



Розділ 11 ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ У НАВКОЛОЗЕМНОМУ ПРОСТОРИ

LOGO



Зміст

11.1

Фактори та явища, що впливають на поширення земних радіохвиль

11.2

Поширення наземних радіохвиль над пласкою поверхнею Землі

11.2.1

Поширення радіохвиль за умов високопіднятих антен (метрові, дециметрові, сантиметрові хвилі)

11.2.2

Поширення радіохвиль за умови низького розташування антени (гекто-, кіло-, міріаметрові хвилі)

11.2.3

Поширення радіохвиль над неоднорідною поверхнею

11.3

Поширення наземних радіохвиль із урахуванням сферичності Землі



11.3.1

Урахування сферичності Землі в межах прямої видимості

11.3.2

Поширення радіохвиль над однорідною гладкою поверхнею Землі з урахуванням дифракції

11.4

Поширення наземних радіохвиль над нерівною місцевістю

11.5

Висновки

11.6

Контрольні питання та завдання



11.1 Фактори та явища, які впливають на поширення земних радіохвиль

Радіохвилі, які поширюються безпосередньо над поверхнею Землі і частково огинають її поверхню (через явище дифракції), називають *земними* (поверхневими).

Землю будемо трактувати як напівпровідійну (діелектрик з втратами), пласку неоднорідну поверхню (мокру, суху, скелясту, з пагорбами, лісами, містами, тощо).

Для розв'язання задач щодо поширення радіохвиль необхідно знати і вміти користуватися параметром, що має назву “тангенс кута втрат”, який визначають із співвідношень:

$$tg\delta = \frac{\sigma}{\omega\epsilon} = \frac{60\lambda\sigma}{\epsilon_r}$$

Наприклад, ґрунт вважають діелектричним середовищем, якщо $tg\delta \leq \frac{1}{3}$, якщо $tg\delta \geq 3$ - ґрунт відносять до розряду провідійного середовища.



У таблиці 11.1 наведено електродинамічні параметри деяких середовищ, які впливають на значення ω , тобто на процес поширення радіохвиль.

Види земної поверхні			
Морська вода	80	1	1...6
Прісна вода	75...80	1	
Волога земля	10...30	1	
Суха земля	3...6	1	
Мерзла земля	3...6	1	
	1	1	
	4...5	1	



Принциповим фактором поширення наземних хвиль є необхідність врахування сферичності Землі. На рис. 11.1 наведено розташування в точках А та В антен, відповідно, висотами h_1 та h_2 , відстань r_0 називають відстанню прямої видимості, яку визначають із геометричної побудови, як:

$$r_0 \approx \sqrt{2R_3} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \quad (11.1)$$

$$r_0 = 3,57(\sqrt{h_{1[m]}} + \sqrt{h_{2[m]}}), \text{ КМ} \quad (11.1a)$$

де h_1, h_2 – висоти антен у метрах.



11.2 Поширення наземних радіохвиль над пласкою поверхнею Землі

11.2.1. Поширення радіохвиль за умов високопіднятих антен (метрові, дециметрові, сантиметрові хвилі)

Критерієм для визначення поняття високопіднятих антен є нерівність $h > k\lambda$, тобто висота антени h повинна у декілька разів перевищувати довжину λ хвилі, (коефіцієнт $k = 3 \dots 4$).

Додатковою умовою для випадку високопіднятих антен є вимога того, щоб фідер був невипромінювальною конструкцією:

Хвиля поширюється в об'ємі еліпсоїда
обертання. За першим законом
Снелліуса кут падіння дорівнює
куту відбиття.

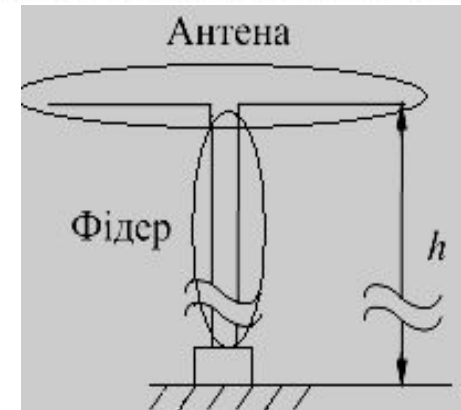


Рисунок 11.2. До пояснення ознаки «високопіднятої антени»



Розв'яжемо задачу, щоб докладно розглянути даний випадок поширення радіохвиль:

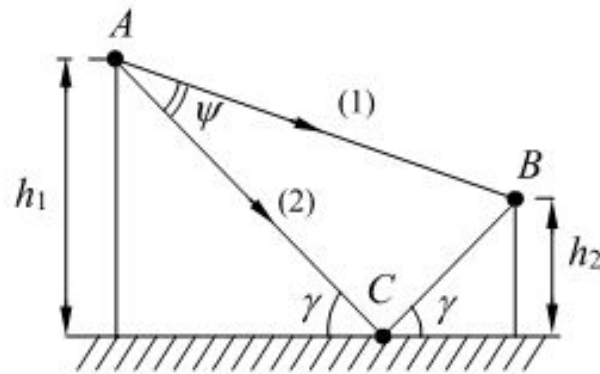


Рисунок 11.3. Процес проходження хвилі з точки A в точку B

Нехай дано: r – відстань між передавачем та приймачем; h_1, h_2 – висоти антени-передавача та антени-приймача відповідно; P_1 – потужність, що випромінює передавач; λ – довжина хвилі, що випромінює передавач; ϵ_r, σ – параметри середовища, в якому поширюється радіохвиля.

$$\gamma - \text{кут ковзання: } \operatorname{tg} \gamma \cong \frac{h_1 + h_2}{r} \approx \gamma$$



Потрібно визначити коефіцієнт послаблення, тобто представити напруженість поля у точці приймання на місці розташування приймальної антени за формулою для середньоквадратичного значення напруженості електричного поля:

$$E = \frac{173 \sqrt{P_{[\text{кВт}]} D_1}}{r_{[\text{км}]}} V, \frac{\text{мВ}}{\text{м}} \quad (11.2)$$

або потужність на вході приймального пристрою:

$$P_2 = \frac{6,33 \cdot 10^3 P_{1[\text{кВт}]} D_1 D_2 \lambda^2_{[\text{м}]}}{r^2_{[\text{км}]}} V^2, \text{ мВт} \quad (11.3)$$



В точці B здійснюється додавання променів між якими є фазовий зсув, що виникає внаслідок розбіжності відстаней, пройдених прямою і відбитою хвилею, а також від електромагнітних параметрів поверхні, від якої відбивається промінь. Залежно від змінення просторових координат точки B змінюється фазовий зсув між прямим та відбитим променем, тобто в точці B є послідовність інтерференційних максимумів та мінімумів. Таким чином напруженість поля в точці B , сформована сумою миттєвих значень напруженості поля безпосереднього променя, позначеного на рисунку (1), і складного: прямого та відбитого від земної поверхні променя (2):

$$\dot{E}_{mB_1} = \frac{245\sqrt{P_{1[\text{кВт}]}}D_1}{r_{1[\text{км}]}} e^{j\omega t}, \frac{\text{мВ}}{\text{м}} \quad (11.3)$$

де E_{mB_1} – амплітудне значення напруженості електричного поля; інший шлях сформовано відбитим від земної поверхні променем:

$$\dot{E}_{mB_2} = \dot{R} \frac{245\sqrt{P_{1[\text{кВт}]}}D_1}{r_{2[\text{км}]}} e^{j(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r)}, \frac{\text{мВ}}{\text{м}} \quad (11.4)$$

де r_1 – довжина шляху AB , що проходить прямий промінь, а r_2 – довжина шляху відбитого від поверхні Землі променя, \dot{R} – комплексний коефіцієнт відбиття від земної поверхні.



Різницю ходу променів (1) та (2) з рисунку визначаємо за співвідношенням:

$$\Delta r = AC + CB - AB \quad (11.5)$$

За тригонометричних перетворювань:

$$\Delta r \cong \frac{2h_1 h_2}{r} \quad (11.5a)$$

Це співвідношення слушне для горизонтально поляризованої хвилі, бо пряма і відбита хвилі мають однакові напрями векторів ; за малих кутів воно слушне і для інших видів поляризації.

Коефіцієнт відбиття від земної поверхні:

$$\dot{R} = R e^{-j\theta} \quad (11.6)$$

де R – коефіцієнт відбиття та θ – кут, які визначають параметрами середовища.



Розв'язок задачі визначення напруженості поля в т. B виконуємо для випадку:

$$\begin{cases} h_1 \ll r \\ h_2 \ll r \end{cases} \quad (11.7)$$

Тобто можна вважати, що промені та майже паралельні. Промінь довше на відстань Δr , отже існує різниця фаз, що дорівнює $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r$.

Отже, маємо:

$$\dot{E}_{mB_2} = R \frac{245 \sqrt{P_{1[\text{кВт}]} D_1}}{r_{2[\text{км}]} + \Delta r} e^{j(\omega t - \theta - \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r)}, \frac{\text{МВ}}{\text{м}} \quad (11.8)$$

Таким чином можемо записати формулу для результативного значення \dot{E}_B

$$\dot{E}_{B\Sigma} = \dot{E}_{B1} + \dot{E}_{B2} = \dot{E}_m (1 + R e^{-j\beta_i}) e^{j\omega t} \quad (11.9)$$

$$\text{де } \beta_i \text{ – інтерференційний коефіцієнт фази: } \beta_i = \theta + \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r \quad (11.10)$$



Представимо $(1 + Re^{-j\beta_i})$ через модуль та фазу:

$$(1 + Re^{-j\beta_i}) = 1 + R\cos\beta_i - jR\sin\beta_i = \sqrt{1 + 2R\cos\beta_i + R^2}e^{-j\phi} \quad (11.11)$$

Кут ϕ визначимо через його тангенс:

$$\operatorname{tg}\phi = \frac{R\sin\beta_i}{1 + R\cos\beta_i} \quad (11.12)$$

Отже формули для вектора \vec{E} (середньоквадратичного та амплітудного значень):

$$E_{B\Sigma} = \frac{173\sqrt{P_{[\text{кВт}]}D_1}}{r_{[\text{км}]}} \sqrt{1 + 2R\cos(\theta + \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r) + R^2} [\cos(\omega t - \phi)], \frac{\text{МВ}}{\text{м}} \quad (11.13)$$

$$E_{mB\Sigma} = \frac{245\sqrt{P_{[\text{кВт}]}D_1}}{r_{[\text{км}]}} \sqrt{1 + 2R\cos(\theta + \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r) + R^2} [\cos(\omega t - \phi)], \frac{\text{МВ}}{\text{м}} \quad (11.13a)$$

Таким чином отримано формулу для визначення коефіцієнта, обумовленого інтерференцією, тобто коефіцієнт *додаткових втрат*:

$$V = \sqrt{1 + 2R\cos(\theta + \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r) + R^2}. \quad (11.14)$$

Для визначення R та θ існують графічні залежності від параметру $60\pi\lambda\sigma = \varepsilon_r \operatorname{tg}\delta$ за різних видів поляризації та в різних середовищах.

Графік функції $V(r)$ наведено на рис. 11.4.

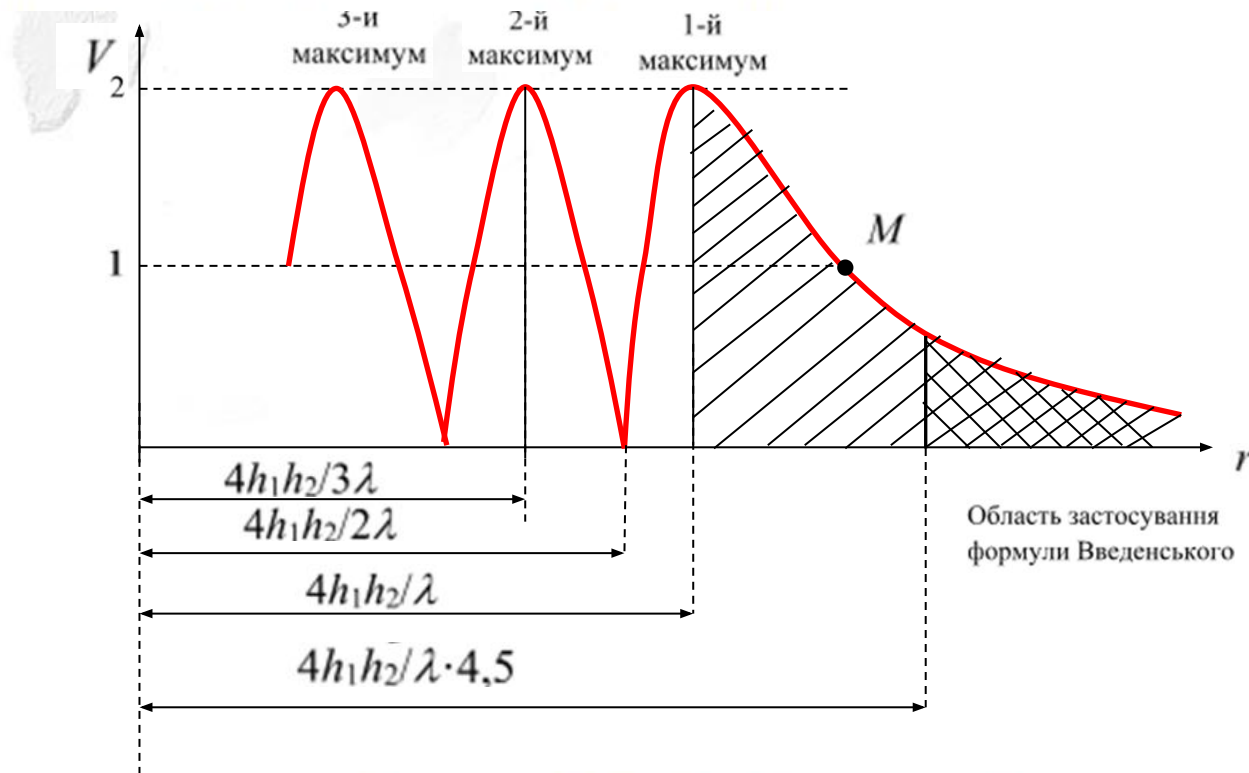


Рисунок 11.4. Графік функцій $V(r)$



З рис. 11.4 випливає, що коефіцієнт V має інтерференційну структуру, тобто можливо спостерігати (на певній ділянці) як підсилення, так і послаблення сигналу.

Для практичних ситуацій (11.14) можна спростити. За малих кутів ковзання для більшості видів поверхні Землі можна вважати, що модуль коефіцієнта $R \approx 1$, а кут $\theta \approx 180^\circ$. Тоді отримуємо формулу:

$$V = 2 \left| \sin \frac{\pi}{\lambda} \Delta r \right|. \quad (11.15)$$

З графіку (рис. 11.4) видно, що можна підібрати таке значення r , щоб отримати екстремуми залежності $V(r)$. Зазначимо максимальну та мінімальну відстані:

$$r_{\max n} = \frac{4h_1 h_2}{\lambda(2n+1)}, \quad (11.16)$$

$$r_{\min n} = \frac{4h_1 h_2}{\lambda(1+n)}. \quad (11.16a)$$



Отже, для високopіднятих антен формула обчислення коефіцієнта V за умови

$$r > \frac{18h_1h_2}{\lambda} \quad (11.165)$$

така:

$$V = \frac{4\pi h_1h_2}{\lambda r} . \quad (11.17)$$

Таким чином середньоквадратичне значення напруженості поля для ситуації високopіднятих антен:

$$E = \frac{2,18\sqrt{P_{[\text{кВт}]}}D}{r^2_{[\text{км}]} \lambda_{[\text{м}]}} h_{1[\text{м}]} h_{2[\text{м}]} \cdot \frac{\text{мВ}}{\text{м}} . \quad (11.18)$$

Формулу (11.18) називають *формулою Введенського*, яка має фундаментальне значення для розрахунку радіоліній метрового, дециметрового, сантиметрового діапазонів.

Якщо необхідно враховувати також дифракційні процеси, застосовують таку формулу для розрахунку коефіцієнта послаблення:

$$V = \frac{4\pi\sqrt{h_1^2 + h_0^2} \cdot \sqrt{h_2^2 + h_0^2}}{\lambda r} . \quad (11.19)$$



де h_0 – деяка приведена мінімальна ефективна висота антени (з урахуванням середовища: вода, вологий або сухий ґрунт тощо, та видів поляризації):

$$h_0 = \frac{\lambda}{2\pi q}, \quad (11.19a)$$

де коефіцієнт q :

– для вертикальної поляризації:

$$q = \left| \frac{\sqrt{\varepsilon_r - j60\lambda\sigma - \cos^2 \gamma}}{\varepsilon_r - j60\lambda\sigma} \right|, \quad (11.20)$$

– для горизонтальної поляризації:

$$q = \left| \sqrt{\varepsilon_r - j60\lambda\sigma - \cos^2 \gamma} \right|. \quad (11.20a)$$



11.2.2 Поширення радіохвиль за умови низького розташування антени (для гекто -, кіло -, міріаметрових хвиль)

Низько розташованими вважають антени, якщо виконана умова:

$$h_1, h_2 < k\lambda, \text{ де } k = 3 \dots 4$$

У випадку низько розташованих антен земна поверхня набуває властивостей провідника, отже вона відбиває радіохвилі. На рис. зображено випадок низько розташованих антен. Відмітимо, що фронт хвилі має напівсферичний вигляд:

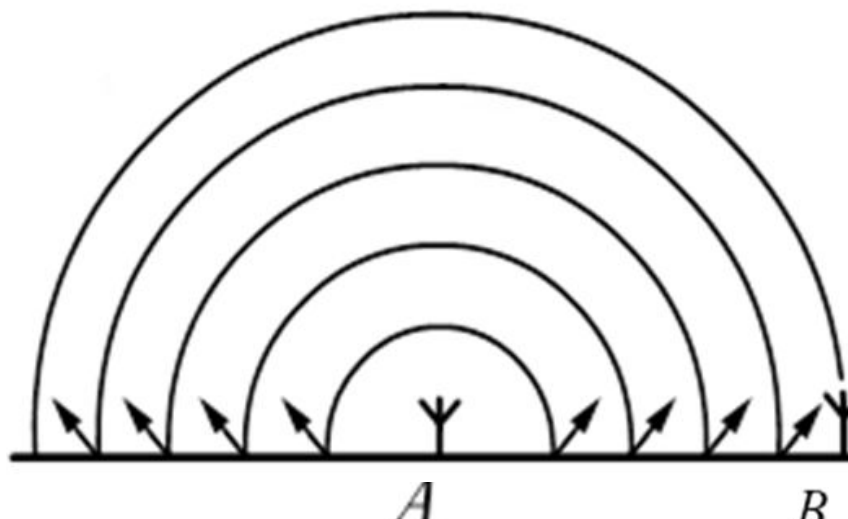


Рисунок 11.5. Модель низького розташування антени



Запишемо формулу для середньоквадратичного значення напруженості електричного поля :

$$E = \frac{245\sqrt{P_{1[\text{кВт}}]}D_1}{r_{1[\text{км}}]} V_1, \frac{\text{мВ}}{\text{м}} \quad (11.21)$$

де V_1 - множник послаблення за умови низько розташованих антен.

Але така формула не враховує деяких реальних умов: по-перше, не врахована кривизна Землі, по-друге, її поверхня не є ідеальним провідником.

Тому, внаслідок відбиття радіохвилі від земної поверхні, середньоквадратичне значення збільшено у разів.

У тих випадках, коли задані ефективна висота антени-передавача та сила струму у пучності , зручніше використовувати таку формулу для розрахунку :

$$E = \frac{120\pi h_e I_1}{\lambda_{[\text{м}}]} r_{[\text{км}}]} V_1, \frac{\text{мВ}}{\text{м}} \quad (11.22)$$

Формулу запропонував у 1909 р. Зоммерфельд. Її модернізували незалежно один від одного Шулейкін та Ван-дер-Поль у 1931р.



Щоб проводити обчислення за допомогою формули Шулейкіна-Ван-дер-Поля, необхідно визначити V_1 – множник послаблення. Для цього введено поняття *чисельної відстані*, яку визначають співвідношенням:

$$x = \frac{r}{s} \quad (11.23)$$

де r – відстань; s – масштаб відстані, який визначають за формулою:

$$s = |\dot{s}| = \frac{\lambda}{\pi} \left| \frac{(\dot{\epsilon}_r)^2}{\dot{\epsilon}_r - 1} \right|, \text{ м} \quad (11.24)$$

Оскільки $\dot{\epsilon}$ має комплексний характер, то:

$$x = \frac{r\pi\sqrt{(\dot{\epsilon}-1)^2+(60\lambda\sigma)^2}}{\lambda[\dot{\epsilon}^2_r+(60\lambda\sigma)]} \quad (11.25)$$



За деякими припущеннями формулу може значно спростити. Наприклад, якщо маємо:

1) $60\lambda\sigma \gg \varepsilon_r$ – провідне середовище, тоді $s = \frac{60\lambda^2\sigma}{\pi}$, $x = \frac{r\pi}{60\lambda^2\sigma}$ (11.26, 11.26а)

2) $60\lambda\sigma \ll \varepsilon_r$ – діелектричне середовище, тоді $s = \frac{\lambda\varepsilon_r}{\pi}$, $x = \frac{r\pi}{\lambda\varepsilon_r}$ (11.26б, 11.26в)

Коефіцієнт V_1 визначають за співвідношенням:

$$V_1 = \frac{2 + 0,3x}{2 + x + 0,6x^2} \quad (11.27)$$

Якщо $x > 25$, можна використовувати спрощену формулу $V_1 \cong \frac{1}{2x}$ (11,27а)

Тобто формула Шулейкіна-Ван-дер-Поля має вигляд:

$$E = \frac{245\sqrt{P_{1[\text{кВт}]}}D_1}{r_{1[\text{км}]}} \cdot \frac{2+0,3x}{2+x+0,6x^2}, \frac{\text{мВ}}{\text{м}} \quad (11.28)$$

Для визначення V_1 можна також користуватися кривими Берроуза, в яких враховано вид поляризації конкретної радіохвилі та значення

$Q = \frac{\epsilon_r}{60\lambda\sigma}$. Зауважимо, що зменшення x призводить до зростання V_1 .

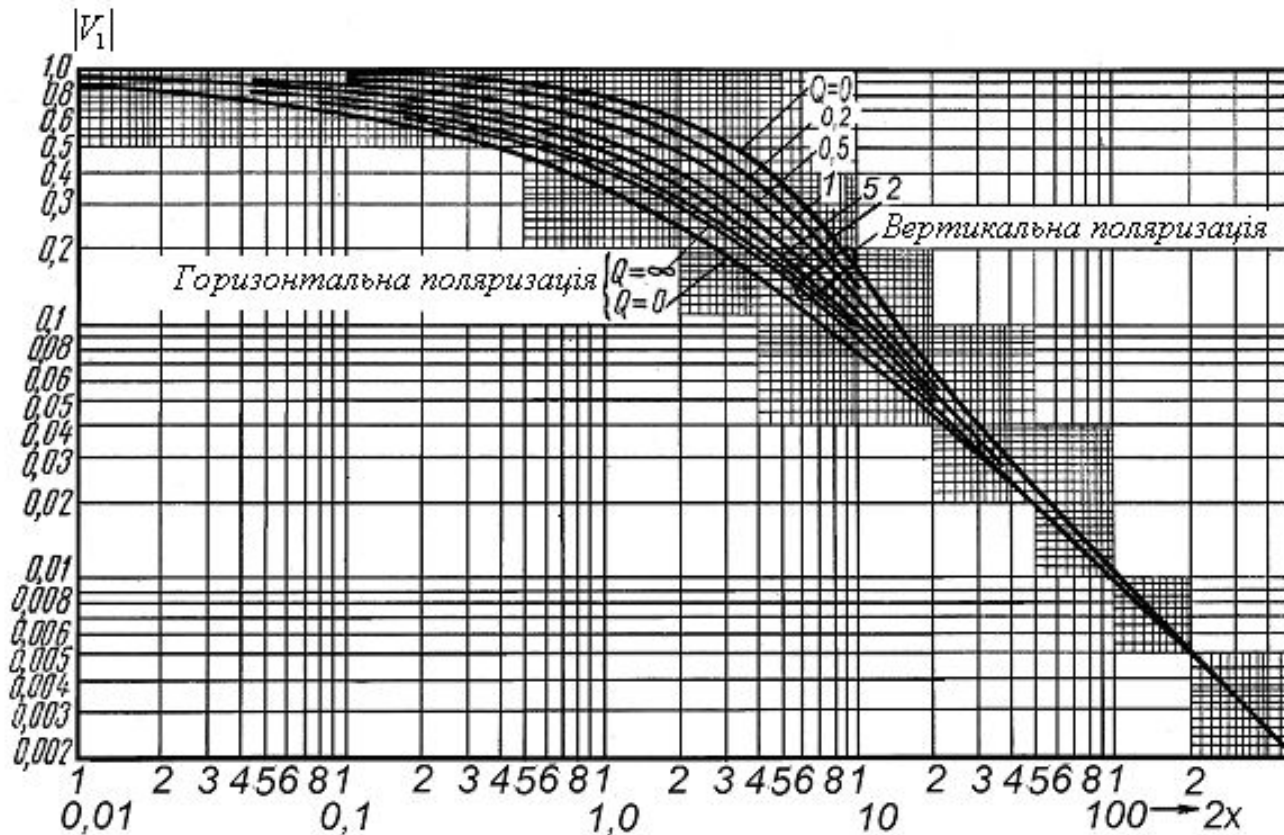


Рисунок 11.6. Криві Берроуза



11.2.3. Поширення радіохвиль над неоднорідною поверхнею

З'ясуємо в історичному аспекті ситуацію поширення радіохвиль над неоднорідним середовищем, наприклад «суходіл-море» (рис. 11.7.). В 1930 р. Еккерслеї запропонував застосування штучних коефіцієнтів послаблення з урахуванням різного характеру середовища та довжини радіолінії. Методику вдосконалили Міллінгтон та Е. Л. Фейнберг.

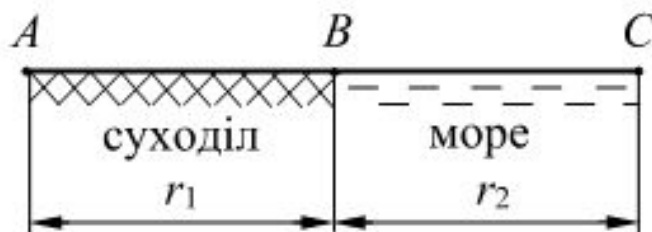


Рисунок 11.7. Поширення радіохвиль над різними середовищами

За сучасних умов можливим є застосування *кривих поширення* *рекомендованих МСЕ* та формули (10.31) якщо радіолінія охоплює суходіл та море.

Е. Л. Фейнберг отримав формули для визначення множника послаблення для ділянки траси, яка пролягає над трьома середовищами: море-суходіл-море, або суходіл-море-суходіл (рис. 11.8).

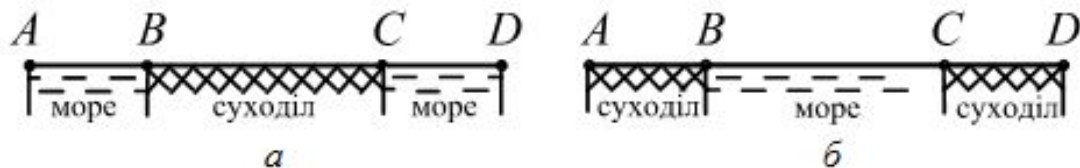


Рисунок 11.8. Радіолінія, що містить ділянки:
а – море-суходіл-море, б – суходіл-море-суходіл

За таких умов на напруженість поля впливають кінцеві ділянки траси.

З рисунку (11.9) випливає, що за умови переходу від суходолу на море значення E суттєво збільшується зі збільшенням відстані від джерела (криві наведено для потужності випромінювання 1 кВт).

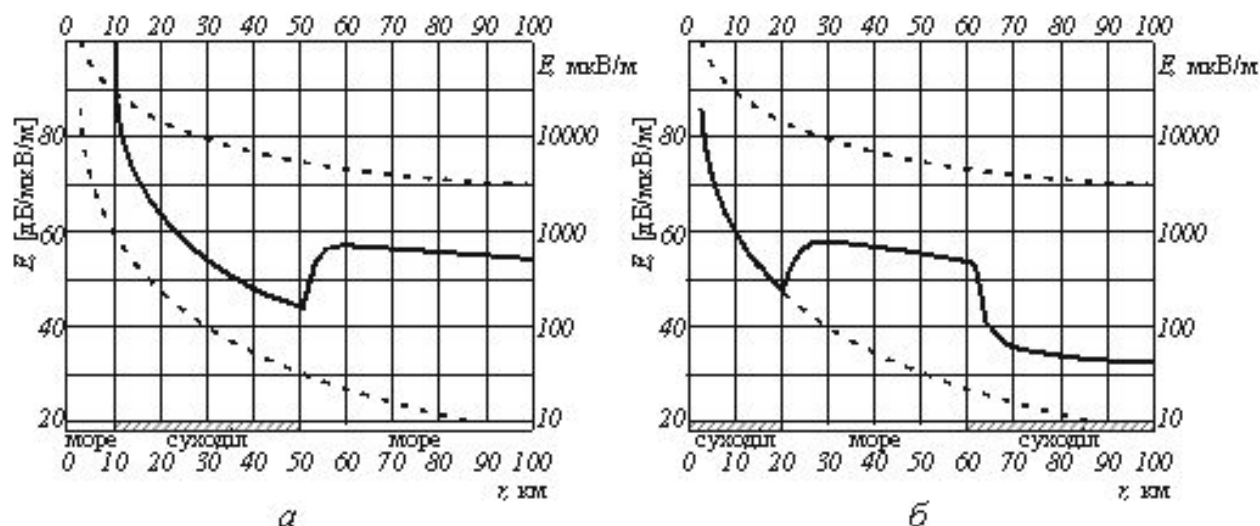


Рисунок 11.9. Графіки змінення напруженості поля з відстанню над трасою,
а – «море-суходіл-море» та б – «суходіл-море-суходіл», штрихові криві:
верхні для моря ніжні для суходолу, суцільні криві для комбінованих трас)



Для оцінювання значення коефіцієнта V введено параметр $\xi = \frac{r_{\text{сд}}}{r_{\text{сд}} + r_{\text{м}}}$, який називають *коефіцієнтом заповнення траси сухоходом*. На рис. 11.10. наведено графік залежності $V(\xi)$.

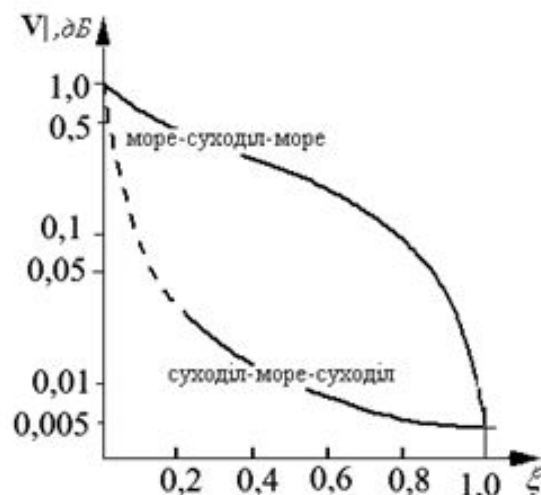


Рисунок 11.10. Графік залежності $V(\xi)$

Із графіка випливає, якщо кінцеві ділянки траси суходіл, то й за невеликого розміру цих ділянок ($\xi = 0,1$), множник послаблення такий же малий, як і на трасі, яка повністю є сухоходом. Якщо кінцеві ділянки траси – море, то вплив суходолу є лише за ξ , близьке до 0,9.



11.3.1 Поширення радіохвиль із урахуванням сферичності Землі

11.3.1 Урахування сферичності Землі в межах прямої видимості

Відстанню прямої видимості називають пряму між передавальною та приймальною антенами, причому пряма лінія, яка є дотичною до земної поверхні.

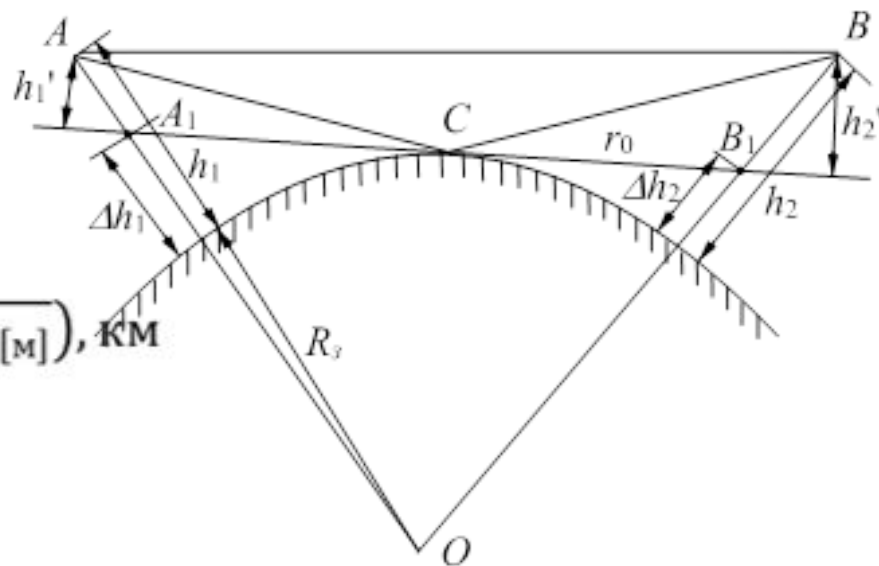
Якщо висоти передавальної і приймальної антен, відповідно h_1 та h_2 , то відстань прямої видимості

визначають: $r_0 = \sqrt{2R_\zeta}(\sqrt{h_{1[M]}} + \sqrt{h_{2[M]}})$, км

з урахуванням $R_\zeta = 6,37$ тис..км:

$r_0 = 3,57(\sqrt{h_{1[M]}} + \sqrt{h_{2[M]}})$, км

Якщо відстань між передавачем і приймачем r є в межах $0,2r_0 < r < 0,8r_0$ - слід враховувати сферичність Землі.





Для визначення напруженості поля на відстані, меншій за r_0 , можна використовувати формулу Введенського, але підставляти в неї не фактичні висоти антен h_1 та h_2 , а приведені – h_1' та h_2' .

$$h_1'_{[M]} = h_{1[M]} - \frac{r_{1[KM]}^2}{12,8}, \quad r_{1[KM]} = \frac{h_1}{h_1+h_2} \cdot r \quad (11.29)$$

$$h_2'_{[M]} = h_{2[M]} - \frac{r_{2[KM]}^2}{12,8}, \quad r_{2[KM]} = \frac{h_2}{h_1+h_2} \cdot r \quad (11.29a)$$

Кривизна Землі так впливає на поширення РХ:

- Δr відрізняється від різниці відстані у випадку високо піднятих антен;
- оскільки хвиля відбивається не від плоскої поверхні, а від опуклої напівпровідникової поверхні, то процес відбиття супроводжено деяким розсіянням хвильової енергії, що призводить до послаблення поля.



11.3.2 Поширення радіохвиль над однорідною гладкою поверхнею Землі з урахуванням дифракції

Поширення радіохвиль за межі прямої видимості пояснюють явищем дифракції. Але це твердження, запропоноване Г. Ватсоном у 1918 році актуальне лише для низькочастотних хвиль (які дифрагують).

Для визначення впливу дифракції на процес поширення радіохвиль у випадку піднятих передавальної та приймальної антен трасу розбивають на три ділянки:

- зона освітленості ($< 0,8r_0$);
- зона напівтіні ($0,8r_0 \dots 1,2r_0$);
- зона тіні ($> 1,2r_0$).



В. А. Фок отримав загальну формулу для напруженості електричного поля в місці приймання, яка актуальна для будь-яких відстаней від передавача. Але цей вираз математично складний, і його використовують, здебільшого для зони тіні. Особливістю цієї формули є представлення множника послаблення, як добуток трьох функцій:

$$V = U(x)V(y_1)V(y_2) \quad \text{або} \quad V_{[\text{дБ}]} = U_{[\text{дБ}]}(x) + V_{[\text{дБ}]}(y_1) + V_{[\text{дБ}]}(y_2) \quad (11.30, 11.30a)$$

де $U(x)$ – функція, яка залежить від відстані та електричних параметрів земної поверхні, $V_1(x), V_2(x)$ – функції, які залежать від висоти передавальної та приймальної антен.

Фок запропонував параметри траси виразити у безрозмірних величинах:

$$\text{– розмірний масштаб відстані: } L = \left(\frac{\lambda R_3^2}{\pi} \right)^{1/3}, \text{ м,} \quad (11.31)$$

$$\text{– розмірний масштаб висот: } H = \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda^2 R_3}{\pi^2} \right)^{1/3}, \text{ м.} \quad (11.31a)$$

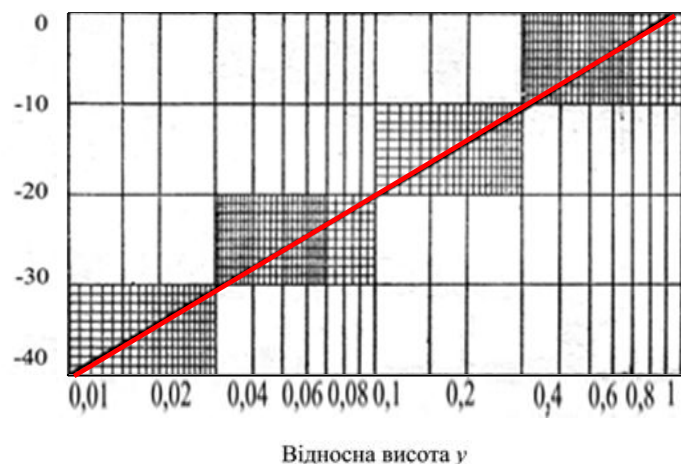
Параметри радіоканалу визначають з використанням цих величин .

$$x = \frac{r}{L}, y_1 = \frac{h_1}{H}, y_2 = \frac{h_2}{H} \quad (11.32)$$



Залежність функцій $U(x)$, $V_1(x)$, $V_2(x)$ від їх аргументів визначають із графіків залежності множника послаблення від висоти:

а) $V_1(y)$, дБ



б) $V_1(y)$, дБ

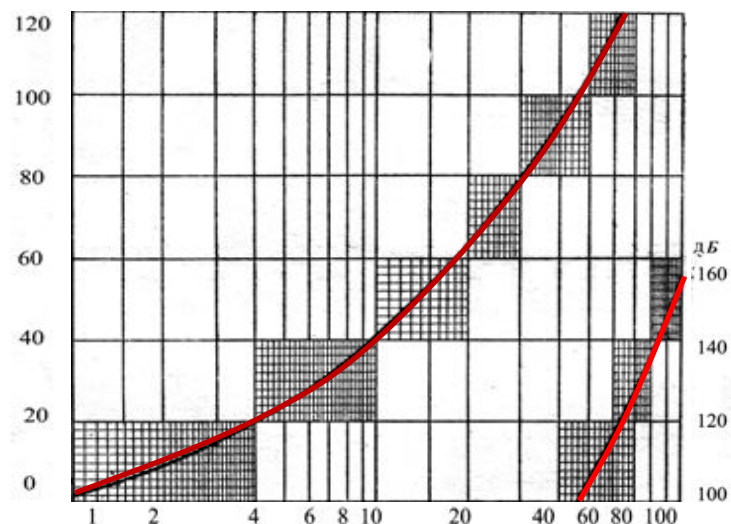


Рисунок 11.11. Функції: а – $U(x)$, б – $V_1(y_1, y_2)$ – для $y = 0,01 \dots 1$, в – $V_2(y_1, y_2)$ для $y = 1 \dots 100$;



11.4 Поширення земних радіохвиль над нерівною місцевістю

Реально радіохвилю, яка поширюється можна моделювати еліпсоїдом обертання, який повторює діаграму спрямованості антени.

В результаті відбиття радіохвилі від нерівної (пагорбистої) поверхні в точку приймання приходять пряма та відбита хвилі. Для кожної з яких існує своя область, суттєва для поширення (яка теж має форму еліпсоїда):

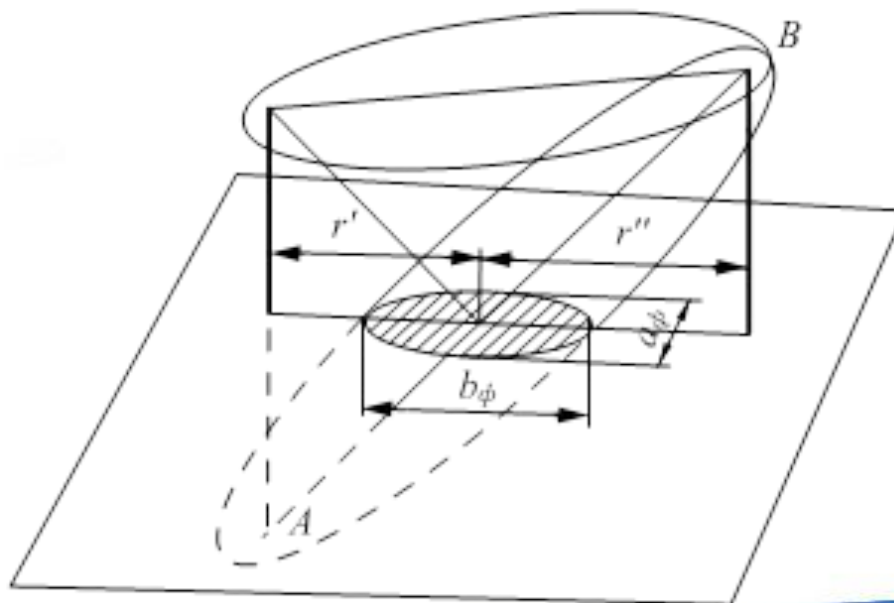


Рисунок 11.12. Ділянка земної поверхні, яка формує відбиту хвилю



Частина енергії фронту хвилі, що падає, $m - m'$ відіб'ється від різних ділянок земної поверхні (фронт відбитої хвилі $n - n'$). За таких умов є різниця ходу променів відбитих від точок D і B , яка призводить до зсуву за фазою $\Delta\varphi$, внаслідок збільшення відстані за траєкторією $(m - m') - (n - n')$:

$$\Delta r = AB + BC = 2h \cos \theta \quad (11.33)$$

Зсув за фазою

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2h \cos \theta. \quad (11.34)$$

Якщо $\Delta\varphi < \frac{\pi}{2}$, то хвилю можна вважати *пласкою*, тобто мінімально допустима висота

$$h_{\text{доп}} = \frac{\lambda}{8 \cos \theta}. \quad (11.35)$$

Таким чином поверхню можна вважати рівною, тобто відбивання є близьким до дзеркального, якщо виконано умову $h < h_{\text{доп}}$. Цю умову називають *критерій Релея*.



11.5. Висновки

1. Земні радіохвилі – хвилі, що поширюються безпосередньо над поверхнею Землі (71% – море, 29% – суходіл) і частково огинають її поверхню внаслідок явища дифракції.
2. На процес поширення земних радіохвиль впливають *інтерференція, дифракція, відбиття, поглинання*. Ці процеси зумовлені параметрами середовища ϵ , σ ; видом поляризації; напрямком випромінювання; рельєфом траси.
3. Значення ϵ_r в межах від одиниць (ліс, сухий ґрунт) до десятків (вода); σ – від стотисячної долі Сіменса до одиниць десятків. Ці параметри залежать від частоти.
4. Для вивчення явища поширення земних хвиль треба використовувати моделі плоскої Землі і сферичної Землі з екрануючими перешкодами.
5. Коефіцієнт послаблення має інтерференційну структуру (у випадку високопіднятих антен).
6. Формула Введенського має велике значення для розрахунку ліній метрового, сантиметрового діапазонів і використовують у випадку високопіднятих антен.



7. Формулу Шулейкіна-Ван-дер-Поля використовують для розрахунку ліній гекто-, кіло-, міріаметрових хвиль у випадку низько розташованих антен.
8. Над морем коефіцієнт V спадає повільніше, ніж над суходолом, але у крайніх точках вони рівні.
9. Під час врахування кривизни Землі процес відбиття радіохвиль супроводжено деяким розсіянням енергії, що призводить до послаблення поля відбитої хвилі.
10. Для визначення впливу дифракції на процес поширення радіохвиль у випадку піднятих передаючої та приймальної антен трасу розбивають на три зони: зона освітленості, зона напівтіні, зона тіні.
11. Для піднятих антен теж використовують інтерференційні формулами, але в формулах геометричний радіус Землі змінюють на еквівалентний.



12. Із збільшенням відстані між передаючою та приймальною антенами виникає похибка (теорія Фока), тому Фок запропонував ввести коефіцієнти, які дозволяють параметри траси виразити у безрозмірних одиницях:

- розмірний масштаб відстані: $L = \left(\frac{\lambda R \zeta^2}{\pi}\right)^{1/3}$, м

- розмірний масштаб висот: $H = \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda^2 R_3}{\pi^2}\right)^{1/3}$, м.

Безрозмірні коефіцієнти $x = \frac{r}{L}$, $y_1 = \frac{h_1}{H}$, $y_2 = \frac{h_2}{H}$

13. Модель поширення радіохвиль над нерівною місцевістю будують з врахуванням зон Френеля. У пагорбистій місцевості повинен бути “просвіт” між вершинами перешкод та першою зоною Френеля.

14. Для оцінки інтенсивності зворотнього відбиття вводять поняття ефективної відбиваючої площі.

11.6. Контрольні питання та завдання



1. Охарактеризуйте параметри земної поверхні, які впливають на поширення наземних радіохвиль.
2. Виведіть формулу для кута втрат у двох варіантах (з величинами α та β , відповідно).
3. Виведіть формулу прямої видимості та охарактеризуйте зони: освітлену, напівтіні та тіні.
4. Наведіть процедури отримання інтерференційної формули.
5. Виведіть коефіцієнт додаткових втрат для високо розташованих антен.
6. Поясніть інтерференційний характер залежності K .
7. Виведіть формулу Введенського та обґрунтуйте її обмеження.
8. Отримайте розрахункові формули для антен низького розташування (Шулейкіна – Ван-дер-Поля).
9. Наведіть криві Берроуза та приклад їх застосування.
10. Охарактеризуйте особливості розрахунків напруженості електричного поля над неоднорідною поверхнею.
11. Охарактеризуйте процес поширення радіохвиль із врахуванням сферичності Землі.
12. Поясніть методику розрахунку радіолінії за урахуванням дифракції.
13. Визначте коефіцієнти послаблення за методикою В.А. Фока (дані за вашим вибором).
14. Виведіть формули стосовно нерівності поверхні за критерієм Релея.