

УДК 539.3

Грінченко В. Т.¹, академік НАН України,
д. ф.-м. н., проф.

Комп'ютер і механіка

Розвиток комп'ютерних технологій, зростання їх потужності сприяли широкому використанню математичного моделювання практично в усіх галузях сучасного природознавства. Для механіки ця тенденція виразилася в формуванні нових розділів, одержанні і систематизації великого обсягу кількісних оцінок в задачах, що не могли бути вирішені з допомогою традиційних аналітичних методів. В роботі в історичній перспективі розглянуто деякі шляхи використання комп'ютерів при розв'язанні нових задач та проблеми практичного використання обчислювальних технологій. Відмічено ряд робіт, виконаних з використанням комп'ютерних обчислень співробітниками кафедри теоретичної та прикладної механіки КНУ імені Тараса Шевченка.

Ключові слова: комп'ютер, комп'ютерні технології, механіка, математичне моделювання.

¹ Інститут гідромеханіки НАН України,
03057, м. Київ, вул. Желябова, 8/4
e-mail: grinchenko@hydromech.com.ua

Святкування 150-річчя кафедри теоретичної та прикладної механіки Київського національного університету імені Тараса Шевченка природно стимулює роздуми про зміни в цій найстарішій галузі природознавства, про її вплив на розвиток інших наукових дисциплін. Основним способом одержання знань в механіці з самого початку її формування було використання математичних моделей. Багато сформульованих математичних задач не мали розв'язків. Величезним досягненням математиків і механіків є розвиток якісної теорії диференціальних рівнянь, використання якої дозволило вивчити властивості багатьох складних систем. Однак величезна кількість задач не мала розв'язків, які б давали кількісні оцінки характеристик механічних систем. Можливість одержати такі оцінки відкрилася в зв'язку з розвитком комп'ютерної техніки.

Бурхливий розвиток технологій в останні півстоліття суттєво вплинув практично на всі сторони людського життя. Осмислення цього впливу знайшло відображення в спробах визначити сучасне суспільство як інформаційне, суспільство знань, постіндустріальне суспільство та ін. Значний вплив комп'ютерних технологій змінив об-

V. T. Grinchenko¹, Academician of NAS Ukraine,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.

Computer and mechanics

The development of computer technology and increase their capacity have contributed to the widespread use of mathematical modeling in almost all areas of modern science. This trend in the mechanics has resulted in the formation of its new chapters, acquisition and systematization of a large amount of quantitative assessments of problems that could not be solved by traditional analytical methods. In this paper some ways of use of computers in solving of new problems and challenges of practical use of computer technology have discussed in historical perspective. A number of works carried out by means of computer calculations have been distinguished, which were performed at the Department of Theoretical and Applied Mechanics of National Taras Shevchenko University of Kyiv.

Key Words: computer, computer technology, mechanics, mathematical modeling.

¹ Institute of Hydromechanics of NAS Ukraine,
03057, Kyiv, Zhelyabova st., 8/4
e-mail: grinchenko@hydromech.com.ua

личчя, як багатьох окремих галузей сучасної науки, так і обличчя науки в цілому. Аналізу цих змін присвячено ряд фундаментальних досліджень, серед яких відмітимо монографію [1]. Ця робота цікава, перш за все, тим, що саме деякі механічні проблеми, в основному із механіки рідини, автор використовує для підтвердження загальних висновків свого аналізу.

Перший комп'ютер (ENIAC) було створено інженерами Пенсільванського університету для розрахунку артилерійських таблиць стрільби, по суті, для вирішення механічних задач балістики. Уже перші тестові розрахунки принесли цікавий результат – 30-та секундна траєкторія польоту снаряда розраховувалася за 20 секунд. Це була перша вказівка на можливість створення з допомогою комп'ютера систем керування швидкоплинними процесами в реальному масштабі часу.

Перший комп'ютер не використовувався для розрахунків при створенні ядерної бомби. Для проведення розрахунків в інтересах Манхетенського проекту використовувалася праця досить великих команд молодих жінок, що дало підставу автору [2] визначити період до появи ENIAC, як час, коли комп'ютери були жінками. Розробка

термоядерної зброї в США вже проводилася з використанням комп'ютерів. В Радянському Союзі комп'ютерів ще не було і тому обчислення проводилися жіночими командами. Цей період досить яскраво описаний в спогадах людини з незвичною долею, співробітника Харківського фізико-технічного інституту О. О. Лаврентєва (<http://www.npd.ac.ru/npd/history.npd/soldat/soldat.htm>). Зараз ми розуміємо, що факт створення термоядерної бомби в Радянському Союзі раніше ніж в США не слід розглядати, як свідчення більшої ефективності жіночої праці порівняно з комп'ютером. Справа в тому, що розуміння фізичної сторони справи, за спогадами академіка І. М. Халатнікова (<http://ega-math.narod.ru/Landau/IMH.htm>) дозволило саме фізикам запропонувати надзвичайно ефективні методи чисельного аналізу. Відсутність техніки компенсувалася більшою увагою до розробки методів обчислень, і саме в розробці таких ефективних методів радянські вчені зберігали лідерство багато років.

Значну роботу виконано на першому комп'ютері при реалізації американського термоядерного проекту. При проведенні обчислень було запропоновано і випробувано широко відомий нині метод Монте – Карло. Однією із перших задач механіки, що була розв'язана в 1946 році на ENIAC, була задача про надзвукове обтікання крила. Однак визначним моментом в формуванні розуміння ролі і можливостей комп'ютера в сучасній науці стала робота, виконана з участю Е. Фермі та С. Улама. Правда, ця робота була завершена в 1955 році вже після смерті Е. Фермі і з використанням наступного комп'ютера MANIAC I. Результати дослідження представлені в збірнику праць Е. Фермі [3].

Використовуючи можливості комп'ютера, Е. Фермі з колегами дослідили вільні коливання одновимірної системи із 64 однакових зосереджених мас з різними типами нелінійності в силах взаємодії. Така система апроксимує пружну струну з фізичною нелінійністю. Для квадратичної нелінійності розглядалися такі рівняння руху:

$$\ddot{x}_i = (x_{i+1} + x_{i-1} - 2x_i) + \alpha[(x_{i+1} - x_i)^2 - (x_i - x_{i-1})^2].$$

Тут α характеристика нелінійності системи.

Основна ідея роботи полягала в дослідженні процесу збурення періодичного лінійного коливання та перерозподілу енергії початкового одномодового збурення по модам більш високого порядку. Результати розрахунків виявилися, як відмічали самі автори, несподіваними. На початку процесу дійсно спостерігалася поступове зростання амплітуд мод вищого порядку. Однак потім картина змінилася. Деякі із мод вищого порядку ставали домінуючими. Після певного числа

періодів (мова йде про період коливань для нижчої моди у відповідній лінійній системі) знову система повернулася до такого стану, коли вся енергія коливання зосереджена в початковій першій моді. Від значення енергії в початкових умовах енергія першої моди після 30 000 періодів відрізнялася не більше ніж на один відсоток. Поведінка системи для всіх розглянутих типів нелінійності була схожою та ілюструвала справедливість теореми А. Пуанкаре про повернення, згідно з якою система частинок, що мають масу і рухаються згідно з законами механіки, з часом обов'язково повернеться до стану, близького до початкового.

Одержані при аналізі кількісних співвідношень результати в оцінці поведінки нелінійної механічної системи вперше проілюстрували можливість комп'ютера, як інструмента одержання принципово нових фундаментальних знань. Ці результати стали основою для розвитку нових методів нелінійної динаміки, формування поняття солітон. Практично в цей самий час використання комп'ютера стало стимулом для розвинування потужного методу дослідження в багатьох галузях науки – методу Монте – Карло [4].

Широкі можливості одержання принципово нових результатів в механіці з допомогою комп'ютерів відмічалися вже в узагальнюючій статті [8] про роботу третього Всесоюзного з'їзду по теоретичній та прикладній механіці в 1969 році. Уже в цей час на з'їзді було представлено низку доповідей, що чітко свідчили про таку можливість. Автори вказаної статті відмічали, що застосування комп'ютерів в механіці наклало свій відбиток на саму постановку багатьох задач механіки. Слід додати, що нові можливості одержання кількісних оцінок в задачах, що не мають належних аналітичних розв'язків ставлять нові вимоги до глибини аналізу результатів розрахунків, досягнення розуміння ролі різних параметрів задачі. Ставилося завдання про перехід від прикладу розрахунку, що характеризував можливості запропонованого методу до розрахунку пізнавального, такого, що дає підстави для певних практично важливих узагальнень.

Наступним важливим кроком у розвитку механіки та інших природничих наук стало формування теорії детермінованого хаосу. Величезна робота по створенню теоретичного базису такої теорії була проведена багатьма вченими, в основному математиками, на початку та в середині ХХ століття. Певною мірою початок цієї теорії можна пов'язувати з роботами А. Пуанкаре. Однак основним стимулом для розвитку цієї теорії стали результати аналізу нелінійних систем, одержані з допомогою комп'ютерів. Особливо відзнача-

ють роботу Е. Лоренца [5], присвячену аналізу результатів поведінки досить простої, на перший погляд, системи з трьома степенями вільності. Система призначалася для формування прогнозу погоди. Практично випадково при проведенні обчислень автор встановив наявність однієї з характерних ознак систем з хаотичною динамікою – надзвичайну чутливість кількісних оцінок параметрів системи до незначних змін в початкових умовах. Подальший аналіз кількісних результатів призвів до формування поняття дивного атратора. Що стосується передбачення погоди, то висновок автора був категоричним – передбачити погоду більше, ніж на тиждень, принципово неможливо.

Розуміння специфіки поведінки нелінійних систем, формування нової понятійної бази на основі узагальнення результатів досліджень сформували основу для широкого використання теорії динамічних систем в інших, “не механічних” галузях природознавства. Особливо цікавими і перспективними виглядають дослідження поведінки живих систем з використанням нових понять. Зараз уже видано 16 томів в серії “Дослідження нелінійних явищ в науці про життя”. З тематикою видання можна познайомитися на сайті видавництва http://www.worldscientific.com/series/snpls_

Особливо слід відзначити роботи, виконані на кафедрі теоретичної та прикладної механіки КНУ. Перш за все, відзначу роботи з моделювання на аналогових пристроях поведінки нелінійної системи (рівняння Дюфінга) доцентом кафедри Іваном Івановичем Хількевичем. В загальному випадку це рівняння з кубічною нелінійністю не має аналітичного розв’язку. Він багато разів розгортав перед учасниками семінару, який ми проводили разом з Андрієм Теофановичем Улітко, листи з графічним зображенням результатів моделювання. Крім всього іншого вони блискуче ілюстрували чутливість поведінки розв’язків рівняння до початкових умов. На жаль, тоді ніхто з учасників семінару не зосередився на узагальненні цих результатів моделювання. Важливим етапом в розвитку динаміки нелінійних систем були роботи В. О. Кононенка, присвячені дослідженню коливальних процесів в системах з обмеженим збудженням.

Можливості одержання нових знань про поведінку складних систем з допомогою комп’ютерного моделювання широко використовувалися в роботах В. В. Мелешка та його учнів. Розроблені алгоритми дозволили одержати принципові результати в динаміці вихрових структур [5, 6] та в теорії хаотичної адвекції [7].

Новітні тенденції в механіці, що сформулювалися на основі широкого використання можливо-

стей комп’ютерної техніки, оперативно включаються в навчальні програми. Досить змістовну систематизацію сучасних уявлень про особливості теорії динамічних систем та явище детермінованого хаосу приведено в роботі [9].

Навіть прості приклади використання комп’ютера вказують на суттєві ідеологічні проблеми. Оскільки розрахунки завжди ведуться зі скінченим числом значущих цифр, зовсім по іншому виглядають певні математичні твердження, що по суті формуються на основі теорії нескінченно малих (великих) величин. Міркування, що певною мірою висвітлюють важливі аспекти застосування комп’ютерного моделювання приведено в книзі В. І. Арнольда [10]. Перш за все, вказано на точку зору Я. Б. Зельдовіча відносно принципів труднощів переходу від використання класичного аналізу на основі поняття нескінченно малої величини до використання скінчених різниць. При цьому перегляду вимагають навіть такі фундаментальні поняття, як поняття єдиності розв’язку диференціального рівняння.

Аналіз основних співвідношень механіки, що побудовані на заміні похідних скінченими різницями породжує дуже важливий наслідок. При такій заміні навіть дещо підміняється основне фізичне співвідношення – рівняння стану. В задачах механіки в’язкої рідини поряд з фізичною в’язкістю з’являються решіткова та вихрова в’язкість. Якщо в диференціальних рівняннях математичної моделі асимптотика за просторовими змінними та часом узгоджені при використанні поняття похідної, то в різницевих схемах особливу увагу слід приділяти узгодженню “кроків” по простору та часу. Без такого узгодження обчислювальні процедури стають нестійкими і результати обчислень втрачають фізичний смисл [11]. Принципові труднощі виникають також при формулюванні граничних умов в рамках різних схем дискретизації рівнянь (наприклад, моделювання крупних вихорів, LES).

Практичні потреби розв’язання складних інженерних проблем механіки та можливості використання комп’ютерів для цього стимулювали розробку широкого спектру програмних комплексів для моделювання задач механіки. Як характерні приклади можна відзначити відомі комерційні (дуже дорогі) комплекси ANSYS, FLUENT. Співдружність математиків та механіків розвиває також комплекси з вільним доступом, які також досить широко використовуються. З допомогою таких програмних комплексів та сучасних потужних суперкомп’ютерів вдається успішно розв’язувати надзвичайно складні задачі. При цьому заміна фізичного експерименту комп’ютерним приносить значний виграв, як

економічний, так і виграш в часі реалізації проекту. Так, фірма Боїнг при представленні нового літака 787 моделі вказала, що при його створенні проведено всього 11 великомасштабних випробувань в аеродинамічних трубах. В той же час, при створенні попередньої моделі треба було виконати 77 таких випробувань. Така значна різниця досягнута за рахунок широкого використання комп'ютерного експерименту.

Однак, оцінюючи визначні досягнення в використанні комп'ютера при розв'язанні складних задач, слід звертати увагу і на певні проблеми. Накопичений досвід комп'ютерного моделювання свідчить про необхідність обережного підходу до оцінки його результатів. Досить чітко проблема сформульована в назві одного з розділів монографії [1]: Reliability without Truth (надійність без адекватності). Саме ця обставина стимулює дуже активну роботу по створенню стандартів для тестування результатів комп'ютерного моделювання. Лідуючі позиції тут належать американцям. Практично всі державні установи, що фінансують наукові дослідження створили свої нормативні документи, що регламентують таке тестування. Декілька стандартів розроблено і Американським товариством інженерів-механіків. Один із них (ASME V&V 20 2009), визнаний як державний стандарт США, на 85 сторінках регламентує процедуру оцінки результатів моделювання в механіці рідини та в дослідженні процесів теплопередачі. Це було б цікаво і корисно впроваджувати подібні процедури для наших українських досліджень з використанням комп'ютерного моделювання.

Розвиток комп'ютерної техніки зараз дійсно суттєво впливає на саму постановку задач механіки. Побіжний перегляд каталогу бібліотеки одного з провідних західних університетів вказує на видання більше 15 наукових журналів механічного профілю, назва яких починається зі слів COMPUTER, COMPUTING, COMPUTATIONAL. Постійно зростає потужність обчислювальних машин. Останнє, відоме автору, повідомлення про суперкомп'ютер, яке відноситься по часу до початку 2013 року, вказує на можливості системи Titan виконати 20 квадрильйонів операцій в секунду. Детальний опис системи можна знайти в англійському розділі Вікіпедії. Здається, що такі можливості знімають будь-які обмеження на фантазію при постановці задач.

Однак нові можливості для дослідника дають підставу і для формування нових вимог до якості наукової роботи. В. І. Арнольд в одній із робіт цитував висловлювання Ф. Клейна про "тонку отруту математичної освіти". При цьому малася на увазі можливість заповнювати наукову статтю

великою кількістю формул без змістовного аналізу фізичної сторони проблеми. Зараз можна говорити про не менш небезпечну отруту комп'ютерної освіти. Все частіше в наукових виданнях можна зустріти роботи з неймовірною кількістю графічного або числового матеріалу без глибокого осмислення одержаних залежностей. Стає незрозумілим, до якої дисципліни слід віднести таку роботу. Зверненням до читача типу "Дивись і побачиш" не можна користуватися в науковій роботі. Для нього особливу цінність має власна оцінка автором своїх результатів.

Список використаних джерел

1. *Winsberg E. B.* Science in the Age of Computer Simulation. University of Chicago Press. – 2010. – 152 p.
2. *Light J. S.* When computers were women // *Technology and Culture*. – 1999. – V. 40. – No 3. – P. 455-483.
3. *Enrico Fermi Collected Papers*. V. 2. The university of Chicago. – 1965. – P. 977-988. <http://www.cs.princeton.edu/courses/archive/fall09/cs323/papers/fpu55.pdf>
4. *Shchur L. N.* Computational physics and testing theoretical predictions // *Phys. Usp.* – 2012. – V. 55. – No 7. – P. 733-738.
5. *Meleshko V. V.* Coaxial axisymmetric vortex rings: 150 years after Helmholtz // *Theoretical and computational Fluid Dynamics*. – 2010. – V. 24. – Issue 1. – P. 403-431.
6. *Meleshko V. V., Konstantinov M. Yu.* Dynamics of the vortex structures. – Kiev: Naukova Dumka. – 1983. – 282 p. (in Russian).
7. *Meleshko V. V., Peters G. W. M.* Periodic points for two dimensional Stokes flow in rectangular cavity // *Physics Letters A*. – 1996. – V. 216. – P. 87-96.
8. *Vorovich I. I., Mikhailov G. K., Mishkis A. D., Yudovich V. I.* The 3-rd All-Union congress on theoretical and applied mechanics // *Uspekhi Matematicheskikh Nauk*. – 1969. – V. 24. – P. 201-219. (in Russian).
9. *Grinchenko V. T., Matsipura V. T., Snarskii A. A.* Introduction to nonlinear dynamics. Chaos and fractals. – Kiev: Naukova Dumka. – 264 p. (in Russian).
10. *Courant R., Friedrichs K., Lewy H.* On difference equations of mathematical physics // *Uspekhi Matematicheskikh Nauk*. – 1941. – No 8. – P. 125-160.

Надійшла до редколегії 20.05.13