП. Зокрема для діафрагми:

$$-0,7487\beta^2 - 0,1922\beta + \left(1,0140 - \frac{\Delta\omega}{\Delta p}\right) = 0; \quad (4.5)$$

$$D = a_1^2 - 4a_2 \left(a_0 - \frac{\Delta\omega}{\Delta p} \right) = 3,074 - 2,995 \frac{\Delta\omega}{\Delta p}; \quad (4.6)$$

$$\beta_1 = \frac{0,1922 + \sqrt{3,074 - 2,995 \frac{\Delta\omega}{\Delta p}}}{-1,497}; \quad (4.7)$$

$$\beta_2 = \frac{0,1833 - \sqrt{3,074 - 2,995 \frac{\Delta\omega}{\Delta p}}}{-1,497}. \quad (4.8)$$

Застосовуючи формули (4.7), (4.8), отримуємо граничні значення $\beta_{доп}$, які відповідають заданому допустимому значенню відносних втрат тиску на ЗП (див. табл. 4.14).

Таблиця 4.14

Граничні значення відносного діаметра отвору ЗП β , що відповідають заданому значенню відносних втрат тиску ($\Delta\omega/\Delta p$) на ЗП

$\frac{\Delta\omega}{\Delta p}$	0.98	0.95	0.9	0.82	0.72	0.62	0.52	0.45
β_1	-0.3770	-0.4476	-0.5391	-0.6533	-0.7680	-0.8650	-0.9507	-1.0057
β_2	0.1203	0.1909	0.2824	0.3966	0.5112	0.6083	0.6940	0.7490

Як видно з таблиці 4.16 значення β_1 , отримані за формулою (4.7) є від'ємними, тому для практичних задач для визначення $\beta_{доп}$ слід застосовувати формулу (4.8).

Для сопла ISA 1932 отримано такі залежності для обчислення граничного значення відносного діаметра отвору ЗП:

$$-0,3423\beta^2 - 0,8156\beta + \left(1,1039 - \frac{\Delta\omega}{\Delta p} \right) = 0; \quad (4.9)$$

$$D = a_1^2 - 4a_2 \left(a_0 - \frac{\Delta\omega}{\Delta p} \right) = 2,176 - 1,3692 \frac{\Delta\omega}{\Delta p}; \quad (4.10)$$

$$\beta_{доп} = \beta_2 = \frac{0,8156 - \sqrt{2,176 - 1,3692 \frac{\Delta\omega}{\Delta p}}}{-0,6846}. \quad (4.11)$$

Граничні значення відносного діаметра отвору β сопла ISA 1932, що відповідають заданому значенню відносних втрат тиску ($\Delta\omega/\Delta p$) на ЗП

$\frac{\Delta\omega}{\Delta p}$	0.92	0.84	0.725	0.605	0.485	0.37	0.3
β_2	0.2074	0.2886	0.3980	0.5047	0.6051	0.6963	0.7497

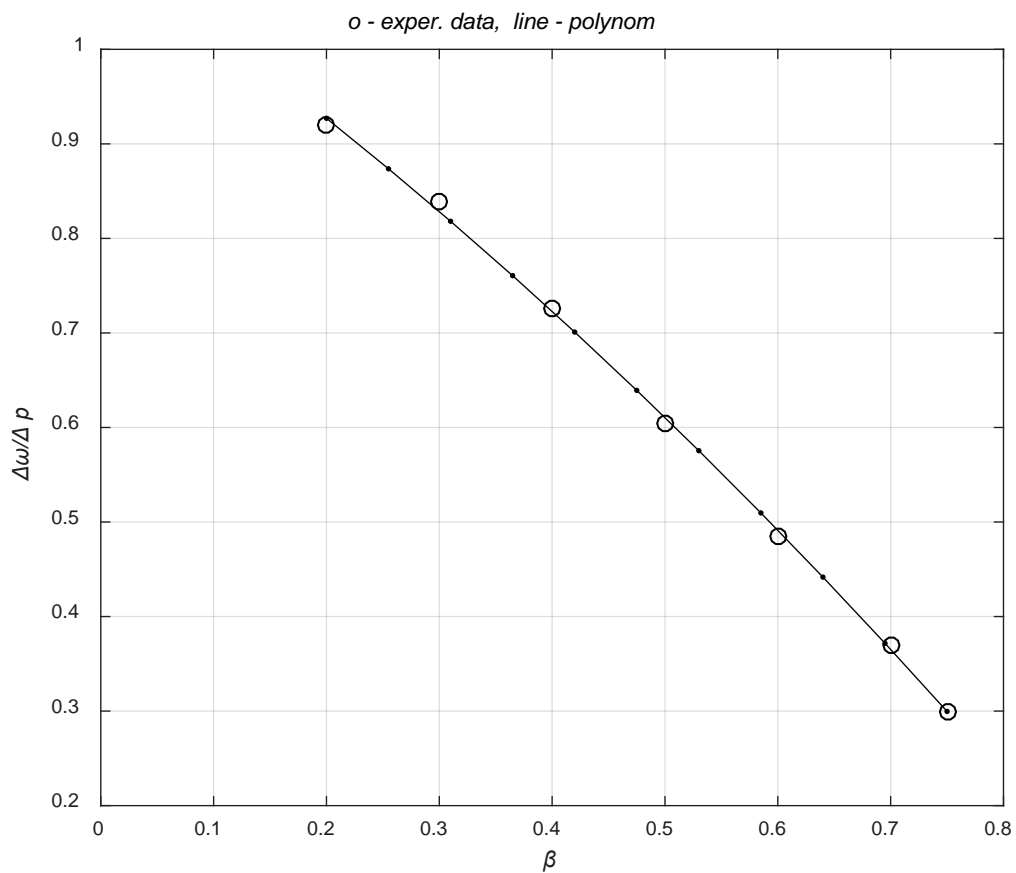


Рис. 4.16. Залежність відносних втрат тиску $\Delta\omega/\Delta p$ від відносного діаметра отвору сопла ISA 1932 β : "о" – значення, отримані за методикою ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009; "-" – апроксимаційний поліном

Для еліпсного сопла аналогічно отримано залежності для обчислення граничного значення відносного діаметра отвору ЗП:

$$-0.4364\beta^2 - 0.7610\beta + \left(1.0968 - \frac{\Delta\omega}{\Delta p}\right) = 0; \quad (4.12)$$

$$D = a_1^2 - 4a_2 \left(a_0 - \frac{\Delta\omega}{\Delta p} \right) = 2,494 - 1,7456 \frac{\Delta\omega}{\Delta p} \quad (4.13)$$

$$\beta_{\text{доп}} = \beta_2 = \frac{0,7610 - \sqrt{2,494 - 1,7456 \frac{\Delta\omega}{\Delta p}}}{-0,8728}. \quad (4.14)$$

Таблиця 4.16

Значення втрат тиску на еліпсному соплі (у вигляді відношення $\Delta\omega/\Delta p$) залежно від значення відносного діаметра $\beta_{\text{доп}}$

$\frac{\Delta\omega}{\Delta p}$	0.92	0.84	0.725	0.605	0.475	0.35	0.285
β_2	0.2076	0.2894	0.3978	0.5018	0.6063	0.7002	0.7469

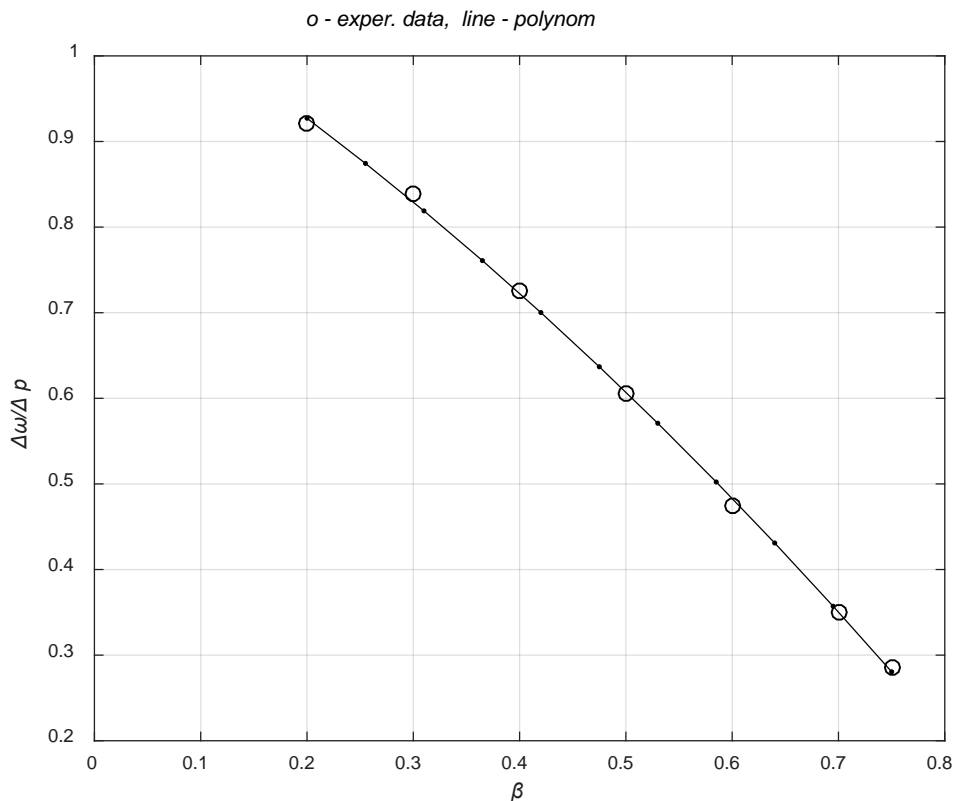


Рис. 4.17. Результати апроксимації втрат тиску на еліпсному соплі (у вигляді відношення $\Delta\omega/\Delta p$) залежно від відносного діаметра β

Рівняння (4.4) – (4.14) застосовано у САПР СВКТЕ для визначення граничного значення $\beta_{\text{ВТдоп}}$, яке відповідає заданому допустимому значенню втрат тиску на ЗП.

Розрахунок параметрів витратоміра змінного перепаду тиску, який забезпечує мінімальну невизначеність результату вимірювання витрати та кількості середовища з врахуванням заданого значення допустимої втрати тиску на ЗП реалізовано за допомогою алгоритму (рис. 4.18), опис якого наведено у табл. 4.17.

За цим алгоритмом значення верхньої границі вимірювань перепаду тиску Δp_e на ЗП розраховується САПР СВКТЕ та не вводиться користувачем.

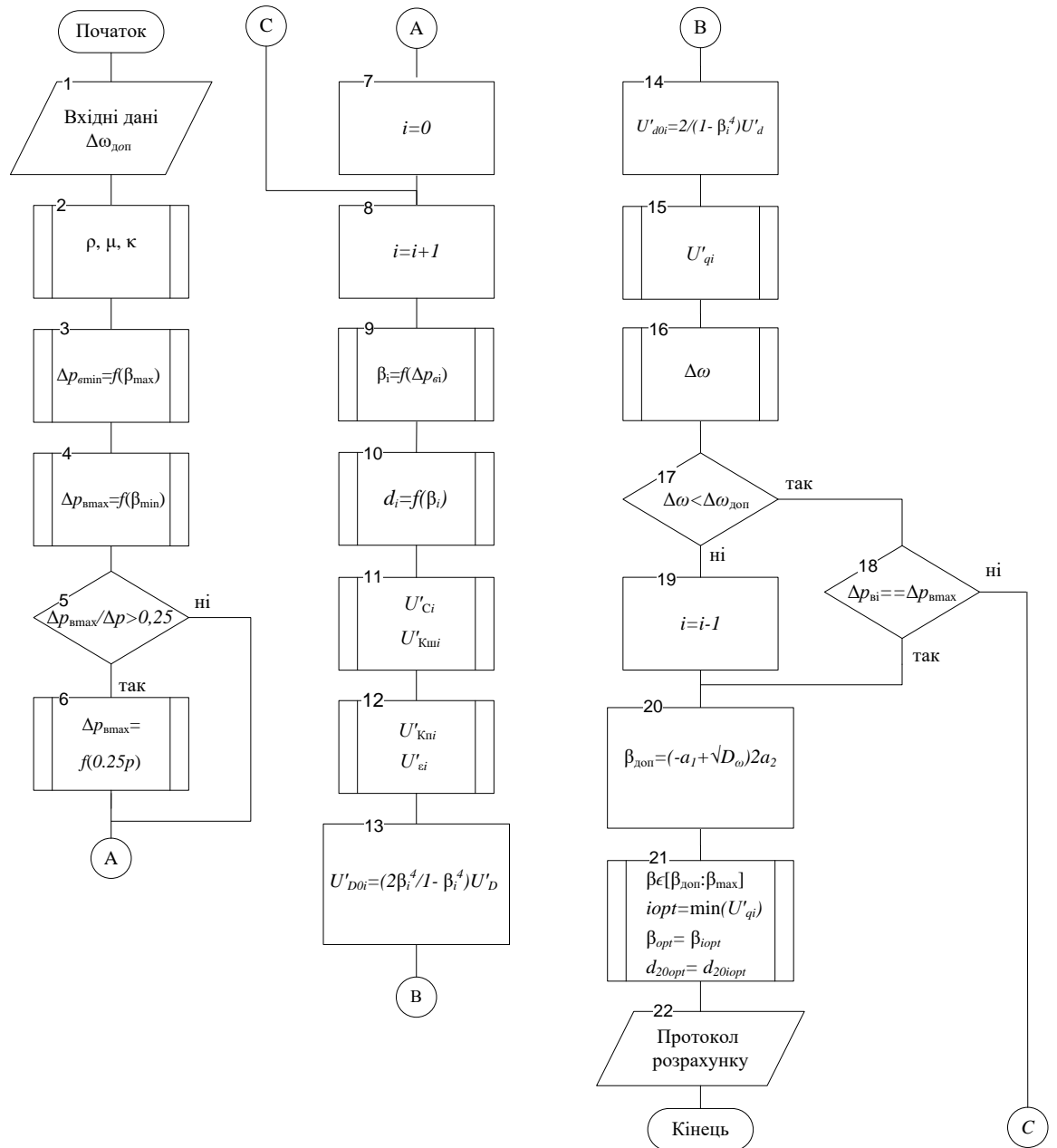


Рис. 4.18 Блок-схема алгоритму оптимізації параметрів витратоміра, який забезпечує мінімальну невизначеність результату вимірювання витрати та кількості середовища з врахуванням заданого значення допустимої втрати тиску на звужувальному пристрої

Таблиця 4.17

Пояснення алгоритму оптимізації параметрів витратоміра, який забезпечує мінімальну невизначеність результату вимірювання витрати та кількості середовища з врахуванням заданого значення допустимої втрати тиску на звужувальному пристрої

№ блоку	Пояснення до блоку
1	2
1	Вхідні дані для розрахунку параметрів витратоміра змінного перепаду тиску, який забезпечує мінімальну невизначеність результату вимірювання витрати та кількості середовища та значення допустимої втрати тиску на ЗП
2	Розрахунок параметрів середовища в робочих умовах: густини; показника адіабати (тільки для газоподібного середовища); динамічної в'язкості
3	Визначення мінімального значення верхньої границі перепаду тиску на ЗП
4	Визначення максимального значення верхньої границі перепаду тиску на ЗП
5	Перевірка умови відношення максимального значення верхньої границі перепаду тиску на ЗП до значення абсолютного тиску середовища. Якщо відношення $\frac{\Delta p_{в. max}}{\Delta p} > 0,25$, то переходимо до блоку 6. Якщо ж відношення $\frac{\Delta p_{в. max}}{\Delta p} \leq 0,25$, то переходимо до блоку 7.
6	Визначення значення верхньої границі перепаду тиску на ЗП, яке буде не більшим за значення $\Delta p_{в. max} \leq 0,25 p$
7	Присвоєння номеру нульової ітерації
8	Збільшення номеру ітерації на одиницю
9	Розрахунок значення відносного діаметра β_i отвору ЗП для заданого i -го значення верхньої границі перепаду тиску на ЗП
10	Розрахунок діаметра отвору або горловини ЗП для i -го значення відносного діаметра β_i отвору ЗП
11	Розрахунок i -го значення відносної розширеної невизначеності коефіцієнта витікання ЗП та i -го значення відносної розширеної невизначеності поправкового коефіцієнта, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні ВТ
12	Розрахунок i -го значення відносної розширеної невизначеності поправкового коефіцієнта, який враховує притуплення вхідного канту діафрагми (тільки для діафрагми) та i -го значення відносної розширеної невизначеності коефіцієнта розширення середовища (тільки для газоподібного середовища)
13	Розрахунок i -го значення добутку відносного коефіцієнту впливу $\frac{2\beta^4}{1-\beta^4}$ на відносну розширену невизначеність результату вимірювання внутрішнього діаметру ВТ ($U'_D = 0,2\%$).
14	Розрахунок i -го значення добутку відносного коефіцієнту впливу $\frac{2}{1-\beta^4}$ на відносну розширену невизначеність результату вимірювання діаметру отвору або горловини ЗП ($U'_d = 0,04\%$).
15	Розрахунок i -го значення відносної розширеної невизначеності результату вимірювання

	витрати середовища
16	Розрахунок значення втрати тиску на ЗП
17	Перевірка i -го значення втрати тиску на ЗП із значенням допустимої втрати тиску на ЗП. Якщо значення втрати тиску на ЗП є меншим за значення допустимої втрати тиску на ЗП ($\Delta\omega < \Delta\omega_{\text{доп}}$), то переходимо до блоку 18, якщо це значення є більшим або рівним, то переходимо до блоку 19.
18	Перевірка i -го значення верхньої границі вимірювань перепаду тиску на ЗП із максимальним значенням верхньої границі перепаду тиску на ЗП. Якщо ці значення рівні ($\Delta p_{vi} = \Delta p_{v\text{max}}$), то переходимо до блоку 20, якщо ці значення не рівні, то переходимо до блоку 8.
19	Зменшення номеру ітерації на одиницю
20	Визначення граничного значення $\beta_{\text{доп}}$, яке відповідає заданому допустимому значенню втрат тиску на ЗП
21	Визначення мінімального значення відносної розширеної невизначеності результату вимірювання витрати середовища, номер його ітерації, відносний діаметр отвору ЗП та діаметр отвору або горловини ЗП за температури середовища 20 °С для цього значення відносної розширеної невизначеності результату вимірювання витрати середовища.
22	Виведення протоколу розрахунку

4.6. Підсистема виведення та графічного представлення результатів розрахунку та проектування

Результати розрахунку та проектування СВКТЕ відображаються у протоколі розрахунку.

Сформований за результатами розрахунку та проектування системи вимірювання кількості теплової енергії протокол, у формі mhtml-сторінки (рис. 4.19), містить такі розділи:

- параметри і характеристики середовища;
- параметри і характеристики звужувального пристрою, в тому числі графічне зображення ЗП (первинного перетворювача та камер усереднення) (рис. 4.21);
- параметри і характеристики вимірювального трубопроводу;
- параметри і характеристики прямолінійних ділянок і оснащення ВТ, в тому числі схема вимірювальної ділянки трубопроводу з місцевими опорами (рис. 4.20);
- параметри і характеристики засобів вимірювання перепаду тиску на ЗП;

- параметри і характеристики засобів вимірювання тиску;
- параметри і характеристики засобів вимірювання температури;
- комплексні параметри витратомірів при заданих значеннях параметрів середовища;
- відносна невизначеність результатів вимірювань витрати та кількості при заданих значеннях параметрів середовища;
- відносна невизначеність результату вимірювання кількості теплової енергії.

Інформація, що представлена у протоколі розрахунку та проектування системи вимірювання кількості теплової енергії є достатньою для того, щоб:

- перевірити відповідність вимогам діючих нормативних документів існуючої системи вимірювання кількості ТЕ;
- перевірити коректність алгоритмів обчислення кількості ТЕ, реалізованих у мікропроцесорних контролерах систем вимірювання;
- розробити проектну документацію та виготовити основні складові проектованої системи вимірювання кількості ТЕ.

Формування протоколу з результатами розрахунку і проектування здійснюється у методі OnOutput().

В процесі формування протоколу OnOutput() викликає метод CalcIT(structMain* data) і FCalc() для перевірки на правильність розрахунків (на відсутність помилок). Якщо помилки відсутні формується сторінка mhtml з використання синтаксису html із заповненням всіх розділів протоколу.

B2D4.tmp.mht - САПР "Теплова енергія" — □ ×

Друк Вихід

Протокол розрахунку

(розрахунок та проектування системи вимірювання кількості теплової енергії на основі витратомірів змінного перепаду тиску)

**Розрахунок виконаний відповідно до Національного стандарту України
ДС ТУ ГОСТ 8.586.(1,2,3,4,5):2009 (ИСО 5167-(1,2,3,4):2003)
Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу
із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв
(введений в дію з 01 квітня 2010 р. наказом Держспоживстандарту України
№ 486 від 30.12.2009)**

1 ПАРАМЕТРИ І ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕРЕДОВИЩА		
<small>(дентифікатор 38)</small>		
1.1	Тип середовища	вода в системах обліку тепlopостачання
1.2	Тиск абсолютний	МПа 0.83062
1.3	Атмосферний тиск	мм рт. ст. 0
* 1.4	Тиск абсолютний	МПа 0.83062
1.5	Температура	°C 130
* 1.6	Густина води в робочих умовах	кг/м ³ 935.123
* 1.7	Динамічна в'язкість води в робочих умовах	Па·с 21.309*10 ⁻⁵
* 1.8	Ентальпія води в робочих умовах	кДж/кг 546.767
1.9	Тиск зворотного середовища абсолютний	МПа 0.5374
* 1.10	Тиск абсолютний зворотного середовища	МПа 0.83062
1.11	Температура зворотного середовища	°C 70
* 1.12	Густина зворотного середовища в робочих умовах	кг/м ³ 977.971
* 1.13	Динамічна в'язкість зворотного середовища в робочих умовах	Па·с 40.367*10 ⁻⁵
* 1.14	Ентальпія зворотного середовища в робочих умовах	кДж/кг 293.432
2 ПАРАМЕТРИ І ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУЖУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ		
<small>(дентифікатор 38)</small>		
2.1	Тип звужувального пристрою (ЗП)	діафрагма з кутовим способом відбору тиску
2.2	Діаметр отвору ЗП при температурі 20 °C	мм 92.8
2.3	Матеріал ЗП	ст.12X18H10T
* 2.4	Постійний коефіцієнт a_0 , який застосовується для розрахунку температурного коефіцієнта лінійного розширення матеріалу ЗП	1/°C 16.206
* 2.5	Постійний коефіцієнт a_1 , який застосовується для розрахунку температурного коефіцієнта лінійного розширення матеріалу ЗП	1/°C ² 6.571

Рис. 4.19. Протокол розрахунку параметрів системи вимірювання
кількості теплової енергії, перша сторінка

Позначення «*» зліва від номера параметра, означає, що перед виведенням у протокол такий параметр був розрахований програмою, а всі інші параметри були введені користувачем.

8062.tmp.mht - САПР "Теплова енергія"

Друк Вихід

4 ПАРАМЕТРИ І ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЯМОЛІНІЙНИХ ДІЛЯНОК І ОСНАЩЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДУ

(Ідентифікатор 39)

4.1 Перший найближчий пристрій до ЗП трубчатий струминовипрямляч у вигляді зв'язки з 19 трубок (1998) (додаткові можливості) 0.42

4.2 Довжина струминовипрямляча м 0.42

* 4.3 Мінімальна допустима відстань між струминовипрямлячем або ППП і ЗП м 0

* 4.4 Максимальна допустима відстань між струминовипрямлячем або ППП і ЗП м 0

4.5 Перший МО до ЗП будь-який МО

4.6 Відстань між першим МО та ЗП м 5

4.7 Відстань між ЗП і МО або найближчою границею розширювача, розміщених після ЗП м 1.7

Рисунок 1 Схема вимірювальної ділянки трубопроводу

4.8 Уступи або різниця значень діаметра між суміжними секціями ВТ відсутні

5 ПАРАМЕТРИ І ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ПЕРЕПАДУ ТИСКУ НА ЗП

(Ідентифікатор 39)

5.1 Модель ППТ FR3051CD

5.2 Верхня границя вимірювань перепаду тиску кгс/м² 6300

5.3 Нижня границя вимірювань перепаду тиску першого нормованого за точністю діапазону перепаду тиску кгс/м² 630

5.4 Нижня границя вимірювань перепаду тиску другого нормованого за точністю діапазону перепаду тиску кгс/м² 63

6 ПАРАМЕТРИ І ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ

(Ідентифікатор 39)

6.1 Модель перетворювача тиску FR3051TA

6.2 Верхня границя вимірювань тиску МПа 4

6.3 Нижня границя вимірювань тиску МПа 0.5

7 ПАРАМЕТРИ І ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

(Ідентифікатор 39)

7.1 Модель ПТ TCM-100M

7.2 Верхня границя вимірювань температури °С 150

7.3 Нижня границя вимірювань температури °С 20

* 7.4 Діапазон шкали вимірювань °С 130

7.5 Зовнішній діаметр ПТ або його захисної гільзи (за її наявності) мм 14

7.6 Місце встановлення ПТ або його захисної гільзи (за її наявності) після звужувального пристрою

7.7 Відстань між ПТ або його захисної гільзи (за її наявності) і ЗП м 1.4

Рис. 4.20. Основне меню САПР. Протокол розрахунку. Розділ параметрів і характеристик вимірювального трубопроводу, а також прямолінійних ділянок вимірювального трубопроводу і його оснащення

Для графічного відображення результатів розрахунку і проектування ЗП та прямолінійних ділянок ВТ застосовано процедуру DrawConstruction(int type). Даний метод дозволяє представити у протоколі графічну інформацію щодо конструкції і розмірів звужувального пристрою та конфігурації вимірювального трубопроводу.

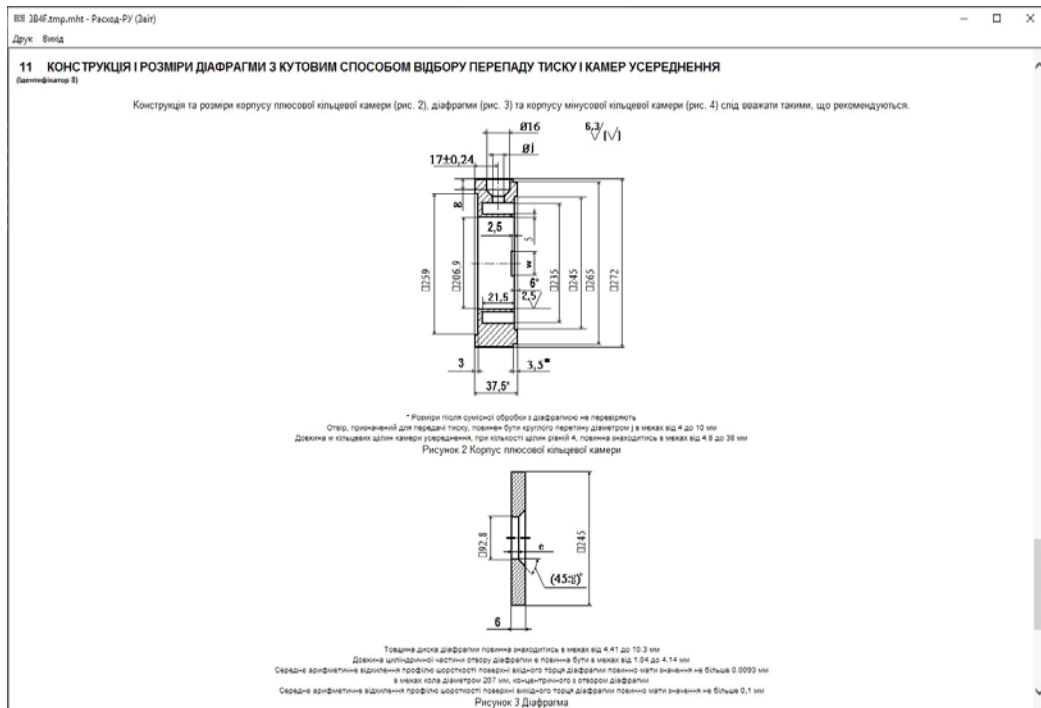


Рис.4.21. Протокол розрахунку. Розділ конструкції і розмірів ЗП на прикладі діафрагми з кутовим способом відбору перепаду тиску

Розроблена САПР "Теплова енергія" впроваджена та застосовується для проектування систем вимірювання кількості теплової енергії у промисловості, зокрема в ТОВ "Сервіскотломонтаж-Львів", а також впроваджена у навчальний процес для студентів спеціальності 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології", що підтверджено актами про впровадження (див. Додаток В, Додаток Г).

Висновки до розділу 4

1. Запропоновано та реалізовано нові підходи щодо автоматизованого проектування систем вимірювання кількості теплової енергії, які дають можливість реалізувати розрахунок конструктивних та метрологічних характеристик системи вимірювання кількості теплової енергії із врахуванням технологічних та нормативних обмежень.

2. На основі розроблених алгоритмів визначення кількості теплової енергії [54], повної математичної моделі витратоміра змінного перепаду тиску [81], методів визначення властивостей води та водяної пари [53], розробленої автором методики обчислення показника адіабати водяної пари [72], методики оцінювання невизначеності ентальпії води і водяної пари [70], методики оцінювання невизначеності результату вимірювання кількості теплової енергії [56] розроблено систему автоматизованого проектування засобів для вимірювання кількості ТЕ.

3. Розроблено алгоритм для автоматизованого проектування витратоміра змінного перепаду тиску, який забезпечує мінімальну невизначеність результату вимірювання витрати середовища з врахуванням допустимої втрати тиску на звужувальному пристрої.

ВИСНОВКИ

Під час виконання дисертаційної роботи отримано такі результати та висновки.

1. За результатами аналізу науково-технічних джерел та нормативних документів щодо обліку теплової енергії виявлено недоліки нормативного, технічного та метрологічного забезпечення систем вимірювання кількості теплової енергії та сформовано завдання для досліджень. Зокрема встановлено, що існуючі програмні пакети не призначені для проектування систем вимірювання кількості теплової енергії, тому актуальним є завдання розроблення САПР засобів вимірювання кількості ТЕ.

2. Виконано класифікацію та узагальнення рівнянь обчислення кількості теплової енергії для вимірювальних систем з різною структурою та сформовано узагальнене рівняння обчислення кількості теплової енергії, що враховує кількість подавальних, зворотних трубопроводів, трубопроводів підживлення та може бути застосоване як для закритих так і для відкритих систем тепlopостачання.

3. Шляхом розгляду у сукупності повної математичної моделі витратоміра змінного перепаду тиску, рівнянь визначення кількості теплової енергії та рівнянь визначення властивостей теплоносія розроблено математичну модель системи вимірювання кількості теплової енергії, що дає можливість дослідити вплив конструктивних характеристик витратоміра, параметрів теплоносія на результат вимірювання кількості теплової енергії.

4. На основі теорії оцінювання невизначеності та рівнянь розрахунку ентальпії води (водяної пари) розроблено рівняння для розрахунку невизначеності ентальпії води (водяної пари), застосування якого дає можливість врахувати методичну невизначеність розрахунку ентальпії та невизначеності параметрів стану води (водяної пари) для області параметрів стану теплоносія, що охоплює технологічні умови застосування систем вимірювання кількості теплової енергії.

5. Розроблено рівняння невизначеності вимірюваного значення кількості теплової енергії, що дає можливість обчислити невизначеність для конфігурації системи вимірювання з двома витратомірами;

6. Розроблено нове рівняння для обчислення показника адіабати перегрітої водяної пари, отримане на основі базових термодинамічних залежностей та рівнянь IAPWS IF-97, за яким отримано масив зразкових значень показника адіабати; на основі масиву зразкових значень розроблено спрощені залежності та алгоритм розрахунку показника адіабати для їх застосування у обчислювачах кількості теплової енергії.

7. Розроблено новий метод проектування системи вимірювання кількості теплової енергії, який полягає у пошуку параметрів витратоміра, що забезпечують мінімальну невизначеність вимірюваного значення витрати із одночасним врахуванням граничного значення втрат тиску, що дає можливість зменшити втрати тиску у системах постачання теплової енергії.

8. Запропоновано нові підходи щодо автоматизованого проектування систем вимірювання кількості теплової енергії, що дають можливість реалізувати розрахунок конструктивних та метрологічних характеристик системи вимірювання кількості теплової енергії із врахуванням технологічних та нормативних обмежень.

9. Розроблено алгоритми розрахунку кількості теплової енергії, що реалізують математичну модель системи вимірювання кількості теплової енергії та дають можливість обчислити кількість теплової енергії для різних конфігурацій систем вимірювання.

10. Розроблено алгоритм проектування системи вимірювання кількості теплової енергії, який забезпечує мінімальну невизначеність вимірюваного значення витрати із одночасним врахуванням граничного значення втрат тиску та дає можливість зменшити втрати тиску, а отже й підвищити ефективність систем постачання теплової енергії;

11. Шляхом реалізації сукупності алгоритмів, що реалізують математичну модель системи вимірювання кількості теплової енергії, рівняння обчислення

фізичних властивостей теплоносія, рівняння розрахунку невизначеності кількості теплової енергії розроблено програмний комплекс САПР "Теплова енергія" для автоматизованого проектування систем вимірювання кількості теплової енергії.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в підприємствах, що займаються проектуванням та інсталяцією об'єктів тепlopостачання, зокрема розроблений програмний пакет САПР "Теплова енергія" застосований для проектування систем вимірювання кількості теплової енергії у ТОВ "Сервіскотломонтаж-Львів" а також впроваджений у навчальний процес для студентів спеціальності 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології".

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» (№1314-VII). Відомості Верховної Ради, 2014. № 30. ст.1008.
2. Закон України «Про теплопостачання» (№ 2633-IV). Відомості Верховної Ради, 2005. №28. ст. 373
3. Закон України «Про комерційний облік теплової енергії та водопостачання» (№ 2119-VIII). Відомості Верховної Ради, 2017. № 34. ст.370.
4. Методика розподілу між споживачами обсягів спожитих у будівлі комунальних послуг. Затверджено наказом Мінрегіону України від 22.11.2018. № 315
5. Опалення, вентиляція та кондиціонування ДБН В.2.5-67:2013. К.: Мінрегіон України, 2013.
6. ДБН В.2.5-39:2008. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Теплові мережі. К. 2008 р.
7. ДБН В.2.5-77:2014 Котельні. Київ. Мінрегіонбуд, 2014.
8. НПАОП 0.00-1.81-18 Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском. Затверджено наказом Мінсоцполітики України від 05.03.2018 № 333.
9. ДСТУ-Н Б В.2.5-73:2013. Настанова з монтажу внутрішніх санітарно-технічних систем. (СНиП 3.05.01-85, MOD). Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України. 2013.
10. ДБН В.2.5-64:2012 Внутрішній водопровід та каналізація. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2013.
11. Wytuczne projektowania i budowy węzłów cieplnych. Veolia Energia Warszawa S.A. 2020. 67
12. Ustawa z dnia 11 maja 2001 r. Prawo o miarach, tekst jednolity Dz.U. 2004 nr 243, poz. 2441.

13. Ustawa z dnia 30 sierpnia 2002 r. O systemie zgodności, tekst jednolity Dz.U. 2010 nr 138, poz. 395.
14. Rządowy projekt ustawy o zmianie ustawy – Prawo energetyczne, ustawy – Prawo ochrony środowiska oraz ustawy o systemie oceny zgodności – Druk Sejmowy 1084 oraz 1153. Komisja Gospodarki. 2006 r.
15. PN-B-02423:1999 Ciepłownictwo. Węzły ciepłownicze. Wymagania i badania przy odbiorze.
16. PN-EN 1434-1+A1:2019-01 Ciepłomierze – Część 1 : Wymagania ogólne. 2019.
17. PN-EN 1434-2+A1:2019-01 Ciepłomierze -- Część 2: Wymagania konstrukcyjne. 2019
18. Heat meters. International Recommendation OIML R75-1. International Organization of Legal Metrology. Paris. Edition 2002(E).
19. Реєстр затверджених типів. ДП "Укрметртестстандарт" URL: <http://legalzvt.kiev.ua/search>
20. Технічний регламент засобів вимірювальної техніки. Затверджено постановою Кабінету Міністрів України від 24 лютого 2016 р. № 163.
21. Directive 2014/32/EU of the European Parliament and of the Council of 26 February 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of measuring instruments (recast) [Електронний ресурс]. Official Journal of the European Union. 2014. Режим доступу до ресурсу: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2014/32/2015-01-27>.
22. ДСТУ EN 1434-1:2019 Теплолічильники. Частина 1. Загальні вимоги (EN 1434-1:2015 + A1:2018, IDT). [Чинний від 01.08.2019]. ДП «УкрНДНЦ»
23. ДСТУ EN 1434-2:2019 Теплолічильники. Частина 2. Вимоги до конструкції (EN 1434-2:2015 + A1:2018, IDT). [Чинний від 01.08.2019]. ДП «УкрНДНЦ».

24. ДСТУ EN 1434-3:2017 Теплолічильники. Частина 3. Обмін даними та інтерфейси (EN 1434-3:2015, IDT). [Чинний від 01.07.2018]. ДП «УкрНДНЦ».
25. ДСТУ EN 1434-4:2019 Теплолічильники. Частина 4. Випробування для затвердження типу (EN 1434-4:2015 + A1:2018, IDT). [Чинний від 01.08.2019]. ДП «УкрНДНЦ».
26. ДСТУ EN 1434-5:2019 Теплолічильники. Частина 5. Первинна повірка (EN 1434-5:2015 + A1:2019, IDT). [Чинний від 01.11.2019]. ДП «УкрНДНЦ».
27. ДСТУ EN 1434-6:2017 Теплолічильники. Частина 6. Монтаж, уведення в експлуатацію, контроль в експлуатації та технічне обслуговування (EN 1434-6:2015, IDT). [Чинний від 01.07.2018]. ДП «УкрНДНЦ».
28. Mateusz Turkowski. Metrologia przepływów. Oficyna wydawnicza politechniki Warszawskiej. Warszawa. 2018. 284 s.
29. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник. Книга 1. СПб.: Политехника. 2002. 409 с.
30. Й. Й. Білинський М. О. Стасюк М. В. Гладішевський. Аналіз методів і засобів контролю витрат рідких і газоподібних середовищ та їхня класифікація. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2015. № 1.
31. Матіко Ф.Д. Вимірювання витрати та кількості стисненого природного газу на газонаповнювальних станціях: дис. канд. техн. наук: 05.11.01. Львів, 2001. 179 арк.
32. Андронов И.В. Измерение расхода жидкостей и газов. М.: Энергоиздат, 1981. 88 с.
33. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідин і газів за допомогою стандартних звужуючих пристроїв. Частина 2. Діафрагми. Технічні вимоги. (ГОСТ 8.586.2–2005 (ИСО 5167-2:2003), IDT; ISO 5167-2:2003, NEQ): ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009. [Чинний від 2010.04.01]. К. : Держспоживстандарт України, 2010.– 90 с.
34. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини і газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 3. Сопла та сопла

Вентурі. Технічні вимоги. (ГОСТ 8.586.3–2005 (ИСО 5167-3:2003), IDT; ISO 5167-3:2003, NEQ): ДСТУ ГОСТ 8.586.3:2009. [Чинний від 2010.04.01]. К. : Держспоживстандарт України, 2010. 68 с.

35. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини і газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 4. Труби Вентурі. Технічні вимоги. (ГОСТ 8.586.4–2005 (ИСО 5167-4:2003), IDT; ISO 5167-4:2003, NEQ): ДСТУ ГОСТ 8.586.4:2009. [Чинний від 2010.04.01]. К. : Держспоживстандарт України, 2010. 53 с.

36. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини і газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 1. Принцип методу вимірювання та загальні вимоги: ГОСТ 8.586.1–2005 (ИСО 5167-1:2003), IDT; ISO 5167-1:2003, NEQ: ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009. [Чинний від 2010.04.01]. К. : Держспоживстандарт України, 2010. 98 с.

37. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідин і газів за допомогою стандартних звужуючих пристроїв. Частина 5. Методика виконання вимірювань. (ГОСТ 8.586.5–2005, IDT): ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009. [Чинний від 2010.04.01]. К. : Держспоживстандарт України, 2010. 196 с.

38. Лесовой Л. В. Розрахунок невизначеності результату вимірювань витрати і кількості сухої частини вологого газу за методом змінного перепаду тиску. *Теплоенергетика. Інженерія докільля. Автоматизація: зб. наук. праць*. Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2010. № 67. С. 104 – 113.

39. Пістун Є. П. Метод та алгоритми розрахунку прямолінійних ділянок витратоміра змінного перепаду тиску з пристроями підготовки потоку та без них згідно з ГОСТом 8.586.1,2,3,4,5-2005. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Теплоенергетика. Інженерія докільля. Автоматизація*. 2009. № 659. С. 129–134.

40. Y. P. Pistun, L. V. Lesovoy, F. D. Matiko, R. M. Fedoryshyn. Computer Aided Design of Differential Pressure Flow Meters. *World Journal of Engineering and Technology*. 2014. Vol. 2, №2. P. 68-77.

41. Yevhen Pistun, Leonid Lesovoy, Roman Fedoryshyn. Design of flowmeters for fluid energy carriers by means of «Raskhod-Ru» CAD. *JEECS*. 2013. Vol. 3. No. 1. p. 79 – 86
42. Айрапетов В.А., Сошина Ж.С., Степкина Л.А., Пистун Е.П., Крук И.С., Лесовой Л.В. Методика расчета диафрагм оптимальных по точности измерения расхода и количества природного газа. М.: Всесоюз. науч.-произв. об-ние «Союзгазавтоматика». 1983. 30 с.
43. Flow Cad software V2.0 [Електронний ресурс]. Users manual. Режим доступу до ресурсу: http://www.arian.cl/downloads/man-arian_flow_cad_software_v2.pdf.
44. ISO Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices Inserted in Circular Cross-Section Conduits Running Full - Part 1: General Principles and Requirements. 2003. P. 40.
45. Matiko F. D., Slabyk O. M., Hutnyk M. B. (2018). Аналіз нормативного забезпечення систем вимірювання кількості теплової енергії. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2018. Вип. 28 (3). С. 105 – 110.
46. Кузьмін О. В. Інженерне обладнання будівель : навч. посіб. Донецьк : ДонНУЕТ. 2014. 248 с.
47. Методика осуществления коммерческого учета тепловой энергии, теплоносителя. М. : Министерство строительства и жилищно -коммунального хозяйства РФ. 2014. 50 с.
48. Правила обліку, відпуску і споживання теплової енергії (Проект). К. : Міністерство з питань житлово-комунального господарства України, 2009. 96 с.
49. КТМ 204-України 244-94 Норми та вказівки по нормуванню витрат палива та теплової енергії на опалення житлових та громадських споруд, а також на господарсько-побутові потреби в Україні. Київ, 2001.
50. Слабик О. М., Матіко Ф. Д., Лесовой Л. В. Алгоритм визначення кількості теплової енергії для систем із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2019. Вип. № 36. С. 77 – 81.

51. МИ 2412-97. ГСИ. Водяные системы теплоснабжения. Уравнения измерений тепловой энергии и количества теплоносителя. Введена в действие с 01.09.1997. М.: ВНИИМС. 1997. 40 с.
52. Щедрина О.І. Алгоритмізація та програмування процедур обробки інформації: навчальний посібник. К.: КНЕУ, 2001. С 240.
53. IAPWS R7-97(2012). Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. Lucerne, Switzerland. 2007. P. 49
54. Слабик О.М., Матіко Ф.Д., Лесовой Л.В. Алгоритм визначення кількості теплової енергії для систем з витратоміром змінного перепаду тиску. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2019*: матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ – 2019). 23–24 квітня 2019 р. Київ, 2019. С. 68 – 69.
55. ISO 5168:2005 Measurement of fluid flow – Procedures for the evaluation of uncertainties. 2005. P.65.
56. Byts O., Kurytnik I., FedirMatiko F., Lesovoy L., Matiko H. Evaluating the uncertainty of the amount of thermal energy for metering systems with differential pressure flowmeters. *Napędy i Sterowanie*. 2020. No. 4. P. 57 – 63.
57. МИ 2553-99 ГСИ. Энергия тепловая и теплоноситель в системах теплоснабжения. Методика оценивания погрешности измерений. Основные положения. 1999.
58. ГОСТ Р 8.728-2010 Оценивание погрешностей измерений тепловой энергии и массы теплоносителя в водяных системах теплоснабжения. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ).
59. JCGM 100:2008, GUM 1995 with minor corrections Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement, First edition. 2008. 120 p.
60. Wyznaczanie niepewności pomiaru przy wzorcowaniu. EA-4/02 M: 2013. Wyd. 1.

61. IAPWS. Revised Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use 1996. 2018. P.19
62. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы стандартных справочных данных ГСССД 187-99. Вода. Удельный объем и энтальпия при температурах 0...1000 градусов Цельсия и давлениях 0,001...1000 МПа. ВНИЦСМВ. 1999. 39 с.
63. Варгафтик Н. Б., Вукалович М. П. О Международных скелетных таблицах по теплопроводности и вязкости. *Теплоэнергетика*. 1967. №1. С. 91.
64. IAPWS, Revised Release on the IAPS Formulation 1985 for the Viscosity of Ordinary Water Substance, International Association for the Properties of Water and Steam, 2003..
65. Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара: Справочник. Рек. Гос. службой стандартных справочных данных 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат. 1984. 80 с.
66. Ривкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. М.: Энергия. 1980. 424 с.
67. R12-08: Release on the IAPWS Formulation 2008 for the Viscosity of Ordinary Water Substance. 2008. P. 9.
68. Лесовой.Л.В. Розрахунок витрати вологої водяної пари за методом змінного перепаду тиску із стандартним звужувальним пристроєм. *Методи та прилади контролю якості*. 2011. Вип. 26. С. 71-76.
69. Слабик О.М., Матіко Ф.Д., Лесовой Л.В. Спрощений алгоритм розрахунку показника адиабати перегрітої пари для автоматизованих систем обліку теплової енергії. International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students *Actual Problems of Automation and Control*: conference materials. Луцьк, 2018. №6. С. 49-54.

70. Matiko F., Slabyk O., Lesovoy L., Matiko H. Technique for evaluating the uncertainty of enthalpy of water and steam for thermal energy metering systems. *Energy Engineering and Control Systems*. 2018. Vol. 4, № 2. P. 79 – 86.
71. Шпильрайн Э.Э., Кессельман П.М. Основы теории теплофизических свойств веществ. М.: Энергия. 1977. 248с.
72. Слабик О. М., Матіко Ф. Д., Лесовой Л. В. Спрощений алгоритм розрахунку показника адиабати перегрітої пари для автоматизованих систем обліку теплової енергії. *Вісник КПІ. Серія: Приладобудування*. 2019. Вип. 57 (1). С. 72 – 78.
73. Василенко, І. Ф. Вплив концепції невизначеності вимірювань на метрологічну діяльність. *Наукові записки : зб. наук. пр.* Кіровоград: КНТУ, 2016. Вип. 19. С. 58-68.
74. ДСТУ 2681-94. Метрологія. Терміни та визначення. [Чинний від 1995.01.01]. Київ : Держстандарт України, 2001. Група 01.040.17. 17.020 (Т 80)
75. Державна система забезпечення єдності вимірювань. Метрологічне забезпечення. Основні положення: ДСТУ 2682:94. [Чинний від 1995.01.01]. Київ: Держстандарт України, 1995. 15 с.
76. Академія метрології України (за ініціативою Львівського відділення). Метрологія. Терміни та означення: сучасне трактування. 6-2017. *Метрологія та прилади*. 2017. №6. С.39 – 44.
77. ГОСТ 30319.2-96 Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости. ВНИЦСМВ Госстандарта России. 1997.
78. Матіко Ф. Д. Вплив невизначеностей фізичних властивостей газоподібних енергоносіїв на точність їх обліку. *Вимірювальна техніка та метрологія: Міжвідомчий наук.–техн. збірник*. 2009. Вип.70. С. 76–82.
79. Matiko F., Byts O., Lesovoy L, Matiko H. Computer-aided system for designing the thermal energy metering devices. *Energy Engineering and Control Systems*. 2020. Vol. 6, No. 1. P. 61 – 69.

80. В. Ю. Щербина. Конспект лекцій: навчальний посібник для студентів які навчаються за освітньо-науковою програмою магістерської підготовки, спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Інжинирінг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання виробниц [Електронний ресурс] / В. Ю. Щербина // КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/25669>.

81. Лесовой Л.В. Методологічні засади нормування та підвищення точності вимірювання витрати і кількості плинного енергоносія методом змінного перепаду тиску: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.11.01. Львів, 2012. 36 с.

82. Бьерн Страуструп. Язык программирования C++. Специальное издание: Издательство Бином, 2012. 1136 с.

83. Герб Саттер. Решение сложных задач на C++. Серия C++ in-Depth: Издательский дом «Вильямс», 2002. 400с.

84. Джефф Эджер. Библиотека программиста C++. Издательство: Питер. 1999. С. 320.

85. Лесовой Л.В., Матіко Ф.Д., Федоришин Р.М. Автоматизоване проектування систем вимірювання витрати плинних енергоносіїв. Лабораторний практикум: навч. Посібник. Львів: В-во «Сполом», 2019. 252 с.

86. Пістун Є.П., Лесовой Л.В. Нормування витратомірів змінного перепаду тиску. Львів: Видавництво ЗАТ «Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв», 2006. С. 576

87. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества: справочник. Ленинград. 1989. 701 с.

Список публікацій здобувача:

Публікації в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Matiko F. D., Slabyk O. M., Hutnyk M. V. (2018). Аналіз нормативного забезпечення систем вимірювання кількості теплової енергії. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2018. Вип. 28 (3). С. 105 – 110.

2. Matiko F., Slabyk O., Lesovoy L., Matiko H. Technique for evaluating the uncertainty of enthalpy of water and steam for thermal energy metering systems. *Energy Engineering and Control Systems*. 2018. Vol. 4, № 2. P. 79 – 86.

3. Слабик О. М., Матіко Ф. Д., Лесовой Л. В. Спрощений алгоритм розрахунку показника адіабати перегрітої пари для автоматизованих систем обліку теплової енергії. *Вісник КПІ. Серія: Приладобудування*. 2019. Вип. 57 (1). С. 72 – 78.

4. Слабик О. М., Матіко Ф. Д., Лесовой Л. В. Алгоритм визначення кількості теплової енергії для систем із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2019. Вип. № 36. С. 77 – 81.

5. Matiko F., Byts O., Lesovoy L, Matiko H. Computer-aided system for designing the thermal energy metering devices. *Energy Engineering and Control Systems*. 2020. Vol. 6, No. 1. P. 61 – 69.

6. Byts O., Kurytnik I., FedirMatiko F., Lesovoy L., Matiko H. Evaluating the uncertainty of the amount of thermal energy for metering systems with differential pressure flowmeters. *Наряды і Sterowanie*. 2020. No. 4. P. 57 – 63.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

7. Слабик О.М., Матіко Ф.Д. Автоматизація проектування систем вимірювання кількості теплової енергії на основі витратомірів змінного перепаду тиску. *Актуальні проблеми гуманітарних та природничих наук:*

матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції. 25-26 серпня 2017 р. Одеса, 2017. С. 156 – 158.

8. О. М. Слабик, Д. Матіко, Л. В. Лесовой. Проектування систем вимірювання кількості теплової енергії на основі витратомірів змінного перепаду тиску. *«Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (ВКДТС-2017)*: збірник тез доповідей Четвертої міжнародної наукової конференції. 31 жовтня – 2 листопада 2017 р. Вінниця, 2017. С. 237 – 238.

9. Матіко Ф. Д., Слабик О. М., Гутник М. Б. Аналіз стану приладового обліку кількості теплової енергії. *Приладобудування: стан і перспективи*: збірник тез доповідей XVII Міжнародної науково-технічної конференції. 15 – 16 травня 2018 р. Київ, 2018. С 184.

10. Slabyk O.M., Matiko F.D., Lesovoy L.V. Technique for determining the properties of heat carrier for the automated design of measuring systems of thermal energy. *Автоматика/Automatics – 2018*: матеріали XXV Міжнародної конференція з автоматичного управління. 18–19 вересня 2018 р. Львів, 2018. С. 189 – 190.

11. Слабик О.М., Матіко Ф.Д., Лесовой Л.В. Спрощений алгоритм розрахунку показника адіабати перегрітої пари для автоматизованих систем обліку теплової енергії. *International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students Actual Problems of Automation and Control*: conference materials. 30 листопада 2018 р. Луцьк, 2018. №6. С. 49-54.

12. Слабик О.М., Матіко Ф.Д., Лесовой Л.В. Алгоритм визначення кількості теплової енергії для систем з витратоміром змінного перепаду тиску. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2019*: матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ – 2019). 23–24 квітня 2019 р. Київ, 2019. С. 68 – 69.

13. Слабик О.М., Матіко Ф.Д., Лесовой Л.В. Оцінювання невизначеності ентальпії теплоносія для метрологічного забезпечення систем обліку теплової енергії. *«Приладобудування: стан і перспективи»*: збірник тез доповідей XVIII

Міжнародної науково-технічної конференції. 15 – 16 травня 2019 р. Київ, 2019. С. 172 – 173.

14. Биць О.М., Матіко Ф.Д., Лесовой Л.В. Програмний комплекс для автоматизованого проектування систем вимірювання кількості теплової енергії. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2020*: матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ-2020). 22 квітня 2020 р. Київ, 2020. С. 35 – 36.

Підпрограма розрахунку кількості теплової енергії

```

void WaterCount()
{
if (typemedium == 50 || typemedium == 51)
    {
        for (int TeploI = 1; TeploI <= 2; TeploI++)
            {
                FNull();
                Inevyznach = 2;
                sized20Constr = sized20;
                pA01 = Fpin(sizeatmpressure + 5, pA) * (typepressure - 1);
                if (TeploI == 1)
                    {
                        TeploDodTC = valuetemp; //температура середовища
                        valuetemp = TeploT2C; //температура зворотнього
середовища

                        TeploDodP = valuepress; //тиск середовища, МПа
                        valuepress = TeploP2I; //тиск зворотного середовища
                        TeploDp = dp; //перепад тиску
                        dp = TeploDp2; // перепад тиску в зворотному середовищі

                        TeploDt = Dt; //зовнішній діаметр ПТ або гільзи
                        TeploD20ULedge = D20ULedge;
                        TeploDMO220 = DMO220; //внутрішній діаметр ВТ
                        TeploDMO2320 = DMO2320;
                        TeploDMO320 = DMO320;
                        TeploSizeLedge = SizeLedge; //
                        TeplovalueEc = valueEc; //
                        TeplovalueEcn = valueEcn; //
                    }
                else
                    {
                        valuetemp = TeploDodTC; //температура середовища
                        valuepress = TeploDodP; //тиск
                        dp = TeploDp; //перепад тиску
                    }
            }
    }
}

```

```

valueT = T = FTin(sizetemp, valuetemp); // переведення °C в
Кельвіни
if (typepressure == 2) //перевірка на тип тиску
    valueUpA = 100 * deltapA / pA; // визначення похибки за
вказаною формулою
else
    valueUpA = 0; // значення похибки рівне 0 при першому
виконанні

p = Fpin(sizepressure, valuepress); //перетворення тиску в МПа
pmax = Fpin(sizepressure, pmax); ///перетворення верхньої
границі тиску в МПа
if (typepressure == 2)
{
    p = p + Fpin(sizeatmpressure + 5, pA);
    deltapA = Fpin(sizeatmpressure + 5, deltapA);
}
valuep = Fpout(sizepressure, p); //тиск в МПа
if (typemedium != 6 && typemedium != 49 && typemedium != 4 ||
typemedium == 4 && typepressure == 3) //перевірка на Воду або Пару
{
    TMinmeas = FTin(sizetemp, tMinmeas); // перетворення
нижньої границі температури в Кельвіни
    TMaxmeas = FTin(sizetemp, tMaxmeas); // перетворення
верхньої границі температури в Кельвіни
}
FInput(); // Визначення граничних вхідних значень для
розрахунку

if (typecalculate == 4)
    d20 = FLin(sized20, valued20); // діаметр ЗП при T=20
переводимо в мм
lt = valueLTMO; //відстань між ЗП і ПТ

Dt = FLin(1, Dt); //Зовнішній діаметр ПТ [ м ]
D20ULedge = FLin(sizeD20, D20ULedge); // Внутрішній діаметр
секції ВТ (уступ)
D20 = FLin(sizeD20, valueD20); //Внутрішній діаметр ВТ [м]
valueD20K = 1000 * D20;

DMO220 = FLin(sizeD20, DMO220);

```

```

DMO2320 = FLin(sizeD20, DMO2320);
DMO320 = FLin(sizeD20, DMO320);
SizeLedge = FLin(1, SizeLedge);
valueEc = FLin(1, valueEc);
valueEcn = FLin(1, valueEcn);
valuedpminBK = Fpin(sizedp + 10, valuedpminBK); // Min перепад
тиску BK [ кгс/м2]

if (typeRshSel == 1 || typeRshSel == 2) //виконується при умові,
якщо вказано шорскість труби
{
    typepipe = 21;
    RashArray[typepipe - 1] = FLin(1, valueRsh);
    UrshArray[typepipe - 1] = valueURsh;
    if (typeKSH == 0)
    {
        valueRa = valueRsh;
        valueRsh = valueRa * M_PI;
    }
    if (typeKSH == 1)
    {
        RashArray[typepipe - 1] = RashArray[typepipe - 1] /
M_PI;
        valueRa = RashArray[typepipe - 1] * 1000;
    }
}
H = FH(); //Розрахунок ентальпії води і пари
Ro = FRo(); //Розрахунок густини середовища
valueRo = Ro;
FGRANin(); //Визначення граничних вхідних значень для
розрахунку

valueKapa = kapa = Fkapa(); //Розрахунок показника адіабати
valueMju = mju = Fmju(); //Розрахунок динамічної в'язкості
do
{
    URosuga0 = URosuga;
    URosuga = FURo(); //Розрахунок похибки визначення
перепаду тисків

```

```

    } while (100 * fabs(URosuga0 / URosuga - 1) > 0.01); //обчисляємо
поки похибка не буде меншою 0,01
    valueURo = URosuga;//похибка перепад тиску
    valueURo = URosg;//похибка перепад тиску
    valueURoc = URoc;//похибка перепад тиску
    valueUK = FUK(); //Розрахунок похибки визначення коефіцієнта
стискуваності
do
{
    Укарасуга0 = Укарасуга;
    Укарасуга = FУкара(); //Розрахунок похибки визначення
показника адіабати
} while (100 * fabs(Укарасуга0 / Укарасуга - 1) > 0.01);
valueУкара = Укарасуга;
qmmax = qmax = Fqvgsg(qmaxvg, FI); //розрахунок витрати
switch (typecalculate)
{
case 1:
    mitkaerr = 1;
    valuedp = dp;
    dpopt = Fpin(sizedp + 10, dp);
    valued20 = FLout(sized20, Fdp(dpopt));
    valueOmega = Fpout(sizedp + 10, dOmegamax);
    break;
case 2:
    valueOmega = dOmegamax;
    dOmegamax = Fpin(sizedp + 10, dOmegamax);
    valued20 = FLout(sized20, Fvt());
    break;
case 3:
    valued20 = FLout(sized20, Fopt());
    valueOmega = Fpout(sizedp + 10, dOmegamax);
    break;
case 4: розрахунок витрати середовища та кількості теплової
енергії
    mitkaerr = 1;//для виключення егг в проміжних точках
оптимального розрахунку (mitkaerr=1)
    dpopt = Fpin(sizedp + 10, dp); //зворотному перепад тиску в
кгс/м^2

```

```

        qmaxvg = Fqm(dprot); //Розрахунок масової витрати
середовища
        qmmax = qmax = Fqvgsg(qmaxvg, FI); //розрахунок
кількості теплової енергії
        valueQmax = qoutput = Fqout(sizeqmax, qmaxvg);
//переводимо в т/год
        valueOmega = Fpout(sizedp + 10,
dOmax); //переводимо в кгс/м2
        break;
    }
}
}
}

```

ДОДАТОК В



СЕРВІСКОТЛОМОНТАЖ-ЛВІВ

ТОВ «Сервіскотломонтаж-Львів»

Юридична адреса: 79044, м. Львів, вул. Природна 56/20.
 info@skm-lviv.com.ua, тел. (032)232-65-75, факс 232-65-70
 р/р UA673253210000026007060746755 в ЗАХІДНЕ ГРУ АТ КБ
 «Приватбанк» м. Львова МФО 325321 ЄДРПОУ 37801512

вих. № _____ від _____ 2020 року

«Застосованою відповідальністю»
 Директор
 ТОВ «Сервіскотломонтаж-Львів»
 _____ 2020 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів і рекомендацій дисертаційної роботи

Биць Оксани Михайлівни

«Автоматизація проектування систем вимірювання кількості теплової енергії на основі витратомірів змінного перепаду тиску»

Голова комісії:

Головний інженер – Скакун Г.І.

Члени комісії:

Головний інженер проекту – Миرونюк О.В.

Начальник виробничо-технічного відділу – Милимук М.Б.

склали акт за фактом застосування ТОВ «Сервіскотломонтаж-Львів» результатів досліджень, виконаних у дисертаційній роботі Биць Оксани Михайлівни **«Автоматизація проектування систем вимірювання кількості теплової енергії на основі витратомірів змінного перепаду тиску»**.

Результати дисертаційної роботи Биць О.М., зокрема, САПР засобів вимірювання кількості теплової енергії, застосовуються при проектуванні систем вимірювання кількості теплової енергії на основі витратомірів змінного перепаду тиску.

Застосування результатів роботи дало можливість спростити процес проектування засобів вимірювання кількості теплової енергії та зменшити його трудомісткість. Крім того, під час проектування розроблена САПР контролює відповідність проектних рішень вимогам нормативних документів щодо вимірювання кількості теплової енергії та щодо витратомірів змінного перепаду тиску і надає експертні рекомендації про коректування відповідних рішень. Таким чином, застосування САПР забезпечує можливість спроектувати сучасну систему вимірювання кількості теплової енергії, що відповідає вимогам діючих нормативних документів. Поряд з цим, САПР дає можливість обчислити значення кількості теплової енергії для заданих характеристик засобів вимірювання та параметрів потоків теплоносія та використати ці значення як зразкові під час перевірки діючих вимірювальних систем.

Результати дисертаційної роботи Биць О.М. мають практичне значення, є актуальними, дозволяють підвищити якість проектування систем вимірювання кількості теплової енергії.

Голова комісії:

Головний інженер

Члени комісії:

Скакун Г.І.

Миرونюк О.В.

Милимук М.Б.

ДОДАТОК Г

“ЗАТВЕРДЖУЮ”



Проректор

Національного університету
"Львівська політехніка" з науково-
педагогічної роботи, к.т.н., доцент

О. Р. Давидчак

2020 р.

АКТ

впровадження в навчальний процес
у Національному університеті "Львівська політехніка"
результатів дисертаційної роботи
аспіранта Биць Оксани Михайлівни
на тему: "Автоматизація проектування систем вимірювання кількості теплової енергії
на основі витратомірів змінного перепаду тиску"

Даний акт складений про те, що на кафедрі "Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій" в навчальному процесі студентів впроваджені результати виконаної упродовж 2016-2020 років дисертаційної роботи "Автоматизація проектування систем вимірювання кількості теплової енергії на основі витратомірів змінного перепаду тиску".

Результати роботи використовуються в навчальному процесі під час проведення занять з дисциплін «Основи систем автоматизованого проектування» та «Технологічні вимірювання і прилади» (в лекціях та лабораторних заняттях) для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

В навчальному процесі, а також під час дипломного проектування і виконання бакалаврських кваліфікаційних робіт застосовується система автоматизованого проектування засобів вимірювання кількості теплової енергії на основі витратомірів змінного перепаду тиску.

Впровадження результатів роботи в навчальний процес сприяє ознайомленню студентів з проблемами проектування систем вимірювання кількості теплової енергії, зокрема проблемами підвищення точності вимірювання кількості теплової енергії та методами і способами їх вирішення, а також забезпечує підвищення рівня теоретичної та практичної підготовки студентів зазначеної вище спеціальності.

Завідувач кафедри АВКТ,
професор, д.т.н.

Голова НМР ІЕСК,
д.т.н., професор

Пістун Є. П.

Маляр В.С.