ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР ім. Б.І. ВЄРКІНА НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

З А Т В Е Р Д Ж У Ю

В.о. директора
ФТІНТ ім. Б.І. Вєркіна НАН України

_____ М.І. Глущук

«16» 04 2020 р.

ПРОГРАМА

навчальної дисципліни

Сучасні обчислювальні методи, підходи і системи та їх застосування в наукових експериментах, моделюванні фізичних процесів, розрахунках та обробці даних

(назва навчальної дисципліни)

з галузі знань «10 Природничі науки»
за спеціальністю «104 Фізика та астрономія».

Рівень вищої освіти	третій (освітньо-науковий)
Освітня програма	доктор філософії
Форма навчання	денна
Загальний обсяг у кредитах Європейської кредитної трансферно-накопичувальної системи:	4 кредити ЄКТС

Харків - 2020

РОЗРОБЛЕНО ТА ВНЕСЕНО:

Фізико–технічним інститутом низьких температур ім. Б. І. Вєркіна
Національної академії наук України
(повне найменування вищого навчального закладу)

РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ:

Програма затверджена Вченою радою Фізико–технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Вєркіна Національної академії наук України, «___» _____ 2020 р., протокол № __.

1. Опис навчальної дисципліни

<table>
<tr><td rowspan="2">Найменування показників</td><td rowspan="2">Галузь знань, напрям підготовки, освітньо-кваліфікаційний рівень</td><td>Характеристика навчальної дисципліни</td></tr>
<tr><td>денна форма навчання</td></tr>
<tr><td>Кількість кредитів – 4</td><td>Галузі знань:
- «10 Природничі науки»</td><td>Обов’язковий</td></tr>
<tr><td>Загальна кількість годин – 120 (42 аудиторних)</td><td>Спеціальність:
- «104 Фізика та астрономія»</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="8">Тижневих годин для денної форми навчання аудиторних – 2 самостійної роботи здобувача – 8</td><td rowspan="8">Освітньо-науковий рівень: доктор філософії</td><td>Лекції, годин</td></tr>
<tr><td>30</td></tr>
<tr><td>Семінари, годин</td></tr>
<tr><td>6</td></tr>
<tr><td>Самостійна робота, годин</td></tr>
<tr><td>84</td></tr>
<tr><td>Вид контролю</td></tr>
<tr><td>іспит</td></tr>
</table>

2. Мета та завдання навчальної дисципліни

Мета: ознайомити аспірантів з сучасним станом обчислювальних методів, підходів і систем та їх застосуванням в наукових експериментах, моделюванні фізичних процесів, розрахунках та обробці даних, надати інформацію про пакети чисельної обробки експериментальних даних, пакети фізичного та математичного моделювання, а також сформувати уявлення про проблеми і перспективи розвитку обчислювальної техніки та її використання у теоретичній та експериментальній фізиці.

Завдання:

- надати аспірантам інформацію про сучасні чисельні методи в теоретичній та експериментальній фізиці;
- дати інформацію про напрями досліджень і розробок в області високоефективних обчислювальних систем;
- навчити аспірантів застосовувати базові знання в галузі чисельної обробки експериментальних даних до виконання конкретних науково-дослідних робіт зі спеціальності.

У результаті вивчення курсу аспірант повинен

знати:

- термінологію в галузі чисельного моделювання;
- особливості використання сучасних пакетів чисельного моделювання фізичних процесів та обробки експериментальних даних;
- основні положення теорії кінцево-різницевих систем, теорії лінійних операторів, та їх використання у чисельних методах;
- фізичні основи роботи обчислювальних систем.

вміти:

- обґрунтовано вирішувати фізичні задачі в рамках своєї спеціальності, використовуючи різнобічні міждисциплінарні знання з математики і теоретичної фізики;
- використовувати довідкову і навчальну літературу в галузі математики та теоретичної фізики, знаходити інші необхідні джерела інформації і працювати з ними.
- пояснювати основні принципи та використовувати вивчені методи у самостійній науковій роботі.

Внаслідок вивчення навчальної дисципліни аспірант повинен бути здатним продемонструвати такі **програмні результати навчання** (згідно з освітньо-науковою програмою «ФІЗИКА»):

знання:

1) здатність вести спеціалізовані наукові семінари та публікувати наукові статті в вітчизняних та закордонних наукових журналах (ПРН-1.4);
2) здатність робити огляд та пошук інформації в спеціалізований літературі, використовуючи різноманітні ресурси: журнали, бази даних, он-лайн ресурси (ПРН-1.5);
3) здатність підготувати та успішно захистити дисертаційну роботу на основі індивідуальних досліджень (ПРН-1.6);
4) досягнення відповідних знань, розумінь та здатностей використання методів аналізу даних та статистики на найбільш сучасному рівні (ПРН-1.7).

уміння:

1) самостійно планувати та виконувати експерименти, оцінювати отримані результати (ПРН-2.2);
2) обирати методи і моделювати явища та процеси різної складності при вирішенні фізичних задач з урахуванням спеціалізації в конкретних галузях фізики конденсованого стану (ПРН-2.3);
3) поєднувати теорію і практику, а також приймати рішення та виробляти стратегію діяльності для вирішення завдань спеціалізації з урахуванням загальнолюдських цінностей, суспільних, державних та виробничих інтересів (ПРН-2.4);
4) застосовувати знання і розуміння для розв'язування задач синтезу та аналізу елементів та систем, характерних обраній спеціалізації (ПРН-2.5);
5) застосовувати системний підхід, інтегруючи знання з інших дисциплін та враховуючи нетехнічні аспекти, підчас розв'язання науково-дослідних завдань з обраної спеціалізації та проведення досліджень (ПРН-2.7);
6) аргументувати вибір методів розв'язування спеціалізованої задачі, критично оцінювати отримані результати та захищати прийняті рішення (ПРН-2.8);

Здобути комунікативні навики та набути навичок працювати автономно і відповідально:

1) здатність адаптуватись до нових умов та самостійно приймати рішення (ПРН-4.1);
2) здатність усвідомлювати необхідність навчання впродовж усього життя з метою поглиблення набутих та здобуття нових фахових знань (ПРН-4.2);
3) здатність демонструвати розуміння засад охорони праці, електробезпеки та їх застосування (ПРН-4.5).

Вивчення навчальної дисципліни передбачає формування та розвиток у аспірантів загальних та фахових **компетентностей:**

ЗК-2 Здатність проведення досліджень на відповідному рівні;
ЗК-3 Здатність спілкуватися іноземною мовою;
ЗК-4 Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій ;
ЗК-5 Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації;
ЗК-7 Здатність працюватив міжнародному контексті та автономно;
ЗК-8 Здатність бути критичним і самокритичним;
ЗК-9 Здатність до практичного застосовування знань;
ЗК-11 Здатність генерувати нові ідеї (креативність).
ЗК-12 Здатність до наукового мислення, зокрема володіння загальнонауковими (філософськими) компетентностями, спрямованими на формування системного наукового світогляду, професійної

етики та загального культурного кругозору.
ЗК-13 Здатність дотримуватись морально-етичних правил поведінки, а також академічної доброчесності, характерних для учасників академічного середовища.
ФК-1 Концептуальні та методологічні знання щодо історії розвитку та сучасного стану наукових досліджень з основних напрямів фізики.
ФК-2 Поглиблені спеціалізовані знання з того напряму сучасної фізики, який був обраний для проведення власного наукового дослідження, та розуміння сучасних фізичних теорій і методів, спроможність до їхнього аналізу та ефективного застосування в практиці наукової та науково-педагогічної діяльності і проведенні досліджень.
ФК-4 Здатність виконувати оригінальні дослідження, досягати наукових результатів, які створюють нові знання у фізиці і дотичних до неї міждисциплінарних напрямах і можуть бути опубліковані у провідних наукових виданнях з фізики та суміжних галузей.
ФК-6 Здатність самовдосконалюватися, презентувати результати досліджень фахівцям і нефахівцям.
ФК-7 Здатність до формулювання наукових задач та планування стратегій їхнього розв'язання з можливістю інтеграції знань з різних наукових сфер та застосуванням системного підходу в практичній діяльності.
ФК-10 Здатність підготувати та успішно захистити дисертаційну роботу на основі узагальнення власних експериментальних або теоретичних досліджень з фізики.
ФК-11 Здатність інтегрувати знання з інших дисциплін, застосовувати системний підхід та враховувати комплексні аспекти при розв'язанні проблемних завдань та проведенні наукових досліджень.
ФК-12 Знати та вміти застосовувати фундаментальні знання з фізики конденсованого стану для аналізу явищ та процесів, які відбуваються в твердих тілах і рідинах, знати основні закономірності утворення структури твердих тіл та взаємозв'язок структури з фізичними властивостями твердих тіл, вміти використовувати основні принципи сучасної фізики конденсованого стану до виконання конкретних науково-дослідних робіт зі спеціальності.
ФК-13 Знати основи чисельного моделювання, обчислювальних методів, підходів і систем та вміти їх застосовувати в наукових експериментах, при моделюванні фізичних процесів, розрахунках та обробці даних. Вміти обґрунтовано вирішувати фізичні задачі в рамках своєї спеціальності, використовуючи знання з математики і теоретичної фізики, використовувати пакети чисельної обробки експериментальних даних, пакети фізичного та математичного моделювання.
ФК-15 Знати сучасні підходи, моделі та методи теоретичного дослідження конденсованих середовищ (в першу чергу – в твердих тіл) і явищ, пов'язаних зі складною структурою цих середовищ. Вміти вирішувати конкретні задачі теоретичної і експериментальної фізики з використанням сучасних підходів, моделей та методів теоретичного дослідження.

Передумови для вивчення навчальної дисципліни

- Для вивчення даної дисципліни необхідні знання з вищої математики, математичної фізики, статистичної фізики та квантової механіки
- У програмі використовуються результати наукових досліджень з найактуальніших досягнень у різних напрямках математики, математичної фізики, чисельних методів.
- Лекційний курс передбачає використання комп'ютерного демонстраційного експерименту, технічних засобів навчання, комп'ютерних проекторів.

Постреквізити

Основні положення навчальної дисципліни мають застосовуватися при плануванні і виконанні власних наукових досліджень та подальшій обробці і аналізі результатів цих досліджень.

3. Анотація навчальної дисципліни

Курс «Сучасні обчислювальні методи, підходи і системи та їх застосування в наукових експериментах, моделюванні фізичних процесів, розрахунках та обробці даних» є курсом зі спеціалізації, який узагальнює та систематизує знання аспірантів, отримані у інших курсах, а також знайомить з новими методами чисельного моделювання фізичних процесів та чисельними методами обробки даних.

4. Структура навчальної дисципліни

Тема 1. Обчислювальні комплекси обробки результатів фізичного експерименту. Знайомство з базовими поняттями обчислювальної техніки. Кластерні та хмарні обчислення, принципи побудови та функціювання. Сучасний стан розвитку обчислювальної галузі в світі.

Тема 2. Програмне забезпечення для побудови обчислювальних комплексів обробки результатів фізичного експерименту.

Операційна система Linux. Організація та основні команди. Знайомство з менеджерами розподілених ресурсів для обчислювальних кластерів. Базові поняття та принципи функціювання. Програмне забезпечення, необхідне для взаємодії з користувачем. Створення пакетних файлів, необхідних для постановки завдань на кластер на прикладі менеджера розподілених ресурсів Torque (PBS).

Тема 3. Стандарти та технології сучасного паралельного програмування.

Основні принципи побудови сучасних паралельних програм. Стандарт OpenMP. Організація та основні етапи реалізації програмного забезпечення з використанням OpenMP для язиків програмування C/C++ та FORTRAN. Технологія MPI. Різновиди MPI. Організація та основні етапи реалізації програмного забезпечення з використанням OpenMPI для язиків програмування C/C++. Сучасні вільні та комерційні пакети обробки результатів фізичного експерименту.

Тема 4. Методи чисельної обробки результатів фізичного експерименту.

Знайомство з такими базовими методами чисельної обробки експериментальних даних, як: метод найменших квадратів; поліноміальна апроксимація; чисельне інтегрування і диференціювання, чисельна інтерполяція; дискретне Фур'є перетворення і частотна фільтрація сигналу; аналого-цифрове (АЦП) та цифро-аналогове перетворення (ЦАП).

Тема 5. Чисельні методи рішення математичних рівнянь.

Чисельне рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь наступними методами: метод половинного ділення, метод хорд, метод дотичних (метод Ньютона), метод оберненої матриці, метод Крамера і метод Гаусса. Чисельне рішення системи нелінійних рівнянь методом Ньютона. Чисельне рішення системи нелінійних диференціальних рівнянь методом Рунге – Кутти.

Тема 6. Чисельні методи моделювання фізичних процесів.

Основні методи чисельного моделювання класичної фізики: Класичні методи молекулярної динаміки. Класичні методи Монте-Карло (Monte Carlo – MC). Основні методи чисельного моделювання квантової фізики: Метод точної діагоналізації (Exact Diagonalization – ED). Квантові методи Монте-Карло (Quantum Monte Carlo – QMC). Теорія функціоналу густини (Density Functional Theory – DFT). Метод ренормгруппи матриці густини (Density Matrix Renormalization Group – DMRG).

Загальна структура навчальної дисципліни

№	*Назва теми*	*у тому числі*			
		Усього	*Лекції,*	*Семінар,*	*Самостійна*

			годин	*годин.*	*робота, годин*
1.	Обчислювальні комплекси обробки результатів фізичного експерименту.		6		
2.	Програмне забезпечення для побудови апаратних комплексів обробки результатів фізичного експерименту.		4	2	10
3.	Стандарти та технології сучасного паралельного програмування.		4	4	10
4.	Методи чисельної обробки результатів фізичного експерименту.		4		16
5.	Чисельні методи рішення математичних рівнянь.		6		24
6.	Чисельні методи моделювання фізичних процесів.		6		24
	Усього, годин	**120**	**30**	**6**	**84**

Теми лекційних занять

№	*Назва лекції*	*Кількість годин*
1.	Кластерні та хмарні обчислення, принципи побудови та функціювання.	2
2.	Сучасний стан розвитку обчислювальної галузі в світі.	2
3.	Менеджери розподілених ресурсів для обчислювальних кластерів. Програмне забезпечення, необхідне для взаємодії з користувачем.	2
4.	Операційна система Linux. Організація та основні команди.	2
5.	Організація та основні етапи реалізації програмного забезпечення з використанням OpenMP для язиків програмування C/C++ та FORTRAN.	2
6.	Організація та основні етапи реалізації програмного забезпечення з використанням OpenMPI для язиків програмування C/C++.	2
7.	Сучасні вільні та комерційні пакети обробки результатів фізичного експерименту.	2
8.	Метод найменших квадратів. Чисельна інтерполяція, інтегрування і диференціювання.	2
9.	Дискретне Фур'є перетворення. Частотна фільтрація сигналу. Аналого-цифрове (АЦП) та цифро-аналогове перетворення (ЦАП);	2
10.	Чисельне рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Метод половинного ділення, метод хорд, метод дотичних (метод Ньютона), метод оберненої матриці, метод Крамера і метод Гаусса.	4
11.	Чисельне рішення системи нелінійних рівнянь методом Ньютона. Чисельне рішення системи нелінійних диференціальних рівнянь методом Рунге – Кутти.	2
12.	Класичні методи молекулярної динаміки. Класичні методи Монте-Карло (Monte Carlo – MC).	2
13.	Метод точної діагоналізації. Квантові методи Монте-Карло (Quantum Monte Carlo – QMC).	2

14.	Теорія функціоналу густини. Метод ренормгруппи матриці густини.	2
	Разом	**30**

Теми семінарських занять

№	*Назва теми*	*Кількість годин*
1.	Створення пакетних файлів, необхідних для постановки завдань на кластер.	2
2.	Директиви та бібліотеки стандарту OpenMP для язика програмування C++.	2
3.	Вирішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь методом Гауса з застосуванням стандарту OpenMP	2
	Разом	**6**

Самостійна робота

№	*Назва теми*	*Кількість годин*
1.	Менеджер розподілених ресурсів для обчислювальних кластерів Torque.	10
2.	Порівняння стандарту OpenMP з технологією OpenMPI.	10
3.	Метод найменших квадратів та поліноміальна апроксимація	4
4.	Чисельне інтегрування і диференціювання функції однієї змінної, чисельна інтерполяція.	8
5.	Дискретне Фур'є перетворення.	4
6.	Чисельне рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь.	8
7.	Чисельне рішення системи нелінійних рівнянь.	8
8.	Чисельне рішення системи, нелінійних диференціальних рівнянь.	8
9.	Класичний метод Монте-Карло для одновимірної моделі Ізінга.	8
10.	Метод точної діагоналізаці для системи спинів S=1/2.	8
11.	Квантовий метод Монте-Карло для одновимірної моделі Гейзенберга з S=1/2.	8
		84

5. Методи навчання

МН1 – Лекції. Лекційний матеріал охоплює центральні та найбільш складні проблеми сучасних чисельних методів, що використовуються у фізичному і математичному моделюванні та в обробці результатів фізичного експерименту. Простіші питання, що добре висвітлені в літературі, виносяться на самостійне вивчення.

МН2 – Семінарські заняття. Семінарські заняття передбачають самостійне вивчення аспірантами за завданням викладача окремих питань і тем лекційного курсу з наочним оформленням матеріалу у вигляді реферату, доповіді, повідомлення тощо. Семінарські заняття дають змогу викладачам ближче познайомитися з аспірантами, донести до них необхідну інформацію, а відтак перевірити, як вони засвоїли її, як користуються нею в навчальній і науковій роботі. Викладач має змогу враховувати теоретичну і практичну підготовку аспіранта, його індивідуальні особливості і здібності, що зумовлює підвищення

рівня підготовки кожного аспіранта.

МН4 – Самостійна робота. Робота здобувачів носить в основному самостійний характер. Вони самостійно роблять пошук наукової літератури і опрацьовують її, консультуючись з викладачем. Таким чином вони удосконалюють набуті раніше навички роботи з літературою за фахом. Основна увага приділяється формуванню та засвоєнню базових знань в галузі математики та теоретичної фізики та вмінню застосовувати їх до виконання конкретних науково-дослідних робіт зі спеціальності.

МН3, МН5 – демонстрація презентацій, використання засобів мультимедіа, дистанційні заняття з використанням комп'ютерних засобів.

6 Методи діагностики знань

ФОРМИ ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАВЧАННЯ (ФО)

ФО1 – відвідування лекцій та творчий підхід в процесі наукового пошуку (20 балів);

ФО2 – самостійна робота, опрацювання літератури та електронних джерел за темою дослідження (20 балів);

ФО4 – відповідь на семінарі та використання сучасних інформаційних технологій при підготовці відповіді (20 балів);

ФО5 – робота в команді при виконанні завдань самостійної роботи та на семінарі (5 балів);

ФО6, ФО8, ФО9, ФО10 – підготовка та оформлення реферату та презентації, використання у доповіді прикладів реальних фізичних об'єктів, що пов'язані з дисертаційним дослідженням (20 балів).

Екзамен (15 балів)

Всього: 100 балів.Шкала оцінювання

СУМА БАЛІВ	ОЦІНКА ЄКТС	ОЦІНКА ЗА НАЦІОНАЛЬНОЮ ШКАЛОЮ	
		екзамен	залік
90-100	A	відмінно	зараховано
82-89	B	добре	
75-81	C		
64-74	D	задовільно	
60-63	E		
35-59	FX	незадовільно	не зараховано
1-34	F		

7 «Критерії оцінювання результатів навчання

Кількість балів	Критерії оцінювання
90-100	У відповіді повністю розкрито зміст питання. Матеріал викладено логічно, аргументовано, мова є грамотною, науковий стиль викладення матеріалу, вільне володіння термінологічним апаратом дисципліни. У відповіді продемонстровано високий рівень володіння матеріалом, що входить до навчальної програми, та продемонстровано високі практичні навички.
75-89	Відповідь досить повно розкриває зміст питання або розкриває основні (найважливіші) аспекти у запитанні, слухач володіє термінологічним апаратом дисципліни. У викладеному матеріалі слухач має помилки із аргументацією відповіді, недостатня логічність та послідовність викладення матеріалу. У відповіді продемонстровано високий рівень володіння матеріалом, що було викладено на лекціях, та середній рівень володіння практичним матеріалом.
60-74	Відповідь на контрольне питання є неповною, розкриває тільки деякі аспекти навчального матеріалу. Слухач припускається помилок у використанні термінології навчальної

	дисципліни. Рівень володіння матеріалом, що було викладено на лекціях, додатковим та практичним матервалом матеріалом є середнім.
35-59	У відповіді допущено суттєві помилки, які свідчать про незнання лекційного матеріалу або обов'язкової літератури; слухач слабо володіє термінологією дисципліни.
1-34	Відповідь практично відсутня, слухач демонструє незнання лекційного матеріалу або обов'язкової літератури; не володіє термінологією

8. Навчально-методичне забезпечення

На початку семестру здобувачі отримують:

1. Робочу програму, що містить перелік тем, список рекомендованої літератури та інформаційних ресурсів, критерії та шкалу оцінювання; контрольні запитання до іспиту;

2. Пакет літератури, що містить основні підручники, навчальні та методичні посібники в електронній формі (формати .pdf та .djvu),

9. Питання до заліку/екзамену

1. Кластери. Їх різновиди. Вимоги до обчислювальних кластерів.
2. Хмарні обчислення. Їх переваги та недоліки в порівнянні з кластерами.
3. Менеджер розподілених ресурсів для обчислювальних кластерів Torque.
4. Стандарт OpenMP. Призначення та реалізація.
5. Технологія OpenMPI. Призначення та реалізація.
6. Структура і використання апаратних і програмних інтерфейсів в приладах обробки та збору даних.
7. Чисельна обробка експериментальних даних.
8. Дискретне Фур'є перетворення.
9. Чисельні методи рішення систем лінійних алгебраїчних рівнянь.
10. Чисельне методи рішення систем нелінійних рівнянь.
11. Чисельне методи рішення систем нелінійних диференціальних рівнянь.
12. Методи молекулярної динаміки.
13. Класичні методи Монте-Карло.
14. Метод точної діагоналізації для квантовомеханічних систем.
15. Квантові методи Монте-Карло.
16. Теорія функціоналу густини.
17. Метод ренормгруппи матриці густини.

10. Рекомендована література

1. Корнєєв Ст. Д. Паралельне програмування MPI: Учеб. посібник / Яросл. держ. ун-т. Ярославль, 2002. 104 с. ISBN 5-8397-0239-0
2. Антонов А. С. Паралельне програмування з використанням технології OpenMP: Навчальний посібник. – М: Изд-во МДУ, 2009. – 77 с. ISBN 978-5-211-05702-9
3. Шпаковський Р. В., Верхотуров А. Е., Серікова Н. Ст. Керівництво по роботі на обчислювальному кластері. Навчальний посібник. Вузівська книга. 2004. - 172 с.
4. Воєводін Вл.В., Жуматій С. А. "Обчислювальна справа і кластерні системи".-М.: Вид-во ДУ, 2007. - 150 с. ISBN 978-5-211-05440-0
5. К. Биндер, Д. В. Хеерман. Моделирование методом Монте-Карло в статистической физике. Пер. с англ. В. Н. Задкова. - М.: Наука. Физматлит, 1995. - 144 с.
6. Д. В. Хеерман Методы компьютерного эксперимента в теоретической физике. М.: Наука, 1990. - 176 с.
7. Рапапорт Д. К. Мистецтво молекулярної динаміки / Рапапорт Д. К. ; Дьяконова А. Н. (пер. з англ.); Єфремов Р. Р. (навч. ред.). — М. ; Іжевськ : Ін-т комп'ютер. дослідж., 2012. — 630 с. ISBN 978-5-4344-0083-1.
8. F. F. Assaad. in Quantum Simulations of Complex Many-Body Systems: From Theory to Algorithms, Publication Series of the John von Neumann Institute for Computing (NIC), edited by J. Grotendorst, D. Marx, and A. Muramatsu (NIC, Julich, 2002).
9. Quantum Simulations of Complex Many-Body Systems: From Theory to Algorithms, Publication Series of the John von Neumann Institute for Computing (NIC), edited by J. Grotendorst, D. Marx, and A. Muramatsu (NIC, Julich, 2002).
10. J.K. Cullum and R.A. Willoughby. Lanczos Algorithms for Large Symmetric Eigenvalue Computations, Society for Industrial and Applied Mathematics (2002).
11. Anders W. Sandvik. Computational Studies of Quantum Spin Systems https://arxiv.org/abs/1101.3281v1

13. Інтернет-ресурси

http://www.cplusplus.com/	Інформація про C++ мову.
https://www.open-mpi.org/	Документація по MPI протоколу.
https://www.openmp.org/	Документація по OpenMPпротоколу.
http://www.cleverstudents.ru	Чисельні методи обробки експериментальних даних з прикладами.