

ТЕОРЕТИЧНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ТОЧКИ РОСИ ТА ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ЛІСІВ ЗА УМОВАМИ ПОГОДИ

**А.Д. Кузик, кандидат фізико-математичних наук,
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності**

На основі аналізу теоретичних методів визначення точки роси як однієї з складових комплексного показника пожежної небезпеки за умовами погоди здійснено вибір методу та використано його при визначенні пожежної небезпеки. Досліджено добовий приріст комплексного показника пожежної небезпеки залежно від метеорологічних даних – температури та відносної вологості повітря

Пожежна небезпека лісів, точка роси

Точка роси – це температура, при якій в умовах сталого тиску відбувається конденсація вологи. Ця величина має важливе значення при визначенні пожежної небезпеки лісів за умовами погоди. При обчисленні класу пожежної небезпеки за умовами погоди в Україні використовується метод В.Г.Нестерова [1] (або його модифікації), який базується на визначенні точки роси. Комплексний показник пожежної небезпеки, який є основою цього методу, обчислюється за формулою:

$$K = \sum_{i=1}^n t_i(t_i - t_{di}), \quad (1)$$

де t_i – температура повітря в день i , виміряна о 12 год., t_{di} – точка роси в день i , n – кількість днів без дощу. Під час метеорологічних спостережень не завжди визначають точку роси. Але її можна обчислити на основі інших метеорологічних даних, зокрема, температури повітря і відносної вологості.

Метою роботи є огляд та порівняння методів визначення точки роси, їх застосування у методі визначення пожежної небезпеки лісів за умовами погоди, а також аналіз комплексного показника пожежної небезпеки.

Розглянемо спочатку методи визначення точки роси. Всі методи можна розділити на експериментальні та теоретичні. Обмежимося розглядом теоретичних методів. Їх можна умовно розділити на табличні (визначення за допомогою таблиць), графічні (за допомогою діаграм, графіків та ін.), емпіричні (за допомогою емпіричних формул) та фізико-теоретичні (за допомогою формул на основі фізичних законів).

Найпростіше визначити точку роси за допомогою таблиць. Цей метод використовується тоді, коли треба визначити точку роси для конкретної температури повітря та відносної вологості.

Використання графіків, зокрема діаграми Мольє [2], також доцільне у випадку визначення точки роси для невеликої кількості параметрів. Цей метод складніший, оскільки потребує знань алгоритму зчитування з діаграми необхідних даних.

Аналітичні методи можна поділити на емпіричні та фізико-теоретичні. Визначення точки роси за цими методами здійснюється за формулами, аргументами яких є температура повітря, відносна вологість, а іноді й інші параметри. Формули є зручними та можуть використовуватися для широкого діапазону температур та вологостей. Такі методи підходять для розробки різноманітних калькуляторів точки роси, апаратних та програмних засобів, які здійснюють обчислення цієї величини.

Розглянемо деякі з емпіричних методів та порівняємо результати, які можна одержати за їх допомогою. Для зручності сприйняття використаємо однакові позначення фізичних величин та не будемо наводити перетворення, результатом яких є формули, що описують ці методи.

Найчастіше зустрічається [3] та рекомендується для використання емпіричний метод, який ґрунтується на формулах

$$t_d = \frac{b \cdot \alpha(t, \varphi)}{a - \alpha(t, \varphi)}, \quad (2)$$

$$\alpha(t, \varphi) = \frac{a \cdot t}{b + t} + \ln \frac{\varphi}{100}, \quad (3)$$

де t_d – точка роси (°C),

t – температура повітря (°C),

φ – відносна вологість повітря (%),

$a=17,27$, $b=237,7$ (°C) – сталі.

Цей метод діє для діапазонів температур $0^\circ\text{C} < t < 60^\circ\text{C}$, відносних вологостей $1\% < \varphi < 100\%$ і має заявлену точність $\pm 0,4^\circ\text{C}$.

Аналогічний метод можна одержати на основі формул з [4]. Формули у цьому випадку мають вигляд

$$t_d = \frac{c \ln \frac{\varphi \cdot P_w}{100} + d}{k - n \ln \frac{\varphi \cdot P_w}{100}}, \quad (4)$$

$$P_w = e^{\frac{kt-d}{c+nt}}, \quad (5)$$

де P_w – парціальний тиск насиченої водяної пари при температурі t (кПа);

$c=233,77$; $d=115,72$; $k=16,57$; $n=0,997$ – сталі.

Він може використовуватися у ширшому діапазоні температур ($0^\circ\text{C} < t < 87^\circ\text{C}$). Заявлена точність методу досить висока і становить $0,02^\circ\text{C}$ в усьому діапазоні температур.

Більш складними та з більшою кількістю параметрів є метод, запропонований NOAA [5]. Формули для обчислення точки роси за цим методом мають вигляд:

$$t_d = \frac{q \ln \frac{\varphi \cdot P_w}{100 \cdot r}}{s - \ln \frac{\varphi \cdot P_w}{100 \cdot r}}, \quad (6)$$

$$P_w = r e^{\frac{st}{t+q}}, \quad (7)$$

де $r=6,112$; $q=243,5$; $s=17,67$ – сталі.

Проведемо порівняння трьох методів у діапазоні температур від 0°C до 60°C та відносної вологості у межах від 1 до 100%. Значення точки роси, обчислені для цілих значень температур та відносної вологості повітря з вказаних діапазонів, є дуже близькими. Так, найбільша різниця між значеннями точки роси, обчисленими за (2), (3) та (4), (5) становить $0,324^\circ\text{C}$, за (2), (3) та (6), (7) – $0,294^\circ\text{C}$, а за (4), (5) та (6), (7) – $0,619^\circ\text{C}$, причому найбільші відхилення спостерігаються при максимальних значеннях температури та відносної вологості повітря.

З метою кращого узгодження результатів з фізичною теорією для обчислення значення точки роси вважаємо за доцільне використовувати фізико-теоретичні методи. На відміну від емпіричних, у таких методах кожна константа, яка входить до формул, має відповідний фізичний зміст, а самі формули базуються на фізичних законах.

Розглянемо метод обчислення точки роси за температурою повітря та відотною вологістю на основі запропонованого у [6, 7]. Відносну вологість повітря можна визначити за формулою [8]:

$$\varphi = \frac{P}{P_w} \cdot 100\%, \quad (8)$$

де P – парціальний тиск водяної пари при температурі точки роси t_d ; P_w – парціальний тиск насиченої водяної пари при температурі повітря.

Застосуємо проінтегровану від точки роси t_d ($^\circ\text{C}$) до t ($^\circ\text{C}$) (або від $T_d = T_0 + t_d$ (K) до $T = T_0 + t$ (K), де $T_0 = 273,15^\circ\text{C}$) формулу Клапейрона-Клаузіуса [9]:

$$\ln \frac{P}{P_w} = \frac{l_v}{R} \left(\frac{1}{T_d} - \frac{1}{T} \right), \quad (9)$$

де $l_v = 2,5 \cdot 10^6$ Дж/кг – теплота випаровування;

$R = 461,49$ Дж/(кг·K) – газова стала для водяної пари.

Скориставшись (8), з (9) одержуємо формулу для обчислення значень точки роси у градусах Кельвіна:

$$T_d = \frac{1}{\frac{1}{T} - \frac{R}{l_v} \ln \left(\frac{\varphi}{100} \right)}, \quad (10)$$

або у шкалі Цельсія:

$$t_d = \frac{1}{\frac{1}{t + T_0} - \frac{R}{l_v} \ln\left(\frac{\varphi}{100}\right)} - T_0. \quad (11)$$

Порівняємо значення точки роси, одержані за формулою (11) зі значеннями, обчисленими за розглянутими емпіричними методами у діапазоні температур повітря від 0°C до 60°C та відносної вологості у межах від 1 до 100%. Максимальне відхилення результатів обчислень, проведених за формулою (11), від значень, одержаних за формулами (2), (3) не перевищує 1,399°C, за (4), (5) – 1,723°C та за (6), (7) – 1,104°C. Коефіцієнти кореляції між результатами становлять, відповідно, 0,992, 0,993 та 0,993.

Графік залежності точки роси від температури повітря та відносної вологості зображений на рис. 1.

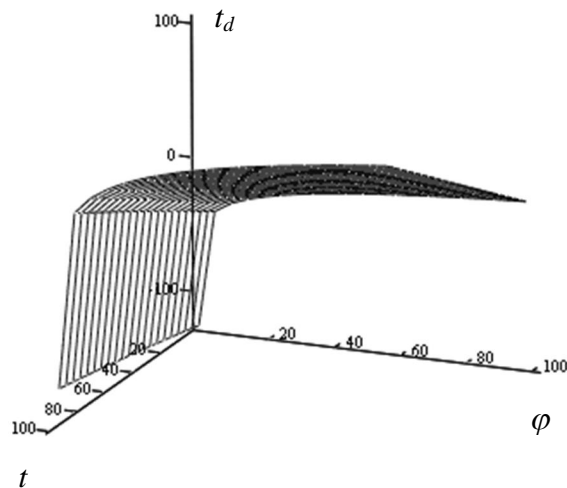


Рис. 1. Графік залежності точки роси t_d від температури повітря t та відносної вологості φ

При обчисленні комплексного показника пожежної небезпеки K (1) кожної доби станом на 12 годину дня його збільшують на величину

$$k = t \cdot (t - t_d), \quad (12)$$

де t – температура повітря, t_d – точка роси. З урахуванням (11) формула (12) набуде вигляду

$$k = t \cdot \left(t + T_0 - \frac{1}{\frac{1}{t + T_0} - \frac{R}{l_v} \ln\left(\frac{\varphi}{100}\right)} \right) \quad (13)$$

Таким чином, величина k буде функцією двох змінних t та φ . Дослідимо цю функцію в області G , яка задається нерівностями $0^\circ\text{C} < t < 50^\circ\text{C}$ і $0\% < \varphi < 99\%$. Часткові похідні

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \left(t + T_0 - \frac{1}{\frac{1}{t + T_0} - \frac{R}{l_v} \ln\left(\frac{\varphi}{100}\right)} \right) + t \left(1 - \frac{1}{\left(\frac{1}{t + T_0} - \frac{R}{l_v} \ln\left(\frac{\varphi}{100}\right) \right)^2} \cdot \left(\frac{1}{t + T_0} \right)^2 \right),$$

$$\frac{\partial k}{\partial \varphi} = \frac{-1}{\left(\frac{1}{t + T_0} - \frac{R}{l_v} \ln\left(\frac{\varphi}{100}\right) \right)^2} \cdot \frac{R}{l_v} \cdot \frac{1}{\varphi}$$

відмінні від нуля в точках області G , у якій розглядаємо k . Часткова похідна $\frac{\partial k}{\partial t}$ набуває в G додатних значень, а $\frac{\partial k}{\partial \varphi}$ – від’ємних. Тому при фіксованих значеннях відносної вологості функція k зростає із збільшенням t , а при фіксованій температурі – спадає зі збільшенням φ . Графік функції $k=k(t, \varphi)$ зображений на рис. 2.

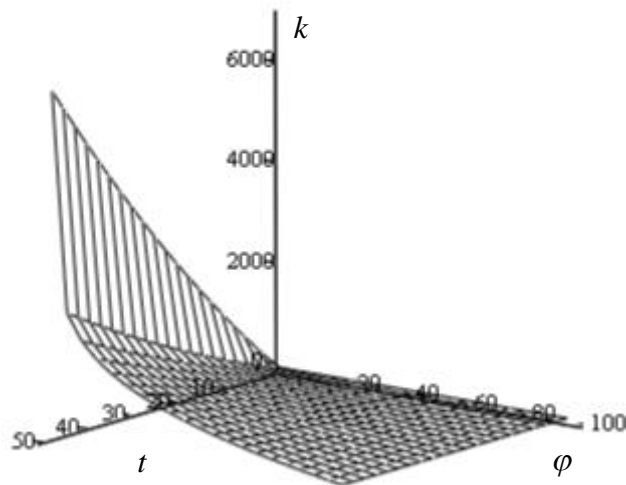


Рис. 2. Графік функції $k=k(t, \varphi)$

Модуль градієнта функції k також є функцією аргументів t та φ у області G та обчислюється за формулою:

$$|\text{grad } k| = \sqrt{\left(\frac{\partial k}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial \varphi} \right)^2}.$$

Він, як і функція k також зростає із збільшенням t та зменшенням φ (Рис. 3).

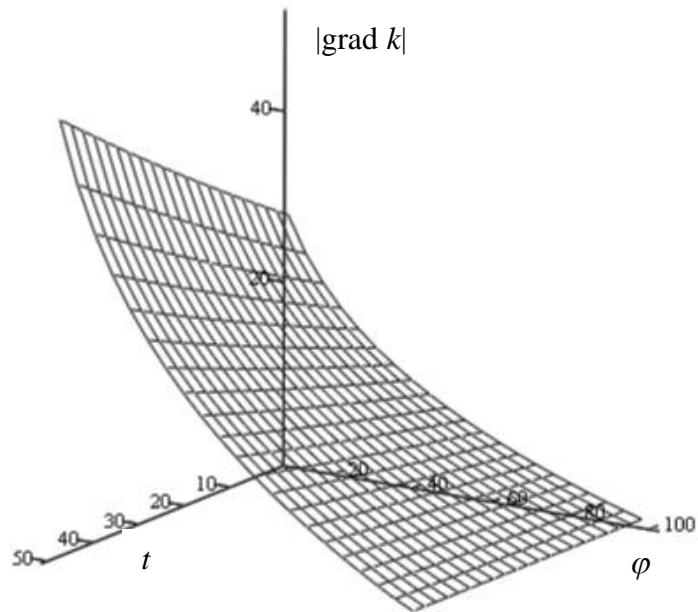


Рис. 3. Графік функції $|\text{grad } k|$

Напрямок градієнта функції k визначимо за допомогою кута α між проекцією градієнта у кожній точці області та віссю температур. Цей кут у радіанах визначається за формулою:

$$\alpha = \text{arctg} \left(\frac{\frac{\partial k}{\partial \varphi}}{\frac{\partial k}{\partial t}} \right)$$

та буде функцією аргументів t та φ , яка набуває від'ємних значень в області G (рис. 4).

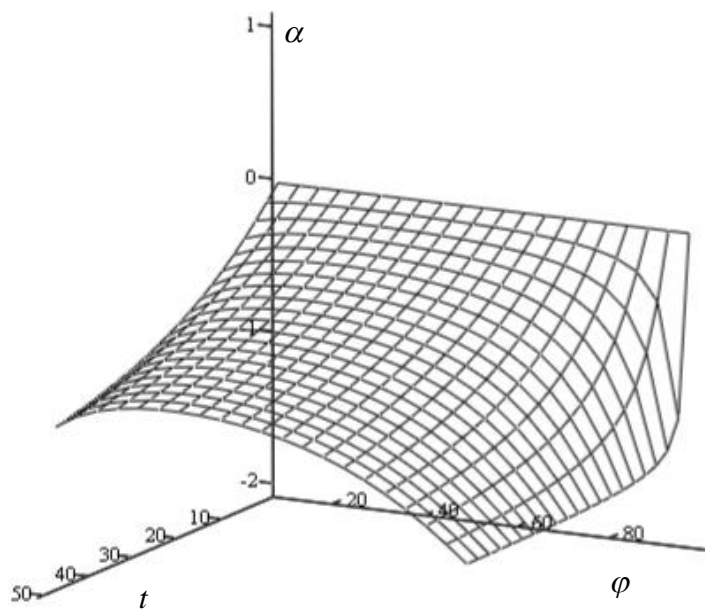


Рис. 4. Графік функції $\alpha = \alpha(t, \varphi)$

Кут α буде мінімальним і близьким до 0 при нульовій температурі t у всьому діапазоні відносної вологості (рис. 5), а також при фіксованій відносній вологості $\varphi \approx 36\%$ у всьому діапазоні температур (рис. 6).

З урахуванням (11) формула визначення комплексного показника пожежної небезпеки (1) набуде вигляду:

$$K = \sum_{i=1}^n t_i \cdot \left(t_i + T_0 - \frac{1}{\frac{1}{t_i + T_0} - \frac{R}{l_v} \ln\left(\frac{\varphi_i}{100}\right)} \right), \quad (12)$$

де t_i – температура в день i , φ_i – відносна вологість повітря в день i .

Висновки

1. Використання таблиць та графіків для визначення точки роси є доцільним лише для невеликої кількості значень, в інших випадках слід застосовувати формули.

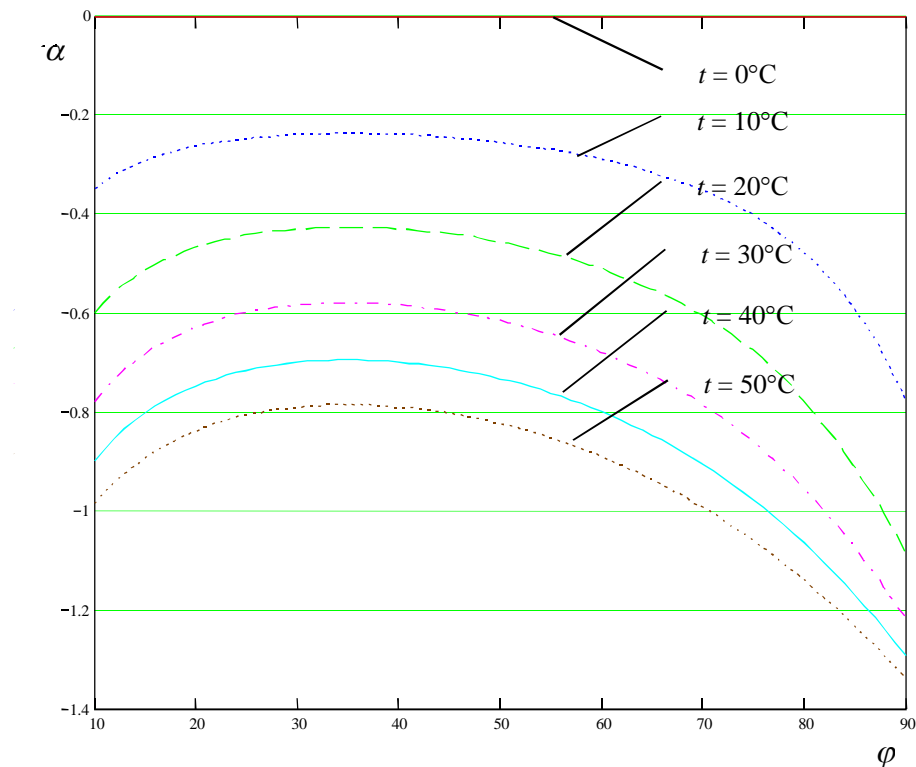


Рис. 5. Залежність α від φ для різних значень t

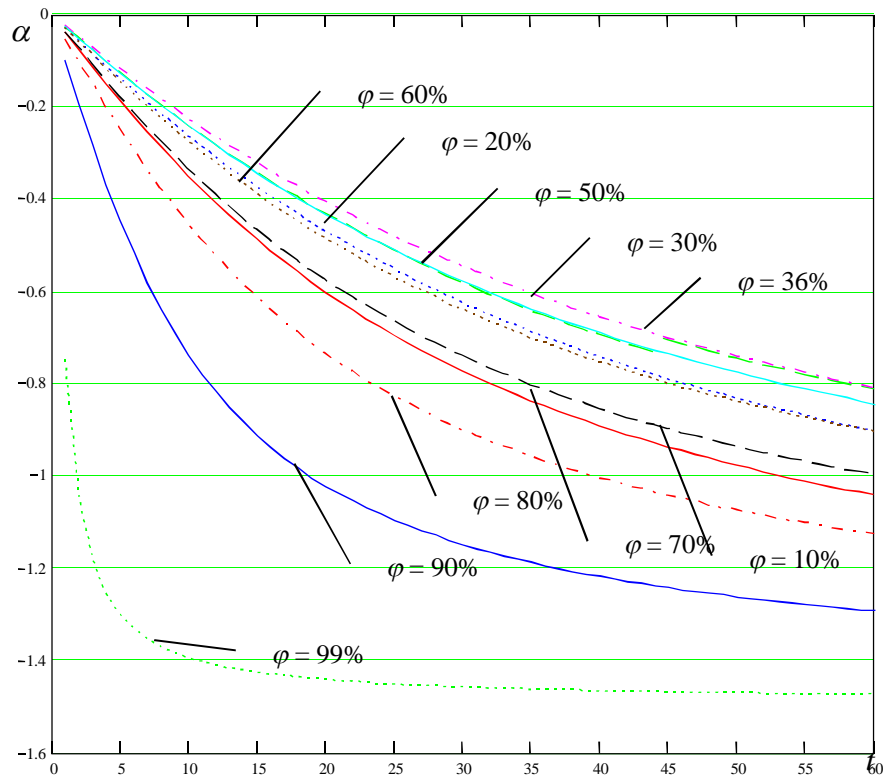


Рис. 6. Залежність α від t для різних значень φ

2. Різниця між значеннями точки роси, одержаними розглянутими емпіричними та фізико-теоретичним методами для заданої температури повітря та відносної вологості є незначними, а результати – добре корельованими між собою.

3. Щоденний приріст комплексного показника пожежної небезпеки k є зростаючою функцією із зростанням температури та спаданням відносної вологості. Модуль градієнта k поводить себе так само, як і k , а напрямок найбільшого зростання градієнта є найближчим до напрямку зростання температури як при нульовій температурі, так і при відносній вологості повітря близько 36%.

4. Для визначення пожежної небезпеки лісів за умовами погоди замість формули (1) слід застосовувати співвідношення (12), у якому використовуються значення температури та відносної вологості повітря.

Список літератури

1. Нестеров В.Г. Горимость леса и методы ее определения / В.Г. Нестеров. – М.: Гослесбумиздат, 1949. – 76 с.
2. Беккер А.М. Системы вентиляции / А.М. Беккер. – М.: Техносфера, Евроклимат, 2005. – 232 с.
3. MET4 and MET4A calculation of dew point [Електронний ресурс] — Режим доступу : – <http://www.paroscientific.com/dewpoint.htm>.
4. Влажный воздух. Справочное пособие. – М.: АВОК, 2004. – 42 с.
5. National Weather Service Weather Forecast Office. The Weather Calculator [Електронний ресурс] — Режим доступу до журн. : – <http://www.srh.noaa.gov/epz/?n=wxcalc>.

6. Calculating relative humidity [Електронний ресурс] — Режим доступу : — <http://www.theweatherprediction.com/habyhints/186>.
7. How do I calculate dew point when I know the temperature and the relative humidity? Questions and answers [Електронний ресурс] — Режим доступу : — <http://ingrid.ideo.columbia.edu/dochelp/QA/Basic/dewpoint.html>
8. *Bosen J.F.* An approximation formula to compute relative humidity from dry bulb and dew point temperatures / J.F. Bosen // Monthly weather review. – December, 1958. – p. 486.
9. *Воловик П.М.* Фізика для університетів. Повний курс в одному томі / П.М. Воловик. — Ірпінь: Перун, 864 с.

На основании анализа теоретических методов определения точки росы, как одной из составляющих комплексного показателя пожарной опасности, по условиям погоды выбрано метод и использовано его при определении пожарной опасности. Исследовано суточный прирост комплексного показателя пожарной опасности в зависимости от метеорологических данных - температуры и относительной влажности

Пожарная опасность лесов, точка росы.

On the basis of the dew point theoretical methods determination analysis as one of components of a fire danger complex indicator on weather conditions the method is chosen and it is used for the fire danger determination. The daily gain of a fire danger complex indicator depending on the meteorological data - temperature and relative humidity is investigated

Forest fire danger, dew point.