

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторної роботи

«ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОСТУПЕНЕВОГО КОМПРЕСОРА»

за курсами «Теоретичні основи теплотехніки»,

«Технічна термодинаміка», «Енергетичні установки»

для студентів технічних спеціальностей усіх форм навчання

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету
протокол № 1 від 28.01.2022 р.

Харків

НТУ «ХПІ»

2022

Методичні вказівки до лабораторної роботи «Дослідження двоступеневого компресора» за курсами «Теоретичні основи теплотехніки», «Технічна термодинаміка», «Енергетичні установки» для студентів технічних спеціальностей усіх форм навчання / уклад.: М. О. Тарасенко, О. М. Тарасенко. – Харків: НТУ «ХПІ», 2022. – 16 с.

Укладачі: М. О. Тарасенко
О. М. Тарасенко

Рецензент С. В. Угольніков

Кафедра теплотехніки та енергоефективних технологій

ВСТУП

Компресори – це машини, які призначені для виробництва стисненого газу та переміщення його по трубопроводах до споживачів.

За принципом дії компресори поділяють на об'ємні, турбінні та струменні. Незалежно від принципу дії при підвищенні тиску газів значно зменшується його об'єм та зростає температура газу.

Компресори характеризують такими основними параметрами:

- абсолютним тиском всмоктування;
- абсолютним тиском нагнітання;
- ступенем підвищення тиску ($\lambda = P_{\text{кін}}/P_{\text{поч}}$);
- ступенем стиснення ($\varepsilon = V_{\text{поч}}/V_{\text{кін}}$);
- подачею;
- потужністю на валу;
- коефіцієнтом корисної дії.

Роботу компресора зазвичай характеризують об'ємною подачею. Під цим розуміють об'єм газу, що подається в зовнішню мережу за одиницю часу, який зведено до умов на вході в компресор.

Зведення об'єму стисненого газу до умов на вході в компресор можна виконати за рівнянням

$$V_{\text{зв}} = V_{\text{вим}} \cdot P_2 \cdot T_1 / P_1 \cdot T_2, \quad (1)$$

де $V_{\text{зв}}$ – зведений об'єм газу, м³;

$V_{\text{вим}}$ – вимірний об'єм газу, м³;

P_2 – абсолютний тиск газу на виході із компресора, Па;

T_2 – абсолютна температура стисненого газу, К;

P_1 і T_1 – абсолютний тиск і температура всмоктуваного газу.

Цей показник залежить від умов стиснення і кінцевих параметрів газу. Процес стиснення газу в компресорі може здійснюватися за адіабатою,

ізотермою або політропою. Він залежить від умов теплообміну між газом і поверхнею циліндра, а також від продуктивності компресора.

Ізотермічний процес організувати досить складно, але це найбільш ефективний процес стиснення газу, до якого потрібно наближатися. В цілому всі процеси стискання газу – політропні, оскільки в компресорах використовуються різні схеми охолодження циліндрів і проміжне охолодження стисненого газу між ступіннями. При малих подачах газу більшість тепла, що виділяється при стисненні газу, сприймається системою охолодження компресора. В такому випадку процес стиснення буде наближатися до ізотермічного. Але при великій продуктивності компресора через циліндр проходить велика кількість газу і його температура на виході буде доволі високою. В цьому випадку процес стиснення буде наближатися до адіабатного.

При адіабатному процесі стиснення температура газу на виході із компресора досягає високих значень. При ступені стиснення $\varepsilon > 3,7$ і процесу стискання, близькому до адіабатного, температура газу може сягати більш $160\text{ }^{\circ}\text{C}$, що значно погіршує умови змащування деталей компресора і навіть може призвести до самоспалахування компресорного мастила. Цей ступінь стиснення можна вважати граничним для компресорів великої потужності. Також зі зростанням ступеня стиснення газу зменшується продуктивність поршневого компресора, а при досягненні ступеня підвищення тиску $\lambda > 8$ продуктивність наближається до нуля. Це пояснюється наявністю в кожному циліндрі поршневого компресора шкідливого простору, що становить 8 – 15 % загального об'єму циліндра (залежно від потужності і конструкції).

Виходячи з наведеного вище в промислових компресорах прийнятий ступінь стиснення газу в одному ступені $\varepsilon < 3,5$ з обов'язковим охолодженням газу між ступеннями стиснення. Це поступово наближає процес стиснення газу в компресорі до ізотермічного, з підвищенням ефективності процесу стиснення.

1 МЕТА РОБОТИ

Метою даної роботи є ознайомлення з роботою багатоступеневого компресора, порівняння і аналіз термодинамічних процесів, які проходять в одно - та багатоступеневих компресорах.

При виконанні даної лабораторної роботи необхідно визначити:

- параметри P , V і T в точках 1, 2, 3, 4_t , 4_n і 4';
- роботу, яка виконується в кожному ступені і в компресорі загалом;
- теоретичну і дійсну потужність компресора при двоступеневому і одноступеневому стисненні газу, при реалізації політропного і ізотермічного стиснення;
- порівняти і проаналізувати отриманий результат, а також зобразити процес стиснення газу в $P - V$ та $T - S$ координатах.

2. ОПИС ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ

Компресор складається з двох циліндрів:

Повітря через фільтр надходить у циліндр низького тиску (1). На вході у компресор виміряємо атмосферний тиск (барометром) і температуру навколишнього повітря.

На виході із циліндра низького тиску виміряємо тиск за допомогою манометра і температуру t_2 за допомогою мілівольтметра, градуйованого в градусах Цельсія ($^{\circ}\text{C}$). При вимірюванні температур t_2 , t_3 , t_4 , t_5 в якості термодатчика використовують термопари типу ХК (хромель-копель).

По трубопроводу повітря надходить в охолоджувач-радіатор, котрий являє собою систему паралельно підключених трубок. Стиснене повітря рухається всередині трубок. Для покращення умов теплообміну з навколишнім середовищем трубки ззовні обдуваються повітрям за допомогою вентилятора. На виході з охолоджувача вимірюємо температуру повітря t_3 . Після охолоджувача повітря подається в циліндр другого ступеня

стиснення. На виході з циліндра другого ступеня вимірюємо надлишок тиску стисненого повітря з допомогою манометра P'_4 і температуру t_4 .

Після другого ступеню стиснення повітря по повітряній магістралі надходить в ресівер а далі через вимірювальну діафрагму надходить в атмосферу.

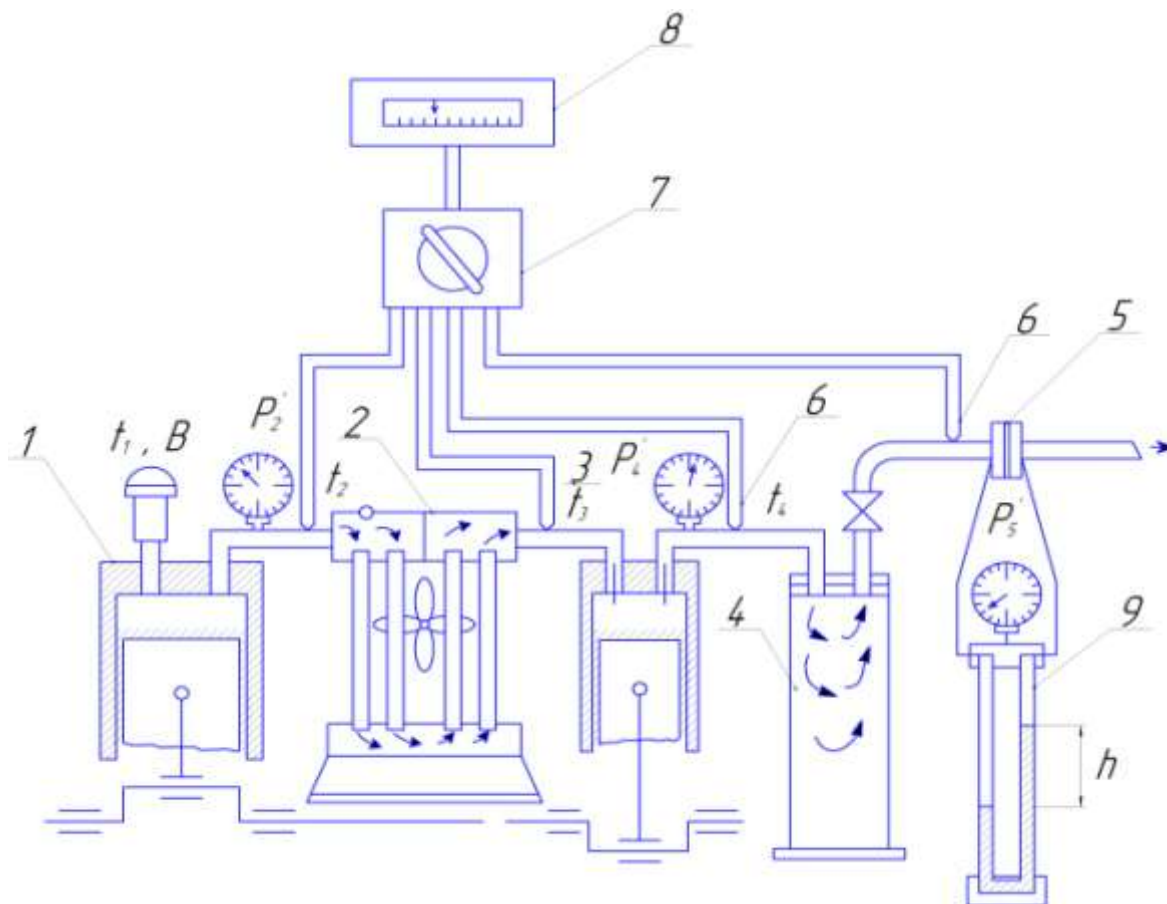


Рисунок 1 – Схема двоступеневого компресора:

1 – циліндр низького тиску; 2 – проміжний охолоджувач повітря (радіатор); 3 – циліндр високого тиску; 4 – ресівер - заспокоювач; 5 – вимірювальна діафрагма (шайба); 6 – термопари; 7 – перемикач термопар; 8 – мілі-вольтметр; 9 – двотрубний диференційний манометр; 10 – фільтр

За допомогою вимірювальної діафрагми проводимо вимірювання витoku повітря. Це один з найбільш простих методів вимірювання витрат рідин і газів. На рівному, довжиною не менше 50 діаметрів, трубопроводі установлюють пристрій зі зменшеним, каліброваним протоком. При русі потоку рідини або газу через такий отвір тиск потоку незначно зменшується на величину ΔP . Перепад тиску ΔP залежить від швидкості потоку і

щільності середовища. Якщо відомий коефіцієнт витрат даної діафрагми (K), щільність речовини (ρ) і перепад тиску на діафрагмі ΔP , то витрату речовини можна визначити із співвідношення

$$M = K\sqrt{\rho h}. \quad (2)$$

Перепад тиску ΔP на діафрагмі вимірюється мікроманометром або диференціальним манометром або більш простим способом U - подібною трубкою.

Перед вимірювальною діафрагмою визначаємо температуру і надмірний тиск, які нам необхідні для розрахунку щільності повітря перед діафрагмою.

Послідовне підключення термопар до мілівольметра здійснюється за допомогою перемикача (7). Потужність двигуна приводу компресора вимірюємо ватметром.

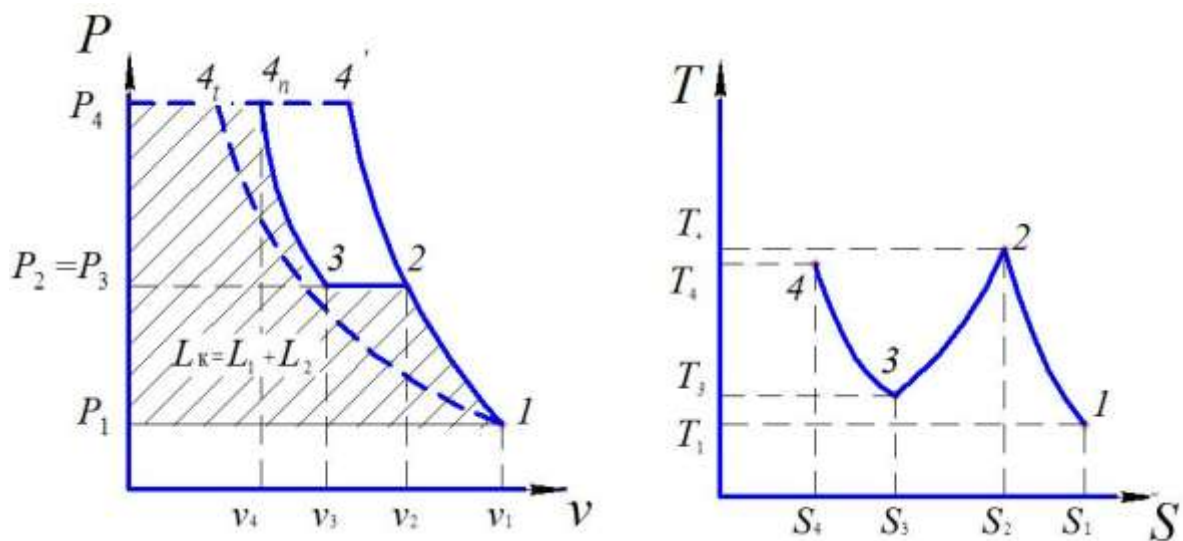


Рисунок 2 – Діаграма теоретичних процесів стиснення повітря у двоступеневому компресорі в $P - V$ та $T - S$ координатах

3 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Включити компресор. Через 5 – 6 хв. встановити тиск повітря після другого ступеня на рівні 4 – 7 ат. та приступити до зняття показань приладів.

Не допускається тривала робота компресора, що може призвести до дострокового виходу компресора з ладу і до перевитрат електроенергії.

Після зняття вимірів кожною підгрупою студентів компресор необхідно відключити від електричної мережі.

Увага: Включення і виключення компресора дозволяється викладачу або майстру виробничого навчання.

Показання всіх вимірів заносяться в таблицю 1.

Таблиця 1 – Дослідні дані

B	P'_2	P'_2	P'_2	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	h	W
мм. рт. ст	ат	ат	ат	°C	°C	°C	°C	°C	мм. вод.ст	Вт

4 ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДУ

4.1 Визначення параметрів повітря в характерних точках процесу стиснення.

Необхідно привести всі показання приладів тиску до єдиної системи одиниць СІ, Па:

$$P_1 = \frac{B}{750} \cdot 10^5, \quad (3)$$

$$P'_2 = P'_2 \cdot 0.98 \cdot 10^5, \quad (4)$$

$$P'_4 = P'_4 \cdot 0.98 \cdot 10^5, \quad (5)$$

$$P'_5 = P'_5 \cdot 0.98 \cdot 10^5. \quad (6)$$

Обчислимо значення абсолютного тиску в характерних точках процесу двоступеневого процесу стиснення повітря:

$$P_3 = P_2 = P_2' + P_1, \quad (7)$$

$$P_4 = P_4' + P_1, \quad (8)$$

$$P_5 = P_5' + P_1. \quad (9)$$

За рівнянням Клапейрона визначимо густину повітря перед вимірювальною діафрагмою, кг/м^3 :

$$\rho = \frac{P_5}{R \cdot T_5}, \quad (10)$$

де $R = 288 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ – газова константа для повітря;

T_5 – абсолютна температура повітря перед діафрагмою, К.

Визначимо масову витрату повітря за рівнянням витрат, яке відповідає даній діафрагмі, кг/год :

$$M = 8,57 \sqrt{\rho h}, \quad (11)$$

де h – показання рідкісного диференційного манометра, мм. вод. ст. ;

ρ – густина повітря перед діафрагмою, кг/м^3 .

За допомогою рівняння стану ідеального газу визначимо годинну об'ємну витрату всмоктуваного компресором повітря, $\text{м}^3/\text{год}$:

$$V_1 = \frac{(M \cdot R \cdot T_1)}{P_1}. \quad (12)$$

Об'ємне витрату повітря на виході з першої ступені, $\text{м}^3/\text{год}$:

$$V_2 = \frac{(M \cdot R \cdot T_2)}{P_2}. \quad (13)$$

Об'ємну витрату повітря після охолоджувача визначаємо із співвідношення для ізобарного процесу, м³/год:

$$V_3 = \frac{(V_2 \cdot T_3)}{T_2}. \quad (14)$$

Визначимо об'ємну витрату повітря на виході із другого ступеня компресора, м³/год:

$$V_4 = \frac{(M \cdot R \cdot T_4)}{P_4}. \quad (15)$$

З рівняння політропного процесу знаходимо показник політропи, характерний для процесу стиснення повітря в першому ступені:

$$n_1 = \ln \frac{P_2}{P_1} / \ln \frac{V_1}{V_2}. \quad (16)$$

Визначимо показник політропи процесу стиснення повітря в другому ступені компресора:

$$n_1 = \ln \frac{P_4}{P_3} / \ln \frac{V_3}{V_4}. \quad (17)$$

4.2 Визначення об'ємних характеристик компресора

Теоретична годинна об'ємна продуктивність компресора визначається продуктивністю першого ступеня компресора, м³/год:

$$V_T = 3600 \cdot F_1 \cdot S \cdot n, \quad (18)$$

де F_1 – площа поперечного перерізу поршня першого ступеня, м²;

$S = 0,12$ мм – хід поршня;

$n = 12,167 \text{ c}^{-1}$ – частота обертання вала компресора.

Діаметр циліндра першого ступеня $d_1 = 230 \text{ мм}$, другого ступеня $d_2 = 135 \text{ мм}$.

Визначимо коефіцієнт подачі компресора:

$$\lambda = \frac{V_1}{V_T}. \quad (19)$$

Коефіцієнт подачі є еквівалентом об'ємного коефіцієнта корисної дії (ККД) компресора.

Об'ємний ККД зменшується зі збільшенням шкідливого простору в циліндрах компресора, із збільшенням тиску в ступені. При $P_2/P_1 > 10$ продуктивність компресора прямує до нуля.

При підвищенні тиску подача компресора зменшується, що не дозволяє одержати гази високого тиску в одному ступені.

За звичай в одноступеневих компресорах одержують гази з кінцевим тиском не більше 0,7 МПа.

4.3 Визначення енергетичних характеристик компресора

Роботу стиснення повітря в першому і другому ступені визначаємо по співвідношенню для політропного процесу, кДж/год:

$$L_1 = \frac{n_1}{n_1 - 1} (P_1 V_1 - P_2 V_2) \cdot 0.001, \quad (20)$$

$$L_2 = \frac{n_2}{n_2 - 1} (P_3 V_3 - P_4 V_4) \cdot 0.001. \quad (21)$$

Визначимо сумарну роботу першого та другого ступенів компресора:

$$L_k = L_1 + L_2. \quad (22)$$

Необхідна теоретична потужність приводу двоступеневого компресора визначається за такою залежністю, кВт:

$$N_T = L_k / 3600. \quad (23)$$

Дійсна потужність, яка споживається компресором при двоступеневому стисненні повітря:

$$N_d = W \cdot \eta_{\text{э}}. \quad (24)$$

де W – потужність двигуна за ватметром, кВт;

$\eta_{\text{э}} = 0,96$ – електричний ККД електродвигуна.

ККД компресора, який враховує втрати на тертя, роботу системи вентиляційного проміжного охолодження повітря та інше, визначимо із співвідношення:

$$\eta_k = \frac{N_T}{N_d}. \quad (25)$$

4.4 Визначення характеристик компресора при умовному одноступеневому стисканні повітря

Визначимо параметри повітря в точці 4', вважаючи, що стиснення повітря відбувається в одному ступені стиснення до тиску P_4 з показником політропи n_1 :

$$V_4' = V_1 \left(\frac{P_1}{P_4} \right)^{\frac{1}{n_1}}, \quad (26)$$

$$T_4' = \frac{V_4' \cdot P_4}{M \cdot R}. \quad (27)$$

Визначимо роботу компресора в режимі одноступеневого стиснення повітря, кДж/год:

$$L'_k = \frac{n_1}{n_1 - 1} (P_1 V_1 - P_4 V_4') \cdot 0.001. \quad (28)$$

Теоретична потужність одноступеневого компресора, кВт:

$$N' = L'_k / 3600. \quad (29)$$

Порівняння теоретичної потужності компресора в режимі одноступеневого і двоступеневого стиснення повітря, кВт:

$$\Delta N = N' - N_T; \quad (30)$$

4.5 Визначення характеристик компресора при умовному ізотермічному стисненні повітря

Визначимо параметри повітря в точці $4t$, що відповідає режиму ізотермічного стиснення, по співвідношенню для ізотермічного процесу, м³/год:

$$V_{4t} = \frac{(P_1 \cdot V_1)}{P_4}. \quad (31)$$

Робота компресора при ізотермічному режимі стисненні відповідає роботі ізотермічного стиснення, кДж/год:

$$L'_i = P_1 \cdot V_1 \ln \frac{V_{4t}}{V_1} \cdot 0.001. \quad (32)$$

Теоретична потужність компресора при ізотермічному стисненні повітря, кВт:

$$N_t = L_t / 3600. \quad (33)$$

Порівняємо теоретичну потужність на привід компресора при ізотермічному і двоступеневому стисненні повітря, кВт:

$$\Delta N = N_T - N_t; \quad (34)$$

4.6 Побудова в масштабі процесів двоступеневого, одноступеневого та ізотермічного стискання в $P - V$ і $T - S$ координатах

При побудові процесів стиснення потрібно орієнтуватися на рис.2 даних методичних вказівок.

При визначенні ентропії повітря в характерних точках процесів стиснення можна використати наступне співвідношення, кДж/кг·град:

$$S = c_p \cdot \ln(T/T_H) - R \cdot \ln(P/P_H). \quad (35)$$

де $T_H = 273$ К – температура повітря при нормальних умовах;

$P_H = 1,013 \cdot 10^5$ Па – тиск повітря при нормальних умовах.

5. ЗВІТ ПРО РОБОТУ

Звіт про виконану роботу повинен містити:

1. Короткий опис цілей і завдань даної роботи.
2. Принципову схему компресора.
3. Протокол проведених випробувань.
4. Обробку результатів випробувань.
5. У масштабі зобразити в $P - V$ та $T - S$ координатах процеси двоступеневого, одноступеневого та ізотермічного стиснення повітря.

Контрольні запитання

1. Які процеси ідеального газу вам відомі? Зобразити процеси ідеального газу в $P - V$ та $T - S$ координатах.
2. Пояснити, який процес стиснення газів найбільш економічний і чому. Гранично можливі термодинамічні процеси стиснення газів.
3. Яка мета застосування багатоступеневого процесу стиснення газів? Переваги та недоліки.
4. Типи компресорів та їх характеристики.
5. Яка закономірність при розподілі тиску між ступенями?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Павловський В.Г. Термодинаміка фізико-енергетичних процесів: навч. посібник для студентів технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. У 2-х ч.: Ч. 2 / В.Г. Павловський, Г.І. Павловський. – Харків : НТУ «ХП», 2003. – 336 с.
2. Пеньков В. І. Технічна термодинаміка: навч. посібник / В. І. Пеньков. – Рівне : НУВГП, 2010. – 209 с.
3. Константинов С. М., Панов Є. М. Теоретичні основи теплотехніки: Підручник. – Київ.: Золоті ворота, 2012. – 592 с.
4. Алабовский А. Н. Техническая термодинамика и теплопередача / А. Н. Алабовский, И. А. Недужий. 3-е изд. перераб. и доп. – Київ : Вища школа, 1990. – 255 с.

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторної роботи

«ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОСТУПЕНЕВОГО КОМПРЕСОРА»

за курсами «Теоретичні основи теплотехніки»,

«Технічна термодинаміка», «Енергетичні установки»

для студентів технічних спеціальностей усіх форм навчання

Укладачі: ТАРАСЕНКО Микола Олексійович
ТАРАСЕНКО Олександр Миколайович

Відповідальний за випуск

проф. Антон ГАНЖА

Роботу до видання рекомендував

доц. Лариса ТЮТЮНИК

Редактор М. П. Єфремова

План 2022 р., поз.

Підп. до друку . . . 2022. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.

Riso-друк. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 0,8.

Наклад 50 прим. Зам. №_____. Ціна договірна

Видавничий центр НТУ «ХП».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

Самостійне електронне видання