

ВІДГУК
офіційного опонента
на дисертаційну роботу Терновського Валентина Борисовича
“РЕЛЯТИВІСТСЬКА СПЕКТРОСКОПІЯ ВАЖКИХ АТОМІВ З
УРАХУВАННЯМ ОБМІННО-КОРЕЛЯЦІЙНИХ ТА РАДІАЦІЙНИХ
ЕФЕКТІВ”, представлену на здобуття наукового ступеня доктора фізико-
математичних наук за спеціальністю 01.04.05 –оптика, лазерна фізика

Вступ. Перш за все хочу сказати, що мені дуже приємно спостерігати за творчим зростанням В.Б. Терновського, починаючи з його захисту кандидатської дисертації. Захист кандидатської дисертації спричинив його становлення як наукового спеціаліста, здатного розв’язувати важливі наукові задачі в області атомної фізики. Тепер же я спостерігаю становлення спеціаліста енциклопедичного рівня, який вніс вирішальний внесок як в розвиток математичного апарату для розв’язування складних задач, пов’язаних з прецизійними дослідженнями енергетичних і спектроскопічних характеристик важких атомів та іонів, так і вирішенні подібних задач щодо екзотичних адронних атомних систем з прецизійним урахуванням релятивістських, ядерних ефектів та радіаційних квантово-електродинамічних поправок, на основі адіабатичного формалізму Gell-Mann & Low. І нарешті, область його наукових інтересів сягнув до розробки основ нового ефективного релятивістського підходу до розрахунку параметрів β -розпаду важких атомних систем.

Основною метою дисертаційної роботи Терновського В.Б. є розв’язання низки надто актуальних, складних фундаментальних проблем сучасної атомної оптики та спектроскопії, які включають розробку теоретичних основ нової прецизійної релятивістської спектроскопії важких звичайних багатоелектронних та екзотичних адронних (каонних) систем, а також розробка нового ефективного релятивістського підходу до розрахунку параметрів β -розпаду (дозволені переходів) важких систем в межах прецизійної кооперативної електронно- β -ядерної спектроскопії атомних систем.

Загальновідомо, що вивчення важких атомних систем, так званих релятивістських багатоелектронних та адронних атомів, а також важких багатозарядних іонів представляє значний інтерес для подальшого розвитку атомної та ядерної теорій і має принципове фундаментальне значення в багатьох областях атомної фізики (теорія атомних спектрів, спектроскопія, теорія спектральних ліній), астрофізики, фізики плазми, фізики лазерів тощо.

Успіхи в області розвитку експериментальних методів дослідження спектрів атомів та іонів дозволяють вирішувати актуальні і важливі завдання атомної оптики та лазерної фізики на принципово новому релятивістському рівні теоретичної послідовності і точності.

З огляду на величезне значення, яке відіграє інформація про властивості важких атомів для подальшого розвитку атомної та ядерної теорій, була розроблена досить велика кількість різних методів розрахунку енергетичних і спектроскопічних характеристик багатоелектронних атомів та іонів, з ураху-

ОДЕКУ Канцелярія
ВХ. 337
18 09 2027 р.

ванням в тій чи іншій мірі кореляційних, релятивістських, а також радіаційних (останні особливо важливі для важких атомів та іонів) ефектів. До числа найбільш широко використовуваних і досить популярних методів можна віднести відомі методи Хартрі-Фока (ХФ), Дірака-Фока (ДФ) в одно- і багато-, мега-конфігураційному наближенні, різноманітні версії теорії збурень (ТЗ) по $1/Z$ (Z – заряд ядра атома), ТЗ з ХФ, ДФ нульовим наближенням, метод псевдопотенціалу, метод функціонала густини, наближення випадкових фаз в нерелятивістському та релятивістському варіантах тощо. Зважаючи на те, що більшість існуючих методів розрахунку енергетичних і спектроскопічних характеристик багатоелектронних атомів та іонів, незважаючи на відомий прогрес в їх розвитку, не здатні забезпечити одночасний прецизійний опис всіх перерахованих груп ефектів і поправок, дисертаційна робота Терновського В.Б. є **актуальною** та своєчасною.

Актуальність обраної теми дослідження підтверджує її зв'язок з низкою НДР Одеського державного екологічного університету, установи, де виконано роботу, а також проектів фундаментальних досліджень МОН України, у тому числі: “Розвиток та застосування нових обчислювальних методів в задачах математичної фізики, теорії ядра та адронних атомів, квантової геометрії” (№ держр. 0114U005145, 2014-2018рр.), “Розвиток та застосування нових методів обчислювальної математики, математичної фізики в задачах теоретичної квантової оптики, атомної, молекулярної спектроскопії”, № держр. 0116U002097, 2016-2020рр.), “Розрахунок енергетичних та спектроскопічних характеристик рідбергівських атомів та багатозарядних іонів на основі релятивістської багаточастинкової теорії збурень” (2019-2023рр.), “Розвиток та застосування хаос-геометричних та квантово-динамічних методів дослідження спектрів і динаміки лазерних систем та приладів надвисокочастотної електроніки” (2019-2023рр.) та інші.

Зміст роботи. Основна ідея даної дисертаційної роботи, яка об'єднує всі її розділи, пов'язана з розвитком релятивістської теоретичної прецизійної спектроскопії важких звичайних багатоелектронних, а також екзотичних адронних (каонних) систем з одночасним прецизійним урахуванням ядерних, радіаційних, обмінно-кореляційних ефектів. Перейдемо тепер до детального аналізу змісту дисертації.

Дисертаційна робота має традиційну структуру і складається зі вступу, оглядового розділу, чотирьох оригінальних розділів, загальних висновків та списку використаних джерел.

Перший розділ дисертації присвячений докладному огляду теоретичних методів розрахунку спектрів і спектроскопічних характеристик важких багатоелектронних атомів, а також так званих екзотичних адронних (зокрема, каонних) атомних систем.

Другий розділ присвячено викладанню нового формалізму релятивістської багаточастинкової теорії збурень та нового оптимізованого енергетичного підходу до розрахунку енергетичних і спектроскопічних характеристик важких атомних систем, зокрема, докладному викладенню основ нового ефективного методу комбінованої релятивістської теорії збурень з оптимізованим Дірака-Фока-Брейта нульовим наближенням. Принциповою відмінністю від альтернативних

підходів у релятивістській спектроскопії є те, що в новому підході вперше реалізована процедура вибору в якості нульового наближення оптимізованого Дірака-Фока (ОДФ) потенціалу.

З метою врахування станів безперервного спектру дисертант використав методику побудови штурмовських розкладень. Окремий підрозділ другого розділу присвячений викладенню процедури побудови одноквазічастинкового уявлення в релятивістській теорії збурень, яка базується на процедурі мінімізації калібрувальних-неінваріантних внесків в радіаційні ширини з дотриманням принципу калібрувальної інваріантності. Це принципово новий аспект всієї роботи. В рамках нового формалізму розвинуто прецизійний підхід до урахування складних обмінно-кореляційних ефектів, як ефектів другого порядку і домінуючих класів діаграм вищих порядків теорії збурень, у т.ч. поляризаційної міжквазічастинкової взаємодії, ефектів її екранування, ефектів швидкого “розмазування” вихідного стану по неозорому набору конфігурацій та суттєво некулонівського групування рівнів у рідбергівських спектрах, тиску континууму та інших.

Третій розділ роботи присвячено викладенню результатів апробації нового формалізму, зокрема, викладені дані розрахунків енергій та ймовірностей, сил осциляторів електричних E1 переходів $5d^{10}7p(P_{1/2}, P_{3/2})-5d^{10}6s(S_{1/2})$, $5d^{10}7p(P_{1/2}, P_{3/2})-5d^{10}7s(S_{1/2})$ та E2 переходу $5d^9 6s^2(D_{5/2}, D_{3/2})-5d^{10}6s(S_{1/2})$ в одноразово іонізованому атомі Hg⁺, енергій рівнів конфігурацій np^2 , $npn's$ ($n=6$, $n'=7$) та ймовірностей переходів $6p^{23}P_J \rightarrow 7s^3P_J^o$ (лінії 2833.9, 3684.5, 4059A) атому свинцю, енергій рівнів, ймовірностей переходів та сил осциляторів $4f^7(^8S)6s^2^8S_{7/2}$, $4f^7(^8S)6s6p^8P_{5/2,7,9,2}$, $4f^7(^8S)6s7p^8P_{5/2,7/2}$, $4f^7(^8S)6s8p^8P_{9/2,7/2}$ атому Eu I, енергій переходів, сил осциляторів і ймовірностей радіаційних переходів в спектрі атому талію Tl, прецизійні дані для енергій рівнів конфігурацій $6p5d$, $6p^2$, $5d^2$, $7s6p$ атому ітербію Yb (причому для деяких рідбергівських резонансів вперше передбачені значення їх енергій та ширин), прецизійні дані для енергій та ширин збуджених станів атома тулію Tm $4f^{-1}6s(J12)nsnp[J]$ з квантовим числом $n=25-50$, результати розрахунку енергій орбіталей для атому урану (ізоотоп ⁹²U). Проведений аналіз даних, отриманих для атомів ітербію, тулію та урану продемонстрував та підтвердив ефективність нової теорії, а також дозволив вперше виявити ряд унікальних особливостей в рідбергівській автоіонізаційній спектроскопії, пов'язаних з аномально малими ширинами автоіонізаційних, рідбергівських резонансів. Крім того, нові результати показали, що наведені у літературі дані щодо урану ⁹²U містять певні неточності, що пов'язано із вкрай високою складністю розрахунків для рідбергівських серій вказаного ізоотопу. Цілком погоджуюсь з висновком, який зроблено в роботі, що зазначені результати досліджень можна розглядати як відкриття елементів нової **нелінійної некулонівської фізики** важких атомних систем.

Четвертий розділ дисертації присвячений викладенню нового послідовного релятивістського підходу до розрахунку спектрів та спектроскопічних характеристик важких екзотичних адронних (каонних) атомних систем. В якості основи для нової теорії дисертантом було використано релятивістські рівняння Клейна-Гордона-Фока (каон) та Дірака-Фока (електронна підсистема) з одночасним урахуванням електромагнітної та сильної каон-ядерної взаємодії з використанням

модифікованого методу оптичного потенціалу. За результатами виконаних обчислень енергетичних внесків в енергії 8i-7h, 8k-7i, 7h-6g в спектрі каонного азоту, ймовірностей радіаційних переходів, енергії рідбергівських переходів в спектрі важких каонних атомів, зокрема, вольфраму ^{184}W , свинцю ^{207}Pb та урану ^{238}U і зроблено загальний висновок, що для досягнення фізично розумної узгодженості між теорією та експериментом важливо використовувати ефективні послідовні й кількісно прецизійні процедури релятивістських, ядерних (у т.ч. ефектів сильної взаємодії), радіаційних ефектів. Порівняння експериментальних та альтернативних теоретичних даних вказує на достатньо **високу ефективність розвинутого нового релятивістського підходу в теорії важких каонних систем.**

П'ятий розділ дисертації присвячений викладенню основ нового ефективного релятивістського підходу до розрахунку параметрів β -розпаду (дозволених переходів) важких атомних систем, який також базується на новому формалізмі релятивістської калібрувально-інваріантної теорії збурень. На прикладі серії дозволених (понад дозволених) β -розпадів ($^{33}\text{P} \rightarrow ^{33}\text{S}$, $^{35}\text{S} \rightarrow ^{35}\text{Cl}$, $^{45}\text{Ca} \rightarrow ^{45}\text{Sc}$, $^{63}\text{Ni} \rightarrow ^{63}\text{Cu}$, $^{106}\text{Ru} \rightarrow ^{106}\text{Rh}$, $^{155}\text{Eu} \rightarrow ^{155}\text{Gd}$, $^{241}\text{Pu} \rightarrow ^{241}\text{Am}$) дисертантом вперше виявлено зв'язок між хімічним оточенням атома та характеристиками дозволених β -переходів, який полягає в тому, що при переході від визначення функції Фермі $F(E,Z)$ за функціями на межі ядра до визначення $F(E,Z)$, що обчислюється за амплітудами при нулі, функція f зростає відповідно для розпадів $^{33}\text{P} \rightarrow ^{33}\text{S}$ ($E_0 = 249$ кеВ), $^{35}\text{S} \rightarrow ^{35}\text{Cl}$ ($E_0 = 167$ кеВ) на 2-4%, $^{63}\text{Ni} \rightarrow ^{63}\text{Cu}$ ($E_0 = 65,8$ кеВ) – на 5%, $^{155}\text{Eu} \rightarrow ^{155}\text{Gd}$ ($E_0 = 140,7$ кеВ) – 12%, $^{241}\text{Pu} \rightarrow ^{241}\text{Am}$ ($E_0 = 20,8$ кеВ) – на 32%. Важливим результатом роботи є підтвердження, що поправка, пов'язана з урахуванням обмінно-кореляційних ефектів в електронних хвильових функціях при низькій енергії суттєво перевищує поправку на кулонівське екранування, однак із зростанням енергії поправка на екранування поступово зрівнюється з обмінним внеском.

У заклучній частині дисертації наведені загальні висновки.

Наукова новизна положень, результатів, висновків дисертації. На мій погляд, у даній дисертації отримано низку важливих нових наукових результатів, основні з яких полягають у наступному. В роботі вперше в спектроскопії атомних систем розроблено новий ефективний метод опису енергетичних, радіаційних і спектроскопічних характеристик важких звичайних багатоелектронних, а також екзотичних адронних (каонних) систем з послідовним, максимально прецизійним урахуванням релятивістських, ядерних ефектів та радіаційних квантово-електродинамічних поправок, на основі адіабатичного формалізму Gell-Mann & Low запропоновано нову послідовну калібрувально-інваріантну ab initio версію релятивістського енергетичного підходу, суттєво удосконалено послідовний непертурбативний підхід до опису радіаційних квантово-електродинамічних поправок до енергій рівнів важких атомів, зокрема, власно-енергетичної частини лембівського зсуву, поправки на поляризацію вакууму тощо. Вперше виконаний розрахунок спектру низько розташованих рівнів надважкого елемента ніхонія ^{278}Nh з прецизійним урахуванням релятивістських, радіаційних, ядерних та обмінно-кореляційних поправок. Вперше із спектроскопічною точністю виявлено унікальні особливості в автоіонізаційній спектроскопії ітербію Yb і тулію

Тм, пов'язані з аномально малими ширинами автоіонізаційних та рідбергівських резонансів, в цілому узагальнено нову інформацію щодо важких атомів типу лантаноїдів та актиноїдів, урану, трансуранових елементів тощо. Вперше запропоновано та досліджено новий послідовний релятивістський підхід до розрахунку спектрів та спектроскопічних характеристик важких каонних атомних систем, який дозволяє послідовно виконати одночасне урахування електромагнітної взаємодії та сильної каон-ядерної взаємодії з використанням модифікованого методу оптичного потенціалу. Вперше розвинуто новий релятивістський підхід до розрахунку параметрів β -розпаду (дозволенних переходів) важких систем в межах прецизійної кооперативної електронно- β -ядерної спектроскопії атомних систем, який дозволив вперше розглянуто зв'язок між хімічним оточенням атома та характеристиками дозволенних β -переходів та виявити деякі закономірності, пов'язані з урахуванням обмінно-кореляційних ефектів в електронних хвильових функціях. Нові дані, отримані автором, доводять ефективність та переваги нових оригінальних підходів, зокрема, завдяки використанню оптимізованого нульового наближення Дірака-Фока-Брейта та досить повному урахуванню складних багаточастинкових обмінно-кореляційних ефектів. Встановлено, що у порівнянні зі стандартними неоптимізованими релятивістськими методами новий підхід дозволяє отримати більш точні дані.

В дисертації вирішена нова наукова проблема: **релятивістська спектроскопія важких звичайних багатоелектронних та каонних атомів систем з одночасним коректним урахуванням ядерних, у т.ч. електронно- β -ядерних, квантово-електродинамічних, радіаційних і обмінно-кореляційних ефектів.**

Практичне значення наукових результатів дисертації уявляється дійсно вагомим, оскільки отримані в роботі важливі конкретні дані (у більшості випадків, як правило, вперше) вкрай необхідні для розв'язання широкого класу задач, зокрема, атомної і молекулярної оптики та спектроскопії, астрофізики, фізики термоядерної, астрофізичної, лабораторної плазми, токамака, плазмохімії, лазерної фізики і квантової електроніки, розробки нових ефективних схем генерації, включаючи створення разерів, гразерів, а також суміжних галузей фізики, а саме фізики ядра, елементарних частинок, високих енергій, фізики прискорювачів, колайдерів. Насамкінець, особливу практичну значущість мають результати щодо енергетичних та радіаційних характеристик з точки зору вирішення задач побудови оптимальних схем лазерного фотоіонізаційного поділення важких, у т.ч. радіоактивних ізотопів та ядерних ізомерів, зокрема, атомів лантаноїдів, актиноїдів, урану, трансуранових елементів тощо.

Ступінь обґрунтованості наукових результатів й їхня достовірність підтверджені докладним порівнянням розрахованих автором, на підставі своїх нових підходів, енергетичних, радіаційних та спектроскопічних характеристик важких атомних систем у вільному стані, зокрема, атомів (іонів) ртуті, талію, ітербію, тулію, урану, а також відповідних каонних (вольфрам ^{184}W , свинець ^{207}Pb , уран ^{238}U) та бета-розпадних атомних систем, з відповідними надійними експериментальними даними та їх добрим узгодженням. Всі основні результати дисертації є новими, строго обґрунтованими і доведеними; вони опубліковані

у 34 наукових фахових виданнях і доповідалися на майже 20 переважно міжнародних досить відомих конференціях, конгресах, школах.

Зауваження до роботи. Слід зазначити зараз, що наведені нижче побажання і зауваження носять характер рекомендацій і ні в якому разі не стосуються основних положень цієї важливої та цікавої роботи.

По-перше, у вступі, а також у першому оглядовому розділі автор не тільки надає достатньо докладний та ретельний аналіз сучасних підходів в теоретичній релятивістській спектроскопії важких атомних систем, але й вказує на практичне значення відповідних спектральних даних для різноманітних застосувань. У списку літератури одночасно наведені всі ключові роботи включно до 2021 р. Акцент дисертант робить на відомі роботи Glushkov-Ivanov і співр., в яких закладено теоретичні основи одного з найбільш послідовних за теперішнього часу підходів щодо вирішення проблеми побудови оптимізованого одноквазічастинкового уявлення в теорії багатоелектронних систем. Але наданий також і огляд альтернативних процедур, зокрема, процедури Рудзікаса з використанням калібрувальної сталої в якості параметру теорії. Як це можливо? Цей аспект дисертанту варто було б розглянути докладніше, оскільки авторська версія є безумовно більш послідовною.

По-друге. У першому розділі на стор. 29 автор в ході загального огляду теоретичних методів розрахунку спектрів і спектроскопічних характеристик багатоелектронних атомів та іонів коротко описує їх недоліки та робить висновок щодо необхідності врахування всього набору релятивістських, радіаційних, ядерних ефектів, складних обмінно-кореляційних поправок. Проте в дисертації чітко не описано, чи ставили попередні дослідники перед собою аналогічну мету, чи ця ідея належить виключно автору?

По-третє, у другому розділі (пр.2.2.1) при визначенні самоузгодженого потенціалу рівнянь Дірака-Фока дисертант вводить у розгляд разом із потенціалом, що враховує скінчений розмір ядра в межах моделі або Гауса або Фермі для розподілу заряду, також і локальний потенціал. У зв'язку з цим виникає питання, по-перше, доцільності використання одночасно двох моделей Гауса, Фермі, а також щодо особливостей локального потенціалу.

По-четверте, при проведенні досить складних розрахунків спектрів трьох і більше квазічастинкових станів звичайно найбільш трудомістким завданням є обчислення матричних елементів на хвильових функціях N-квазічастинкових станів, для чого автор використовує свою оригінальну версію методу Фано (пр.2.2.5). Можливо автору слід було задекларувати це також як елемент новизни, а також надати визначення різних типів 3-квазічастинкових оболонки (електронних конфігурацій).

По-п'яте. До числа безумовно нових результатів, представлених у розділі 3, відносяться дані, що стосуються енергетичних, і спектроскопічних характеристик розглянутих автором атомів тулію, ітербію. У цьому сенсі варто згадати нові, дуже цікаві результати стосовно спектроскопії рідбергівських станів ітербію Yb і тулію Tm, пов'язаних з аномально малими ширинами рідбергівських резонансів. Очевидно, що ці дані, крім всього іншого, мають велике значення для

спектроскопії рідкоземельних атомів. З цього приводу виникає питання мотивації вибору саме цих атомів лантаноїдів (Tm, Yb), а не інших, тобто, хоча б короткий коментар, напр., з урахуванням складності електронної структури вибраних атомів у порівнянні з іншими атомами лантаноїдів, вибір був доречним. Також варто пояснити, якою є перспектива застосування нової теорії для інших рідкоземельних атомів, і ще не менш важливо, атомів актиноїдів, трансуранових та взагалі надважких елементів. Точка зору автору з цього приводу була б дуже цікава.

По-шосте, в багатоелектронних системах, якими є важкі атоми, часто важко передбачити фізичні механізми, відповідальні за прояв тих чи інших ефектів. В такому разі, використовуючи всі відомі ідеї, варто було б зупинитись для пояснення сильних резонансних ефектів на ідеї дробового резонансу (співвідношення частот двох квантових переходів n_1/n_2 , де n_1 і n_2 – цілі числа), який грає значну роль в лазерах на вільних електронах за рахунок резонансу між обертонами.

Методичні зауваження.

1) Як автореферат, так й сама дисертація, перевантажені аббревіатурами і скороченнями, причому як в українськомовному і російськомовному варіантах, так і латиниці. Хоч на стор. 26-27 дано відповідне пояснення, тим не менше це суттєво ускладнює читання безумовно нової та дуже цікавої роботи.

2) В роботі є невдалі вислови, смислові неточності та граматичні помилки. Зокрема у скороченні «ТЗ РМВРТ» перші дві літери «ТЗ» є зайвими (стор. 32); пропущена буква «R» у скороченні «МВРТ» (стор. 39); некоректний переклад українською фізичного терміну «зворотних см^{-1} » – замість «обернені» (стор. 46.), «минулого сторіччя» – замість «століття» (стор. 55); замість «обліку» слід вжити «урахування» (стор. 59).

Висновок. З точки зору поставленої мети та вирішених задач, наукової новизни, теоретичної та практичної значущості отриманих результатів дисертаційна робота Терновського В.Б. є завершеною роботою, в якій фактично закладені основи нового напрямку у сучасній оптиці та спектроскопії важких атомів - релятивістської теоретичної прецизійної спектроскопії важких звичайних багатоелектронних, а також екзотичних адронних (каонних) систем з одночасним прецизійним урахуванням ядерних, радіаційних, обмінно-кореляційних ефектів, яка базується на: а) формалізмі комбінованої калібрувальньо-інваріантної релятивістської багаточастинкової теорії збурень з оптимізованим нульовим наближенням Дірака-Фока-Брейта та узагальненому енергетичному підході, б) новому ефективному релятивістському підході до розрахунку параметрів β -розпаду (дозволених переходів) важких систем в межах прецизійної кооперативної електронно- β -ядерної спектроскопії атомних систем, що одночасно складає **вирішену наукову проблему**.

Зміст автореферату відповідає основним положенням роботи, які досить повно опубліковані у відомих наукових журналах (особливо слід відзначити значну кількість публікацій у міжнародних фахових журналах та виданнях, у

т.ч. видавництв Springer, InTech, з досить високим імпаکت-фактором, що входять до міжнародних науково-метричних баз) і апробовані на відомих, як правило, міжнародних конференціях та конгресах.

Використання результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи Терновського В.Б. можуть бути використані у наукових планах та програмах досліджень відповідних установ, зокрема, університетів та інститутів МОН України, НАН України, а також взагалі організацій, де займаються розв'язанням широкого кола задач атомної, молекулярної, лазерної фізики, фізики плазми, астрофізики, радіоастрономії тощо.

Вважаю, що дисертаційна робота Терновського Валентина Борисовича **“Релятивістська спектроскопія важких атомів з урахуванням обмінно-кореляційних та радіаційних ефектів”** за своєю актуальністю, новизною, науковою цінністю та іншими показниками відповідає вимогам пунктів 9, 10, 12-14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів від 24.07.2013 р. №567 (із змінами і доповненнями) і наказу МОН України від 12.01.2017 р. № 40 щодо оформлення дисертацій, а автор роботи, Терновський Валентин Борисович, безумовно заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05 – оптика, лазерна фізика.

Офіційний опонент:

Доктор фізико-математичних наук, професор
професор кафедри загальної та прикладної фізики
Національного авіаційного університету,
Заслужений діяч науки і техніки України
08.09.2021



П.О. Кондратенко



Підпис гр. Кондратенка П.О.
з а с в і д ч у ю

Вчений секретар
Національного авіаційного університету

М. Мельник