

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені В. Н. КАРАЗІНА

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У ЗАПОРОШЕНІЙ  
ГАЗОРОЗРЯДНІЙ ПЛАЗМІ**

**Монографія**

Харків – 2021

УДК 533.9  
М 74

**Рецензенти:**

**І. О. Анісімов** – професор, доктор фізико-математичних наук, заслужений діяч науки і техніки України, завідувач кафедри радіотехніки та радіоелектронних систем факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка;

**Ю. В. Слюсаренко** – професор, доктор фізико-математичних наук, академік НАН України, начальник відділу статистичної фізики і квантової теорії поля Інституту теоретичної фізики ім. О. І. Ахієзера ННЦ ХФТІ;

**О. К. Черемних** – професор, доктор фізико-математичних наук, член-кореспондент НАН України, заступник директора з наукової роботи в Інституті космічних досліджень НАН України та Державному космічному агентстві України (м. Київ).

*Затверджено до друку рішенням Вченої ради  
Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна  
(протокол № 10 від 27.09.2021 р.)*

**Моделивання** процесів у запорошеній газорозрядній плазмі : монографія /  
М 74 М. О. Азаренков, І. Б. Денисенко, А. Г. Загородній, А. І. Момот. – Харків : ХНУ  
імені В. Н. Каразіна, 2021. – 244 с.  
ISBN 978-966-285-736-8

Описано різні підходи для обчислення заряду пилових частинок (які ще називають порошинками) у плазмі та для знаходження потенціалу навколо порошинок. Представлено теоретичні та числові моделі для опису властивостей плазми з високою густиною заряду порошинок, а саме для знаходження концентрацій електронів та іонів, ефективної температури електронів, функції розподілу електронів за енергією, заряду порошинок, втрат електронів та іонів у розряді та втрат енергії електронів у різних процесах. Дослідження проведено в гідродинамічному та кінетичному наближеннях. Розглянуто квазістаціонарну запорошену плазму та нестаціонарну запорошену плазму у режимі післясвітіння.

Для студентів магістерської підготовки, аспірантів та науковців, які спеціалізуються в галузі фізики плазми, фізики газового розряду та теоретичної фізики.

**УДК 533.9**

ISBN ISBN 978-966-285-736-8

© Харківський національний університет  
імені В. Н. Каразіна, 2021

© Азаренков М. О., Денисенко І. Б.,  
Загородній А. Г., Момот А. І., 2021

© Чорна О. Д., макет обкладинки, 2021

## ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	5
<b>Розділ 1. Запорошена плазма як об'єкт досліджень. Властивості та методи описання запорошеної плазми.</b> .....	10
1.1. Параметри запорошеної плазми .....	10
1.2. Заряджання порошинок у плазмі.....	12
1.2.1. Модель обмеженого орбітального руху.....	12
1.2.2. Дрейфово-дифузійне наближення .....	15
1.3. Модель точкових стоків у дрейфово-дифузійному наближенні.....	17
1.3.1. Стаціонарний випадок.....	19
1.3.2. Динамічне екранування.....	19
1.4. Неідеальність запорошеної плазми і фазові переходи .....	21
1.5. Кінетична теорія плазми як складова теорії запорошеної плазми.....	23
1.5.1. Кінетичне рівняння.....	23
1.5.2. Функція діелектричного відгуку для плазми без зіткнень .....	27
1.5.3. Вплив зіткнень на діелектричні характеристики плазми (модельний опис) .....	31
1.6. Мікроскопічна теорія запорошеної плазми .....	34
1.6.1. Кінетичне рівняння для мікроскопічної фазової густини .....	34
1.6.2. Кінетичні рівняння для запорошеної плазми.....	39
<b>Розділ 2. Ефективний потенціал зарядженої макрочастинки</b> .....	45
2.1. Ефективний заряд макрочастинки в моделі Пуассона – Больцмана ..	46
2.1.1. Постановка задачі .....	46
2.1.2. Ізотермічна плазма .....	49
2.1.3. Неізотермічна плазма .....	51
2.1.4. Висновки .....	54
2.2. Ефективний потенціал порошинки у сильнозіткненній плазмі.....	55
2.2.1. Постановка задачі і основні рівняння .....	55
2.2.2. Ефективний потенціал.....	57
2.2.3. Висновки .....	66
2.3. Кінетична теорія ефективного потенціалу порошинки.....	66
2.3.1. Модель точкових стоків .....	68
2.3.2. Вплив зіткнень на ефективний потенціал .....	77
2.3.3. Висновки .....	84
2.4. Порошинка у сильнозіткненній плазмі у зовнішньому магнітному полі .....	84
2.4.1. Постановка задачі.....	84
2.4.2. Порошинка у плазмі із замагніченими електронами і незамагніченими іонами .....	89
2.4.3. Висновки .....	96
<b>Розділ 3. Дослідження запорошеної газорозрядної плазми у гідродинамічному наближенні</b> .....	97
3.1. Вплив порошинок на просторові параметри ємнісного розряду.....	98

3.2. Просторові розподіли параметрів плазми в електронегативному газовому розряді з порошинками субмікронного розміру.....	110
3.3. Властивості електронегативної плазми з порошинками радіусом 5-10 нм.....	123
3.4. Висновки до третього розділу.....	134
<b>Розділ 4. Дослідження аргонної плазми, яка містить порошинки субмікронного розміру, у кінетичному наближенні .....</b>	<b>136</b>
4.1. Обґрунтування моделей запырошеної плазми.....	137
4.2. Просторово-усереднені параметри запырошеної аргонної плазми... ..	142
4.3. Одновимірні моделі запырошеної аргонної плазми.....	153
4.4. Просторовий розподіл температури електронів у неоднорідній запырошеній плазмі ємнісних та індукційних розрядів.....	161
4.5. Вплив дрейфу електронів до стінок розрядної камери на функцію розподілу електронів за енергією.....	168
4.6. Аналітичні вирази, які описують функцію розподілу електронів за енергією у запырошеній плазмі, що підтримується зовнішнім електричним полем.....	173
4.6.1. Наближений аналітичний розв'язок однорідного рівняння Больцмана у випадку запырошеної плазми.....	174
4.6.2. Залежність ФРЕЕ від концентрації порошинок та їх радіуса і порівняння результатів розрахунків, отриманих із аналітичної моделі, з результатами числових розрахунків.....	177
4.7. Висновки до четвертого розділу.....	185
<b>Розділ 5. Дослідження запырошеної плазми, що є у фазі післясвітіння.....</b>	<b>188</b>
5.1. Результати числового моделювання запырошеної плазми, що є у фазі післясвітіння, за допомогою просторово-усередненої моделі.....	189
5.1.1. Модель.....	190
5.1.2. Результати числових розрахунків.....	196
5.2. Функція розподілу електронів за енергією у запырошеній плазмі післясвітіння.....	207
5.2.1. Теоретична модель та основні припущення.....	208
5.2.2. Частота пружних електрон-атомних зіткнень залежить від енергії електронів.....	210
5.2.3. Частота пружних електрон-атомних зіткнень незалежна від енергії електронів.....	214
5.2.4. Функція розподілу електронів за енергією за різних зовнішніх умов.....	217
5.3. Висновки до п'ятого розділу.....	223
Післямова.....	227
Список використаних джерел.....	230