

DOI: 10.20535/1970.69(1).2025.331881

УДК 681.5

АНАЛІЗ СТАНУ ТА ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЄКТУВАННЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ПЛИННИХ СЕРЕДОВИЩ

*Сапелюк Р. В., Матіко Ф. Д.**Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна**E-mail: rostyslav.v.sapeliuk@lpnu.ua*

Стаття є комплексним дослідженням сучасного стану та тенденцій розвитку систем автоматизованого проєктування (САПР) для вимірювання параметрів плинних середовищ. Основна увага приділяється аналізу спеціалізованих програмних продуктів для автоматизованого проєктування систем вимірювання витрати та витратомірів. Виконано аналіз функціональних можливостей широко застосовуваних програмних продуктів САПР «Витратомір», Arian Flow CAD, Simcenter FloEFD та виділено їх переваги і недоліки. Як окремий критерій аналізу виділено здатність програмного продукту проєктувати витратоміри змінного перепаду тиску відповідно до вимог міжнародних стандартів ISO 5167. Розглянуто технологічні переваги продуктів, зокрема наявність інтерактивної взаємодії з дослідником та можливість оптимізації характеристик витратоміра. Також виконано аналіз функціональних можливостей програмних пакетів, розроблених на основі CFD-методів, зокрема SolidWorks, Ansys Fluent. Вказано, що ці програмні пакети є ефективним додатковим інструментом для дослідження витратомірів плинних середовищ при нестандартних умовах монтажу вузлів обліку, при розширенні області застосування за межі дії стандартів, зокрема ISO 5167, і за діапазоном числа Рейнольдса, і за класами витратомірів, при дослідженні потоків у пристроях підготовки потоку та удосконаленні конструкції цих пристроїв. Сформовано порівняльну таблицю переваг і недоліків розглянутих програмних продуктів.

Виконано огляд новітніх технологій, які впроваджують у системи проєктування інженерних продуктів, зокрема веб-технологій, хмарних рішень і алгоритмів штучного інтелекту, які сприяють підвищенню ефективності автоматизованого проєктування. Розглянуто переваги застосування цифрових двійників для прогнозування поведінки систем у реальних умовах експлуатації, а також застосування хмарних платформ у забезпеченні доступності, масштабованості та інтеграції САПР із системами управління даними.

Наукова новизна дослідження полягає у виділенні ключових напрямів розвитку САПР засобів вимірювання витрати та кількості плинних середовищ з урахуванням вимог сучасних стандартів, автоматизації процесів проєктування та впровадження адаптивних інструментів моделювання.

Ключові слова: автоматизоване проєктування; витратомір; плинне середовище; інтерактивне моделювання; CFD-методи.

Вступ. Актуальність проблеми дослідження.

Сучасний розвиток науки і техніки вимагає впровадження інноваційних рішень для забезпечення високої точності, надійності та ефективності вимірювання параметрів плинних середовищ. Системи автоматизованого проєктування (САПР) займають ключову роль у створенні та вдосконаленні засобів вимірювання, забезпечуючи інтеграцію сучасних технологій у процес проєктування [1]. Зростання потреби у прецизійних вимірюваннях у різних галузях – від енергетики до фармацевтики – стимулює розвиток САПР як ефективного інструменту для підвищення продуктивності та скорочення циклу розробки нових засобів вимірювання.

Актуальність даного дослідження обумовлена необхідністю вдосконалення методів автоматизації проєктування з урахуванням специфіки плинних

середовищ, таких як гази, рідини та їх суміші, характеристики яких можуть суттєво змінюватися у часі та просторі. Аналіз існуючих рішень і тенденцій розвитку у цій сфері дозволяє визначити перспективні напрямки вдосконалення систем проєктування, що сприятиме підвищенню якості продукції та її адаптивності до умов експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Робота ґрунтується на аналізі науково-методичної літератури, наукових статей, періодичних видань та напрацювань сучасних та попередніх дослідників, серед них: Є. П. Пістун, Л. В. Лесовой, І. В. Коробко, І. А. Гришанова, К. С. Барандич, а також на досвіді авторів у розробці САПР для вимірювальних систем.

Останні дослідження в галузі автоматизованого проєктування демонструють значний прогрес у розробці та впровадженні інноваційних рішень.

У навчальному посібнику К. С. Барандич [2] розглянуто теоретичні основи САПР для комп'ютерно-інтегрованих технологій. Автори акцентують увагу на адаптивних методах проектування, які можуть застосовуватися у приладобудуванні для створення складних систем вимірювання.

У роботах Є. Пістуна та співавторів [3] досліджено принципи проектування витратомірів змінного перепаду тиску. Автори акцентують увагу на автоматизації проектування витратомірів зі стандартними звужувальними пристроями, які відповідають вимогам національних стандартів ДСТУ ГОСТ 8.586.1-5:2009. В основу цих стандартів покладено міжнародні стандарти ISO 5167-1:2003, які застосовують у всьому світі для організації виготовлення, експлуатації та метрологічного забезпечення витратомірів змінного перепаду тиску. У [3] представлено нові методики проектування, реалізовані в САПР витратомірів змінного перепаду тиску, які дають можливість під час проектування виконувати оптимізацію характеристик витратоміра для досягнення заданих критеріїв, зокрема, мінімальної невизначеності вимірюваного значення витрати, заданих втрат тиску на звужувальному пристрої.

У статті Al. Kreis та співавторів [4] розглянуто потенціал і можливості автоматизації проектування елементів та вузлів автомобілів, зокрема можливість впровадження штучного інтелекту для оптимізації конструкції проєктованих елементів.

Опубліковано велику кількість робіт, присвячених застосуванню методів та інструментів CFD (обчислювальної гідродинаміки) для моделювання та проектування витратомірів. Зокрема, у роботах [5 - 7] розглянуто застосування CFD методів для моделювання турбулентних потоків у трубопроводах та ультразвукових витратомірах та дослідження похибки цих витратомірів. У [5, 7] розглянуто вплив моделей турбулентності на результати моделювання потоків у витратомірах, що дає можливість підвищити точність моделювання та проектування ультразвукових витратомірів.

У навчальному посібнику [8] та підручнику [9] розглянуто застосування програмного пакету ANSYS FLUENT для різноманітних задач сучасного приладобудування, зокрема і для моделювання, проектування та дослідження витратомірів різних класів. Для цього детально розглянуто етапи підготовки моделі, створення сіток, налаштування солверів і опрацювання результатів моделювання.

Відомі також публікації [10, 11], у яких представлено результати CFD-моделювання потоків у вимірювальних трубопроводах витратомірів змінного перепаду тиску. Для цього застосовують програмні пакети ANSYS FLUENT, Solid Works. CFD-моделювання дає можливість дослідити поведінку потоку в області звужувального пристрою або оцінити вплив на нього тих чи інших

факторів плинного середовища, зокрема впливу місцевих гідравлічних опорів. Удосконалення програмних пакетів для CFD-моделювання та застосування відповідних моделей турбулентності дає можливість отримати адекватні результати, які однак потребують експериментального підтвердження.

Результати проведеного огляду літературних джерел демонструють актуальність автоматизації проектування витратомірів із врахуванням вимог чинних стандартів, а також актуальність розроблення та застосування інноваційних підходів, які забезпечують зменшення невизначеності вимірювання витрати та кількості плинного середовища, а також оптимізацію конструкції витратомірів.

Мета дослідження – проаналізувати сучасний стан та основні тенденції розвитку систем автоматизованого проектування (САПР) у контексті розроблення засобів вимірювання витрати і кількості плинних середовищ та розробити рекомендації щодо розроблення такої САПР.

Виклад основного матеріалу

Системи автоматизованого проектування (САПР) засобів вимірювання параметрів плинних середовищ широко застосовують у інженерній практиці. Це зумовлено тим, що витратоміри та лічильники плинних середовищ застосовують у галузі законодавчо регульованої метрології, відповідно їх застосування унормоване низкою стандартів та методичних документів. Під час проектування засобів вимірювання витрати необхідно врахувати усі нормативні обмеження, а також технологічні вимоги, тому процес проектування є складним та трудомістким і надзвичайно актуальним є застосування САПР для його автоматизації та спрощення.

Під час проектування витратомірів змінного перепаду тиску необхідно виконати вимоги міжнародних стандартів, таких як ISO 5167.1-4:2003, а також національних стандартів ДСТУ ГОСТ 8.586.1-5:2009 [12], які розроблені на основі ISO 5167.1-4:2003, однак мають суттєві відмінності від цих міжнародних стандартів. ISO 5167 є комплексом стандартів для визначення витрати рідини, газу та пари за допомогою витратомірів змінного перепаду тиску. У цьому комплексі стандартів встановлено вимоги до таких широко застосовуваних пристроїв звуження потоку як діафрагми, сопла, труби Вентурі. Редакція ISO 5167.1-6:2022 [13] суттєво уточнює вимоги до вимірювальних пристроїв, порівняно з ISO 5167:2003. Зокрема уточнено вимоги щодо застосування діафрагм у трубопроводах малих діаметрів та з діаметром отвору менше 25 мм. Також надано більше уваги застосуванню звужувальних пристроїв для вимірювання витрати потоків з низьким числом Рейнольдса, що

розширює область застосування витратомірів змінного перепаду тиску за умов змінної витрати потоку. Це дозволяє зменшити похибку вимірювання витрати і кількості середовища для різних умов їх застосування.

У новому комплексі стандартів ISO 5167.1-6:2022 додано п'яту та шосту частини, які встановлюють вимоги до застосування таких нових видів звужувальних пристроїв як конічний витратомір та клиновидне звуження. У першій частині комплексу стандартів [13] введено розділ, у якому подано аналітичні залежності та методику обчислення невизначеності вимірюваного значення витрати.

Отже новий комплекс стандартів ISO 5167.1-6:2022 має суттєві відмінності від редакції стандартів 2003 року ISO 5167.1-4:2023. Тому під час виконання аналізу відомих САПР як один із обов'язкових критеріїв застосовності САПР для проєктування витратомірів змінного перепаду тиску нами розглянуто вимогу реалізації в САПР положень міжнародних стандартів ISO 5167.1-4:2003 або ISO 5167.1-6:2022.

Один з найбільш поширених програмних пакетів для проєктування витратомірів змінного перепаду тиску – це САПР «Расход-РУ» [2, 3]. САПР «Расход-РУ» пропонує інтерактивну платформу для введення даних та забезпечує відповідність результатів проєктування вимогам національних стандартів ДСТУ ГОСТ 8.586.1-5:2009. САПР дає можливість мінімізувати похибки вимірювання витрати, інтерактивно аналізуючи дані, які вводяться користувачем, та пропонуючи оптимальні значення конструктивних характеристик витратомірів, зокрема для вимірювання витрати газу чи рідини. Програмне забезпечення має

функції для розрахунку невизначеності результатів вимірювань витрати та кількості плинного середовища і оптимізації конструкції звужувального пристрою, що робить його важливим інструментом для автоматизованого проєктування витратомірів [3]. У [2, 3] також відзначено, що сучасні САПР, такі як САПР «Расход-РУ», інтегрують алгоритми ітераційного пошуку для досягнення ефективних проєктних рішень, що особливо важливо для складних умов експлуатації.

У 2025 році на основі САПР «Расход-РУ» розроблено та сертифіковано САПР «Витратомір». Ця САПР реалізує функції САПР «Расход-РУ» та додатково має такі основні переваги:

- розширено перелік стандартів для обчислення коефіцієнта стисливості та густини природного газу та введено до переліку методів розрахунку коефіцієнта стисливості природного газу метод SGERG-88 стандарту ДСТУ ISO 12213-3:2009, а також метод AGA8-92DC стандарту ДСТУ ISO 12213-2:2009 (див. рис. 1);
- реалізовано розрахунок теплоти згоряння природного газу для значень температури стандартних умов вимірювання об'єму та температури стандартних умов продуктів згоряння відповідно до ДСТУ EN ISO 6976:2020 (див. рис. 2, а);
- реалізовано розрахунок невизначеності теплоти згоряння природного газу відповідно до ДСТУ EN ISO 6976:2020 (див. рис. 2, а);
- реалізовано розрахунок кількості енергії природного газу в різних одиницях (МДж, кВт*год) (див. рис. 2, б);
- реалізовано розрахунок витрати природного газу, зведеної до температури стандартних умов 0 °C та 20 °C (див. рис. 1, рис. 2, а).

Рис. 1. Вікно введення параметрів і характеристик природного газу в САПР «Витратомір»

Відповідно в САПР «Витратомір» удосконалено протокол розрахунку витратоміра та додано інформацію про значення вищої об'ємної теплоти згоряння природного газу, відносну розширену невизначеність результату вимірювання об'ємної

вищої теплоти згоряння природного газу, відносну розширену сумарну невизначеність результату визначення кількості енергії, яка переноситься природним газом, що видно з прикладу розрахунку витратоміра, представленого на рисунку 2.

Назва величини	Значення	Одиниця
Тип середовища	природний газ	
Максимальна витрата середовища при заданих параметрах середовища	9274.74	м ³ /год (за с.у.)
Мінімальна витрата середовища при заданих параметрах середовища	6566.64	м ³ /год (за с.у.)
Кількість енергії природного газу	437113.47	МДж
Вища теплота згоряння природного газу	47.1295	МДж/м ³
Молярний об'єм природного газу (ДСТУ EN ISO 6976:2020)	0.022330093	м ³ /моль
Густина природного газу за стандартних умов (ДСТУ EN ISO 6976:2020)	0.87106305	кг/м ³
Верхня границя вимірювань перепаду тиску на ЗП	2	кПа
Абсолютний тиск середовища	0.4	МПа
Абсолютний тиск стандартних умов згоряння середовища	101325	Па
Абсолютний тиск стандартних умов вимірювання об'єму середовища	101325	Па
Термодинамічна температура середовища	288.15	К
Температура стандартних умов вимірювання об'єму середовища	0	°C
Температура стандартних умов згоряння середовища	25	°C
Коефіцієнт стисливості в робочих умовах	0.991414	-
Густина середовища в робочих умовах	3.28786	кг/м ³
Показник адиабати середовища в робочих умовах	1.26261	-
Динамічна в'язкість середовища в робочих умовах	0.000010655	Па·с
Внутрішній діаметр трубопроводу при робочій температурі середовища	399.978	мм
Відносний діаметр отвору звукувального пристрою	0.499987	-
Число Рейнольдса при максимальній витраті середовища	670431	-
Коефіцієнт швидкості входу	1.03279	-
Коефіцієнт витікання при числі Рейнольдса, яке відповідає максимальній витраті	0.6041	-
Поправковий коефіцієнт, який враховує притуплення вхідного канта діафрагми	1	-
Поправковий коефіцієнт, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні БТ	1	-
Коефіцієнт розширення середовища	0.998532	-
Втрата тиску на ЗП при максимальній витраті середовища	1.46589	кПа
Відносна розширена сумарна невизначеність результату вимірювання масової вищої теплоти згоряння	0.0464099	%
Відносна розширена сумарна невизначеність результату вимірювання об'ємної вищої теплоти згоряння	0.326048	%
Відносна розширена сумарна невизначеність результату вимірювання кількості середовища	0.651	%
Відносна розширена сумарна невизначеність результату вимірювання кількості енергії	0.728	%
Діаметр отвору діафрагми при робочій температурі середовища	199.984	мм
Діаметр отвору діафрагми при температурі 20 °C	200	мм

а)

Параметр	Значення	Одиниця
7.3 Нижня границя вимірювань температури	0	°C
* 7.4 Діапазон шкали вимірювань	50	°C
7.5 Зовнішній діаметр ПТ або його захисної гільзи (за її наявності)	10	мм
7.6 Місце встановлення ПТ або його захисної гільзи (за її наявності)	до звукувального пристрою	
* 7.7 Відстань між ПТ або його захисної гільзи (за її наявності) і ЗП	2	м
8 КОМПЛЕКСНІ ПАРАМЕТРИ ВИТРАТОМІРА ПРИ ЗАДАНИХ ЗНАЧЕННЯХ ПАРАМЕТРІВ СЕРЕДОВИЩА		
(Ідентифікатор 284)		
8.1 Конфігурація витратоміра змінного перепаду тиску	з вимірювальним комплексом	
8.2 Модель вимірювального комплексу	ISO	
* 8.3 Максимальна витрата природного газу	40242.5	м ³ /год (за с.у.)
* 8.4 Мінімальна витрата природного газу	6566.64	м ³ /год (за с.у.)
* 8.5 Вища теплота згоряння природного газу	47.1295	МДж/м ³
* 8.6 Кількість енергії	1896608	МДж
* 8.7 Втрати тиску на ЗП при максимальній витраті середовища	29.332	кПа
* 8.8 Число Рейнольдса при максимальній витраті середовища	2908958	
* 8.9 Число Рейнольдса при мінімальній витраті середовища	474674	

б)

Рис. 2. Результати проєктування в САПР «Витратомір»: а) вікно результатів розрахунку витратоміра; б) фрагмент протоколу розрахунку витратоміра

У роботі [14] представлено результати розроблення програмного продукту САПР «Теплова енергія» для проєктування систем вимірювання кількості теплової енергії на основі витратомірів змінного перепаду тиску. У цій САПР реалізовано повну математичну модель витратоміра змінного перепаду тиску, яка розроблена у [15] та враховує

обмеження стандартів ДСТУ ГОСТ 8.586.1-5:2009. Для розрахунку властивостей води та водяної пари застосовано методи IAPWS [16], а також розроблені авторами [15] методику обчислення показника адиабати водяної пари, методику оцінювання невизначеності результату вимірювання кількості теплової енергії та запропоновані нові підходи що-

до автоматизованого проєктування систем вимірювання кількості теплової енергії.

Для обчислення кількості теплової енергії необхідно обчислити значення витрати теплоносія у подавальному, зворотному трубопроводах та трубопроводі підживлення залежно від обраної конфігурації системи вимірювання кількості теплової енергії. Розроблена САПР передбачає застосування витратомірів змінного перепаду тиску на основі стандартних звужувальних пристроїв в усіх трубопроводах.

САПР засобів вимірювання кількості теплової енергії дає можливість спростити процес проєктування та зменшити його трудомісткість. Крім того, під час проєктування САПР контролює відповідність проєктних рішень вимогам нормативних документів щодо вимірювання кількості теплової енергії та щодо витратомірів змінного перепаду тиску та надає експертні рекомендації щодо коригування відповідних рішень. Таким чином, представлена в [15] САПР «Теплова енергія» забезпечує можливість спроектувати сучасну систему вимірювання кількості теплової енергії, що відповідає вимогам діючих нормативних документів.

Окрім названих вище САПР відомі також і інші програмні продукти для проєктування витратомірів плинних середовищ. Так, Arian ISO – 5167 Flow CAD – програмний продукт, спеціально розроблений для проєктування витратомірів змінного перепаду тиску відповідно до вимог ISO 5167:2003 [17]. Автоматизує розрахунок витрати та знижує ризик помилок у параметрах, які вводяться вручну. Розробники вказують, що використання цієї САПР значно прискорює процес проєктування та забезпечує точність витратомірів за умови зміни тиску та витрати у широкому діапазоні [17]. Приклад інтерфейсу Arian ISO – 5167 Flow CAD представлено на рис. 3.

САПР широко використовують для моделювання витратомірів та розрахунку параметрів потоку на основі рівнянь Нав'є-Стокса, які описують перенесення маси, імпульсу та енергії в потоках [1, 2, 5, 6]. Розв'язування цих моделей виконують із застосуванням методів обчислювальної гідродинаміки (CFD), що дозволяє аналізувати великий перелік параметрів середовища, зокрема, тиск, температуру, швидкість, густину, в'язкість, теплопровідність [5-11].

Як показано в роботі [18], моделювання за допомогою CFD дозволяє визначати важливі параметри за результатами розв'язування нелінійних диференціальних рівнянь, а також прогнозувати поведінку потоків у складних умовах. Такі інструменти часто використовують для проєктування вимірювальних систем, наприклад, для визначення характеристик об'ємного витратоміра, або аналізу втрат тиску в первинному перетворювачі витрати [8, 9, 18, 19].

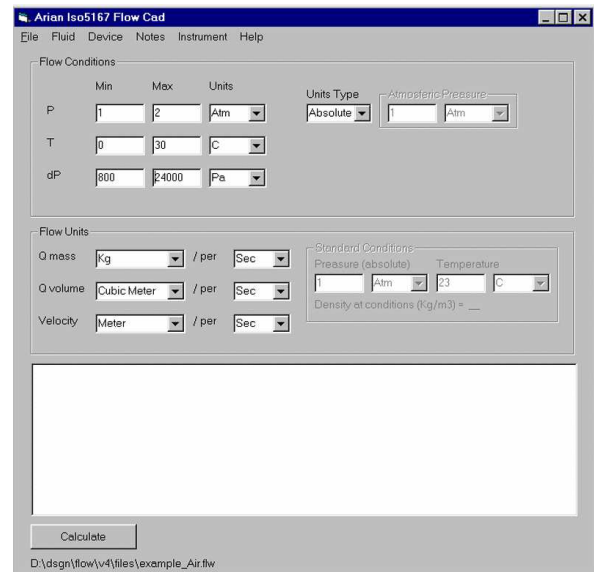


Рис. 3. Інтерфейс користувача Arian ISO – 5167 Flow CAD [17]

Розробка Simcenter FloEFD від Siemens [20] є потужним інструментом для інженерного аналізу, що широко використовується для моделювання гідрогазодинамічних процесів та теплообміну. FloEFD тісно інтегрується в провідні CAD-системи (наприклад, Siemens NX, Solid Edge, PTC Creo, CATIA V5), дозволяючи інженерам проводити CFD-аналіз безпосередньо на "рідній" 3D-моделі. Це значно прискорює процес проєктування та внесення змін, оскільки будь-які модифікації геометрії в CAD автоматично оновлюються в моделі FloEFD.

Ключові особливості FloEFD, релевантні для проєктування витратомірів [20]:

- *автоматизоване створення сітки*: технологія SmartCells™ та метод занурених меж (immersed boundary method) дозволяють ефективно працювати зі складними геометричними моделями та автоматично генерувати якісну сітку, навіть для CAD-моделей з дрібними дефектами;
- *аналіз потоків*: FloEFD моделює ламінарні та турбулентні потоки (використовуючи власну модифіковану k-ε модель), стисливі та нестисливі рідини і гази, а також стаціонарні та не-стаціонарні процеси;
- *моделювання теплообміну*: підтримується моделювання кондукції, конвекції та радіаційного теплообміну, що важливо для термічних витратомірів;
- *визначення параметрів*: дає можливість розраховувати поля швидкості, тиску, температури, падіння тиску, коефіцієнти витрати тощо;
- *параметричні дослідження*: спрощує оптимізацію конструкції шляхом аналізу різних варіантів геометрії або умов експлуатації.

Siemens активно працює над адаптацією своїх програмних продуктів для відповідності сучасним

промисловим стандартам та вимогам, акцентуючи на точності розрахунків, моделюванні складних фізичних явищ та інтеграції з інженерними процесами. Роботи команди зосереджені на оптимізації виробничих процесів, де точний контроль

параметрів потоку, наприклад, витрати енергії на транспортування рідин, є критично важливим. Приклад моделювання та інтерфейсу САПР FloEFD у системі Siemens NX показано на рис. 4 [20].

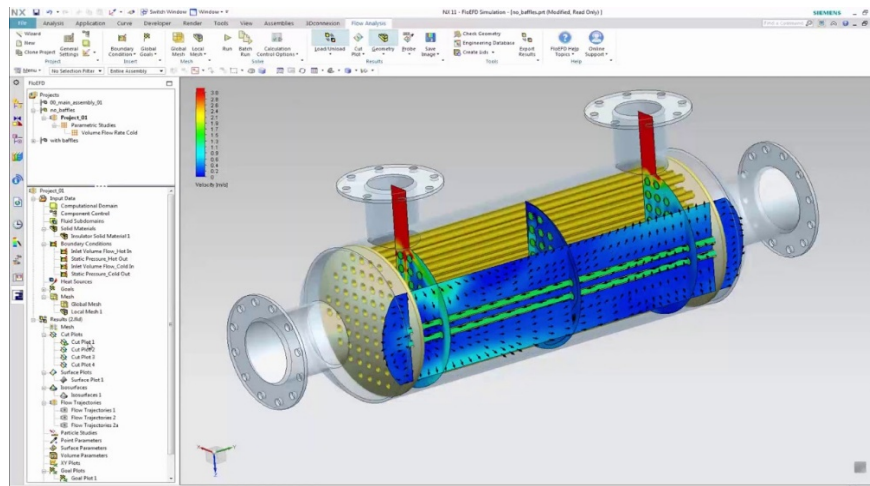


Рис. 4. Інтерфейс користувача модуля FloEFD у системі Siemens NX [20]

Ansys Fluent є одним із провідних програмних комплексів у галузі обчислювальної гідродинаміки (CFD), що широко використовується для моделювання складних потоків рідин і газів, теплообміну та супутніх фізичних явищ у різних інженерних задачах, включаючи проектування та аналіз витратомірів. Розробником програми є компанія ANSYS Inc.[8, 9, 19].

Програмне забезпечення Ansys Fluent надає широкі можливості для моделювання багатозонних потоків (наприклад, за допомогою моделей Volume of Fluid (VOF), Discrete Phase Model (DPM)), аналізу потоків у складних геометричних структурах, а також розрахунку параметрів потоків із різними фізико-хімічними властивостями. Ansys Fluent дозволяє проводити симуляції для різних режимів течії, включаючи ламінарний та турбулентний (з використанням різноманітних моделей турбулентності, таких як k-ε, k-ω SST, RNG k-ε), аналізувати явища кавітації, а також виконувати нестационарний аналіз. Його інструменти можуть бути використані для детального аналізу роботи витратомірів, визначення їх характеристик (наприклад, коефіцієнта витрати, втрат тиску), оптимізації конструкції для забезпечення відповідності стандартам, таким як ISO 5167, та підвищення точності вимірювань, особливо в умовах нерівномірних або нестабільних потоків. Численні дослідження підтверджують ефективність Ansys Fluent для проектування анемометричних давачів, механічних осциляторних витратомірів, термічних витратомірів, труб Вентурі, сопел, діафрагм та аналізу потоків в ультразвукових витратомірах [10, 11, 21].

Інструмент FloWorks програмного пакету SolidWorks базується на застосуванні методів

обчислювальної газо- та гідродинаміки і дозволяє дослідити широке коло різноманітних потоків: двовимірні, тривимірні, ламінарні, турбулентні та перехідні, нестискувані, стискувані, з до-, транс- і надзвуковими областями, стаціонарні та нестационарні потоки багатокомпонентних плинних середовищ в каналах і/або навколо тіл, з урахуванням гравітації, пограничного шару, в тому числі з врахуванням шорсткості стінок, з теплообміном між плинним середовищем та твердим тілом, яке, в свою чергу, може складатися із декількох матеріалів; з розрахунком теплопередачі в твердих тілах, тобто із вирішенням задачі спряженого теплообміну, в тому числі із врахуванням радіаційного теплообміну між поверхнями; ламінарні потоки неньютонівських рідин; двофазні потоки як рух рідких або твердих частинок в потоці плинного середовища [22, 23].

У FloWorks рух і теплообмін плинного середовища моделюється з допомогою рівнянь Нав'є-Стокса, що описують в нестационарній постановці закони збереження маси, імпульсу та енергії цього середовища. Крім того, використовуються рівняння стану компонентів плинного середовища, а також емпіричні залежності в'язкості та теплопровідності цих компонентів середовища від температури. Цими рівняннями моделюються турбулентні, ламінарні та перехідні (між турбулентними та ламінарними, перехід визначається критичним значенням числа Рейнольдса) потоки. Для моделювання турбулентних потоків (вони зустрічаються найчастіше в інженерній практиці) рівняння Нав'є-Стокса усереднюються по Рейнольдсу [22, 23]. Реалізований авторами приклад моделювання потоку у вимірювальному трубопроводі з встановленою стандартною діафрагмою за допо-

могою FloWorks представлено на рисунку 5.

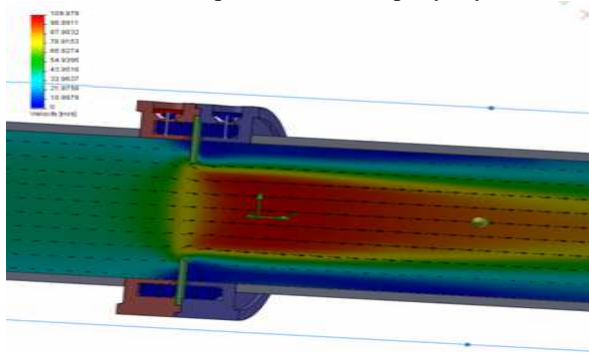


Рис. 5. Результати моделювання поля швидкості потоку у вимірювальному трубопроводі з встановленою стандартною діафрагмою за допомогою FloWorks

В ряді наукових публікацій [10, 11, 21] представлені результати CFD-моделювання потоків через звужувальні пристрої витратомірів змінного перепаду тиску. На початкових стадіях досліджень, CFD-методи в основному застосовувались для аналізу витратомірів даного класу для якісного опису структури потоку в області звужувального пристрою, або для оцінки впливу на нього тих чи інших факторів плинного середовища. Згодом, також були проведені дослідження, які дозволили зробити висновок, що застосування CFD-моделювання із конкретними моделями турбулентності ($k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$, realizable $k-\epsilon$, SST $k-\omega$ і S-A) дозволяє в широкому діапазоні числа Рейнольдса забезпечити значення коефіцієнта витрати з похибкою, що не перевищує межі, зазначені стандартом ISO 5167-2:2003. Поряд із цим, CFD-моделювання залишається актуальним додатковим інструментом при дослідженні витратомірів за методом змінного перепаду тиску в таких ситуаціях [10, 11, 21]:

- при нестандартних умовах монтажу вузлів обліку;
- при розширенні області застосування за межі дії стандарту ISO 5167.2:2003 як за діапазоном числа Рейнольдса, так і за класами витратомірів;
- при дослідженні потоків в струминовипрямлячах та пристроях підготовки потоку та удосконаленні конструкції цих пристроїв.

У роботі [18] автори зазначають, що впровадження веб-технологій у САПР дозволяє суттєво підвищити ефективність процесів автоматизованого проектування, забезпечуючи доступність, масштабованість та інтеграційний потенціал. Хмарні рішення, як-от платформи SaaS (Software as Service), надають користувачам можливість працювати у віддаленому режимі, використовуючи централізовані сервери для обчислювальних завдань і зберігання даних. Застосування хмарних рішень надає такі переваги [18]:

- доступність: САПР, побудовані на веб-технологіях, забезпечують доступ до програмних ресурсів із будь-якого пристрою, що під'єднаний до мережі інтернет; це дає можливість інженерам співпрацювати з різних географічних локацій;
- масштабованість: інфраструктури хмарних обчислень автоматично адаптуються до зростання обсягів даних або розширення функціоналу;
- зручність інтеграції: хмарні платформи легко поєднуються з іншими сучасними технологіями, як-от IoT (Інтернет речей) та ERP-системи (системи управління ресурсами підприємства); це відкриває нові можливості для моніторингу та аналізу даних у реальному часі.

Сучасні САПР-платформи, наприклад, Autodesk Fusion 360 та Onshape, інтегрують хмарні технології для підтримки багатокористувачького середовища. Ці системи дозволяють проектувати та моделювати компоненти у спільному робочому просторі, що актуально для вимірювальних пристроїв, які вимагають комплексного підходу до проектування.

Штучний інтелект (ШІ) та машинне навчання (МН) також стали невід'ємними компонентами систем автоматизованого проектування, сприяючи оптимізації процесів розробки та забезпечуючи високу точність розрахунків. Застосування методів машинного навчання дозволяє автоматично визначати оптимальні геометричні параметри для вимірювальних пристроїв, таких як діафрагми або труби Вентурі, на основі моделювання потоків рідини чи газів. Наприклад, за допомогою алгоритмів, що аналізують великі масиви даних (big data), система може обирати такі параметри, які мінімізують втрати тиску та підвищують точність вимірювань.

Програмні пакети ANSYS Fluent [19] та COMSOL Multiphysics [24], активно використовують методи ШІ для створення високоточних моделей динаміки рідин, забезпечуючи автоматизацію процесу калібрування моделей пристроїв [1].

ШІ дозволяє створювати цифрові двійники (digital twins) для моделювання роботи вимірювальних пристроїв у реальних умовах. Такі моделі допомагають передбачити потенційні відмови або оптимізувати експлуатаційні режими до встановлення пристроїв. Наприклад, дослідження у сфері адаптації вимірювальних пристроїв до умов змінного потоку показали, що нейронні мережі можуть передбачити ефективність роботи пристроїв на основі даних про турбулентність потоку [1].

Результати аналізу сучасних програмних продуктів для проектування, моделювання та дослідження витратомірів плинних середовищ представлено в таблиці 1.

Оновлення стандартів, зокрема перехід від ISO 5167.1-4:2003 до ISO 5167.1-6:2022 [13], сут-

тево впливає на процеси проектування і виготовлення витратомірів змінного перепаду тиску зі стандартними звужувальними пристроями. Ці зміни впливають на технічні, організаційні та економічні аспекти діяльності виробників і користувачів цих засобів. Основні проблеми переходу до нових стандартів пов'язані з фінансовими витратами підприємств, які виникають при модернізації виробництва витратомірів та оновленні програмного забезпечення. Особливо це стосується малих і середніх підприємств, для яких ці витрати можуть

бути критичними.

Серед перспективних шляхів вирішення цих проблем – розробка адаптивних систем автоматизованого проектування, які враховують модульність і хмарні технології. Веб-технології дозволяють зменшити витрати на впровадження оновлень, забезпечуючи автоматичну інтеграцію змін. Галузеві асоціації також можуть сприяти спільній сертифікації і обміну даними, що зменшує фінансове навантаження.

Таблиця 1. Порівняльний аналіз програмних продуктів для проектування та дослідження витратомірів плинних середовищ

Назва САПР	Переваги	Недоліки	Галузі застосування
САПР Витратомір	Інтерактивне моделювання дозволяє користувачам у реальному часі змінювати параметри і бачити результати. Автоматична оптимізація параметрів забезпечує високу точність розрахунків і відповідність стандартам ДСТУ ГОСТ 8.586.1-5:2009. Програмне забезпечення також інтегрує алгоритми ітераційного пошуку для досягнення самоконсистентних розрахунків	Потреба в навчанні персоналу для ефективного використання систем	Газова промисловість, енергетика (моніторинг та розрахунок витрати газу і рідини), нафтохімія (контроль процесів переробки), водопостачання (вимірювання витрати води), Державний нагляд у галузі законодавчо-регульованої метрології.
Simcenter FloEFD	Тісна CAD-інтеграція дозволяє працювати з "рідною" геометрією. Автоматизоване та ефективне створення сітки (SmartCells™). Моделювання широкого спектру потоків (ламінарі, турбулентні, стисливі/нестисливі) та теплообміну. Можливість параметричних досліджень для оптимізації.	Може вимагати значних обчислювальних ресурсів для дуже складних задач. Вартість ліцензії може бути високою для малих та середніх підприємств.	Проектування промислового обладнання (включаючи компоненти витратомірів), аерокосмічна галузь, автомобільна промисловість, електроніка (охолодження), енергетика (аналіз потоків та теплообміну).
Arian Flow CAD	Автоматизація розрахунків коефіцієнта розширення та витрати знижує ризик помилок у параметрах, які вводяться вручну. Програмне забезпечення гарантує точність вимірювань для різних технологічних умов.	Обмежена підтримка нестандартних умов, що може обмежувати його застосування. Потреба в регулярних оновленнях для підтримки актуальності.	Вимірювання витрати рідин і газів (проектування витратомірів змінного перепаду тиску), контроль витратомірів, застосованих у різних у різних технологічних процесах.
FloWorks (SolidWorks)	Дослідження різноманітних потоків: двовимірні, тривимірні, ламинарі, турбулентні та перехідні, нестискувані, стискувані, з до-, транс- і надзвуковими областями, стаціонарні та нестаціонарні потоки багатокомпонентних плинних середовищ в каналах і/або навколо тіл, в тому числі з врахуванням шорсткості стінок, з теплообміном між плинним середовищем та твердим тілом, яке, в свою чергу, може складатися із декількох матеріалів.	Потребує потужних обчислювальних ресурсів для складних задач. Висока вартість ліцензій. Потрібне навчання персоналу для розширених функцій.	Широке застосування в енергетиці, нафтогазовій та хімічній промисловості, авіа-, приладо- та автомобілебудуванні; Проектування та аналіз різних класів витратомірів (змінного перепаду тиску, турбінні, ультразвукові, тощо).

Продовження табл. 1

Назва САПР	Переваги	Недоліки	Галузі застосування
Ansyes Fluent	Широкий спектр фізичних моделей (турбулентність, багатофазні потоки, теплообмін, кавітація, FSI, акустика). Розширені можливості побудови сітки. Підтримка параметричних досліджень та інструментів оптимізації. Широке промислове використання та валідація. Інтеграція з платформою Ansyes Workbench для мультифізичного аналізу. Дозволяє детально аналізувати поля потоку, досліджувати вплив умов встановлення та складних явищ; використовує методи ІІІ для створення високоточних моделей потоків.	Може бути обчислювально ресурсомістким для дуже складних задач. Висока вартість ліцензій. Потрібне навчання персоналу для розширених функцій.	Широке застосування в енергетиці, нафтогазовій та хімічній промисловості, аерокосмічній галузі, автомобілебудуванні, виробництві для проектування та аналізу різних класів витратомірів (Вентурі, діафрагмові, соплові, ультразвукові, термічні тощо) та іншого гідрогазодинамічного обладнання.

Особливе значення має інвестування в навчання персоналу, адже впровадження сучасних стандартів потребує високого рівня кваліфікації інженерів і програмістів.

Таким чином, впровадження нових стандартів, таких як ISO 5167.1-6:2022 [13], надає як нові можливості для удосконалення витратомірів, так і формує виклики, пов'язані з необхідністю адаптації діючих систем вимірювання витрати. Одним з таких викликів є розроблення нових систем автоматизованого проектування, які повинні враховувати вимоги нових стандартів, зокрема і [13]. Під час розроблення нових САПР потрібно застосовувати сучасні технології, такі як веб-технології, хмарні платформи, а також як інструменти для оптимізації характеристик витратомірів.

Веб-технології, зокрема, забезпечують можливість доступу до програмних засобів через браузер, що знижує витрати на інфраструктуру та забезпечує мобільність для користувачів у всьому світі [18]. Системи, засновані на хмарних технологіях, дають змогу зберігати дані на віддалених серверах, забезпечуючи масштабованість, безпеку та зручність доступу до проектних матеріалів для різних користувачів одночасно. Це також дозволяє реалізувати механізми резервного копіювання та оновлення в реальному часі без необхідності залучення локальних ресурсів.

Хмарні платформи надають також можливість інтеграції з іншими системами автоматизації, такими як ERP (Enterprise Resource Planning), що оптимізує управлінські та виробничі процеси, а також забезпечує підтримку великих обсягів даних [18]. Зокрема, використання хмарних рішень для зберігання та обробки результатів розрахунків дозволяє інженерам і проектувальникам отримувати доступ до поточних даних в будь-який час, що значно при-

скорює прийняття рішень і знижує ймовірність помилок [4].

Наступним важливим напрямом для подальших досліджень є інтерактивне моделювання та візуалізація даних. Використання передових графічних інтерфейсів для візуалізації потоків, характеристик матеріалів, та параметрів вимірювальних приладів дозволяє зменшити час на прийняття проектних рішень. Крім того, інтерактивне моделювання надає можливість виконувати реальні перевірки теоретичних розрахунків, дозволяючи інженерам миттєво реагувати на зміни в умовах роботи системи.

Сучасні інструменти для 3D-візуалізації, такі як OpenGL та DirectX, разом з алгоритмами моделювання, здатні відобразити складні фізичні процеси у вигляді чітких і зрозумілих графіків і анімацій. Це дає змогу зменшити ймовірність технічних помилок під час розробки проектів і дозволяє клієнтам краще уявляти кінцевий продукт. Крім того, інтерактивне моделювання відкриває нові можливості для вивчення поведінки систем в умовах різних зовнішніх впливів, таких як зміна температури, тиску чи в'язкості [18].

Доцільно також розглянути можливість використання машинного навчання для вдосконалення процесів проектування. Наприклад, алгоритми глибокого навчання можуть бути використані для прогнозування поведінки систем в реальному часі та для автоматичного налаштування параметрів проекту на основі аналізу великих обсягів даних. Крім того, інтелектуальні системи можуть бути використані для адаптації проектів до нових умов, що змінюються під час їх експлуатації.

У контексті інтеграції з новими стандартами, автоматизація може включати програмні рішення, які перевіряють відповідність всіх елементів проекту вимогам ISO 5167.1-6:2022. При цьому для вже існуючих вимірювальних систем САПР

повинна враховувати результати вимірювань характеристик труб і вимірювальних діафрагм за новими методиками.

Таким чином, перспектива розробки САПР нового покоління для проектування витратомірів з використанням веб-технологій, інтерактивного моделювання, автоматизації та штучного інтелекту, у поєднанні з актуальними стандартами, є важливим напрямом для подальших досліджень. Впровадження таких технологій дозволить значно підвищити ефективність проектування, оптимізувати витрати часу і ресурсів, а також забезпечити високий рівень точності і надійності систем вимірювання витрати плинних середовищ.

Висновки

За результатами аналізу відомих літературних джерел та програмних продуктів для проектування витратомірів встановлено, що існує потреба розроблення та вдосконалення систем автоматизованого проектування засобів вимірювання витрати і кількості плинних середовищ. Ця потреба зумовлена зміною нормативної та методичної бази для розроблення витратомірів, а також необхідністю впровадження сучасних технологій опрацювання даних.

Також виконано аналіз функціональних можливостей програмних продуктів, розроблених на основі CFD-методів, зокрема SolidWorks, Ansys Fluent, Simcenter FloEFD. Показано, що ці програмні продукти є ефективним додатковим інструментом для дослідження витратомірів плинних середовищ при нестандартних умовах монтажу вузлів обліку, при розширенні області застосування за межі дії стандартів, зокрема ISO 5167, як за діапазоном числа Рейнольдса, так і за типами звужувальних пристроїв, при дослідженні потоків в пристроях підготовки потоку та удосконаленні конструкції цих пристроїв.

Однак для галузей приладобудування та метрологічного нагляду за витратомірами, які застосовують у галузі законодавчо-регульованої метрології, необхідно розробити саме спеціалізовані САПР, які дають можливість моделювати конструкцію витратоміра із врахуванням вимог та обмежень сучасних стандартів, зокрема ISO 5167.1-6:2022. Інтеграція в такі спеціалізовані продукти веб-технологій, хмарних платформ і штучного інтелекту дає можливість реалізувати оптимізацію характеристик витратомірів, забезпечити віддалену роботу з проектом дослідника або групи дослідників, а також адаптацію витратомірів до реальних умов їх експлуатації.

Література

- [1] R. C. Baker, *Flow Measurement Handbook: Industrial Designs, Operating Principles, Performance, and Applications*. Cambridge University Press, 2016.
- [2] *Системи автоматизованого проектування технологічних процесів (САПР ТП): конспект лекцій*: навч. посіб. / уклад. К. С. Барандич, С. П. Вислоух, М. В. Філіппова. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023.
- [3] Y. Pistun, L. Lesovoy, F. Matiko, R. Fedoryshyn, "Computer Aided Design of Differential Pressure Flow Meters", *World Journal of Engineering and Technology*, vol. 2, no. 2, pp. 82–91, 2014. DOI: 10.4236/wjet.2014.22009
- [4] Al. Kreis, M. Hirz, (2020). CAD-Automation in Automotive Development – Potentials, Limits and Challenges. 56-60. DOI: 10.14733/cadconfP.2020.56-60.
- [5] I. Gryshanova, A. Rak, I. Korobko, "The investigation of the correction factor for ultrasonic flow meters", *Measurement*, vol. 219, 113326, 2023. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113326
- [6] Є. П. Пістун, Ф. Д. Матіко, В. І. Роман, А. А. Стеценко, "Дослідження похибки ультразвукових витратомірів за умов спотвореної структури потоку на основі CFD-моделювання", *Метрологія та прилади*, Вип. 4, с. 13–23, 2014.
- [7] V. Roman, F. Matiko, I. Kostyk, "Investigation of turbulence parameters influence on results of CFD modeling of flow in ultrasonic flowmeter", *Energy Engineering and Control Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 73–78, 2021. DOI: 10.23939/jeecs2021.01.073
- [8] І. А. Гришанова, І. В. Коробко, *Системи CAD/CAE ANSYS FLUENT. Навчальний посібник*, Київ, Україна: Дія ЛТД, 2012.
- [9] І. А. Гришанова, Л. П. Згуровська, Ю. В. Киричук, *Розв'язок задач проектування приладів та систем з використанням ANSYS і MATHCAD: підручник*, Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022.
- [10] N. Tamhankar, A. Pandhare, A. Joglekar, V. Bansode, "Experimental and CFD analysis of flow through venturimeter to determine the coefficient of discharge", *International Journal of Latest Trends In Engineering and Technology (IJLTET)*, vol. 3, is. 4, 2014, pp. 194-200.
- [11] Karthik G. S., Yogesh Kumar K.J., V. Seshadri, "Prediction of Performance Characteristics of Orifice Plate Assembly for Non-Standard Conditions Using CFD", *International Journal of Engineering and Technical Research*, vol. 3, is. 5, 2015, pp. 162-167.
- [12] ДСТУ ГОСТ 8.586.1-5:2009 Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. [Введено в дію від 01.04.2010]. – Київ, Україна: Держспоживстандарт України, 2010.
- [13] ISO 5167.1-6:2022. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full. International Organization for Standardization, 2022.
- [14] F. Matiko, O. Byts, L. Lesovoy, H. Matiko, "Computer-aided system for designing the thermal energy metering devices", *Energy Engineering and Control Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 61–69, 2020.

- DOI: 10.23939/jeecs2020.01.061
- [15] Л. В. Лесовой, “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, Нац. ун-т “Львівська політехніка”, Львів, 2012.
- [16] IAPWS R7-97(2012) Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. August, 2007.
- [17] Theory overview of flow measurement using differential pressure devices based on ISO – 5167 standard. Arian FL40 flow computer description: flow cad software users manual. [Online]. Available: <https://www.arian.cl/downloads/man-arianflowcadsoftware.pdf>
- [18] Ch. Qian, G. D. S. Borja, T. A. Bryan, “Construction automation: Research areas, industry concerns and suggestions for advancement”, *Automation in Construction*, vol. 94, pp. 22–38, 2018. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.05.028
- [19] ANSYS Fluent User’s Guide. ANSYS Inc., 2023. [Online]. Available: <https://www.ansys.com/>
- [20] Simcenter FLOEFD software. [Online]. Available: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/simcenter/fluids-thermal-simulation/floefd/>
- [21] Manish S. Shah, Jyeshtharaj B. Joshi, Avtar S. Kalsi, C.S.R. Prasad, Daya S. Shukla, “Analysis of flow through an orifice meter: CFD simulation”, *Chemical Engineering Science*, vol. 71, pp. 300–309, 2012.
- [22] Jože Duhovnik, Ivan Demšar, Primož Drešar. *Space Modeling with SolidWorks and NX*, Ljubljana, Sloveniya: University of Ljubljana, 2015.
- [23] SOLIDWORKS Flow Simulation. [Online]. Available: <https://www.solidworks.com/product/solidworks-flow-simulation>
- [24] COMSOL Multiphysics CFD Module User’s Guide. COMSOL Inc., 2023. [Online]. Available: <https://www.comsol.com/>

UDC 681.5

R. V. Sapeliuk, F. D. Matiko*Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine***ANALYSIS OF THE STATE AND DEVELOPMENT TRENDS OF COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS FOR FLUID FLOW MEASUREMENT DEVICES**

The article provides a comprehensive study of the current state and development trends of computer-aided design (CAD) systems for measuring fluid parameters. The main focus is on the analysis of specialized software products for the automated design of flow measurement systems and flowmeters. An analysis of the functional capabilities of widely used CAD software products "Vytratomir" (Flowmeter), Arian Flow CAD, and Simcenter FloEFD was performed, and their advantages and disadvantages were highlighted. The ability of the software product to design differential pressure flowmeters in accordance with the requirements of international standards ISO 5167 was singled out as a separate analysis criterion. The technological advantages of the products were considered, in particular, the presence of interaction with the researcher and the possibility of optimizing flowmeter characteristics. An analysis of the functional capabilities of software packages developed on the basis of CFD methods, in particular SolidWorks and Ansys Fluent, was also performed. It is indicated that these software packages are an effective additional tool for studying fluid flowmeters under non-standard installation conditions of metering stations, when expanding the scope of application beyond the limits of standards, in particular ISO 5167, both in terms of the Reynolds number range and types of flowmeters, when studying flows in flow conditioning devices and improving the design of these devices. A comparative table of the advantages and disadvantages of the considered software products was formed.

An overview of the latest technologies being introduced into engineering product design systems was carried out, in particular web technologies, cloud solutions, and artificial intelligence algorithms, which contribute to increasing the efficiency of automated design. The advantages of using digital twins for predicting the behavior of systems in real operating conditions, as well as the use of cloud platforms in ensuring the accessibility, scalability, and integration of CAD with data management systems, were considered.

The scientific novelty of the research lies in identifying the key directions for the development of CAD systems for fluid flow and quantity measurement devices, taking into account the requirements of modern standards, automation of design processes, and the introduction of adaptive modeling tools.

Keywords: automated design; flowmeter; fluid; interactive modeling; CFD methods.

*Надійшла до редакції
03 квітня 2025 року*

*Рецензовано
09 травня 2025 року*



© 2025 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).