

**Відгук
офіційного опонента**

на дисертаційну роботу Карпуса Степана Геннадійовича
«Отримання пучків багатозарядних іонів газів на малогабаритному
електростатичному прискорювачі горизонтального типу», що представлена на
здобуття наукового ступеня кандидата фізико - математичних наук за
спеціальністю 01.04.20 - фізика пучків заряджених частинок.

Можливості використання наукових приладів для проведення різноманітних досліджень залежать від технічних характеристик приладів та від професіоналізму, інтелекту, навіть мистецтва розробників. Інколи технічні характеристики існуючих приладів недостатні для виконання досліджень і у експериментаторів виникає дилема: обрати досить коштовний варіант використання новітнього обладнання, чи модифікувати існуюче. В сучасних умовах другий варіант значно реальніший, однак потребує зусиль та неабиякого рівня професіоналізму. Автор дисертації та його колеги зосередились на другому варіанті рішення проблеми.

В роботі була раціонально використана ядерно-фізична установка на базі електростатичного прискорювача «Сокіл», що свідчить не стільки про винахідливість автора і його колег, а скоріше про вміння знайти можливості для досить серйозних досліджень тонких покриттів в скрутних умовах сьогодення.

При цьому кількість та складність фізичних задач, які повстали перед дослідником, значно збільшились. По-перше об'єктом досліджень у дисертаційній роботі стали динаміка пучків частинок в прискорювальному комплексі та методи створення багатозарядних іонів в плазмовому розряді, а по-друге задачі з використання такого сфокусованого пучку для аналізу поверхні тонких плівок.

Сутність роботи автора дисертації в тому, що для дослідження поверхні тонких плівок було використано багатозарядні іони, що дозволяє в умовах прискорення на даній установці підняти в рази енергію іонів пучка.



Для цього було розроблено технологію генерації таких багатозарядних іонів. Такі технології можна створювати тільки дуже розуміючись в природі плазмових процесів, що являє собою не тільки технологічну, а також складну фізичну проблему. При цьому передбачалось, що така установка повинна проводити сепарацію та фокусування іонів, та відповідати умовам експериментів для ретельних досліджень тонких покриттів. Дійсно, автори дуже раціонально використали резонанс пружного розсіювання $^{16}\text{O}(\alpha, \alpha)^{16}\text{O}$, $E_{\text{res}}=3,037 \text{ MeV}$, який можна було досягнути тільки якщо підвищити енергію прискорених іонів.

В роботі також використані аналітичні оцінки ефективності іонізації та числові методи розрахунків траєкторій іонів. Розглянуто механізми розділення (сепарації) пучків та оцінка проходження іонів в речовині. Що дозволило порівняти теоретичні і експериментальні дані для виявлення реальної картини процесів. Це демонструє досить ґрунтовний та професіональний підхід та високу культуру наукового дослідження. Все це свідчить про неабияку *актуальність даної роботи*.

Дисертаційна робота Карпуся Степана Геннадійовича «Отримання пучків багатозарядних іонів газів на малогабаритному електростатичному прискорювачі горизонтального типу» складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і одного додатку.

Вступ дає відповідь на питання, наскільки тема роботи актуальна, сформульовано зв'язок роботи з науковими програмами, яка ціль дослідження, практичне значення результатів, вклад автора, апробація результатів, публікації і т. і.

У **першому розділі** розглянуто основні питання, які дають можливість вибору структури базової установки. Розглянуто методи отримання багатозарядних іонів газів на електростатичних прискорювачах та загальні вимоги до джерел багатозарядних іонів, підходи до застосування багатозарядних іонів газів на ядерно-фізичній установці ЕП «Сокіл», представлено обґрунтування використаних методик. Все це дозволило

сформулювати проблему та перейти до реалізації установки, що одержує пучки багатозарядних іонів газів на малогабаритному прискорювачі Ван де Граафа горизонтального типу.

У **другому розділі** розглянуто опис експериментального устаткування. Представлено дані, отримані при випробуванні джерела багатозарядних іонів на стенді, а також на ядерно-фізичній установці «Сокіл» на каналі опромінення і каналі «Універсальна камера».

Автор дисертації демонструє як на базі розряду Пеннінга створив джерело багатозарядних іонів, досліджує характеристики пучка іонів в залежності від параметрів розряду, зокрема напруги і тиску робочого газу. Знайдено також інші важливі характеристики: масовий склад, спектр іонів за енергіями, поперечний розподіл густини іонів у пучку. На ядерно-фізичній установці ЕП «Сокіл» отримано струми пучків багатозарядних іонів Ne і Ar у камері, визначено діаметр пучку іонів Ne^+ (вихід каналу випромінювання). Використано методики розділення іонів $^4\text{He}^{2+}$ і H_2^+ на тонких вуглецевих плівках (79 і 300 нм), та за допомогою магнітного мас-аналізатору і електростатичного аналізатора. Отримано також пучки іонів $^4\text{He}^{2+}$ з низьким вмістом іонів H_2^+ , і пучок іонів $^3\text{He}^{2+}$ з енергіями до 3,6 MeV.

У **третьому розділі** більш детально розглядається джерело багатозарядних іонів на основі розряду Пеннінга, що зроблено з урахуванням загальних і специфічних вимог з боку малогабаритного ЕП «Сокіл». Проаналізовано вплив розрядної напруги та тиску робочого газу на ефективність створення таких іонів. Використано при цьому такі гази, як неон, аргон, гелій і водень. Розглянуто кутові розподіли іонів у пучках, розподіл за енергіями іонів. Взагалі кажучи, матеріал третього розділу – це опис рішення окремої фізичної задачі з дуже жорсткими умовами конструктивної реалізації. Однак і аналіз фізичних умов також цікавий, зокрема автор показує, що основний внесок в утворенні багатозарядних іонів у джерелах даного типу вносять однократні зіткнення електронів з атомами і молекулами.

У **четвертому розділі** розглянуто вибір методів інжекції іонів, зокрема систем витягування і фокусування іонів. Для цього було проведено числовими методами аналіз траєкторій іонів в вибраних умовах. Найбільш цікавою ще однією фізичною задачею було теоретично обґрунтування розділення пучків ${}^4\text{He}^{2+}$ і H_2^+ на установці, при використанні магнітного мас-аналізатору і електростатичного аналізатора та вільних вуглецевих плівок, що дозволило одержати пучки іонів ${}^4\text{He}^{2+}$ з низьким вмістом іонів H_2^+ . Показано, як це було реалізовано та скомпоновано в експериментальній установці.

В **п'ятому розділі** показано, як за рахунок зворотного розсіювання і ядерних реакцій було реалізовано важливі експериментальні дослідження характеристик тонких покриттів широкого спектра застосування. З одного боку це застосування розробленого джерела багатозарядних іонів на основі розряду Пеннінга, з другого боку - це нова окрема фізична задача, що враховує можливість глибокого проникнення багатозарядних іонів та їх ефективного резонансного розсіювання. Зокрема показано, як резонанс пружного розсіювання ${}^{16}\text{O}(\alpha, \alpha){}^{16}\text{O}$, $E_{\text{res}}=3,037$ MeV може бути використано для визначення стехіометрії тонкого покриття Nb_2O_5 на основі з SiO_2 . Визначено також вміст кисню у пористих покриттях, що є важливим доповненням для оцінки пористості.

Зробимо деякі зауваження стосовно тексту дисертації.

1. Не було необхідності використовувати аббревіатуру в тексті дисертації, де по-перше досить місця для формулювання результатів без скорочень, а по-друге це заважає розуміти ці результати.

2. Не має нумерації формул, що не дає можливості використовувати текст при обговоренні.

3. Другий та третій розділи можна було б зробити як один розділ.

Ці зауваження не знижують високої оцінки дисертаційної роботи

Основними результатами дисертації є:

1. Розробка компактного інжектора багатозарядних іонів на базі джерела типу Пеннінга для електростатичного прискорювача «Сокіл», де було вперше

отримано пучки багатозарядних іонів на виході з прискорювача: $^3\text{He}^{2+}$, $^4\text{He}^{2+}$, $^{40}\text{Ar}^{2+}$, $^{40}\text{Ar}^{3+}$, $^{20}\text{Ne}^{2+}$, $^{20}\text{Ne}^{3+}$. До цього часу на даному типі прискорювачів (малогабаритні, горизонтального типу Ван де Граафа) багатозарядні іони не прискорювалися.

2. Було проведено аналіз процесів утворення багатозарядних іонів з розряду Пеннінга в даних умовах. Знайдено розподіли іонів за енергією в залежності від параметрів розряду та інших факторів. Показано переваги використання методів аналізу на пучку двозарядних іонів для ядерно-фізичної установки «Сокіл» при визначенні товщини, стехіометрії та вмісту домішок в тонких покриттях широкого спектру використання.

Можна констатувати, що за рахунок комплексного рішення цілої низки досить складних фізичних та конструкторських задач на малогабаритному горизонтального типу прискорювачі Ван де Граафа була створена ефективна експериментальна установка для формування пучка багатозарядних іонів досить високої енергії, та продемонстрована її ефективність для дослідження тонких покриттях широкого спектру використання. Це має велику *практичну цінність*.

Основні матеріали дисертації, які відомі спеціалістам, опубліковано у 6 спеціалізованих фахових наукових виданнях, що задовольняють вимогам ДАК МОН України до публікацій, на яких ґрунтується дисертаційна робота (5 з них включено до наукометричних баз), 2 статті у науково-технічних журналах, 12 робіт в збірниках, тезах та доповідях на конференціях.

Результати дисертації *актуальні*, положення та висновки *достовірні та обґрунтовані*, так як для цього був використаний коректний математичний апарат та числові методи дослідження. Експериментальні дослідження проведено *серйозно* та *ґрунтовно*, матеріали досліджень *достатньо ілюстровано*.

В цілому автор дисертації продемонстрував високий рівень кваліфікації. Результати роботи будуть корисні не тільки для розвитку фізичних та технічних методів прискорення багатозарядних іонів, розробки методів їх

використання в різних експериментальних та технологічних приладах, а також для формування системного підходу до розробки низки пов'язаних фізичних процесів, які є базою для реальних прискорювальних комплексів.

Автореферат дисертації досить повно відображає зміст дисертації, основні результати дисертаційної роботи вчасно опубліковані.

Вважаю, що дисертація Карпуща Степана Геннадійовича «Отримання пучків багатозарядних іонів газів на малогабаритному електростатичному прискорювачі горизонтального типу» задовольняє вимогам ДАК МОН України до кандидатських дисертацій, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико - математичних наук за спеціальністю 01.04.20 - фізика пучків заряджених частинок.

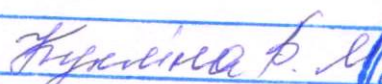
Офіційний опонент

Доктор фіз.-мат. наук

Професор



Куклін В. М.

Підпис 
ЗАСВІДЧУЮ
Учений секретар Харківського національного
університету імені В.Н.Каразіна

