

## Сучасний стан використання модельних рішень у провідних метрологічних інститутах світу

В.В. Склярів

Національний науковий центр «Інститут метрології», вул. Мירוносицька, 42, 61002, Харків, Україна  
vladimir.skliarov@gmail.com

### Анотація

Розглянуто питання застосування сучасних цифрових програмних технологій у провідних національних метрологічних інститутах (NMI). Наведено практичні приклади використання розрахункових комплексів для вирішення окремих завдань вимірювальних систем і розв'язання повсякденних наукових задач.

На основі фінального звіту NIST про руйнування веж Всесвітнього торгового центру в Нью-Йорку 11 вересня 2001 року наведено практичне використання сучасних пакетів комп'ютерного моделювання. Модельні рішення окремих складових (конструкція будівель, модель літаків, фактор механічного та гравітаційного впливу, температурне оточення) дозволили реконструювати і пояснити процеси їх руйнування.

Досвід використання програмних пакетів інженерного аналізу в РТВ відображено прикладом розрахунку тиску в газі з метою визначення сталої Больцмана. Крім того, метод скінченних елементів є основним методом, що використовується в проєктах EURAMET та EMPIR. Зазначені вище дослідження забезпечують виконання ряду розрахунків для вирішення завдань, що виникають у провідних метрологічних організаціях світу.

Метою роботи є аналіз і обґрунтування принципів використання комп'ютерного моделювання при побудові та вдосконаленні елементів національних еталонів. Актуальність теми роботи визначається схваленою урядом Концепцією розвитку цифрової економіки і суспільства України на 2018–2020 рр. та планом заходів щодо її реалізації (розпорядження Кабінету Міністрів України від 17 січня 2018 № 67-р). Концепція розвитку цифрової економіки України полягає у використанні цифрових технологій у секторах промисловості для їх ефективності, конкурентоспроможності та сталого розвитку, зростання обсягів виробництва високотехнологічної продукції та добробуту населення.

**Ключові слова:** програмні технології; метрологічні завдання; цифрова економіка; Індустрія 4.0; національні еталони.

Отримано: 02.12.2019

Відредаговано: 18.12.2019

Схвалено до друку: 20.12.2019

### Вступ

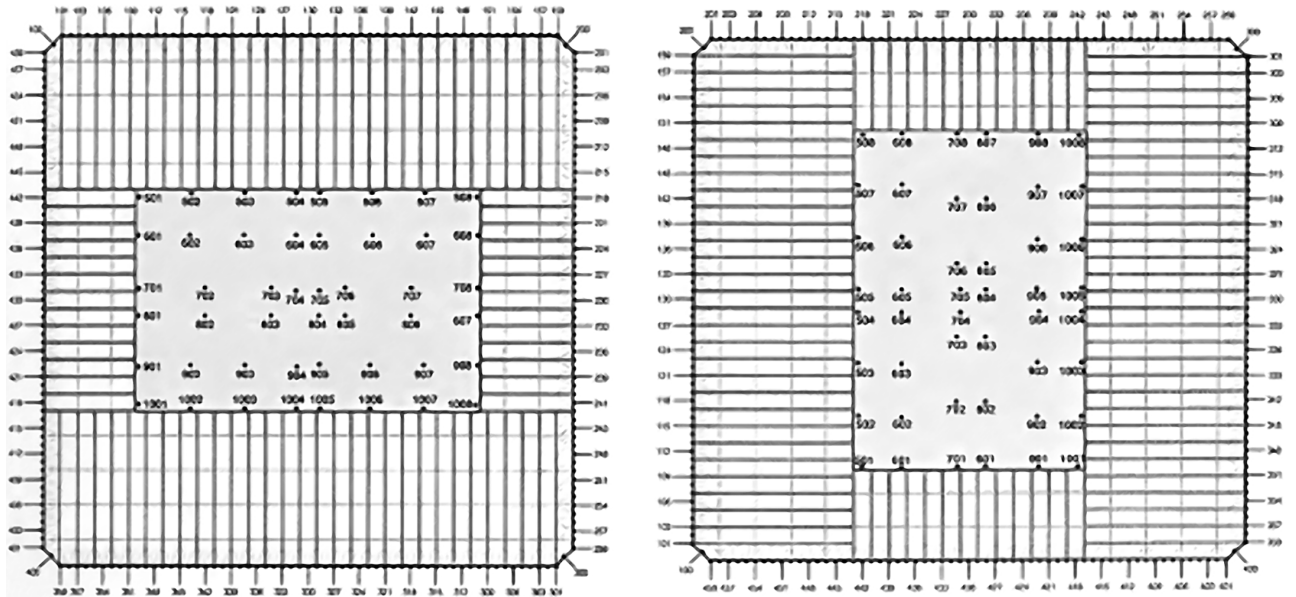
Схвалена урядом Концепція розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018–2020 роки та план заходів щодо її реалізації (розпорядження Кабінету Міністрів України від 17 січня 2018 року № 67-р) має на меті план заходів щодо усунення бар'єрів на шляху цифрової трансформації України у найбільш перспективних сферах [1]. З підписанням Угоди про асоціацію з ЄС Україна взяла зобов'язання адаптувати існуючі національні програми та нормативи до стандартів, які існують у країнах ЄС. Програма партнерства з міжнародними та європейськими ініціативами з розвитку «Індустрії 4.0» відкриває для України можливість участі у міжнародних проєктах «Горизонт 2020», EMPIR, Factories of the Future, Ear plus та ін.

Однією з ключових складових успішної реалізації цифрової трансформації України є стандартизація. Розробка вітчизняних і використання закордонних стандартів, поширення цифрових технологій, 3D-друк та застосування сучасних розрахункових комплексів є базовими елементами розвитку [2].

Національні еталони України задовольняють існуючі на сьогодні вимоги щодо забезпечення простежуваності результатів вимірювань для Програми «Індустрія 4.0», концепції «смарт-фабрика» та у сфері адитивного виробництва [3].

### Основна частина

У NIST ведуться дослідження з таких напрямків: будівництво та конструкції, пожежа, метроло-



Вежа 1

Вежа 2

Рис. 1. План поверхів будівель з номерами колон

гія, інформаційні технології, виробництво, аналітична хімія, біоматеріали, полімери, хімія, електромагнітна фізика, кераміка, матеріали, кібербезпека, біологія. Дослідження та розрахунки значної кількості робіт з наведених галузей виконуються із застосуванням сучасних методів комп'ютерного моделювання. Дослідження та модельні оцінки виконуються як для застосування на національних еталонах, так і для використання у повсякденному житті. Яскравим прикладом цього є дослідження, наведені у підсумковому звіті NIST щодо руйнувань веж Всесвітнього торгового центру 11 вересня 2001 року [4].

З використанням програмних пакетів моделювання було виконано структурне моделювання кожної з веж (рис. 1), етапи зіткнення літаків із вежами у часі (рис. 2).

Моделювання веж виконано з використанням програмного забезпечення SAP2000, версія 8. SAP2000 — це програмний пакет для аналізу та проектування будівельних конструкцій. Глобальні тривимірні моделі охоплювали 110 поверхів та шість підземних рівнів. Моделі склалися з десятків тисяч обчислювальних елементів. Використовуючи SAP2000, NIST встановив, що конструкції веж було коректно розраховано. Наступний етап розрахунків передбачав моделювання та побудову структурних моделей для аналізу механічного впливу літаків. Побудови та розрахунки моделей виконувались за допомогою програми високонелінійних розрахунків ANSYS LS-DYNA. Компоненти вежі в зоні удару були описані з вищою роздільною здатністю, для моделювання зовнішніх пошкоджень від удару застосовувалась більш

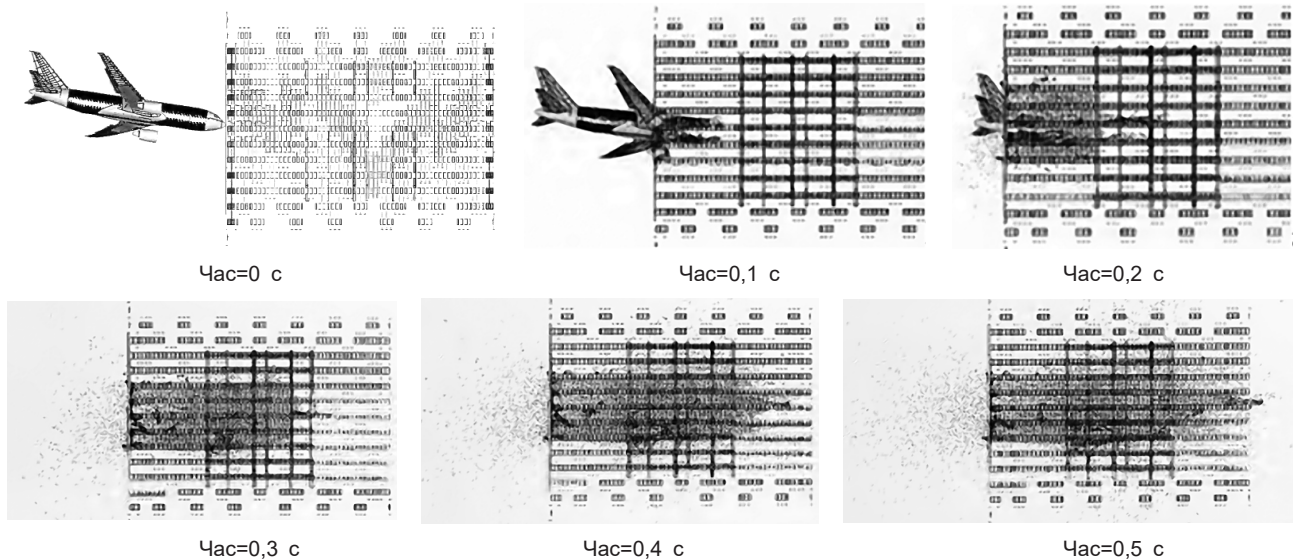


Рис. 2. Моделювання зіткнення з вежею у часі

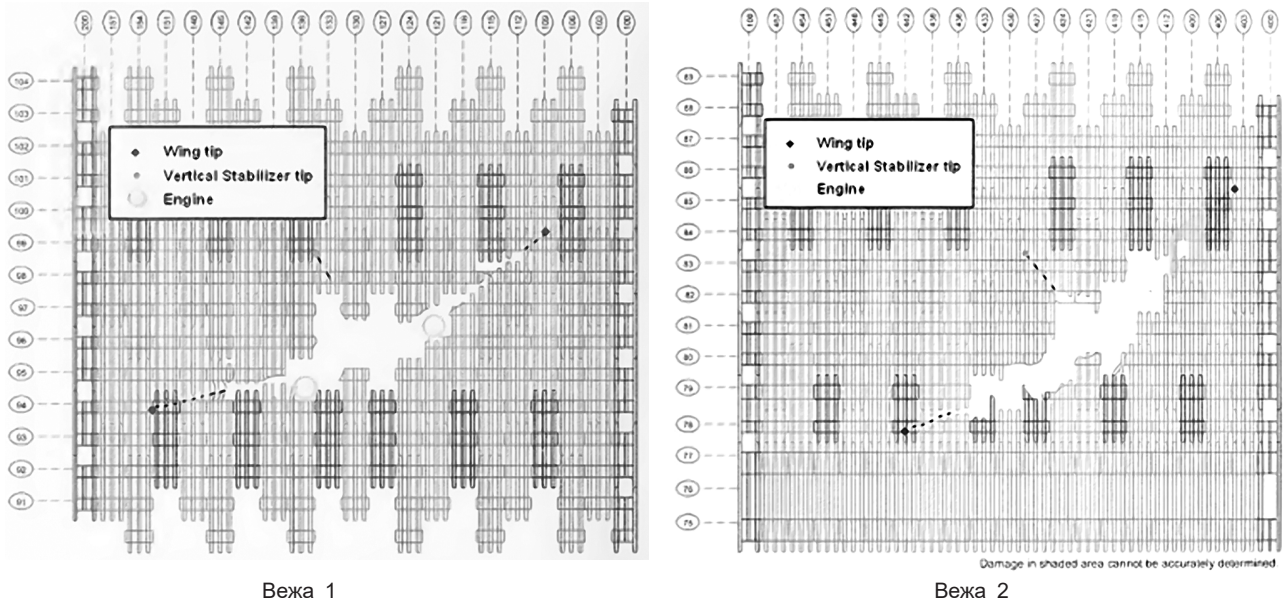


Рис. 3. Вхідні отвори у вежах з локацією компонентів літаків

груба сітка. Моделі веж та літака було складено з понад двох мільйонів елементів. На розрахунки було витрачено два тижні комп'ютерного часу на 12-ядерному комп'ютерному кластері. Для моделювання та розрахунків руйнувань у будівлі побудовано масштабні геометрії входу літаків у будівлю та кумулятивні ураження поверхів і приміщень веж центру (рис. 3 та 4).

За результатами моделювання було перевірено здатність будівель витримувати гравітаційні навантаження та чинити опір силі вітру, змодельовано наслідки зіткнення з літаком та реконструйовано механіку пошкодження повітряного судна, нагрівання, спричиненого пожежею, та прогресування місцевих руйнувань, які призвели до руйнування всієї будівлі.

Реконструкцію руйнувань було виконано з урахуванням впливу літаків. Оскільки моделі двох літаків схожі, за основу було взято модель літака Boeing 767–200ER. Моделювання виконано методом скінченних елементів із розбиттям на 800 тис. елементів різних розмірів (від 0,01 до 0,10 м), за-

лежно від елемента літака. Крім того, користуючись довідковими даними, виконано моделювання двигунів літаків та розподіл авіаційного палива у крилах. Первинні та подальші руйнування було виконано з урахуванням комбінованого гравітаційного та температурного навантаження із застосуванням програмного модуля ANSYS 8.1. Модельні рішення враховували гравітаційні та температурні навантаження до 700 °C протягом 30 хвилин. Відповідно до розрахунків, спочатку теплові розширення підлоги штовхнули колони назовні, при підвищенні температури підлога провисла, а колони зсунулися всередину. Було виявлено критичну деформацію переважно на кінцях ферм і прогин підлоги. Температурне навантаження (розігрів до 700 °C) викликало відхилення підлоги на 1 м, що спричинило осідання та руйнування конструкції.

На підставі комплексного підходу та системного аналізу було зроблено заключні висновки щодо всіх причин та чинників руйнування веж.

У NIST також виконуються роботи для цивільних об'єктів. Швидкість обміну повітря в бу-

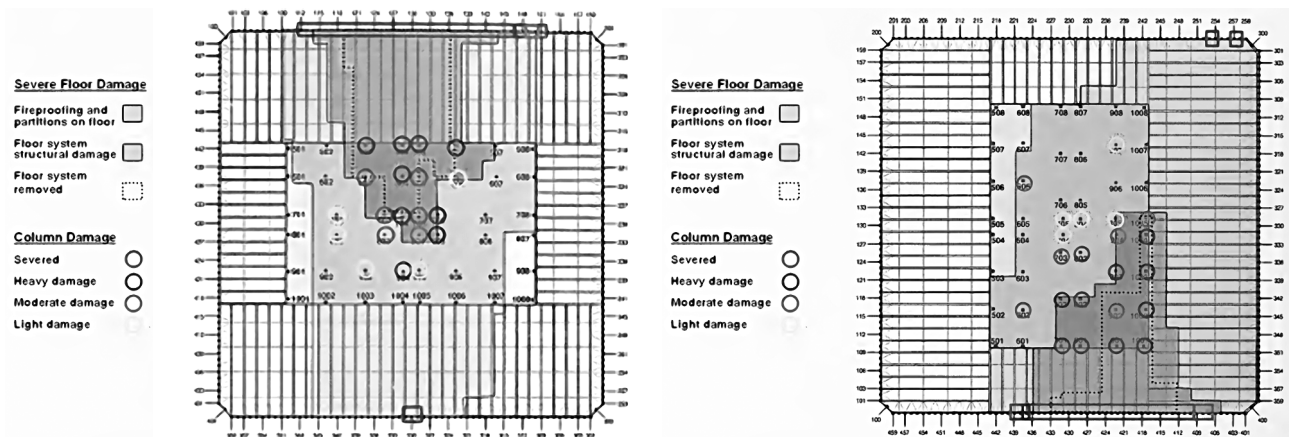


Рис. 4. Моделювання кумулятивного ураження приміщень

динках змінюється з часом залежно від погоди, умов у приміщенні та роботи обладнання. Коефіцієнти зміни повітря в реальному часі оцінюються за допомогою програмного забезпечення для моделювання багатозонного повітряного потоку CONTAM, розробленого в NIST [5].

Національний інститут стандартів і технологій також розробляє пристрій для вимірювання теплопровідності теплоізоляції в діапазоні температур від 90 до 900 К. Новий прилад значно розширить можливості вимірювання ізоляції, призначеної для криогенних застосувань або для промислових застосувань при високих температурах. Для вдосконалення конструкції нагрівача використовується розрахунковий комплекс ANSYS. Було запропоновано декілька моделей для демонстрації ролі аналізу скінченних елементів у прогнозуванні теплопровідності теплоізоляції [6].

Фізико-технічний інститут (РТВ) Німеччини має спеціальний підрозділ з математичного моделювання та аналізу даних (Mathematical Modelling and Data Analysis, Department 8.4). Метою цього підрозділу є зосереджена робота у галузях прикладної математики, які мають фундаментальне значення для метрології. Дослідження стосуються аналітичного та чисельного моделювання фізичних явищ, аналізу даних та методів оцінки невизначеності вимірювань.

Застосування методу скінченних елементів та програмних пакетів моделювання дозволило виконати розрахунки коефіцієнта деформації поршневої пари та пов'язаної з нею невизначеності вимірювань тиску до 1 ГПа. Дослідження виконувалися методом скінченних елементів. Результати досліджень демонструють гарну згоду методу скінченних елементів (МСЕ) і експериментальних коефіцієнтів деформації, але досить великі відмінності в невизначеності, розподілах тиску, профілях зазору і швидкостях опускання поршня вимагають подальшого з'ясування. Невизначеність геометрії зазору визначається як основне джерело невизначеності. Звірення поршневих систем, проаналізоване в рамках цього проекту, є корисним для перевірки теоретичних результатів. МСЕ надають корисний інструмент для прогнозування коефіцієнта деформації, але потрібна додаткова робота, перш ніж на МСЕ можна буде повністю покластися для визначення невизначеності, особливо при спробі змоделювати поведінку реальних пар поршень-циліндр [7].

Також було зроблено дослідження коефіцієнтів деформації газових поршневих систем. Дослідження виконувались моделюванням методом скінченних елементів, яким було проаналізовано конфігурацію поршневих систем та циліндрів газових систем 2, 5, 10 та 20 см<sup>2</sup>, які працюють у режимах надлишкового та абсолютного тисків від 0,06 до 7,5 МПа для визначення їх ефектив-

них площин при нульовому тиску та під дією тиску. Результати досліджень демонструють гарну згоду МСЕ і експериментальних досліджень. Встановлено, що коефіцієнти деформації не залежать від газу, але сильно залежать від форми зазору, виду тиску та еластичних властивостей поршневих пар [8].

З метою підтвердження калібрувальних та вимірювальних можливостей, а також перевірки еквівалентності газових еталонів тиску двох інститутів, у 2012–2013 рр. проводилися двосторонні додаткові звірення між Національним інститутом метрології Таїланду (NIMT) та РТВ в діапазоні надлишкового тиску від 60 до 350 кПа. На певному етапі досліджень методом скінченних елементів розраховувалися реальні розміри зазору між поршнем та циліндром [9].

Із застосуванням методів моделювання було обчислено динаміку та потік рідини, розроблено моделі та оптимізовано конфігурацію вимірювань. Виконано моделювання та прогнозування впливу різних параметрів та додаткових коефіцієнтів на невизначеність вимірювань.

Використання методів комп'ютерного моделювання стало базою для виконання робіт за проектом EMPIR "Метрологія багатофазних потоків" (Multiphase flow reference metrology) [10]. Метою цього було пояснення та зменшення невизначеності вимірювань багатофазного потоку в нафтовій і газовій галузях. Експериментально та чисельно досліджувалась типова система вимірювання багатофазного потоку, що складається з горизонтальної труби довжиною 16 м. Було виконано моделювання різної швидкості потоку нафти, води та газу в гідро-газодинамічному модулі ANSYS Fluent. Залежно від заданих поверхневих швидкостей газової та рідкої фаз, у кінці секції припливу спостерігалися схеми потоку, які впливають на точність лічильника. Гідро-газодинамічне моделювання дозволяє візуалізувати різні структури у всіх частинах геометрії, навіть у тих областях, які навряд чи можна спостерігати в експериментах. Крім того, було досліджено вплив різних параметрів (наприклад, використання різних рідин у лабораторіях, що беруть участь у звірненнях) на вимірювання тиску. Перевага моделювання над експериментом полягає в тому, що можна змінити лише один параметр, а інші зафіксувати. Таким чином, вплив різних параметрів можна досліджувати окремо. Порівняння результатів надає якісну згоду, крім того, різниці в часі між початком, серединою та кінцем потоку збігаються з експериментальними спостереженнями [11, 12].

У Національній фізичній лабораторії Великої Британії (NPL) проводяться дослідження з таких напрямків:

- проектування нового обладнання та тестових зразків;

## Наукові та прикладні завдання, відповідно до видів вимірювання

Вид вимірювання	Наукові та прикладні завдання	Розрахункові комплекси
1	2	3
Час та частота	Побудова радіотехнічних систем із температурною стабілізацією процесів у квантових генераторах	ANSYS Maxwell, ANSYS Multiphysics, NASTRAN, Abaqus
Електрика та магнетизм	Моделювання електричного та магнітного полів, розрахунок трансформаторів, дослідження вібраційного впливу на антену	ANSYS Maxwell, NASTRAN, COMSOL
Акустика, ультразвук і вібрація	Модальний та гармонічний аналіз, визначення резонансно-частотних характеристик об'єкта	ANSYS Acoustics, ANSYS Maxwell, Nastran, Zencrack, ANSYS LS-DYNA
Фотометрія та радіометрія	Розподіл напружень на оптичній лінзі, отримання температурних полів у лазерних системах	ANSYS Multiphysics, ANSYS FLUENT, NASTRAN, Abaqus
Іонізуючі випромінювання	Моделювання радіаційного захисту та міцності реакторів, потокових та дифузійних процесів, дослідження тиску в радіаційних сховищах та контейнерах	ANSYS Structural, ANSYS FLUENT, NASTRAN, Abaqus, AVOGADRO
Термометрія	Моделювання температурного розподілу та випромінювання, прогнозування механічної деформації під впливом температурного навантаження, дослідження температурної міцності об'єкта	ANSYS Thermal, Abaqus, SIMTEC, ANSYS FLUENT, NASTRAN, DEFORM
Хімія та біологія	Моделювання хімічних реакцій та горіння, вирішення потокових та дифузійних задач, моделювання біологічних процесів	ANSYS Flotran, AVOGADRO, SIMTEC
Довжина	Задачі регулювання механізму переміщення референтного дзеркала, розрахунок зубчатих передач та шорсткості	ANSYS Structural, DEFORM, ANSYS LS-DYNA
Маса та пов'язані з нею величини	Задачі моделювання процесу визначення твердості, розрахунки тиску, потоку та турбулентності рідини, дослідження електромагнітних левітаційних систем	ANSYS Multiphysics, ANSYS FLUENT, Abaqus, ANSYS LS-DYNA, DEFORM, SIMTEC, COMSOL, Zencrack

- моделювання експериментів та поглиблене вивчення фізичних процесів;
- прогнозування поведінки обладнання та матеріалів;
- дослідження чутливості експериментів до навколишнього впливу;
- оцінювання фізичних ефектів шляхом зіставлення результатів моделювання з вимірюваними даними.

NPL має великий досвід роботи зі спеціалізованими моделями матеріалів, включаючи п'єзоелектрики та мультиферити, пластмаси та клеї, ламінати, композити та метали. В NPL розробили та впровадили власні моделі матеріалів, застосовують метод ґраток Больцмана для моделювання потоку рідини у мікропотоківих системах. Важливими є дослідження щодо фундаментальних фізичних сталей [13].

Фахівці Корейського дослідницького інституту еталонів та науки (KRISS) використовують метод скінченних елементів та розрахунковий комплекс ANSYS при прогнозуванні коефіцієнта динамічної концентрації напруження у пластині з отвором при розрахунках циклічної вібрації конструкції,

що оцінюється методом інфрачервоної термографії [14]. Резонансну частоту, форму моди та розподіл напруження досліджуваного зразка отримують шляхом проведення модального аналізу. Для уникнення резонансних частот, як правило, потрібні структурні компоненти, що мають резонансні частоти більшого порядку. Експериментальні дослідження було виконано методом термографічного аналізу. Отримані результати збігаються у межах невизначеності експериментального методу.

## Висновки

За результатами проведеного аналізу, для вирішення наукових та прикладних завдань у різних видах вимірювань можна визначити та класифікувати такі розрахункові комплекси (див. у таблиці).

## Вдячність

Автор висловлює слова подяки канд. фіз.-мат. наук К.П. Івановій та провідному інженеру О.В. Зуєву за поради та обговорювання під час роботи над статтею.

# Современное состояние использования модельных решений в ведущих метрологических институтах мира

В. В. Скляр

Национальный научный центр "Институт метрологии", ул. Мироносицкая, 42, 61002, Харьков, Украина  
vladimir.skliarov@gmail.com

## Аннотация

В статье рассмотрены вопросы применения современных цифровых программных технологий в ведущих национальных метрологических институтах (NMI). Приведены практические примеры использования расчетных комплексов для решения отдельных задач измерительных систем и повседневных научных задач.

На основе финального отчета NIST о разрушении башен Всемирного торгового центра в Нью-Йорке 11 сентября 2001 года показано практическое использование современных пакетов компьютерного моделирования. Модельные решения отдельных составляющих (конструкция зданий, модель самолетов, фактор механического и гравитационного воздействия, температурное окружение) позволили реконструировать и объяснить процессы их разрушения.

Опыт использования программных пакетов инженерного анализа в РТВ представлен примером расчета давления в газе с целью определения постоянной Больцмана. Кроме того, метод конечных элементов – основной метод, который используется в проектах EURAMET и EMPIR. Указанные выше исследования предполагают выполнение ряда расчетов для решения задач, возникающих в ведущих метрологических организациях мира.

Целью работы является анализ и обоснование принципов использования компьютерного моделирования при построении и совершенствовании элементов национальных эталонов.

**Ключевые слова:** программные технологии; метрологические задачи; цифровая экономика; Индустрия 4.0; национальные эталоны.

# State of the art of using model solutions at leading metrological institutes of the world

V. Skliarov

National Scientific Centre "Institute of Metrology", Myronosytska Str., 42, 61002, Kharkiv, Ukraine  
vladimir.skliarov@gmail.com

## Abstract

The article discusses the application of modern digital software technologies in leading national metrological institutes (NMI). Practical examples of the use of calculation systems for solving individual tasks of measuring systems and addressing everyday scientific problems are given.

Based on the NIST final report on the destruction of the World Trade Center towers in New York on September 11, 2001, the practical use of modern computer simulation packages is shown. Model solutions of individual components (building structure, aircraft model, factor of mechanical and gravitational effects, temperature environment) made it possible to reconstruct and explain the processes of their destruction.

The experience of using software packages for engineering analysis in PTB is presented by the example of calculating gas pressure in order to determine the Boltzmann constant. In addition, the finite element method is the main method used in the EURAMET and EMPIR projects. The above studies suggest a number of calculations to solve problems arising in the leading metrological organizations of the world.

The aim of the work is to analyze and justify the principles of using computer modeling in the construction and improvement of elements of the national measurement standards. The relevance of the topic of work is determined by the Concept for the Development of the Digital Economy and Society of Ukraine for 2018–2020 and the Plan of Measures for its Implementation (the Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 67-r dated January 17, 2018) approved by the Government of Ukraine. The main goal of the Concept is to implement an action plan to remove barriers to the digital transformation of Ukraine in the most promising areas. The Concept for the Development of the Digital Economy of Ukraine is in the use of digital technologies in industrial sectors in order to provide their effectiveness, competitiveness and stable development, growth in the production of high-tech products and the well-being of the population.

**Keywords:** software technologies; metrological tasks; digital economy; Industry 4.0; national measurement standards.

## Список літератури

1. Про схвалення Концепції розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018–2020 роки та затвердження плану заходів щодо її реалізації. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/67–2018-%D1%80>
2. Цифрова агенда України. Проект Постанови КМУ від січня 2018 р. URL: <https://www.kmu.gov.ua/ua/npas/pro-shvalennya-konceptiyi-rozvitku-cifrovoyi-ekonomiki-ta-suspilstva-ukrayini-na-20182020-roki-ta-zatverdzhennya-planu-zahodiv-shodo-yiyi-realizaciyi>
3. Skliarov V., Neyezhnikov P., Prokopov A. Metrological assurance and traceability for Industry 4.0 and additive manufacturing in Ukraine. *Smart Structures and NDE for Industry 4.0*: proceedings of the conference (4–8 March 2018, Denver, Colorado, USA), vol. 10602; 106020Q. <https://doi.org/10.1117/12.2292821>
4. Gutierrez C.M., O'Neill M., Jeffrey W. Final Report on the Collapse of the World Trade Center Towers, September 2005. URL: <https://www.nist.gov/engineering-laboratory/final-reports-nist-world-trade-center-disaster-investigation>
5. Dols W.S., Polidoro B. CONTAM User Guide and Program Documentation. Technical Note 1887. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2016.
6. William M. Healy Using Finite Element Analysis to Design a New Guarded Hot Plate Apparatus for Measuring the Thermal Conductivity of Insulating Materials, Building and Fire Research laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD 20899–8632. Reprinted from ANSYS Users' Group Conference Proceedings (October 2, 2001).
7. Sabuga W., Molinar G., Buonanno G., Esward T., Rabault T., Yagmur L. Calculation of the distortion coefficient and associated uncertainty of PTB and LNE 1GPa pressure balances using finite element analysis. EUROMET project 463. *Metrologia*, 2005, vol. 42, S202–S206. doi:10.1088/0026–1394/42/6/S12
8. Sabuga W., Priruenrom T., Molinar G., Min Beciet, Giovinco G., Rabault T., Wongthep P., Pražák D. FEA calculation of pressure distortion coefficients of gas-operated pressure balances. EURAMET project 1039. *Measurement*, 2012, vol. 45(10), pp. 2464–2468. doi:10.1016/j.measurement.2011.10.035
9. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0026–1394/50/1A/07009>
10. URL: <https://www.ptb.de/cms/en/ptb/fachabteilungen/abt8/fb-84/ag-841/modellierung-841.html>
11. Fiebach A., Schmeyer E., Knotek S., Schmelter S. *Numerical simulation of multiphase flow in a vertically mounted Venturi flow meter*: proceedings of the 17<sup>th</sup> International Flow Measurement

Conference FLOMEKO (September 26–29, 2016). Sydney, Australia, 2016.

12. Knotek S., Fiebach A., Schmelter S. *Numerical simulation of multiphase flows in large horizontal pipes*: proceedings of the 17<sup>th</sup> International Flow Measurement Conference FLOMEKO (September 26–29, 2016). Sydney, Australia, 2016.
13. URL: <https://www.comsol.com/story/understanding-the-origin-of-uncertainty-in-thermometer-calibration-16355>
14. Choi M.Y., Park J.H., Kim W.T., Lee S.S., Kim K.S., Kang K.S. *Predicting the Dynamic Stress Concentration Factor Using the Stress Measuring Method Based on the Infrared Thermography*: proceedings of the 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (July 2–5, 2008). Krakow, Poland, 2008. doi: 10.21611/qirt.2008.13\_01\_04

## References

1. On Approval of the Concept for the Development of the Digital Economy and Society of Ukraine for 2018–2020 and Adoption of the Plan of Measures for its Implementation. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/67–2018-%D1%80> (in Ukrainian).
2. Digital Agenda of Ukraine. Project of Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine (CMU) from January 2018. Available at: <https://www.kmu.gov.ua/ua/npas/pro-shvalennya-konceptiyi-rozvitku-cifrovoyi-ekonomiki-ta-suspilstva-ukrayini-na-20182020-roki-ta-zatverdzhennya-planu-zahodiv-shodo-yiyi-realizaciyi> (in Ukrainian).
3. Skliarov V., Neyezhnikov P., Prokopov A. Metrological assurance and traceability for Industry 4.0 and additive manufacturing in Ukraine. *Smart Structures and NDE for Industry 4.0*: proceedings of the conference (4–8 March 2018, Denver, Colorado, USA), vol. 10602; 106020Q. <https://doi.org/10.1117/12.2292821>
4. Gutierrez C.M., O'Neill M., Jeffrey W. Final Report on the Collapse of the World Trade Center Towers, September 2005. Available at: <https://www.nist.gov/engineering-laboratory/final-reports-nist-world-trade-center-disaster-investigation>
5. Dols W.S., Polidoro B. CONTAM User Guide and Program Documentation. Technical Note 1887. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2016.
6. William M. Healy Using Finite Element Analysis to Design a New Guarded Hot Plate Apparatus for Measuring the Thermal Conductivity of Insulating Materials, Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD 20899–8632. Reprinted from ANSYS Users' Group Conference Proceedings (October 2, 2001).

7. Sabuga W., Molinar G., Buonanno G., Esward T., Rabault T., Yagmur L. Calculation of the distortion coefficient and associated uncertainty of PTB and LNE1GPa pressure balances using finite element analysis. EUROMET project 463. *Metrologia*, 2005, vol. 42, S202–S206. doi:10.1088/0026–1394/42/6/S12
8. Sabuga W., Priruenrom T., Molinar G., Min Beciet, Giovinco G., Rabault T., Wongthep P., Pražák D. FEA calculation of pressure distortion coefficients of gas-operated pressure balances. EURAMET project 1039. *Measurement*, 2012, vol. 45(10), pp. 2464–2468. doi:10.1016/j.measurement.2011.10.035
9. Priruenrom T, Sabuga W., Konczak T. Final report on APMP.M.P-S4: Results of the bilateral supplementary comparison on pressure measurements in the range (60 to 350) kPa of gauge pressure in gas media. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0026–1394/50/1A/07009>
10. Available at: <https://www.ptb.de/cms/en/ptb/fachabteilungen/abt8/fb-84/ag-841/modellierung-841.html>
11. Fiebach A., Schmeyer E., Knotek S., Schmelter S. *Numerical simulation of multiphase flow in a vertically mounted Venturi flow meter*: proceedings of the 17<sup>th</sup> International Flow Measurement Conference FLOMEKO (September 26–29, 2016). Sydney, Australia, 2016.
12. Knotek S., Fiebach A., Schmelter S. *Numerical simulation of multiphase flows in large horizontal pipes*: proceedings of the 17<sup>th</sup> International Flow Measurement Conference FLOMEKO (September 26–29, 2016). Sydney, Australia, 2016.
13. Available at: <https://www.comsol.com/story/understanding-the-origin-of-uncertainty-in-thermometer-calibration-16355>
14. Choi M.Y., Park J.H., Kim W.T., Lee S.S., Kim K.S., Kang K.S. *Predicting the Dynamic Stress Concentration Factor Using the Stress Measuring Method Based on the Infrared Thermography*: proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (July 2–5, 2008). Krakow, Poland, 2008. doi: 10.21611/qirt.2008.13\_01\_04