

**О.М. Хімич, В.І. Мова, О.О. Ніколайчук,
О.В. Попов, Т.В. Чистякова, В.Г. Тульчинський**

Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України,
просп. Академіка Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна,
+380 44 526 1196, +380 44 526 4178, khimich505@gmail.com

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ ПАРАЛЕЛЬНИЙ КОМП'ЮТЕР НА ПРОЦЕСОРАХ *INTEL XEON PHI* НОВОГО ПОКОЛІННЯ



Вступ. Математичне моделювання з великими обсягами даних на сьогодні є актуальною інноваційною проблемою в різних сферах людської діяльності. Для їх ефективного комп'ютерного дослідження потрібно використовувати потужні комп'ютери та високопродуктивне програмне забезпечення.

Проблематика. Моделі процесів, які досліджуються на сучасних комп'ютерах, мають наближені дані, їх математичні властивості апріорі невідомі. Проте наявне програмне забезпечення не враховує цього. Сучасні паралельні комп'ютери потребують великих вкладень на виготовлення та використання.

Мета. Розробити інтелектуальний персональний комп'ютер на процесорах нового покоління *Intel Xeon Phi* та інтелектуальне програмне забезпечення для автоматичного дослідження та розв'язування основних класів задач обчислювальної математики з наближеними даними.

Матеріали й методи. Застосовано концепцію та методи інтелектуалізації паралельних комп'ютерів сімейства Інпарком, які розробляються Інститутом кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України та Державним підприємством «Електронмаш».

Результати. Експериментальний зразок — інтелектуальний паралельний комп'ютер Інпарком_хр з процесором *Intel Xeon Phi 7210*, який реалізує обчислення (до 3,5 Тфлопс) у форматі одного вузла. Інтелектуальне програмне забезпечення для автоматичного дослідження та розв'язування задач обчислювальної математики.

Висновки. Інпарком_хр гарантує достовірність комп'ютерних розв'язків задач, звільняє користувачів від створення паралельних алгоритмів та програм. Комп'ютер орієнтовано переважно на індивідуальне використання, тим самим піднімаючи ресурс персонального комп'ютерінга для науково-технічних розрахунків.

Ключові слова: математичне моделювання, паралельний комп'ютер, процесор *Intel Xeon Phi*, обчислювальна математика, наближені дані.

Математичне моделювання з великими обсягами даних є актуальною інноваційною проблемою в різних сферах людської діяльності. Дуже часто завдяки чисельним експериментам досліджуються такі характеристики об'єктів та явищ, які неможливо встановити теоретично або натурними експериментами. На сьогодні суттєве поліпшення якості математичного моделювання в різних галузях науки та інженерії можливе лише при викорис-

танні принципово нових тривимірних моделей, переходу від комп'ютерного моделювання окремих вузлів та агрегатів до розрахунку та оптимізації виробу в цілому. Очевидно, що розгляд проблем в такій постановці приводить до дискретних математичних моделей надвеликої розмірності, для комп'ютерної реалізації яких не вистачає обчислювальних ресурсів сучасних персональних комп'ютерів та робочих станцій.

Впродовж кількох десятків років значне підвищення продуктивності комп'ютерів досягалося за рахунок збільшення кількості

процесорів, зростання їх тактової частоти та розпаралелення обчислень. За останні 10–12 років відбулось суттєве зростання продуктивності таких обчислювальних систем з паралельною організацією обчислень. Але на сьогодні підвищення продуктивності за рахунок зростання тактової частоти процесорів вже досягло своєї межі.

В останні роки набули поширення багатоядерні комп'ютери з використанням співпроцесорів-прискорювачів різної архітектури. Серед них досить потужними є комп'ютери гібридної архітектури, які поєднують *MIMD*- і *SIMD*-архітектуру. При розв'язуванні задач на цих комп'ютерах обчислення розпаралелюються між багатоядерними центральними процесорами з використанням графічних процесорів, які ефективно виконують багатопотокові однотипні обчислення великих обсягів.

Суперкомп'ютери гібридної архітектури до недавня займали чільні позиції в світовому рейтингу найпродуктивніших комп'ютерів TOP 500 [1]. Проте при розв'язуванні складних обчислювальних задач на цих потужних комп'ютерах виникають досить суттєві труднощі, пов'язані як з використанням особливостей двох принципово різних архітектур, комунікаційними втратами міжпроцесорних зв'язків, так і через застосування різних програмних засобів розпаралелення — *MPI* та *CUDA*. Без урахування цих особливостей неможливо ефективно використати обчислювальні можливості гібридних комп'ютерів.

Наприкінці 2012 року компанія *Intel* запропонувала нове рішення підвищення продуктивності комп'ютерів *Intel* — процесор *Intel Xeon Phi* першого покоління з архітектурою *Intel MIC* (*Intel® Many Integrated Core Architecture*), який використовується як співпроцесор, а влітку 2016 року було анонсовано багатоядерний процесор *Intel Xeon Phi* другого покоління з архітектурою *Knights Landing*, який використовується як центральний процесор. В останньому рейтингу TOP500 (за листопад 2017 р.) друге місце займає процесор

Intel Xeon Phi першого покоління, а сьоме дев'яте місце займають ці ж процесори другого покоління.

Процесори другого покоління *Intel Xeon Phi* призначені для швидкого розв'язування практичних задач з надвеликими обсягами даних. Це забезпечується високою швидкістю розпаралелених обчислень на спільній пам'яті багатоядерного процесора та відсутністю комунікаційних втрат при цьому, а також завдяки можливості використання великого обсягу оперативної пам'яті різних рівнів. Проте ефективно використати потенціал обчислювальних ресурсів комп'ютерів з процесорами *Intel Xeon Phi* можна лише при застосуванні прикладного програмного забезпечення, яке враховує нові архітектурні можливості процесорів.

Ще одним важливим чинником ефективного виконання комп'ютерних обчислень є точність розв'язків прикладних задач. Математичні моделі, що описують прикладні задачі, завжди містять похибки в початкових даних. Отже, їх математичні властивості априорі невідомі. В межах заданого рівня похибки задачі можуть бути як сумісні, так і несумісні, коректно або некоректно поставлені, погано чи добре обумовлені. В свою чергу, математичні властивості комп'ютерної задачі, яку зрештою і доводиться розв'язувати, можуть суттєво відрізнитися від математичних властивостей дискретної та математичної моделей через заокруглення обчислень та даних в комп'ютері [2–9].

Проте наявне високопродуктивне прикладне програмне забезпечення здебільшого не враховує наблизений характер вихідних даних. Отже, аналіз достовірності одержуваних комп'ютерних результатів покладається на користувачів.

Необхідно також відмітити, що багато користувачів сучасного прикладного програмного забезпечення, наприклад, проблемно-орієнтованих пакетів прикладних програм типу *ANSYS*, *NASTRAN* [10–12], вказують на їх невисоку інтегрованість до нових комп'ютерних архітектур, закритість, величезні обсяги доку-

ментації. Відзначають, що в них не враховано наближений характер даних задачі, не здійснюється аналіз достовірності отриманих результатів. Самостійне вирішення цих проблем потребує від користувачів додаткових затрат інтелектуальних зусиль та часу.

Сучасні високопродуктивні комп'ютерні системи, на виготовлення яких затрачаються величезні асигнування, потребують потужного живлення, систем кондиціонування, мають достатньо високий рівень акустичного шуму і, зважаючи на це, розміщуються в окремих спеціальних приміщеннях. Такі значні капіталовкладення перешкоджають їх широкому застосуванню.

Одним з перспективних напрямків розвитку високопродуктивних обчислень автори вбачають у створенні та використанні інтелектуальних комп'ютерів на основі новітніх обчислювальних засобів (графічних прискорювачів або останніх моделей процесорів *Intel Xeon Phi*), які здатні реалізувати обчислення (до 3 Тфлопс) у форматі персонального комп'ютера, а також у застосуванні сучасних технологій зберігання значних обсягів інформації, інтелектуалізації процесів дослідження та розв'язування задач з наближеними даними.

У 2015 році при виконанні інноваційного науково-технічного проекту «Розробка апаратно-програмного комплексу на базі інтелектуального персонального суперкомп'ютера гібридної архітектури для математичного моделювання в оборонній галузі, галузях машинобудування та будівництва» Інститутом кібернетики ім. В.М. Глушкова НАНУ спільно з Державним підприємством (ДП) «Електронмаш» було розроблено концепцію та створено експериментальний зразок одноузлового восьмиядерного інтелектуального персонального суперкомп'ютера Інпарком_рг з новітніми графічними процесорами *NVIDIA Tesla K40* для розв'язування науково-технічних задач [13].

У 2017 році, в рамках виконання інноваційного науково-технічного проекту «Розробка інтелектуального паралельного комп'ютера на

процесорах нового покоління *Intel Xeon Phi* для задач науки та інженерії», Інститутом кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України спільно з ДП «Електронмаш» розроблено архітектуру та створено експериментальний зразок одноузлового інтелектуального персонального комп'ютера Інпарком_хр на багатоядерному процесорі другого покоління *Intel Xeon Phi* [14].

Ці інноваційні розробки розвивають концептуальні принципи інтелектуалізації паралельних комп'ютерів різної архітектури сімейства Інпарком [15, 16], які розробляються протягом останніх десяти років Інститутом кібернетики імені В.М. Глушкова та ДП «Електронмаш».

Концептуально інтелектуальний комп'ютер для розв'язування науково-технічних задач — це знанняорієнтований паралельний комп'ютер, структура і архітектура якого, а також операційне середовище підтримують інтелектуальне програмне забезпечення для автоматичного дослідження та розв'язування задач обчислювальної математики з наближеними даними.

Основними перевагами інтелектуального паралельного комп'ютера є:

- ✦ звільнення користувачів від роботи з дослідження задач, створення паралельних алгоритмів та програм, що скорочує час постановки й розв'язування задач науки та інженерії;
- ✦ постановка на мові предметної області задачі з наближеними даними;
- ✦ забезпечення вимог щодо точності обчислень (програмно або апаратно) відповідно до властивостей комп'ютерної моделі задачі на основі багаторозрядної арифметики, отримання комп'ютерного результату з оцінкою достовірності.

ПЕРСОНАЛЬНИЙ КОМП'ЮТЕР НА ПРОЦЕСОРІ INTEL XEON PHI ДРУГОГО ПОКОЛІННЯ

Відповідно до концепції створення інтелектуального багатоядерного персонального

комп'ютера Інпарком_хр виготовлено експериментальний зразок одновузлового інтелектуального паралельного персонального комп'ютера Інпарком_хр з процесором *Intel Xeon Phi 7210* (рис. 1) [14].

Технічні характеристики та стандартні програмні засоби персонального комп'ютера Інпарком_хр:

- ✦ процесор *Intel Xeon Phi 7210*—32 — «плитки», з'єднані двомірною решіткою, 64 ядра, 16 Гб «швидкої» пам'яті (*MCDRAM*). Кожна плитка містить 2 ядра, 2×2 *VPU* (векторні процесори), кеш команд і даних першого рівня — 32 Кб, кеш другого рівня — 1 Мб;
- ✦ основна операційна система — *Linux* чи *Windows*;
- ✦ оперативна пам'ять — 192 Гбайт, накопичувач *SSD* — 240 Гбайт, пікова (теоретична) продуктивність (*DP*) — 2,663 Тфлопс, максимальна продуктивність (*DP*, тест *Linpack*) — 1,793 ;
- ✦ компілятори *Intel* — *C*, *C++*, *Fortran*;
- ✦ системи розпаралелення *MPI*, *OpenMP*;
- ✦ бібліотека *Intel Math Kernel (MKL)*;
- ✦ інтелектуальне програмне забезпечення для дослідження та розв'язування задач основних класів обчислювальної математики.

Нижче більш детально описано складові частини персонального комп'ютера Інпарком_хр.

Архітектурні особливості процесора *Intel Xeon Phi* другого покоління

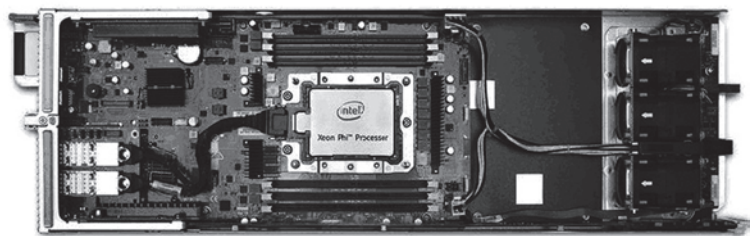
Процесор нового покоління *Intel Xeon Phi*, який використовується в персональному паралельному комп'ютері Інпарком_хр, — це перший завантажувальний хост-процесор компанії *Intel*, який підтримує масовий паралелізм і векторизацію високопродуктивних обчислювальних додатків великих обсягів. В ньому вперше інтегровані пам'ять і технології комутації. Тому, на відміну від існуючих процесорів, які використовуються як співпроцесори, та *GPU*-прискорювачів, його функціональні можливості не обмежені комунікаційними затримками.

Завдяки відсутності таких обмежень новітні процесори *Intel Xeon Phi* забезпечують високу ефективність і масштабованість, здатні працювати в різноманітних конфігураціях. Цей процесор є третім поколінням процесорів на базі архітектури *Intel MIC* та другим у поколінні *Xeon Phi (Intel Xeon Phi x200 Family)* під кодовою назвою *Knights Landing* [17]. Його структура та архітектура наведені на рис. 2.

Процесор *Knights Landing* має у своєму складі до 36 так званих «пліток» (*tiles*) із топологією зв'язків між ними — «двовимірна решітка». Кожна «плитка» — це два ядра *Intel Atom Airmont* (14 НМ версія *Silvermont*) з двома *VPU*



Рис. 1. Експериментальний зразок інтелектуального персонального комп'ютера Інпарком_хр



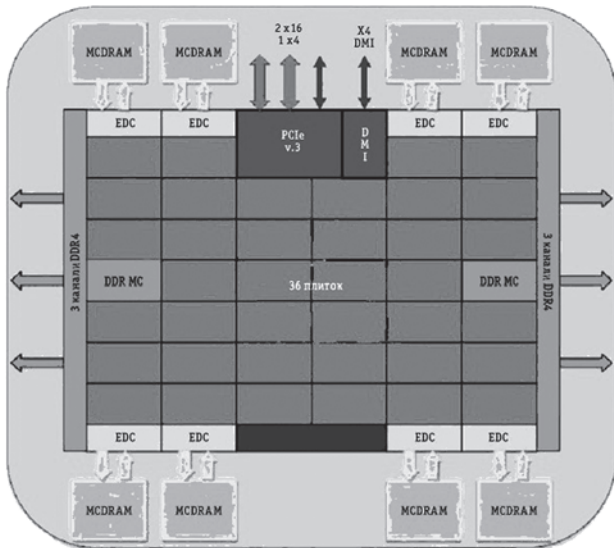


Рис. 2. Архітектура процесора *Knights Landing*

(векторними процесорними пристроями) — AVX512 для роботи з числами у форматі з плаваючою комою подвійної точності.

Кожне ядро має кеші команд і даних по 32 Кбайт з додатковим кешем другого рівня місткістю 1 Мбайт, що розділяється між ядрами «плитки». У мікросхемі забезпечується когерентність кешу другого рівня для всіх ядер із загальною місткістю до 36 Мбайт. Одне таке ядро розраховано на одночасне використання чотирьох ниток, або тредів (потоки команд, що виконуються одночасно). До складу процесора входять також вісім модулів «ближньої» пам'яті MCDRAM (*Multi-Channel DRAM*) загальною місткістю 16 Гбайт та пропускною здатністю більше 400 Гбайт/с, що мають доступ до «плитки».

Крім того, є ще можливість для звернення до «далекої» пам'яті DDR4 2400 місткістю до 384 Гбайт і пропускною здатністю більше 90 Гбайт/с. «Ближня» пам'ять може працювати в трьох різних режимах: як кеш «далекої» пам'яті (*Cache Mode*); у складі єдиного адресного простору з «далекою» пам'яттю (*Flat Mode*); у комбінованому режимі (*Hybrid Mode*), коли частина MCDRAM використовується як кеш, а частина — в єдиному адресному просторі з оперативною пам'яттю DDR4.

Таким чином, архітектурні можливості процесора *Intel Xeon Phi* (використання оперативної пам'яті різних рівнів) розраховано на ефективне виконання задач великих розмірів.

Особливості системного програмного забезпечення персонального комп'ютера *Інпарк_хр*

Системне програмне забезпечення (ПЗ) одноузлового багатоядерного комп'ютера *Інпарк_хр* враховує декілька режимів використання:

- + робота користувача безпосередньо на комп'ютері;
- + віддалений робочий стіл;
- + доступ до комп'ютера в мережі Інтернет.

З метою забезпечення ефективного використання специфіки прикладних програмних засобів для моделювання процесів та явищ в різних предметних областях, які здебільшого функціонують в операційній системі *Windows*, а також для їх взаємодії з іншими програмними засобами, що працюють в операційній системі *Linux*, передбачено дві архітектури системного програмного забезпечення:

- + на основі ОС *Windows Server 2016*;
- + на основі ОС *Linux*.

Отже, користувачі цього комп'ютера мають можливість самостійно обирати операційне середовище залежно від специфіки прикладного ПЗ, що ними використовується.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ *INPARSOFT_XP*

Для вирішення проблем математичного моделювання процесів і явищ, які виникають в наукових та інженерних дослідженнях, а також підвищення продуктивності праці дослідників, створено інтелектуальне програмне забезпечення *Inparsoft_xp* для дослідження та розв'язування основних класів задач обчислювальної математики (системи лінійних алгебраїчних рівнянь; алгебраїчна проблема власних значень; нелінійні рівняння та системи; звичайні диференціальні рівняння і систе-

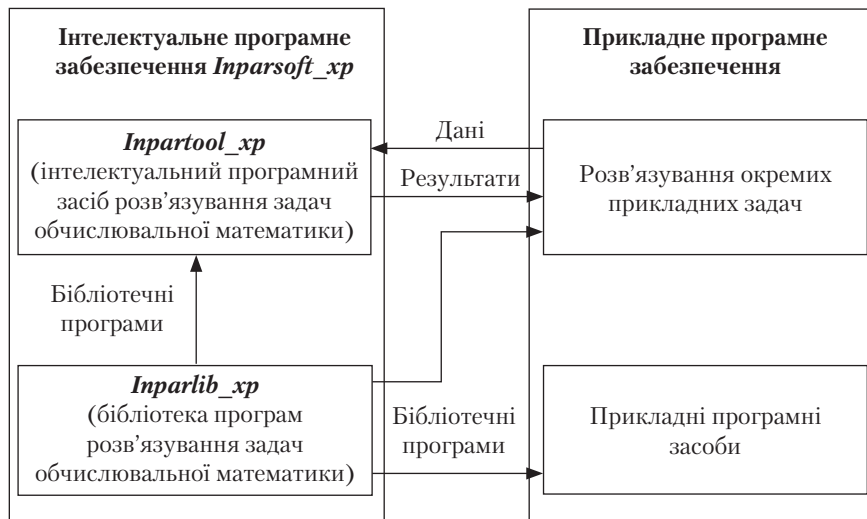


Рис. 3. Архітектура програмного забезпечення *Inparsoft_xp*

ми) на паралельних комп'ютерах з новітніми процесорами *Intel Xeon Phi*, яке легко адаптується до різних комп'ютерних архітектур та операційних систем (рис. 3).

Структурно *Inparsoft_xp* складається з інтелектуального програмного засобу (ІПЗ) *Inpartool_xp* для автоматичного дослідження та розв'язування задач обчислювальної математики з наближеними даними, а також бібліотеки паралельних програм *Inparlib_xp*, що реалізують дослідження та розв'язування визначених класів задач конкретними високопродуктивними методами [15].

З точки зору користувача *Inpartool_xp* — це програмний інструментарій для автоматичного дослідження та розв'язування задач обчислювальної математики з наближеними даними з гарантією достовірності комп'ютерних результатів.

Функціонально *Inpartool_xp* забезпечує виконання таких етапів робіт [15, 16]:

- ✦ постановка в комп'ютері задачі з наближеними даними на мові предметної області;
- ✦ природні для користувача форми введення вихідних даних задачі;
- ✦ автоматизація процесів комп'ютерного дослідження математичних властивостей задачі, вибору алгоритму й синтезу програми

розв'язування на основі знань про предметну область та про задачу, що розв'язується;

- ✦ забезпечення розв'язування задач з підвищеною розрядністю;
- ✦ розв'язування задачі з оцінкою достовірності одержуваних комп'ютерних результатів при ефективному використанні архітектури новітнього процесора *Intel Xeon Phi*;
- ✦ пояснення процесу дослідження та розв'язування задачі;
- ✦ реалізація принципу «прихованого паралелізму».

Реалізація «прихованого паралелізму» передбачає автоматичне формування ефективної конфігурації (топології) комп'ютера та розпаралелення обчислень на оптимальній кількості багатоядерних процесорів *Intel Xeon Phi* [15].

Паралельні програми бібліотеки *Inparlib_xp* забезпечують розв'язування задач визначених класів конкретними алгоритмами. Кожна програма в ході обчислювального процесу перевіряє відповідність вибраного алгоритму математичним властивостям комп'ютерної моделі задачі, формує ефективну конфігурацію комп'ютера з процесорів, що використовуються, виконує початкову розсилку даних, розв'язує задачу й оцінює достовірність отриманого розв'язку або повідомляє причину від-

мови в розв'язуванні задачі обраним алгоритмом [18].

З погляду кінцевого користувача програми бібліотеки є повторно використовуваними компонентами (reuse-компонентами) при розв'язуванні прикладних задач, де задачі обчислювальної математики є проміжним або завершальним етапом.

Програмну реалізацію інтелектуального забезпечення *Inparsoft_xp* здійснено у вигляді окремих компонентів, що спрощує його адаптацію до обчислювального середовища користувача. Для різної архітектури паралельних комп'ютерів, віддаленого і локального доступу, а також різних операційних систем (*Linux*, *Windows*) створено ідентичний інтелектуальний інтерфейс та легко підключаються необхідні програми.

Враховуючи архітектурні та технологічні особливості процесора *Intel Xeon Phi*, при створенні інтелектуального програмного забезпечення *Inparsoft_xp* було застосовано такі способи підвищення ефективності обчислень: розпаралелення та векторизація обчислень; використання кеш-пам'яті різних рівнів [16, 19].

Розпаралелення обчислень на розподіленій пам'яті комп'ютера з декількома хост-процесорами *Intel Xeon Phi* реалізовується за допомогою системи *MPI* [20], а між ядрами *CPU* із спільною пам'яттю — за допомогою системи *OpenMP* [21].

Одним з важливих чинників прискорення обчислень на комп'ютері з хост-процесором *Intel Xeon Phi* є векторизація. В архітектурі зазначеного процесора другого покоління передбачено використання системи команд *AVX512* з підтримкою векторних регістрів. Крім того, в системі *OpenMP* версії 4.0 [21] також є функціональні можливості для реалізації векторизації обчислень на цих процесорах.

Для виконання матрично-векторних операцій можна використовувати відповідні функції версії бібліотеки програм *Intel MKL (Math Kernel Library)* [22], яка адаптована компанією *Intel* для використання на новітніх процесорах

Intel Xeon Phi. Нижче наведено короткий опис виконання обчислення на процесорі *Intel Xeon Phi* за допомогою програм з *Intel MKL*.

При першому виклику будь-якої функції бібліотеки відбувається перевірка апаратних можливостей комп'ютера та обирається варіант коду, який дає максимально ефективне використання паралелізму *SIMD*-команд і регістрів, а також визначається стратегія роботи з надшвидкою пам'яттю *MCDRAM*. Причому функції *Intel MKL* коректно працюють при одночасному виклику з декількох потоків. Таким чином, використання відповідних функцій з бібліотеки програм *Intel MKL* для реалізації математичних операцій над матрицями та векторами забезпечує ефективне використання пам'яті під час обчислень.

ПРИКЛАДНЕ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА КОМП'ЮТЕРІ ІНПАРКОМ_XP

За весь час використання комп'ютерів для розв'язування широкого кола різноманітних прикладних задач створено значну кількість програмних засобів (від окремих програм до програмних комплексів). Переважно ці програмні засоби призначено для комп'ютерів традиційної архітектури (які не використовують паралельні обчислення), тому їх застосування на комп'ютерах з паралельною організацією обчислень вимагає суттєвої модернізації, що, в свою чергу, потребує значних інтелектуальних зусиль розробників та часу.

Розглянемо деякі прикладні задачі, які було розв'язано на Інпарком_xp з новітнім хост-процесором *Intel Xeon Phi* — 1 вузол, *Xeon Phi 7210* (64 ядра, 16 Gb *MCDRAM*), 192 Gb *RAM*, а також на персональному комп'ютері гібридної архітектури Інпарком_pg — 1 вузол, два *Xeon 5606* (4 ядра), 24 Gb *RAM*, 2 *GPU Tesla K40*.

Математичне моделювання міцності будівельних конструкцій

Задачі розрахунку міцності конструкцій та споруд виникають у багатьох галузях народногосподарства, зокрема в будівництві, різних

галузях машинобудування тощо. Зростаючі вимоги до якості проектних рішень, а також використання нових конструктивних матеріалів пов'язані з виникненням якісно нових задач великих розмірів. Для їх комп'ютерного моделювання з'являється потреба в нових методах, пов'язаних з побудовою та дослідженнями коректних комп'ютерних моделей, які адекватно відображають реальну роботу конструкцій.

Свого часу, на базі існуючого програмного комплексу ЛІРА [23], призначеного для розв'язування задач розрахунку міцності будівельних конструкцій на персональних комп'ютерах, було розроблено програмний комплекс ЛІРА-кластер для кластерних комплексів та комп'ютерів гібридної архітектури [24]. Але ЛІРА-кластер широко використовує мережеві технології, а основний режим роботи користувача — режим віддаленого доступу, який передбачає копіювання надвеликих обсягів даних на кластерний комплекс та у зворотному напрямку. До того ж такий режим не забезпечує конфіденційності розрахунків.

Новий потужний комп'ютер Інпарком_xr (у форматі персонального комп'ютера) дозволяє використовувати високопродуктивні обчислення локально. Зважаючи на те, що стандартний програмний комплекс ЛІРА створено для використання в операційному середовищі Windows, на комп'ютері Інпарком_xr передбачено можливість використовувати, крім Linux, також і операційне середовище Windows.

При моделюванні процесів за допомогою програмного комплексу ЛІРА виникають задачі лінійної алгебри, у яких порядок матриць становить від 100 000 до десятків мільйонів. Очевидно, що для їх розв'язування необхідні величезні комп'ютерні ресурси. Завдяки потужності процесора Intel Xeon Phi та ефективних паралельних програмах з бібліотеки *Inparlib_xr* при розв'язуванні таких задач на Інпарком_xr отримано скорочення часу розв'язування в 20 і більше разів порівняно з часом їх розв'язування на однопроцесорному комп'ютері.

Математичне моделювання стану та ресурсу зварних конструкцій

Діагностика технічного стану зварних конструкцій, що працюють при істотних зовнішніх навантаженнях та в умовах агресивних середовищ, є ключовим аспектом гарантування безпеки їх експлуатації. Галузі застосування таких конструкцій (атомна й тепла енергетика, трубопровідний транспорт) передбачають високі вимоги до їх довгострокової надійності. Важливим є якомога точніше визначення граничного стану, виходячи з відомого ступеня експлуатаційного пошкодження, до якого, передусім, слід віднести локальні поверхневі корозійні втрати металу.

Для розв'язування задач, пов'язаних з термомеханічними процесами у зварюванні та при експлуатації зварних конструкцій, в Інституті електрозварювання імені Е.О. Патона НАН України розроблено програмний пакет *WeldPredictions*, який реалізовує послідовну модель обчислень і використовується на персональних комп'ютерах. Але для розрахунків сучасних тривимірних моделей потрібні значні обсяги обчислювальних ресурсів та часу — декілька діб неперервних обчислень на однопроцесорному комп'ютері. Тому доцільним є використання більш потужних комп'ютерів з паралельною організацією обчислень, зокрема, багатоядерного комп'ютера Інпарком_xr.

Розглянемо коротко одну з типових задач математичного моделювання процесів зварювання та споріднених технологій [25], а саме задачу чисельного аналізу напружено-деформованого стану трубопровідних елементів з урахуванням зародження, взаємодії та розвитку пор в'язкого руйнування. В загальному випадку механізм в'язкого руйнування проходить декількома послідовними етапами: зародження пор в'язкого руйнування при виробництві конструкції; збільшення розмірів пор при пластичній деформації, взаємодія та об'єднання пор в'язкого руйнування; зародження макродефекту й відповідне зниження несучої здатності як дефектної області, так і конструк-

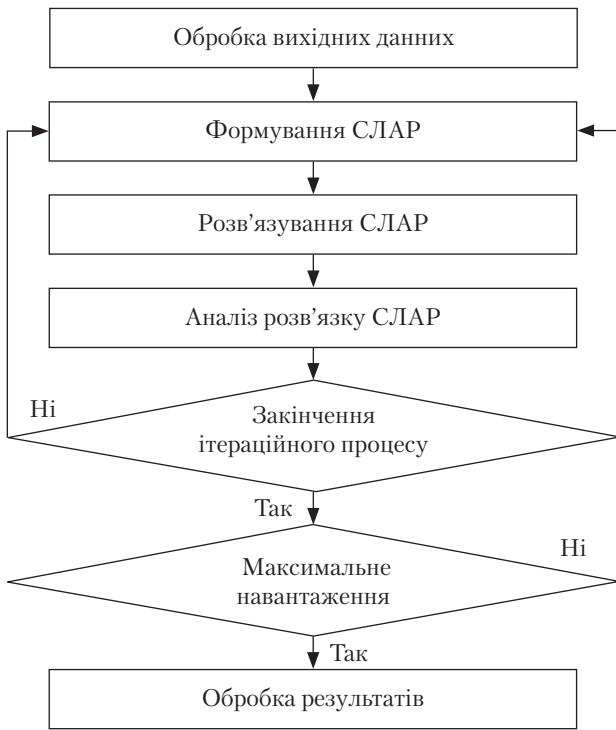


Рис. 4. Схема комп'ютерного аналізу напружено-деформованого стану зварних конструкцій

ції в цілому; розвиток макродефекту. Кожен з цих етапів має різну фізико-механічну природу й описується відповідною взаємопов'язаною моделлю.

На рис. 4 наведено технологічну схему розв'язування задач чисельного аналізу напружено-деформованого й граничного станів зварних конструкцій з урахуванням зародження, взаємодії та розвитку пор в'язкого руйнування.

Очевидно, що в цій технологічній схемі на кожній ітерації використовується розв'язуван-

ня систем лінійних алгебраїчних рівнянь великого порядку. Саме на цю задачу витрачається найбільше комп'ютерних ресурсів та часу. Крім того, оригінальний програмний пакет *WeldPredictions* працює в операційному середовищі *Windows*. Але задачі великих розмірів, які виникають, часто потребують обчислювальних ресурсів більших, ніж можна використати в зазначеній операційній системі (значно більше 4 Гбайт).

Тому пакет *WeldPredictions* було адаптовано до операційної системи *Linux* на Інпарком_хр та застосовано інтелектуальну програму для розв'язування СЛАР із стрічковою несиметричною матрицею паралельним алгоритмом методу Гауса на основі *LU*-розвинення з бібліотеки *Inparlib_xp*. Результати розв'язування СЛАР (в секундах) паралельними алгоритмами методу Гауса на різних комп'ютерних архітектурах наведено в таблиці.

З даних таблиці видно, що, порівняно з послідовною версією алгоритму, отримано прискорення в 33 рази на гібридному персональному комп'ютері (використовуючи два *GPU*) та в 35 разів – за паралельним алгоритмом на комп'ютері з новітніми *Intel Xeon Phi* процесорами (64 ядра).

Задача стійкості композитного матеріалу

У співпраці з Інститутом механіки імені С.П. Тимошенка НАН України було проведено математичне моделювання задачі тривимірної теорії стійкості шарувато-композитного матеріалу при стискуванні поверхневим навантаженням [26], яка зводиться до розв'язування часткової узагальненої алгебраїчної проблеми власних значень (АПВЗ) із стрічковою матрицею методом ітерацій на підпросторі [27]. Саме на розв'язування АПВЗ затрачається найбільше комп'ютерних ресурсів та часу. Отже, ефективність розв'язування всієї задачі значною мірою залежить від ефективного розв'язування АПВЗ. Тому було застосовано розроблені інтелектуальні програми, що реалізують паралельні алгоритми методу іте-

Часові характеристики розв'язування СЛАР із стрічковою матрицею

Порядок матриці	Напів-ширина стрічки	Послідовний алгоритм, с	Гібридний алгоритм на Інпарком_PG (два GPU), с	Паралельний алгоритм на Інпарком_хр, с
137 826	4448	1500	45	42,7

рацій на підпросторі, для стрічкових матриць на різних комп'ютерних архітектурах [28].

Задача розв'язувалася з такими вихідними даними: порядок матриць — 12282; напівширина стрічки матриці *A* — 6212 та матриці *B* — 71; обсяг пам'яті — 2 Гбайти.

Час розв'язування АПВЗ різними алгоритмами методу ітерацій на підпросторі на різних комп'ютерних архітектурах становив:

- ✦ послідовним алгоритмом — 22 хв;
- ✦ гібридним алгоритмом на Інпарком_pg: при використанні одного *GPU* — 0 хв 18 с, при використанні двох *GPU* — 0 хв 10 с;
- ✦ паралельним алгоритмом на Інпарком_xr з процесором *Intel Xeon Phi*, використовуючи 64 ядра, — 0 хв 7 с.

Отже, за гібридним алгоритмом розв'язування АПВЗ на гібридному персональному комп'ютері одержано прискорення у 18 і 33 рази (використовуючи один і два *GPU* відповідно), порівняно з послідовною версією алгоритму, тоді як за паралельним алгоритмом на комп'ютері з новітніми *Intel Xeon Phi* процесорами (64 ядра), одержано прискорення в 45 разів.

На основі обчислених власних значень було визначено величини критичних параметрів стійкості шарувато композитного матеріалу при стисканні поверхневим навантаженням.

В результаті виконання науково-технічного проекту «Розробка інтелектуального паралельного комп'ютера на процесорах нового покоління *Intel Xeon Phi* для задач науки та інженерії» в Інституті кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України розроблено одновузловий інтелектуальний паралельний комп'ютер Інпарком_xr на процесорах *Intel Xeon Phi* нового покоління для математичного моделювання в науці та інженерії.

Спільно з ДП «Електронмаш» створено експериментальний зразок цього багатоядерного комп'ютера з процесором *Intel Xeon Phi 7210* (64 ядра), додатковими 192 Гбайтами оперативної пам'яті та *SSD* накопичувачем обсягом 240 Гбайт.

Для забезпечення ефективного виконання математичного моделювання процесів та явищ в різних предметних галузях розроблено інтелектуальне алгоритмічно-програмне забезпечення *Inparsoft_xr* для автоматичного дослідження й розв'язування з оцінками достовірності результатів базових задач обчислювальної математики з наближеними даними. Крім того, з метою ефективного використання на Інпарком_xr програмного забезпечення *Inparsoft_xr* та його окремих компонентів здійснено модифікацію існуючого прикладного програмного забезпечення для математичного моделювання в галузях будівництва, тепломасопереносу, електрозварювання, стійкості конструкцій.

Створений інтелектуальний багатоядерний персональний комп'ютер Інпарком_xr реалізовує високопродуктивні обчислення (до 3,5 Тфлопс) у форматі одного вузла за рахунок новітніх апаратних рішень процесора *Intel Xeon Phi*, ущільнення обчислень, урахування багаторівневої структури пам'яті та інтелектуалізації процесів дослідження й розв'язування задач.

Експериментальні вирішення практичних задач на Інпарком_xr показали істотне підвищення продуктивності праці користувачів та гарантію достовірності результатів математичного моделювання в галузях науки та інженерії.

Паралельний комп'ютер Інпарком_xr буде застосовуватися для розв'язування спектру нагальних задач математичного моделювання, зокрема в таких галузях як машинобудування, ядерна енергетика, авіа- та суднобудування, оборонна галузь, промислове та цивільне будівництво, електрозварювання тощо.

Експериментальний зразок паралельного комп'ютера Інпарком_xr вже використовується на ДП «Електронмаш» для проведення наукових досліджень та інженерних розрахунків, зокрема задач аналізу міцності будівельних об'єктів, розрахунку фільтрації в багатокомпонентних середовищах, математичного мо-

делювання напружено-деформованого стану зварних конструкцій.

Завдяки нижчій вартості, меншим габаритним розмірам та енергоспоживанню розроблений персональний комп'ютер Інпарком_хр орієнтовано переважно на індивідуальне (локальне) використання, тим самим суттєво піднімаючи ресурс персонального комп'ютерінга для науково-технічних розрахунків.

Таке використання поза комп'ютерними мережами є актуальним для багатьох користувачів, наприклад, для автоматизації проектування в галузі будівництва, оборонній промисловості тощо, забезпечуючи конфіденційність розрахунків.

З іншого боку, існує можливість використання цього комп'ютера й у віддаленому доступі декількома користувачами одночасно.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. TOP 500. URL: <http://www.TOP500.org/> (дата звернення: 24.04 2018).
2. Wilkinson J.H. *Rounding Errors in Algebraic Processes*. London: H.M. Stat. Off, 1963. 161 с.
3. Уилкинсон Дж.Х., Райнш К. *Справочник алгоритмов на языке Алгол. Линейная алгебра*. Москва: Машиностроение, 1976. 389 с.
4. Воеводин В.В. *Ошибки округлений и устойчивость в прямых методах линейной алгебры*. Москва: Изд. ВЦ МГУ, 1969. 153 с.
5. Молчанов И.Н. *Машинные методы решения прикладных задач. Алгебра, приближение функций*. Київ: Наукова думка, 1987. 288 с.
6. Химич А.Н. Оценки возмущений для решения задачи наименьших квадратов. *Кибернетика и системный анализ*. 1996. № 3. С. 95–102.
7. Химич А.Н. Оценки полной погрешности решения систем линейных алгебраических уравнений для матриц произвольного ранга. *Компьютерная математика*. 2002. № 2. С. 41–49.
8. Химич А.Н., Войцеховский С.А., Брусникин В.Н. О достоверности линейных математических моделей с приближенно заданными исходными данными. *Математические машины и системы*. 2004. № 3. С. 54–62.
9. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулдер К. *Машинные методы математических вычислений*. Москва: Мир, 1980. 279 с.
10. Чесбро Г. *Открытые инновации. Создание прибыльных технологий*. Москва: Поколение, 2007. 336 с.
11. Тарнавский Г.А., Алиев А.В. Математическое моделирование: основные сегменты, их особенности и проблемы. *Вычислительные методы и программирование*. 2007. Т. 8. С. 297–310.
12. Ильин В.П. О некоторых проблемах «заоблачного» математического моделирования. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика*. 2014. Т. 3, № 1. С. 68–79.
13. Хімич О.М., Молчанов І.М., Мова В.І., Ніколайчук О.О., Попов О.В., Чистякова Т.В., Яковлев М.Ф., Тульчинський В.Г., Ющенко Р.А. Інтелектуальний персональний суперкомп'ютер для розв'язування науково-технічних задач. *Наука і інновації*. 2016. Т. 12, № 4, С. 17–31.
14. IntelXeon Phi. URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/processors/xeon-phi/> (дата звернення: 20.04 2018).
15. Химич А.Н., Молчанов И.Н., Мова В.И., Перевозчикова О.Л., Стрюченко В.А., Попов А.В., Чистякова Т.В., Яковлев М.Ф., Герасимова Т.А., Зубатенко В.С., Громовский А.В., Нестеренко А.Н., Поляно В.В., Рудич О.В., Ющенко Р.А., Николайчук А.А., Городецкий А.С., Слободян Я.Е., Гераймович Ю.Д. *Численное программное обеспечение МІМД—компьютера Інпарком*. Киев: Наукова думка, 2007. 222 с.
16. Хімич О.М., Попов О.В., Чистякова Т.В., Рудич О.В., Чистяков О.В. Інтелектуальна система для дослідження та розв'язування задач на власні значення на паралельних комп'ютерах з процесорами Intel Xeon Phi. *Науково-теоретичний журнал «Штучний інтелект»*. 2017. № 2. С. 119–127.
17. HC27.25.710—Knights—Landing—Sodani—Intel_copy.pdf. URL: <https://www.hotchips.org/> (дата звернення: 22.04 2018).
18. Химич А.Н., Молчанов И.Н., Попов А.В., Чистякова Т.В., Яковлев М.Ф. *Параллельные алгоритмы решения задач вычислительной математики*. Киев: Наукова думка, 2008. 247 с.
19. Чистяков О.В. Про особливості розв'язання алгебраїчної проблеми власних значень на паралельних комп'ютерах з процесорами Intel Xeon Phi. *Матеріали Міжнародної наукової конференції «Сучасна інформатика: проблеми, досягнення та перспективи розвитку», присвяченої 60-річчю заснування Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, (13–15 грудня 2017 р., м. Київ)*, Київ, 2017. С. 166–167.

20. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. *Параллельные вычисления*. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2002. 608 с.
21. OpenMP. V. 4.0. URL: <http://www.openmp.org/mp-documents/OpenMP4.0.pdf/> (дата звернення: 24.04 2017).
22. Intel Math Kernel Library (MKL). Reference Manual URL: <https://software.intel.com/en-us/articles/mkl-reference-manual/> (дата звернення: 20.04 2017).
23. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. *Компьютерные модели конструкций*. Киев: ФАКТ, 2007. 394 с.
24. Химич А.Н., Полянюк В.В., Попов А.В., Рудич О.В. Решение задач расчета прочности конструкций на MIMD-компьютере. *Искусственный интеллект*. 2008. № 3. С. 750–760.
25. Великоиваненко Е.А., Миленин А.С., Попов А.В., Сидорук В.А., Химич А.Н. Методы и технологии параллельных вычислений для математического моделирования напряженно-деформированного состояния конструкций с учетом вязкого разрушения. *Проблемы управления и информатики*. 2014. № 6. С. 42–52.
26. Гузь А.Н., Декрет В.А. *Модель коротких волокон в теории устойчивости композитов*. Германия, Saarbrücken: LAP, 2015. 315 с.
27. Декрет В.А., Зеленский В.С., Быстров В.М. *Численное исследование устойчивости слоистого композитного материала при одноосном сжатии наполнителя*. Киев: Наукова думка, 2008. 248 с.
28. Химич А.Н., Попов А.В., Чистяков О.В. Гибридные алгоритмы решения алгебраической проблемы собственных значений с разреженными матрицами. *Кибернетика и системный анализ*. 2017. Т. 53, № 6. С. 132–146.

Стаття надійшла до редакції 15.05.18

REFERENCES

1. TOP 500. URL: <http://www.TOP500.org/> (Last accessed: 24.04 2018).
2. Wilkinson, J. H. (1963). *Rounding Errors in Algebraic Processes*. London: H.W. Staat. Off.
3. Wilkinson, J. H., Reinsh, K. (1976). *Algorithm Reference in Algol. Linear algebra*. Moskva: Mechanical engineering [in Russian].
4. Voevodin, V. V. (1969). *Errors of rounding and stability in direct methods of linear algebra*. Moskva: Izd. Computer Center of Moscow State University [in Russian].
5. Molchanov, I. N. (1987). *Machinye metody reshenija prikladnyh sadach. Algebra, priblizhenie funkcyj*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
6. Khimich, A. N. (1996). Otsenki vozmushchenii dlja reshenija zadachi naimen'shikh kvadratov. *Kibernetika i sistemnyi analiz*, 3, 95–102 [in Russian].
7. Khimich, A. N. (2002). Otsenki polnoi pogreshnosti reshenija sistem lineinykh algebraicheskikh uravnenii dlja matrits proizvol'nogo ranga. *Komp'yuternaja matematika*, 2, 41–49 [in Russian].
8. Khimich, A. N., Voitsekhovskiy, C. A., Brusnikin, V. N. (2004). O dostovernosti lineinykh matematicheskikh modelei s priblizhno sadannymi iskhodnymi dannymi. *Matematicheskie mashiny i sistemy*, 3, 54–62 [in Russian].
9. Forsyth, J., Malcolm, M., Moulter, K. (1980). *Machine methods of mathematical calculations*. Moskva: Mir [in Russian].
10. Chesbrough, H. (2007). *Open Innovation: The New Imperative for Creating and Profiting from Technology*. Moskva: Pokolenie [in Russian].
11. Tarnavsky, G. A., Aliev, A. V. (2007). Mathematical modeling: main segments, their features and problems. *Computational methods and programming*, 8, 297–310 [in Russian].
12. Ilyin, V. P. (2014). On some “over-cloud” problems of mathematical modeling. *Bulletin of the South Ural State University. Series “Computational Mathematics and Software Engineering”*, 3(1), 68–79 [in Russian].
13. Khimich, A. N., Molchanov, I. N., Mova, V. I., Nikolaichuk, O. O., Popov, A. V., Chistyakova, T. V., Jakovlev, M. F., Tulchinsky, V. G., Yushchenko, R. A. (2016). Intelligent Personal Supercomputer for Solving Scientific and Technical Problems. *Sci. innov.*, 12(5), 17–31 [in Ukrainian].
14. IntelXeon Phi. URL: <https://www.intel.com/content/www/en/products/processors/xeon-phi/> (Last accessed: 20.04 2018).
15. Khimich, A. N., Molchanov, I. N., Mowa, V. I., Perevozchikova, O. L., Stryuchenko, V. A., Popov, A. V., Chistyakova, T. V., Yakovlev, M. F., Gerasimova, T. A., Zubatenko, V. S., Gromovsky, A. V., Nesterenko, A. N., Polyanko, V. V., Rudich, O. V., Yushchenko, R. A., Nikolaychuk, A. A., Gorodetsky, A. S., Slobodian, Ya. E., Geraimovich, Yu. D. (2007). *Chislennoe programnoe obespechenie intellektual'nogo MIMD-komp'yutera Inparcom*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
16. Khimich, A. N., Popov, A. V., Chistyakova, T. V., Rudich, O. V., Chistyakov, A. V. (2017). The intelligente system for the investigating and solving of eigenvalue problem on parallel computers with processors Intel Xeon Phi. *Scientific and theoretical journal «Artificial intelligence»*, 2, 119–127 [in Ukrainian].

17. HC27.25.710—Knights—Landing—Sodani—Intel_copy.pdf. URL: <https://www.hotchips.org/> (Last accessed: 22.04 2018).
18. Khimich, A. N., Molchanov, I. N., Popov, A. V., Chistyakova, T. V., Jakovlev, M. F. (2008). *Parallel'nye algoritmy resheniya zadach vychislitel'noi matematiki*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
19. Chistyakov, A. V. (2017, December). On the peculiarities of solving the algebraic problem of eigenvalues on parallel computers with Intel Xeon Phi processors. *International Scientific Conference "Modern Computer Science: Problems, Achievements and Prospects of Development" devoted to the 60th anniversary of V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of National Academy of Sciences of Ukraine*, Kyiv [in Ukrainian].
20. Voevodin, V. V., Voevodin, V. V. (2002). *Parallel computations*. Sankt-Petersburg: BHV-Petersburg [in Russian].
21. OpenMP. V. 4.0. URL: <http://www.openmp.org/mp-documents/OpenMP4.0.pdf/> (Last accessed: 24.04 2017).
22. Intel Math Kernel Library (MKL). Reference Manual. URL: <https://software.intel.com/en-us/articles/mkl-reference-manual/> (Last accessed: 20.04 2017).
23. Gorodetsky, A. S., Evzerov, I. D. (2007). *Computer models of constructions*, Kyiv: FACT [in Russian].
24. Khimich, A. N., Poljanko, V. V., Popov, A. V., Rudich, O. V. (2008). Reshenie zadach rascheta prochnosti konstruksii na MIMD-komputere. *Iskusstvennyi intellekt*, 3, 750—760.
25. Velikivanenko, E. A., Milenin, A. S., Popov, A. V., Sidoruk, V. A., Khimich, A. N. (2014). Metody i tekhnologii paralel'nykh vychislenii dlja matematicheskogo modelirovaniya naprjazhonno-deformirovannogo sostojaniya konstruksii s uchetom vjazkogo razrusheniya. *Problemy upravlenija i informatiki, Journal of Automation and Information Sciences*, 6, 42—52 [in Russian].
26. Guz, A. N., Dekret, V. A. (2015). *Model of short fibers in the theory of stability of composites*. Germany, Saarbrucken: LAP.
27. Decret, V. A., Zelensky, V. S., Bystrov, V. M. (2008). *Numerical study of the stability of a laminated composite material under uniaxial compression of a filler*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
28. Khimich, A. N., Popov, A. V., Chistyakov, O. V. (2017). Hybrid algorithms for solving the algebraic eigenvalue problem with sparse matrices. *Cybernetics and Systems Analysis*, 53(6), 132—146.

Received 15.05.18

Khimich, O.M., Mova, V.I., Nikolaichuk, O.O.,
Popov, O.V., Chistyakova, T.V., and Tulchinsky, V.G.
Glushkov Institute of Cybernetics, the NAS of Ukraine,
40, Glushkov Ave., Kyiv, 03187, Ukraine,
+380 44 526 1196, +380 44 526 4178, khimich505@gmail.com

INTELLIGENT PARALLEL COMPUTER WITH INTEL XEON PHI
PROCESSORS OF NEW GENERATION

Introduction. Mathematical modeling with large volumes of data is an actual innovation problem in various spheres of human activity. For their effective computer research, it is necessary to use powerful computers and high-performance software.

Problem Statement. Models of processes studied on modern computers have approximate data, their mathematical properties are a priori unknown. However, the existing software does not take this into consideration. Modern parallel computers require high costs for production and use.

Purpose. To develop an intelligent personal computer based on *Intel Xeon Phi* processors of new generation and intelligent software for automatic research and solution of the main classes of problems of computational mathematics with approximate data.

Materials and Methods. The concept and methods for intellectualization of parallel computers of the Inparcom family, which are developed at the Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine in cooperation with *Electronmash*.

Results. Intelligent Parallel Computer *Inparcom_xp* with an *Intel Xeon Phi* 7210 processor, which makes computations (up to 3.5 TFlops) in the single-node format (test model, prototype). Intelligent software for automatic research and solution of problems in computational mathematics.

Conclusions. The *Inparcom_xp* guarantees a high reliability of computer solutions of problems, frees users from creating parallel algorithms and programs. The computer is made mainly for individual use, thereby raises the resource of personal computing for R&D calculations.

Keywords: mathematical modeling, parallel computer, *Intel Xeon Phi* processor, computational mathematics, and approximate data.

А.Н. Химич, В.И. Мова, А.А. Николайчук,
А.В. Попов, Т.В. Чистякова, В.Г. Тульчинский

Институт кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины,
просп. Академика Глушкова, 40, Киев, 03187, Украина,
+380 44 526 1196, +380 44 526 4178, khimich505@gmail.com

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ КОМПЬЮТЕР
НА ПРОЦЕССОРЕ *INTEL XEON PHI* НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Введение. Математическое моделирование с большими объемами данных на сегодня является актуальной инновационной проблемой в различных сферах человеческой деятельности. Для их эффективного компьютерного исследования нужно использовать мощные компьютеры и высокопроизводительное программное обеспечение.

Проблематика. Модели процессов, которые исследуются на современных компьютерах, имеют приближенные данные, их математические свойства априори неизвестны. Однако существующее программное обеспечение не учитывает этого. Современные параллельные компьютеры требуют больших вложений на изготовление и использование.

Цель. Разработать интеллектуальный персональный компьютер на процессорах нового поколения *Intel Xeon Phi* и интеллектуальное программное обеспечение для автоматического исследования и решения основных классов задач вычислительной математики с приближенными данными.

Материалы и методы. Применены концепция и методы интеллектуализации параллельных компьютеров семейства Инпарком, которые разрабатываются Институтом кибернетики имени В.М. Глушкова и ГП «Электронмаш».

Результаты. Экспериментальный образец — интеллектуальный параллельный компьютер Инпарком_хр с процессором *Intel Xeon Phi 7210*, реализующий вычисления (до 3,5 Тфлопс) в формате одного узла. Интеллектуальное программное обеспечение для автоматического исследования и решения задач вычислительной математики.

Выводы. Инпарком_хр гарантирует достоверность компьютерных решений задач, освобождает пользователей от создания параллельных алгоритмов и программ. Компьютер ориентирован преимущественно на индивидуальное использование, тем самым поднимая ресурс персонального компьютинга для научно-технических расчетов.

Ключевые слова: математическое моделирование, параллельный компьютер, процессор *Intel Xeon Phi*, вычислительная математика, приближенные данные.