



Міністерство освіти і науки України

ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет енергетики, робототехніки та
комп'ютерних технологій

Кафедра електропостачання та енергетичного
менеджменту

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Методичні вказівки
до виконання лабораторної роботи
«Визначення електричної міцності повітря» для здобувачів
першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної форми
навчання зі спеціальності
141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Харків
2023

Міністерство освіти і науки України
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Факультет енергетики, робототехніки та
комп'ютерних технологій**

**Кафедра електропостачання та енергетичного
менеджменту**

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Методичні вказівки
до виконання лабораторної роботи
«Визначення електричної міцності повітря» для здобувачів першого
(бакалаврського) рівня вищої освіти денної форми навчання
зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

Затверджено рішенням
науково-методичної ради
факультету енергетики,
робототехніки та комп'ютерних
технологій
Протокол № 3
від 22 лютого 2023 року

Харків
2023

УДК 620.311

Схвалено на засіданні кафедри
електропостачання та енергетичного менеджменту
Протокол №7 від 8.02.2023 р.

Рецензенти:

С. О. Тимчук, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ДБТУ.

Ю. М. Хандола, канд. техн. наук, зав. кафедри електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та електротехніки ДБТУ.

Електротехнічні матеріали: Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи «Визначення електричної міцності повітря» студентами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навч., спец.: 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»; Державний біотехнологічний університет; упоряд.: В. Г. Пазій – Харків: 2023. – 14 с.

Методичні вказівки включають відомості про газоподібні діелектрики, їхні властивості та застосування в техніці. Наведено методику визначення електричної міцності повітря, заходи безпеки при виконанні роботи, формули для розрахунку та вимоги для оформлення звіту. Також методичні вказівки містять питання для самоперевірки. Виконання лабораторної роботи допоможе майбутнім фахівцям використовувати отримані знання на практиці.

Видання призначене для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

УДК 620.311

Відповідальний за випуск: **В. Г. Пазій**

© Пазій В.Г. 2023.

© ДБТУ, 2023

МЕТА РОБОТИ

Метою даної роботи є вивчення явища електричного пробою повітря, ознайомлення зі способами визначення електричної міцності газоподібних діелектриків, визначення впливу форми електричного поля та відстані між електродами на електричну міцність повітря.

ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Вивчити теоретичні відомості про газоподібні діелектрики і механізми їх пробою.
2. Ознайомитись з випробувальною установкою та технікою безпеки при виконанні роботи.
3. Записати в звіт паспортні дані приладів та апаратів.
4. Визначити електричну міцність повітря в однорідному та неоднорідному електричному полі.
5. Побувати графічну залежність електричної міцності повітря в однорідному та неоднорідному полях від відстані між електродами.
6. Зробити висновок по роботі та оформити звіт.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Електрична міцність пробою $E_{пр}$ є однією з основних характеристик ізоляційних матеріалів. Кожен діелектрик, що знаходиться в електричному полі, втрачає властивості ізолюючого матеріалу, якщо напруженість електричного поля перевищить деяку критичну величину.

Явище втрати матеріалом його електроізоляційних властивостей при перевищенні певного критичного значення напруженості електричного поля називається *пробоем діелектрика*. Пробій діелектрика призводить до утворення в ньому каналу з високою електричною провідністю.

Ізоляційний проміжок – пристрій, чи елемент пристрою, що містить електропровідні елементи з діелектриком між ними.

Значення напруги, при якій відбувається пробій ізоляційного проміжку називається *напругою пробою*. Вона позначається $U_{пр}$ і вимірюється у вольтах або кіловольтах. Відповідне значення напруженості електричного поля називається *електричною міцністю*

діелектрика. Електрична міцність характеризується величиною напруги на одиницю довжини діелектрика в напрямку прикладеного електричного поля, яку він може витримати не руйнуючись.

Електрична міцність визначається відношенням напруги пробою до товщини діелектрика:

$$E_{np} = U_{np} / h ,$$

де h – товщина діелектрика в місці пробою.

На практиці зручно напругу виражати в кВ, а товщину в мм. Тоді електрична міцність буде у кВ/мм. Для переходу до одиниць СІ можна користуватись МВ/м. $1 \text{ МВ/м} = 10^6 \text{ В/м} = 1 \text{ кВ/мм}$.

Повітря є ізолятором в багатьох електричних пристроях (трансформатори, ЛЕП, конденсатори). Електрична міцність його в порівнянні з рідинами і твердими діелектриками досить низька.

На відміну від слабких електричних полів, у сильних електричних полях, характерних для роботи електричної ізоляції, виникають нові явища, пов'язані з іонізаційними процесами.

Залежність струму в газі від прикладеної напруги має три характерні ділянки (рис. 1.1). Перша ділянка (ОА) – лінійна залежність, друга ділянка АВ – насичення, третя ділянка ВС – експонентний ріст. На ділянці ВС діелектричні втрати починають зростати. Причина полягає в появі додаткових носіїв заряду у ізоляційному проміжку за рахунок виникнення *ударної іонізації*.

Ударна іонізація – це фізичне явище збільшення числа електронів та іонів у проміжку за рахунок зіткнення електронів з підвищеною енергією з нейтральними молекулами.

Звідки беруться електрони з підвищеною енергією?

У газі міститься невелика кількість позитивних і негативних іонів та електронів, що перебувають в тепловому русі. Електрони з'являються з електродів, або в результаті розпаду негативного іона, або в результаті термоіонізації. В електричному полі на електрон діє сила, в результаті чого він набирає енергію, прискорюється та до зіткнення з молекулою проходить певну відстань, яка називається *довжиною вільного пробігу*.

Довжина вільного пробігу – середня відстань, яку проходить електрон або іон до непружного зіткнення з молекулою.

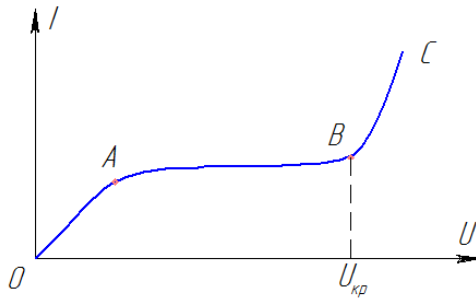


Рисунок 1.1 – Залежність струму витоку в повітрі від напруги

Після проходження відстані l енергія, яку отримує електрон або іон, складе $\Delta W = eEl$. При цьому в кожному акті іонізації витрачається енергія іонізації W . При зіткненні енергія цих частинок передається атомам і молекулам речовини і збуджує їх. Тобто виникає **ударна іонізація** – розщеплення молекули на іон-електрон. При ударній іонізації утворюється **електронна лавина** – експоненційний ріст кількості носіїв заряду в проміжку від катода до анода за рахунок ударної іонізації молекул. Лавина – це ще не пробій. Необхідно, щоб після проходження лавини на катоді знову з'явився електрон. Після цього виникає повторна лавина, потім ще і т.д.

Іонізація електронами відбувається у тому випадку, якщо кінетична енергія електрона, що налітає, $mV^2/2 > W$ за схемою $e+A = A^+ + e+e$. Такий тип іонізації називається *прямою іонізацією*. Тут A – молекула або атом газу.

При заданих значеннях тиску газу і температурі ударна іонізація починається при певній напруженості поля, яка називається *початковою напруженістю*.

Крім іонізації молекул електронами можлива *фотонна іонізація (фотоіонізація), термоіонізація й автоіонізація*.

Фотонна іонізація – вибивання електронів фотонами при енергії фотона не меншій, ніж енергія іонізації.

Фотонна іонізація призводить до розвитку в газі каналів з підвищеною електропровідністю – так званих стримерів. В результаті фотонної та ударної іонізації кількість іонів та електронів у всьому об'ємі газу різко (лавиноподібно) зростає і для існування розряду в газі зовнішній іонізатор вже не потрібен, тобто розряд стає самостійним.

Відбувається фотоіонізація наступним чином. В деяких випадках електрон, розігнаний полем, може не іонізувати молекулу, а перевести

її в збуджений стан – тобто викликати зміну в русі електронів молекули. Ця молекула віддає потім свою надлишкову енергію у вигляді випромінювання (фотона). Фотон поглинається іншою молекулою, яка може при цьому іонізуватись. Така внутрішня іонізація (фотонна іонізація) внаслідок великої швидкості поширення випромінювання призводить до особливо швидкого розвитку в газі каналів з підвищеною провідністю. Ріст провідного каналу відбувається швидше, ніж просування лавини електронів (рис. 1.2).

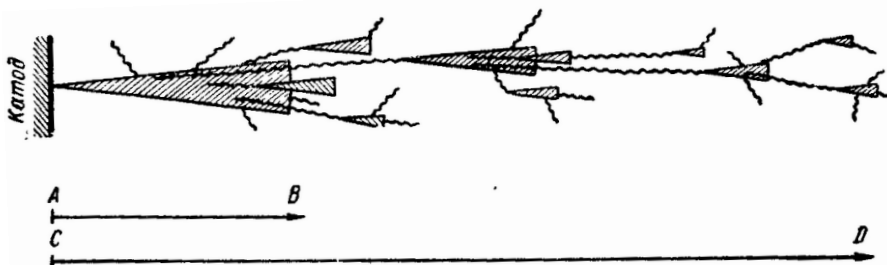


Рисунок 1.2 – Механізм фотонної іонізації

Термоіонізація – поява вільних електронів і іонів за рахунок теплової енергії. Термоіонізація має помітні швидкості при температурі в кілька тисяч градусів.

Автоіонізація – виривання електрона з молекули за рахунок дії сильного електричного поля. Помітну роль у появі електронів автоіонізація починає відігравати в полях більших 10 МВ/см.

У реальній електричній ізоляції слід враховувати контакт діелектрика з електродами. При цьому можливо зародження нових носіїв заряду за участю електрода фактично за допомогою тих же процесів, тобто фотоэффекта, автоіонізації, вибивання електрона позитивним іоном.

Пробій газоподібного діелектрика обумовлюється явищем ударної та фотонної іонізації і процес пробію проходить по різному в залежності від форми електричного поля (однорідне чи неоднорідне).

Після пробію газового проміжку він заповнюється газорозрядною плазмою. Надалі, в залежності від потужності джерела напруги в проміжку розвиваються різні види розрядів. Якщо джерело недостатньо потужне й тиск невеликий, то розвивається *тліючий розряд*. Цей розряд відбувається в повному об'ємі, він має кілька характерних зон, основні з яких – темний простір біля катода й світний анодний стовп. У темному

просторі електрони не мають достатньої енергії для руйнування збуджених молекул і тому немає світіння. У позитивному стовпі світіння викликане випромінюванням збуджених молекул. Аодне світіння використовується в люмінесцентних лампах.

У випадку потужного джерела напруги в проміжку після пробую виникає *дуговий розряд*. Він характеризується вузьким високотемпературним каналом з високою густиною струму і використовується при електрозварюванні.

Вплив форми поля на пробій газів

Явище пробую газу залежить від однорідності електричного поля, в якому відбувається пробій.

Однорідне поле можна отримати між плоскими електродами з заокругленими краями, а також між сферами при відстані між ними, співрозмірними з їх діаметром, а *неоднорідне* – між площиною та вістрям.

В однорідному полі пробій виникає миттєво при досягненні строго певної напруги, яка залежить від температури і тиску газу. Між електродами виникає іскра, що може перерости в дугу.

При малих відстанях спостерігається зростання електричної міцності пробую. Це можна пояснити складністю формування розряду. Так при 1 см $E_{np} = 3$ МВ/м, а при 5 мкм $E_{np} = 70$ МВ/м.

Залежність розрядної напруги від зовнішніх факторів описує закон Пашена $U = f(pd)$, або $E/p = F(pd)$. Тут p – тиск у газі, d – міжелектродний проміжок. Характерна крива для пробую газів наведена на рис. 1.3 Вона має мінімум, значення і положення якого залежать від виду газу. Наприклад, для повітря мінімум пробивної напруги становить 300 В і він досягається поблизу $pd \sim 1$ Па·м.

В *неоднорідному електричному полі* при поступовому збільшенні напруги спостерігається *явище корони* або *тихого розряду*, яке при дальшому збільшенні напруги переходить в іскровий, а потім в *дуговий розряд*.

Пробивна напруга в однорідному електричному полі завжди більша пробивної напруги в неоднорідному полі. Крім цього, в неоднорідному полі як і в однорідному, пробивна напруга газу залежить від відстані між електродами, температури, тиску та роду струму.

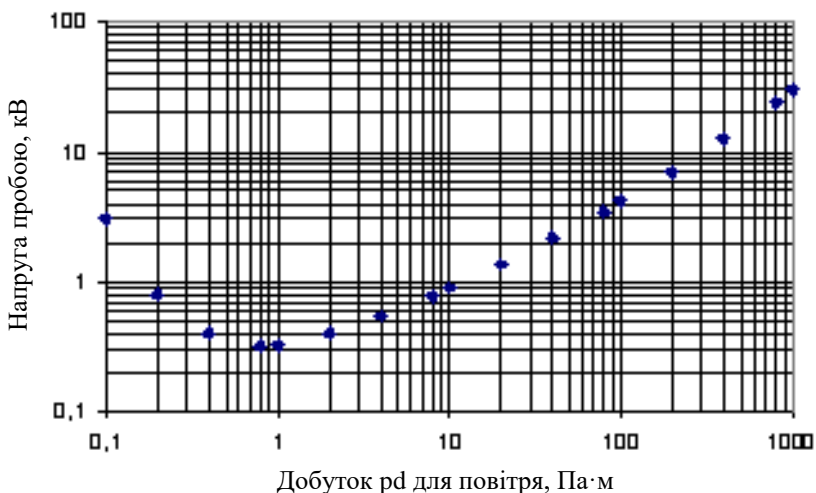


Рисунок 1.3 – Крива Пашена для лавинного пробую повітряного проміжку

Техніка безпеки та порядок роботи з установкою для пробую повітря

Вимірювання електричної міцності повітря виконують на змінному струмові частотою 50 Гц шляхом поступового підвищення напруги до пробую.

Визначення електричної міцності повітря виконується за допомогою установки, електрична схема якої зображена на рис. 1.4. Дана установка розташована за металевою сітчастою огорожею, вхід в яку блокується кінцевим вимикачем SQ , встановленим на дверях огорожі. Входити за огорожу можна тільки з дозволу викладача.

Якщо хто-небудь знаходиться всередині огорожі високовольного трансформатора, то двері огорожі обов'язково повинні бути відкритими. Вмикання установки дозволяється тільки в присутності викладача.

При вмиканні високої напруги слід попередити працюючих командою "Вмикаю".

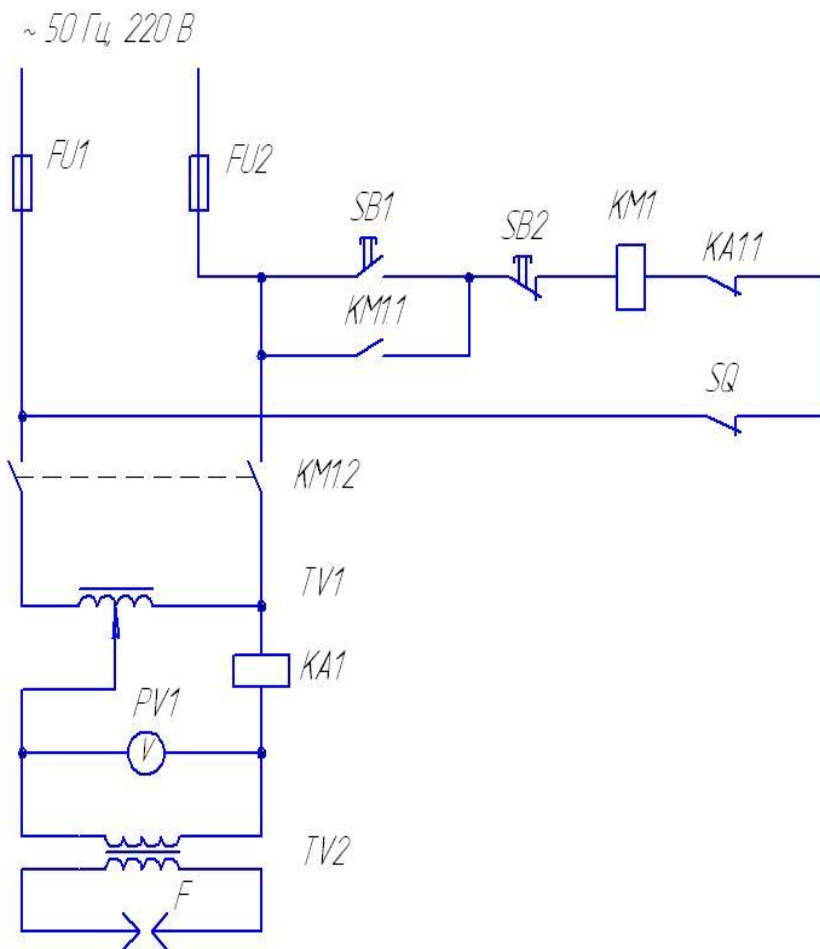


Рисунок 1.4 – Принципова електрична схема установки для пробою повітря

Регулювання напруги здійснюється на низькій стороні високовольтного трансформатора за допомогою автотрансформатора *TV1* типу ЛАТР. При вмиканні установки необхідно, щоб рукоятка автотрансформатора знаходилась на позначці "0". Захист трансформатора напруги *TV2* від короткого замикання при пробі забезпечується за допомогою реле максимального струму *KA1* типу РТ40/6, нормально замкнутий контакт *KA1.1* якого, послідовно з'єднаний з котушкою магнітного пускача *KM1*.

Вмикання високовольтного трансформатора здійснюється кнопкою *SB1* "Пуск", вимикання – кнопкою *SB2* "Стоп". До високовольтних клем трансформатора НОМ-10 через гумові шланги з водою приєднаний розрядник *F*.

Розрядник складається зі штоків: рухомого та нерухомого, на які нагвинчуються змінні електроди. Електроди виконані з латуні у вигляді циліндрів висотою 25 мм та діаметром 25 мм; сфер діаметром 25 мм та конуса з діаметром основи 25 мм і висотою 35 мм.

ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Вимірювання пробивної напруги повітря між двома плоскими електродами проводиться в такій послідовності:

1. Нагвинтити на нерухомий та рухомий штоки розрядника циліндричні електроди.

2. За допомогою рухомого штока та щупа встановити відстань між електродами $l = 1$ мм і простежити щоб основи циліндрів були взаємно паралельні.

3. Вийти з металевї огорожі високовольтного трансформатора та зачинити за собою двері огорожі.

4. Впевнитися, що покажчик автотрансформатора перебуває в положенні "0".

5. З дозволу викладача увімкнути установку і поступово підвищувати напругу за допомогою ЛАТРа. При цьому один із виконавців повинен уважно стежити за показами вольтметра *PVI*, а інший – за розрядником. Швидкість збільшення напруги не повинна перевищувати 0,25 кВ/с.

6. В момент пробою розрядного проміжку треба запам'ятати пробивну напругу. Після пробою покажчик ЛАТРа повернути на позначку "0".

7. Не заходячи всередину огорожі і не змінюючи відстані між електродами, провести пробій ще 2 рази (тобто виконати пункти 4 – 6), а середнє арифметичнє трьох вимірювань записати до табл. 1.2.

8. Аналогічно провести досліди для значення відстані між електродами $h = 2$ мм, $h = 3$ мм, $h = 4$ мм, $h = 5$ мм. Результати занести до таблиці (табл. 1.2).

9. Замінити на рухомому штокові циліндр на конус і провести аналогічні виміри.

10. Замінити електроди на два конуси і провести аналогічні виміри.

11. За результатами роботи оформити звіт.
12. Дати відповідь на контрольні питання.

ПЛАН СКЛАДАННЯ ЗВІТУ

Звіт до лабораторної роботи виконується на аркушах формату А4 з одного боку і повинен містити нижчевказані пункти.

1. Титульний лист встановленого зразка з темою роботи і прізвищами виконавців.
2. Мета роботи.
3. Технічні дані вимірювальних приладів, що використовуються в роботі.

Таблиця 1.1 – Паспортні дані вимірювальних приладів

Позначення на схемі	Назва приладу	Марка приладу	Система	Заводський номер	Номінальні величини	Клас точності
PV1	Вольтметр					

Паспортні дані інших приладів (ЛАТР, реле струму і ін.) та їхні характеристики записуються в довільній формі.

4. Принципова електрична схема установки для визначення електричної міцності повітря. Схема викреслюється обов'язково вручну з дотриманням розмірів і стандартів умовних позначень елементів (ксерокопія не допускається).

5. Таблиця з внесеними вимірними даними та результатами розрахунків (табл. 1.2).

6. Формули для розрахунків з поясненнями.

В таблиці позначені:

U – покази вольтметра PV1, напруга на первинній обмотці випробувального трансформатора TV2, В;

U_{ef} – ефективне значення напруги на вторинній обмотці випробувального трансформатора TV2.

$$U_{ef} = (kU) / 1000, \text{кВ},$$

де k – коефіцієнт трансформації трансформатора TV2, $k = 100$.
 U_{np} – амплітудне значення пробивної напруги, кВ.

$$U_{np} = \sqrt{2} \cdot U_{ef}, \text{ кВ},$$

де U_{ef} – ефективне значення напруги на вторинній обмотці випробувального трансформатора TV2, кВ.

E_{np} – електрична міцність повітря.

$$E_{np} = U_{np} / h, \text{ МВ/м},$$

де U_{np} – амплітудне значення пробивної напруги, кВ;

h – відстань між електродами, мм.

Таблиця 1.2 – Дані вимірювання напруги пробою та розрахунків електричної міцності повітря

№ П/П	h , мм	U , В	U_{ef} , кВ	U_{np} , кВ	E_{np} , МВ/м	Форма електродів
1	1					Циліндр – циліндр
2	2					
3	3					
4	4					
5	5					
6	1					Циліндр – конус
7	2					
8	3					
9	4					
10	5					
11	1					Конус – конус
12	2					
13	3					
14	4					
15	5					

7. Графіки залежності електричної міцності повітря від відстані між електродами $E_{np} = f(h)$ для різної форми електродів.

Для полегшення аналізу результатів вимірювання всі три графіки повинні бути виконані в одних осях координат.

8. Висновок по роботі.

У висновку необхідно проаналізувати отримані практичні результати, порівняти їх між собою та з теоретичними даними, а також сформулювати і записати помічену залежність між довжиною проміжку, формою електродів та електричною міцністю повітря.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Що таке пробій діелектрика?
2. Яка різниця між напругою пробою та електричною міцністю діелектриків?
3. Як змінюється струм в повітряному проміжку при зміні напруги від нуля до напруги пробою?
4. В чому полягає фізика пробою газоподібних діелектриків?
5. Що таке ударна іонізація?
6. Що таке довжина вільного пробігу електрона та електронна лавина?
7. Як відбувається фотонна іонізація?
8. Явища термоіонізації та автоіонізації.
9. Яка різниця в явищах пробою та електричної міцності повітря в однорідному та неоднорідному електричних полях?
10. Як змінюється електрична міцність повітря зі зміною відстані між електродами і чому?
11. Як залежить електрична міцність повітря від тиску і чому?
12. Як залежить електрична міцність повітря від температури?
13. Що таке коронний розряд та якими явищами він супроводжується?

Навчальне видання

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи

Визначення електричної міцності повітря

Автор - укладач:

ПАЗІЙ Володимир Григорович

Формат 60×84/16. Гарнітура Times New Roman
Папір для цифрового друку. Друк ризографічний.
Ум. друк. арк. 0,6. Наклад 100 пр.

Державний біотехнологічний університет
61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44