

**І. О. Мороз**

Сумський державний педагогічний  
університет імені А. С. Макаренка

### **ПОНЯТТЯ «ТЕМПЕРАТУРА» В СТАТИСТИЧНІЙ ТЕРМОДИНАМІЦІ**

*У статті розглянуто методику введення поняття «температура», проаналізовано температурні шкали, встановлено зв'язок між ними. На підставі аналізу циклу Карно введено термодинамічну температуру, яка не залежить від вибору термометричного тіла, доведено, що газова шкала Кельвіна збігається з шкалою термодинамічної температури.*

**Ключові слова:** термодинамічна рівновага, температурні шкали, цикл Карно, термодинамічна температура.

**Постановка проблеми.** З поняттям «температура» ми стикаємося досить часто, і на основі інтуїтивних відчуттів, заснованих на повсякденних спостереженнях, маємо деяке уявлення про цю величину. Температуру тіл ми сприймаємо як характеристику міри нагріву тіл. Однак це поняття, що якісно легко сприймається, важко піддається фізичному визначенню.

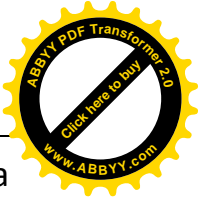
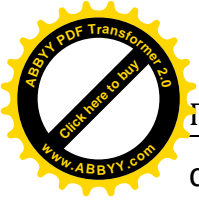
**Аналіз актуальних досліджень** доводить, що, незважаючи на те, що люди володіють здатністю у доступній ділянці сприймати температуру тіл на термічний дотик та якісно порівнювати температури різних тіл, ми не маємо у своєму розпорядженні жодних методів прямого вимірювання температури. Для того щоб мати непрямий метод, необхідно пов'язати температуру з іншими величинами, вимірювання яких нам доступно. Слід також додати, що у межах класичної фізики є дві фізичні величини – температура та ентропія, для яких не існує ніяких механічних аналогів (тобто їм не можна дати механічне тлумачення), що дуже ускладнює їх трактування.

**Мета статті** – розглянути методику введення поняття «температура».

**Виклад основного матеріалу.** Повноцінний аналіз поняття «температура» в курсі термодинаміки може бути здійснений у два етапи. Перший включає якісне визначення температури як характеристики напряду передачі енергії під час контакту тіл та ознайомлення з найбільш поширеними температурними шкалами. Він спирається на такі дослідні факти:

1. Якщо ізольовану систему надати саму собі, то з часом вона перейде у рівноважний стан, коли зникнуть будь-які макроскопічні процеси перенесення маси, енергії, імпульсу, заряду тощо. Таким чином, дослід дозволяє сформулювати постулат про існування рівноваги системи.

2. Якщо дві рівноважні системи привести в контакт, за якого вони можуть обмінюватися енергією без здійснення роботи, то можуть спостерігатися такі явища: а) рівновага систем не порушиться – у цьому випадку говорять, що системи мають однакову температуру; б) одна із



систем нагрівається, а інша охолоджується, доки не настане рівновага об'єднаної системи. Системі, яка охолоджується, прийнято приписувати вищу температуру. Таким чином, температура характеризує напрям передачі енергії під час контакту тіл.

3. Нехай є три рівноважні системи  $A$ ,  $B$  і  $V$ . Якщо системи  $A$  і  $B$  окремо перебувають у стані рівноваги із системою  $V$ , то ці системи ( $A$  і  $B$ ) перебувають у стані термічної рівноваги і між собою. Цей дослідний факт дозволяє порівнювати температури різних систем, не приводячи їх у безпосередній контакт. Для цього достатньо одне з тіл (термометричне тіло, або, простіше кажучи, термометр), що має достатньо малу теплоємність, приводити в контакт з тілом, температуру якого вимірюють. Після досягнення термічної рівноваги заздалегідь проградуваний термометр покаже вимірювану температуру. Питання про градування термометрів буде обговорюватися нижче. Ці дослідні факти свідчать про те, що температура, як фізична величина, характеризує стан термодинамічної рівноваги системи, указує на напрям передачі енергії без виконання роботи і є інтенсивним параметром. Крім того, кожному стану системи відповідає певне значення температури, тому вона є функцією стану.

Температура не може бути виражена через основні величини, такі, як маса, довжина, час. Тому вона сама повинна бути однією з найголовніших фізичних величин, на базі яких відтворюються (вводяться) похідні фізичні величини.

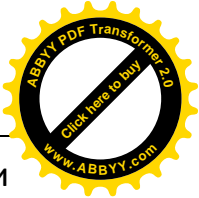
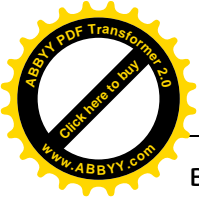
З молекулярної фізики також відомо, що температура є мірою інтенсивності руху молекул, причому середня кінетична енергія молекул

ідеального газу пропорційна температурі  $T$ : 
$$e = \frac{3}{2} kT,$$
 де коефіцієнт пропорційності  $k$  має назву – постійна Больцмана.

Усі ці дослідні факти дозволяють сформулювати постулат про існування теплової рівноваги систем, яка характеризується температурою з вищеперерахованими її властивостями. Цей постулат є вихідним положенням термодинаміки, інколи його називають «нульовим началом (законом) термодинаміки».

Внутрішні параметри (тиск, енергія, густина, поляризація, намагніченість та ін.) визначаються розташуванням зовнішніх тіл. Тому з урахуванням постулату про існування температури можна стверджувати, що у стані рівноваги всі внутрішні параметри є функціями зовнішніх параметрів і температури.

Обговоримо тепер питання про вибір тіла, яке може служити термометром. Під час вибору термометричного тіла важливими є



властивості цього тіла, за якими можна вимірювати температуру. Вони повинні відповідати таким достатньо очевидним вимогам:

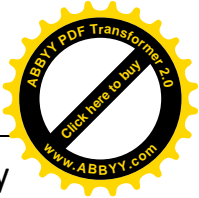
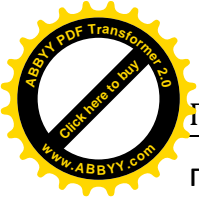
- а) давати однозначні покази температури;
- б) їх покази не повинні залежати від інших факторів, крім температури;
- в) покази повинні точно відтворюватися;
- г) виміри повинні бути достатньо простими і зручними.

Але у природі не існує тіл, властивості яких повністю відповідають перерахованим вимогам. Найбільшою мірою ці вимоги задовольняють такі властивості, як: об'ємне розширення, електрорушійна сила термопари, електричний опір металів (або напівпровідників) і теплове випромінювання тіл. Залежно від діапазону вимірюваних температур використовують усі ці властивості. Наприклад, за високих температур, коли відбувається плавлення багатьох речовин, очевидно, можна використовувати лише теплове випромінювання. За низьких температур, унаслідок малої світимості тіл, ця властивість не придатна і слід використовувати інші властивості. Аналогічні міркування лежать і в основі вибору самого термометричного тіла. Температури, виміряні за допомогою довільно взятих термометричних тіл, називаються емпіричними. Вибравши термометричне тіло та його властивість, яка достатньою мірою задовольняє перераховані вище вимоги, необхідно провести градування шкали. Градування шкали, як і сам вибір термометричного тіла та його властивості, яка однозначно пов'язана з температурою й використовується для визначення останньої, є довільними. Це пояснює той факт, що у науковому світі виникло багато температурних шкал. Розглянемо температурні шкали, які дістали найбільшого поширення.

У 1742 р. шведський учений Цельсій запропонував температурну шкалу, яка і дотепер широко використовується у всьому світі. За початок шкали Цельсія ( $0^{\circ}\text{C}$ ) у наш час приймається температура плавлення льоду за нормального тиску. Температурі кипіння води за такого ж тиску приписується температура  $100^{\circ}\text{C}$ . Інтервал між цими точками розбивається на 100 рівних частин. Поширення наміченого поділу за межі вибраних стандартних (реперних) точок дозволяє отримати всю температурну шкалу.

У США та Англії широко поширеною стала шкала Фаренгейта ( $^{\circ}\text{F}$ ), у якій стандартними (реперними) точками є ті самі точки, що і у шкалі Цельсія, але температурі плавлення льоду приписується значення  $32^{\circ}\text{F}$ , а кипінню води –  $212^{\circ}\text{F}$ , тому цей температурний інтервал ділиться не на 100 рівних частин, як у шкалі Цельсія, а на 180.

У деяких країнах використовується шкала Реомюра ( $^{\circ}\text{R}$ ), у якій температурі плавлення льоду за нормального тиску, як і у шкалі Цельсія,



приписується температура  $0^{\circ}\text{R}$ , але температурі кипіння води, на відміну від шкали Цельсія, приписується не  $100^{\circ}$ , а  $80^{\circ}\text{R}$ .

Оскільки температура є мірою кінетичної енергії руху молекул, то вона (за фізичним змістом) повинна бути величиною додатною. Тому великим недоліком цих температурних шкал є те, що температури, які знаходяться нижче (чи набагато нижче) температури танення льоду, є від'ємними.

У процесі вимірювання температури за будь-якою з розглянутих шкал залишається відкритим питання про те, наскільки емпірична температура, виміряна за цією шкалою, є дійсно «правильною» і який критерій того, що при цьому температура  $400^{\circ}$  вдвічі більша, ніж  $200^{\circ}$ , або що інтервал від  $1200^{\circ}$  до  $1700^{\circ}$  у п'ять разів більший, ніж інтервал від  $400^{\circ}$  до  $500^{\circ}$ . Адже відношення температур різних тіл може бути як додатним, так і від'ємним, навіть рівним нескінченності. Таким чином, наведені міркування про можливість вимірювання емпіричної температури не доводять, що повинна існувати «абсолютна» температура, яка не залежить від вибору термометричного тіла і вибору реперних точок під час градування шкали.

Як відомо, експериментальні дослідження зріджених газів дозволили встановити, що вони (за певних умов) добре підкоряються газовим законам, що дозволило зріджені реально існуючі атмосферні гази розглядати як модель – ідеальний газ, рівняння стану якого – це рівняння Менделєєва-Клапейрона. Для ідеального газу, як доводить дослід, під час вимірювання температури ( $t$ ) за будь-якою з розглянутих раніше шкал добуток ( $pV$ ) лінійно зростає зі збільшенням температури, тобто добуток ( $pV$ ) за будь-якої температури можна записати у вигляді:  $(pV)_t = \alpha + \beta t$ .

Записуючи це співвідношення для двох реперних температур (температура кипіння води за нормального тиску ( $100^{\circ}\text{C}$ ) і температура танення льоду ( $0^{\circ}\text{C}$ )), можна знайти константи  $\alpha$  і  $\beta$  і виразити значення довільної температури, для якої можна виміряти добуток ( $pV$ ). Легко

$$t = \frac{(pV)_t - (pV)_0}{(pV)_{100} - (pV)_0} \cdot 100^{\circ}\text{C}.$$

перевірити, що ця температура ( $t$ ) виражається так: Як

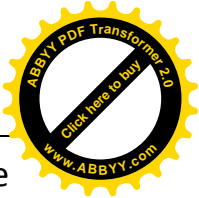
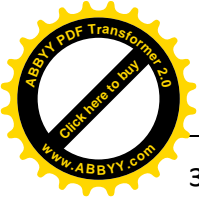
показує дослід, для газу, який підкоряється рівнянню  $(pV)_t = \alpha + \beta t$ , в інтервалі температур від  $0^{\circ}\text{C}$  до  $100^{\circ}\text{C}$  відношення  $(pV)_{100} / (pV)_0$  дорівнює 1,36608 або:

$$\frac{(pV)_{100} - (pV)_0}{(pV)_0} = 0,36608.$$

Тому рівняння  $(pV)_t = \alpha + \beta t$  можна подати у вигляді:

$$(pV)_t = (pV)_0 + \frac{(pV)_{100} - (pV)_0}{100} \cdot t^{\circ}\text{C} \quad (pV)_0 (1 + 0,0036608 t^{\circ}\text{C}).$$

Це рівняння дозволяє побудувати дві рівнозначні й рівномірні газові шкали. Якщо як термометричну властивість вибрати об'ємне розширення



за постійного тиску, то об'єм за довільної температури ( $t$ ) буде дорівнювати:

$$V_t = V_0 (1 + 0,0036608 t^{\circ}C).$$

Звідси за виміряним об'ємом

$$t^{\circ}C = \frac{V_t - V_0}{0,0036608 V_0}.$$

визначається температура: Аналогічно при  $V = const$ :

$$t^{\circ}C = \frac{P_t - P_0}{0,0036608 P_0},$$

де число 0,0036608 – це величина коефіцієнта об'ємного розширення і термічного коефіцієнта тиску ідеального газу.

Ґрунтуючись на результатах аналізу такого газового термометра, Кельвін запропонував так звану абсолютну шкалу температур. Рівняння

$$p = p_0 (1 + 0,0036608 t^{\circ}C)$$

є рівнянням прямої лінії, що перетинає вісь абсцис (температур) у точці  $t = (-1/0.0036608)^{\circ}C = -273,16^{\circ}C$ . Оскільки у стані теплової рівноваги тиск обумовлений ударами молекул по стінці посудини під час їх теплового руху, то рівність нулю тиску означає, що за такої температури припиняється тепловий рух. За шкалою Кельвіна ця температура приймається за абсолютний нуль температур. Величина одиниці вимірювання температури за шкалою Кельвіна і Цельсія вибирається однаковою. Отже, температурі плавлення льоду за нормальної температури відповідає температура 273,16K. Температура, виміряна за шкалою Кельвіна, називається абсолютною.

Порівняємо тепер розглянуті шкали. Позначимо температурний інтервал між температурою танення льоду і температурою кипіння води за нормального тиску через  $\Theta$ . Тоді одиниці вимірювання температури (градуси в різних шкалах) мають такі значення:  $^{\circ}K = ^{\circ}C$  и  $/10\Theta$ ;  $^{\circ}R = \text{и}/80$ ,  $^{\circ}F = \text{и}/180$ .

Будь-який інтервал температур  $\Delta t$  можна виразити у градусах цих

шкал так:

$$\Delta t(^{\circ}C) \frac{\Delta t}{\Theta} 100; \Delta T(^{\circ}K) \frac{\Delta t}{\Theta} 100; \Delta t(^{\circ}R) \frac{\Delta t}{\Theta} 80; \Delta t(^{\circ}F) \frac{\Delta t}{\Theta} 180.$$

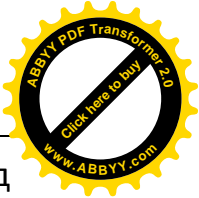
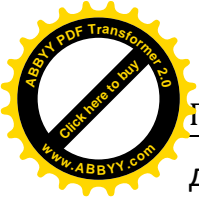
$$\text{Звідси } \frac{\Delta t^{\circ}C}{5} = \frac{\Delta T^{\circ}K}{5} = \frac{\Delta t^{\circ}R}{4} = \frac{\Delta t^{\circ}F}{9}.$$

Прийmemo за початок вибраного температурного інтервалу  $\Delta t$  для температурних шкал, які розглядаються, температуру плавлення льоду за нормального тиску, тобто  $t_1^{\circ}C = 0^{\circ}C$ ,  $t_1^{\circ}K = 273,16K$ ;  $t_1^{\circ}R = 0^{\circ}$ ;  $t_1^{\circ}F = 32^{\circ}$ . Тоді зв'язок між температурними шкалами

$$\text{набуває вигляду: } \frac{t^{\circ}C}{5} = \frac{(T - 273,16)^{\circ}K}{5} = \frac{t^{\circ}R}{4} = \frac{(t - 32)^{\circ}F}{9}.$$

Розглянутих відомостей про температуру, як фізичну величину, достатньо для розгляду законів термодинаміки, але недостатньо для





доведення існування термодинамічної температури, яка не залежить від роду температурного тіла та його властивостей. Тому остаточно поняття «температура» формується на другому етапі – після розгляду другого закону термодинаміки. Тут потрібно спиратися на аналіз температурних шкал, який виконав Кельвін, і його доведення існування термодинамічної температури, яка не залежить від роду температурного тіла та його властивостей, і що газотермічна шкала, яку ми вище розглянули, якраз і є шкалою такої температури. Коротко суть такого аналізу можна викласти так.

Аналіз циклу Карно засвідчує, що його ККД визначається лише температурами нагрівника ( $T_1$ ) та холодильника ( $T_2$ ) і для циклу Карно

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{Q_1}.$$

завжди виконується рівність:  $\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{Q_1}$ . Цей вираз показує, що відношення двох температур робочого тіла може бути вимірне відношенням кількості теплоти:  $Q_2$  – теплота, що віддається холодильнику,  $Q_1$  – теплота, що отримується від нагрівника. Оскільки величина термічного ККД у циклі Карно не залежить від властивостей робочого тіла, то наведені формули можуть слугувати для побудови шкали температур за допомогою виміру теплоти в циклі Карно. Для доведення цього положення на довільних адіабатах I і II (рис. 1) побудуємо оборотні цикли Карно (1, 2, 3 та ін.). Для

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2}; \quad \frac{Q_2}{Q_3} = \frac{T_2}{T_3}; \quad \frac{Q_3}{Q_4} = \frac{T_3}{T_4}$$

циклів 1, 2, 3 можна записати:  $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2}; \frac{Q_2}{Q_3} = \frac{T_2}{T_3}; \frac{Q_3}{Q_4} = \frac{T_3}{T_4}$  тощо. Отже, температури всіх ізотерм повинні відноситися як кількості теплоти, що отримуються або віддаються на ізотермах у циклах Карно, тобто  $Q_1:Q_2:Q_3:\dots = T_1:T_2:T_3:\dots$ . Ця рівність дозволяє величину кількості теплоти  $Q$  прийняти за міру термодинамічної температури.

Побудову термодинамічної шкали температур можна подати так. Нехай температури циклу A-B-C-D (рис. 1) дорівнюють температурі кипіння води  $T_k$  і температурі плавлення льоду  $T_n$ .

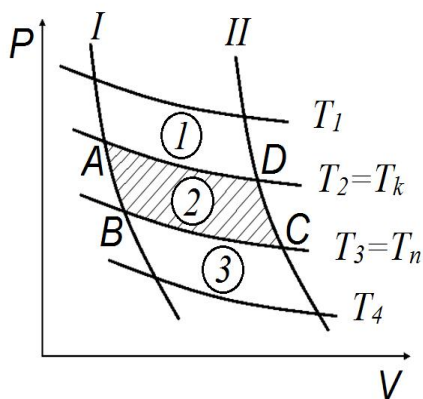
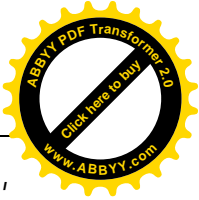
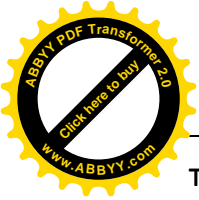


Рис. 1. До обґрунтування термодинамічної температури

температурі плавлення льоду  $T_n$ . Уважаючи, що у цьому циклі на роботу перетворена теплота  $Q$ , розділимо сіткою ізотерм площу циклу A-B-C-D на 100 рівних частин так, щоб у кожному

циклі  $Q_u = \frac{Q}{100}$ , тоді ізотерми на рис. 1 пройдуть через  $1^\circ$ . Так само можна побудувати й ізотерми, що лежать нижче  $T_n$  і вище  $T_k$ . Найменша гранична

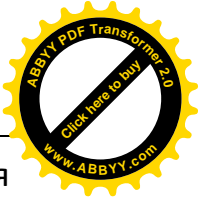


температура  $T_0 = 0^\circ$ , за якої термічний ККД циклу Карно дорівнює одиниці, береться за початкову точку термодинамічної шкали температур. Оскільки ККД циклу Карно не залежить від речовини робочого тіла і під час аналізу циклу Карно ми використовували абсолютну газову шкалу Кельвіна, то робимо висновок про те, що термодинамічна шкала збігається з абсолютною шкалою температур, що вимірюється термометром з ідеальним газом. Тому температуру, виміряну за шкалою Кельвіна, називають абсолютною термодинамічною температурою.

На завершення зазначимо, що експериментальне вимірювання температури плавлення льоду за нормального тиску відтворюється з меншою точністю, ніж температура так званої потрійної точки (температура рівноваги трьох фаз води: рідина – пара – лід). Тому в Міжнародній системі одиниць СІ температура визначається як термодинамічна температура, градус якої встановлюється так, щоб потрійна точка води мала температуру точно 273,16К. Абсолютна термодинамічна шкала температур (шкала Кельвіна) застосовується у наукових дослідженнях під час установлення зв'язку між температурою та іншими фізичними величинами. Але у повсякденному житті, у технічній та навіть у лабораторній практиці досить часто користуються стоградусною шкалою Цельсія.

На практиці безпосередні вимірювання температури за термодинамічною шкалою Кельвіна виявляються дуже складними. Для цієї мети потрібно було б застосувати газовий термометр, переважно водневий або гелієвий, оскільки ці гази порівняно з іншими найбільшою мірою підкоряються законам ідеальних газів. Проте користування газовим термометром становить великі практичні незручності. Тому на практиці для вимірювання температур використовують інші види термометрів, які зберігають достатньо високу точність у відносно вузьких температурних інтервалах. Для градування таких термометрів вибирають кілька постійних опорних точок, відтворення яких у лабораторних умовах не спричиняє великих труднощів. Одна з цих точок задається самим визначенням термодинамічної шкали – це потрійна точка води, якій приписана незмінна температура 273,16К. Останні точки встановлені на основі можливо ретельніших вимірювань. Усі ці точки є температурами фазових переходів за нормального тиску. Проградувані таким чином термометри мають так звану практичну шкалу температур і використовуються у техніці та практичній діяльності науково-дослідних лабораторій.

**Висновки.** Викладення питання про висвітлення поняття «температура» потребує аналізу дослідних фактів, порівняння температурних шкал і повинно виконуватися у два етапи. Спочатку формується лише якісне



уявлення про температуру (і температурні шкали), необхідне для формулювання законів термодинаміки. Остаточно це фізичне поняття формується на підставі аналізу другого закону термодинаміки.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Базаров И. П. Термодинамика / И. П. Базаров. – М. : Высш. шк., 1991. – 447 с.
2. Булавін Л. А, Молекулярна фізика : підруч. / Булавін Л. А., Гаврюшенко Д. А., Сисоєв В. М. – К. : Знання, 2006. – 567 с. – (Класична та сучасна фізика).
3. Мороз І. О. Основи термодинаміки : навч. посіб. / І. О. Мороз. – Суми : Мақден, 2011. – 351 с.

#### РЕЗЮМЕ

**И. А. Мороз.** Понятие «температура» в статистической термодинамике.

*В статье рассмотрена методика введения понятия «температура», проанализированы температурные шкалы, установлена связь между ними. На основе анализа цикла Карно введено термодинамическую температуру, которая не зависит от выбора термометрического тела, доказано, что газовая шкала Кельвина совпадает со шкалой термодинамической температуры.*

**Ключевые слова:** термодинамическое равновесие, температурные шкалы, цикл Карно, термодинамическая температура.

#### SUMMARY

**I. Moroz.** The concept of «temperature» in the statistic thermodynamic.

*The article considers the method of introduction the concept of «temperature», analyzes the temperature scales, and establishes a connection between them. Based on the analysis of the Carnot cycle introduced thermodynamic temperature, which does not depend on the choice of thermometric body and proved that gas Kelvin scale coincides with the thermodynamic temperature scale.*

**Key words:** thermodynamics equilibrium, temperature scales, Carnot cycle, thermodynamics temperature.

УДК 346.548+37.012:581.5(477)

**В. І. Шутенко**

Переяслав-Хмельницький державний педагогічний університет

#### ФЕНОМЕН КУЛЬТУРИ ЗДОРОВ'Я В УКРАЇНСЬКІЙ НАРОДНІЙ ПЕДАГОГІЦІ

*У статті висвітлено значення використання народного педагогічного досвіду для формування культури здоров'я на певних етапах історичного розвитку українського суспільства, проаналізовано генезис категорії «культура здоров'я» в педагогічному дискурсі. Здійснено компаративний аналіз дефініцій категорій «народна педагогіка» та «етнопедагогіка».*

**Ключові слова:** здоровий спосіб життя, культура здоров'я, народна педагогіка, етнопедагогіка.

**Постановка проблеми.** У зв'язку з процесами національного Ренесансу посилюється інтерес до багатовікового народного досвіду. Адже саме там можна знайти ідеї для розбудови нового суспільства, для формування високосвідомого, прийнятого національною ідеєю громадянина України, для вирішення яких правильним дороговказом, безперечно, виступає народна