

УДК 550.837.75:553.98

## ОТРАЖАТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УГЛЕВОДОРОДНОЙ ЗАЛЕЖИ ПРИ ДВУХЧАСТОТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В РЕЖИМЕ МОЩНОГО НЧ-СИГНАЛА

С.В. КАЛИНЦЕВ, канд. физ.-мат. наук, доц. Н.В. ЦЫВИС,  
канд. техн. наук, доц. В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ  
(Полоцкий государственный университет)

Для выделения материальных объектов на фоне окружающей среды используются отражательные характеристики, которые служат инструментом для оптимизации электрических параметров зондирующего сигнала. Исследуемая залежь углеводородов представлена в виде анизотропной неоднородности на трассе связи.

В общем случае пространственная ориентация внешней нормали к границе раздела сред и волнового вектора  $\vec{k}$  является произвольной (рис. 1) и процесс взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) с локальным включением на трассе распространения радиоволн (РРВ) можно представить в виде режима наклонного падения плоской волны с вертикальной поляризацией на безграничную поверхность с анизотропным импедансом (в приближении больших характерных размеров неоднородности по сравнению с длиной волны зондирующего сигнала).

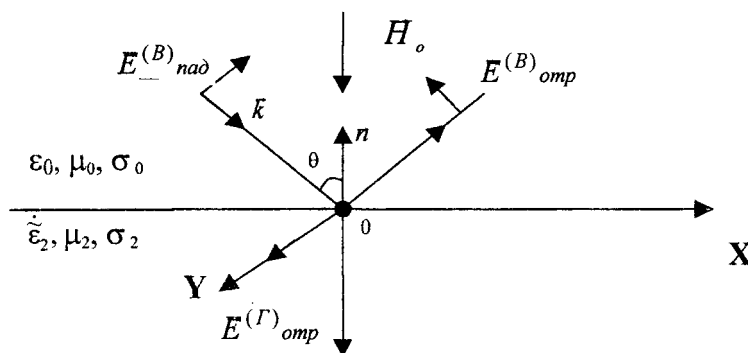


Рис. 1. Геометрия задачи для ЭМВ с вертикальной поляризацией поля

Отражательную способность среды над залежью углеводородов при воздействии ЭМВ с линейной поляризацией в режиме двухчастотного взаимодействия можно оценить по контрасту коэффициентов отражения между анизотропной средой (АС) и поляризацией поля (ПП) по формуле:

$$\Delta R = 20 \lg |R_p - R_{\text{ВВ}}|. \quad (1)$$

Значение коэффициента «подстилающей» среды  $R_p$  с конечной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_p$  и проводимостью  $\sigma_p$  для ЭМВ с вертикальной поляризацией определяется по формуле:

$$R_p = \frac{\dot{\epsilon}_p \sin \Theta - \sqrt{\dot{\epsilon}_p - \cos^2 \Theta}}{\dot{\epsilon}_p \sin \Theta + \sqrt{\dot{\epsilon}_p - \cos^2 \Theta}} = R_p \exp j\varphi_p, \quad (2)$$

где  $\dot{\epsilon}_p = \epsilon_p - j \frac{\sigma_p}{\omega \epsilon_0}$  – комплексная диэлектрическая проницаемость «подстилающей» поверхности.

На рис. 2 – 5 представлены частотные зависимости модуля  $|R_{\text{ас}}|$  и фазы  $\varphi_{\text{ВВ}}$  при  $\theta = 0^\circ$  для различных соотношений частот и амплитуд двух воздействующих сигналов, рассчитанных по формулам (2).

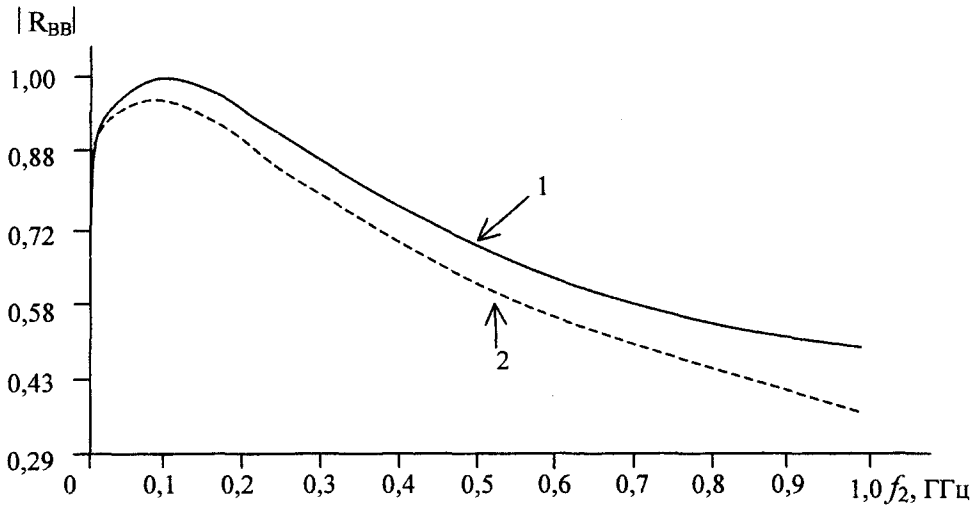


Рис. 2. Зависимости  $|R_{BB}| = \varphi(f_2)$  при нормальном падении:  
 1 - для  $k_\omega = 10^{-6}$ ,  $k_E = 10^{-6}$ ; 2 - для  $k_\omega = 10^{-6}$ ,  $k_E = 10^{-1}$

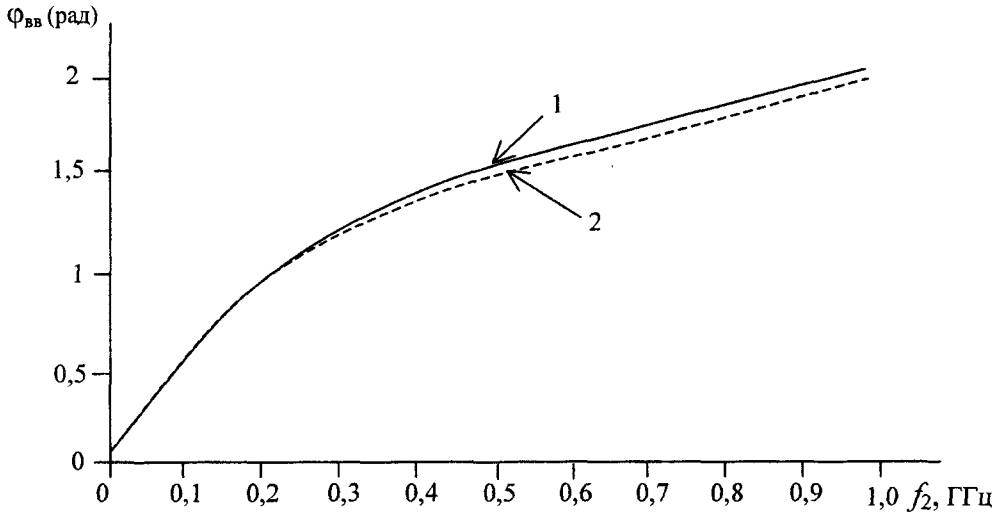


Рис. 3. Зависимости  $\varphi_{BB} = \varphi(f_2)$  при  $\theta = 0^\circ$ :  
 1 - для  $k_\omega = 10^{-6}$ ,  $k_E = 10^{-6}$ ; 2 - для  $k_\omega = 10^{-6}$ ,  $k_E = 10^{-1}$

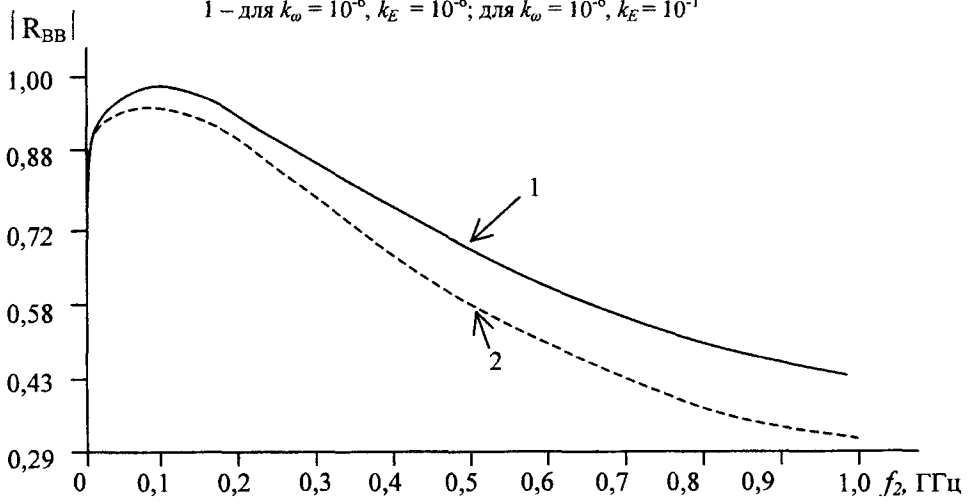


Рис. 4. Зависимости  $|R_{BB}| = \varphi(f_2)$  при нормальном падении:  
 1 - для  $k_\omega = 10^{-1}$ ,  $k_E = 10^{-6}$ ; 2 - для  $k_\omega = 10^{-1}$ ,  $k_E = 10^{-1}$

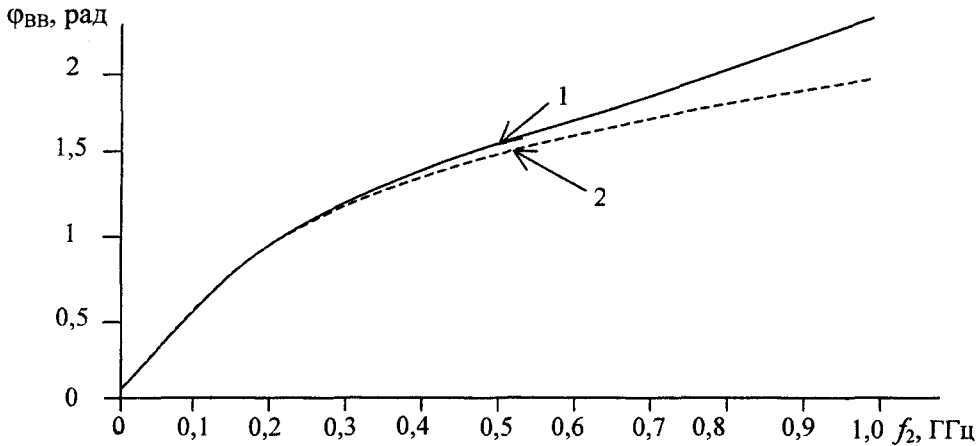


Рис. 5. Зависимости  $\Phi_{\text{вв}} = \varphi(f_2)$  при нормальном падении:  
1 – для  $k_{\omega} = 10^{-1}$ ,  $k_E = 10^{-6}$ ; 2 – для  $k_{\omega} = 10^{-1}$ ,  $k_E = 10^{-1}$

В исследуемом диапазоне частот наблюдается неравномерный характер изменения  $|R_{\text{вв}}|$ . Модуль коэффициента отражения имеет максимальное значение, равное 1,0 в диапазоне частот от 100 до 200 МГц. На частотах в диапазоне от 100 кГц до 100 МГц наблюдается рост этого коэффициента от 0,8 до 1,0, а на частотах выше 200 МГц – плавное уменьшение от 1,0 до 0,3 – 0,4 на частоте  $f_2 = 1$  ГГц. Величина  $|R_{\text{вв}}|$  зависит от соотношения амплитуд и частот взаимодействующих сигналов со средой над залежью, т.е. от параметров  $k_{\omega}$ ,  $k_E$ . Влияние коэффициента  $k_{\omega}$  сказывается незначительно, наибольшие отличия величин  $|R_{\text{вв}}|$  получаются при небольших значениях  $k_{\omega}$ , например, при коэффициенте, равном  $10^{-1}$ , а при  $k_{\omega} = 10^{-3}$  и  $k_{\omega} = 10^{-6}$  отличия характеристик практически не существенны. Влияние амплитуд взаимодействующих волн, т.е. параметра  $k_E$  проявляется более заметно. Например, при  $k_{\omega} = 10^{-6}$  на частоте  $f_2 = 1$  ГГц наблюдается уменьшение  $|R_{\text{вв}}|$  до значения 0,36 при  $k_E = 10^{-1}$  и до значения 0,50 при  $k_E = 10^{-6}$ . В целом характер изменения величины  $|R_{\text{вв}}|$  от частоты  $f_2$  при различных коэффициентах  $k_E$  и  $k_{\omega}$  имеет одинаковый вид (рис. 6 – 8).

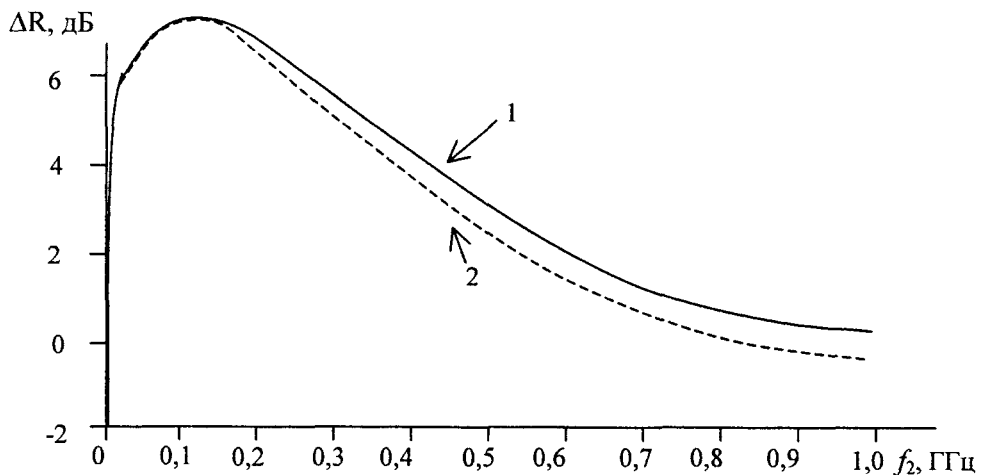


Рис. 6. Зависимости  $\Delta R = \varphi(f_2)$  при  $\theta = 0^\circ$ :  
1 – для  $k_{\omega} = 10^{-6}$ ,  $k_E = 10^{-6}$ ; 2 – для  $k_{\omega} = 10^{-6}$ ,  $k_E = 10^{-1}$

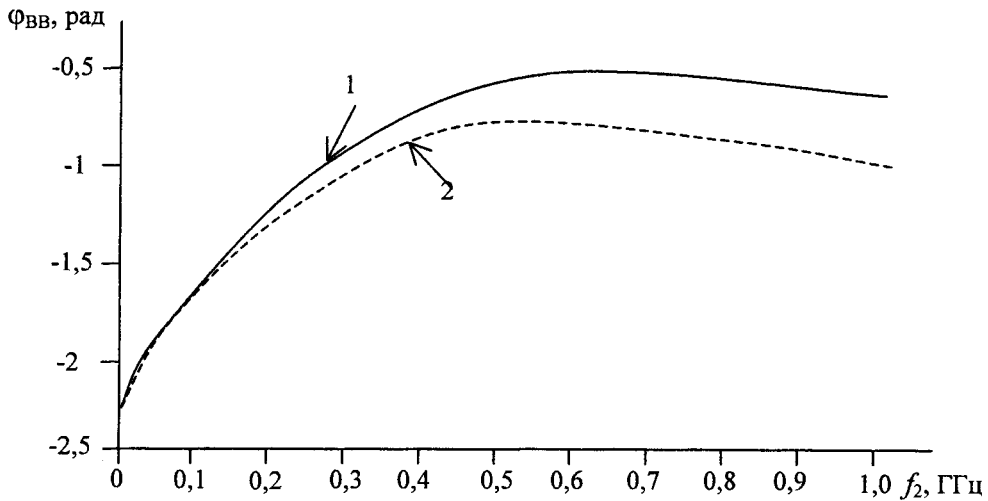


Рис. 7. Зависимости  $\varphi_{\Delta R} = \varphi(f_2)$  при  $\theta = 0^\circ$ :  
 1 – для  $k_\omega = 10^{-6}$ ,  $k_E = 10^{-6}$ ; 2 – для  $k_\omega = 10^{-6}$ ,  $k_E = 10^{-1}$

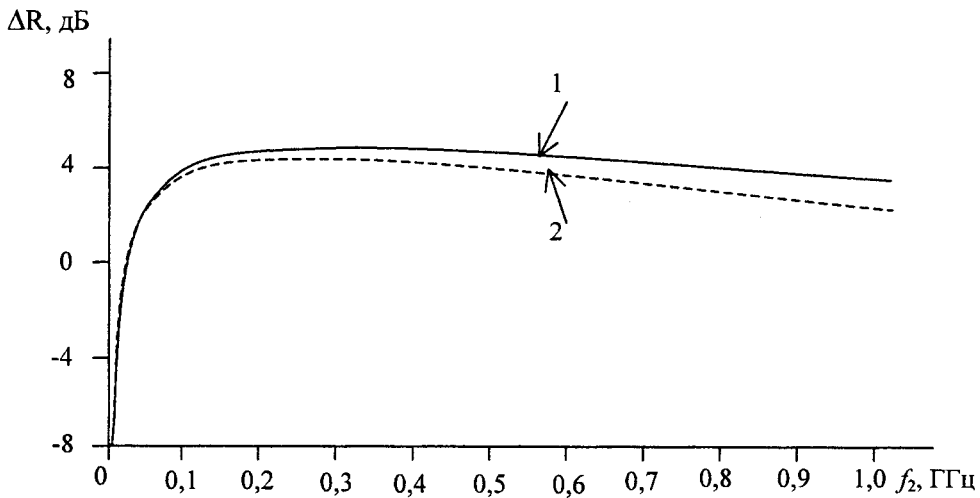


Рис. 8. Зависимости  $\Delta R = \varphi(f_2)$  при  $\theta = 50^\circ$ :  
 1 – для  $k_\omega = 10^{-6}$ ,  $k_E = 10^{-6}$ ; 2 – для  $k_\omega = 10^{-6}$ ,  $k_E = 10^{-1}$

Фазочастотные характеристики  $\varphi_{\Delta R} = \varphi(f_2)$  нелинейно изменяются от значений 0,05 рад на частоте  $f_2 = 10^6$  Гц до 1,8 – 1,9 рад на частоте  $f_2 = 1$  ГГц. Влияние параметров  $k_\omega$  и  $k_E$  сказывается несущественно на изменение фазы. При  $k_\omega = 10^{-3}$  все характеристики практически сливаются в одну линию. Наиболее заметно отличие характеристик при  $k_\omega = 10^{-1}$ , т.е. при незначительном разnose частот  $f_1$  и  $f_2$ .

При  $k_E = 10^{-1}$ ,  $k_\omega = 10^{-6}$  происходит рост  $\varphi_{\Delta R}$  до -0,9 рад на  $f_2 = 450$  МГц и дальше его падение до -1,25 рад на  $f_2 = 1$  ГГц.

При угле падения волны  $\theta = 50^\circ$  контраст наиболее выражен в диапазоне 200 МГц – 1 ГГц и составляет (2 – 4) дБ, фазовые характеристики изменяются не существенно (рис. 9).

При  $k_\omega = 10^{-1}$  общая закономерность характеристик контраста остается прежней, а фаза  $\varphi_{\Delta R} = 0$  во всем диапазоне частот (рис. 10). При  $\theta = 85^\circ$  наибольший контраст наблюдается в диапазоне частот 1 МГц – 50 МГц (рис. 11), причем величины  $k_\omega$  и  $k_E$  не влияют на данный параметр. Фазовая характеристика ведет себя несколько по-иному. Влияние  $k_\omega$  и  $k_E$  не проявляется: при  $f_2 = 200$  МГц  $\varphi_{\Delta R} = -0,018$  рад; при  $f_2 = 1$  ГГц  $\varphi_{\Delta R} \approx 0$  рад.

При нормальном и скользющем падении двухчастотной ЭМВ наибольший контраст на границе контура АС проявляется в низкочастотной части исследуемого диапазона частот (100 - 200 МГц). Зондирование на более высоких частотах оказывается эффективным для этих целей при наклонном падении ЭМВ.

Таким образом, приведенный метод может быть использован для разработки способов поиска и выделения углеводородных залежей на основе двухчастотного взаимодействия.

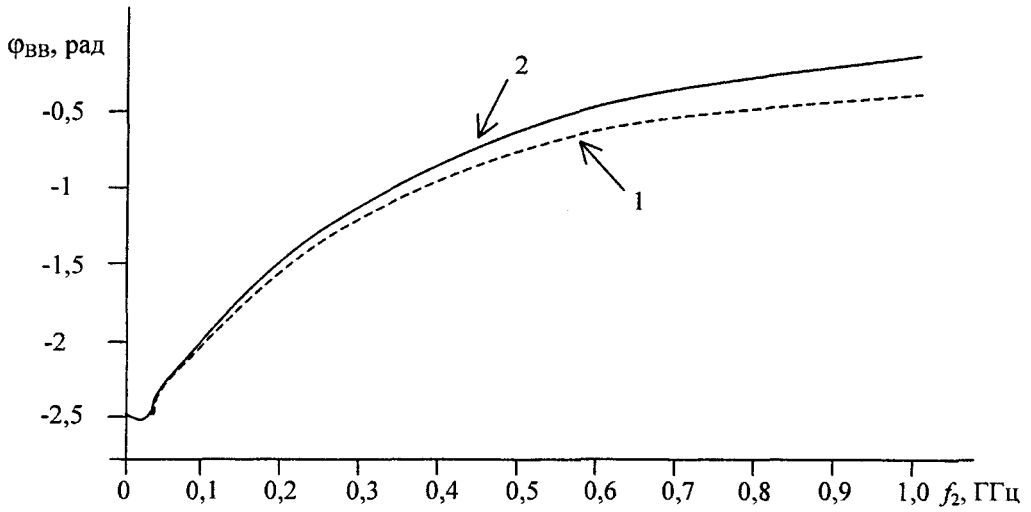


Рис. 9. Зависимости  $\Phi_{\Delta R} = \varphi(f_2)$  при  $\theta = 50^\circ$ :  
 1 – для  $k_\omega = 10^{-6}$ ,  $k_E = 10^{-6}$ ; 2 – для  $k_\omega = 10^{-6}$ ,  $k_E = 10^{-1}$

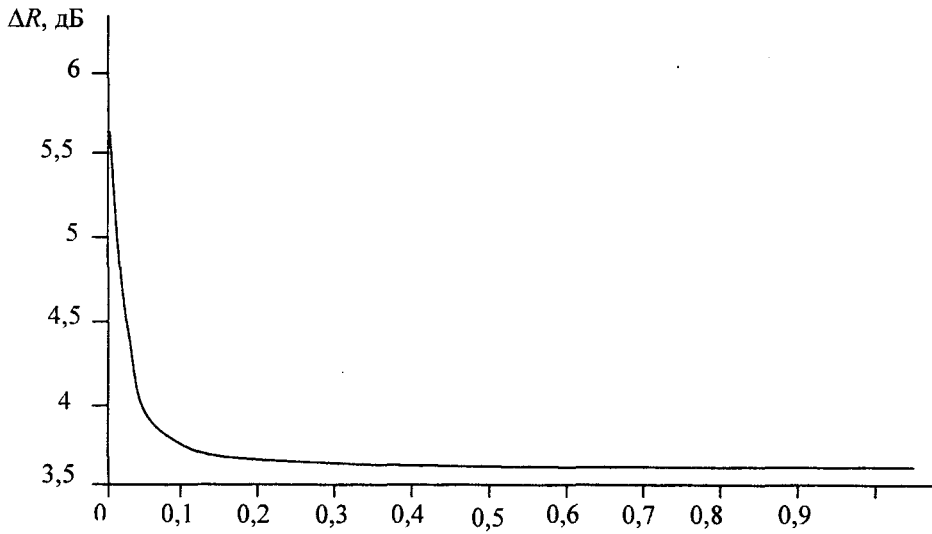


Рис. 10. Зависимость  $\Delta R = \varphi(f_2)$  при  $\theta = 85^\circ$

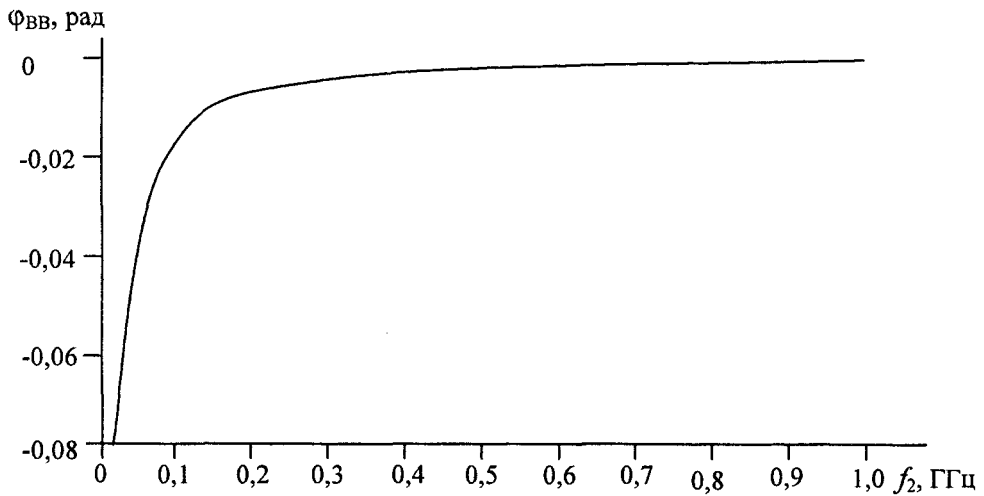


Рис. 11. Зависимость  $\Phi_{\Delta R} = \varphi(f_2)$  при  $\theta = 85^\circ$