

В. И. Байбаков, В. Н. Дацко, Ю. В. Кистович. Экспериментальное обнаружение поверхностных электромагнитных волн Ценнека. В классических экспериментах Г. Герца, столетие которых отмечается в эти дни, наблюдались электромагнитные волны, распространяющиеся в свободном пространстве. Результаты этих экспериментов быстро завоевали мировую известность и признание. Не так просто, поистине драматически складывалась история исследований поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ).

1. В 1899 г. А. Зоммерфельд рассмотрел задачу об осевом токе в длинном прямом проводе и получил решение уравнений Максвелла, амплитуда которых быстро спадает при удалении от поверхности провода. Эти решения были им интерпретированы как ПЭВ, возможно, по аналогии с поверхностными акустическими волнами Рэлея. В 1901 г. Г. Маркони осуществил радиопередачу через Атлантический океан на частоте 30 кГц, в связи с чем было высказано предположение, что в его опытах возбуждался новый типа радиоволны — поверхностная волна (ПВ). В 1907 г. Я. Ценнек показал, что уравнения Максвелла с соответствующими граничными условиями допускают решение, которое может быть названо поверхностной волной. Дисперсионное соотношение для ПВ, распространяющейся по границе раздела сред с диэлектрическими проницаемостями ϵ и ϵ_0 , имеет вид

$$k^2 = k_0^2 \frac{\epsilon_0 \epsilon}{\epsilon_0 + \epsilon},$$

где $k_0 = \omega/c$, k и ω — волновой вектор волны и частота волны, c — скорость света в вакууме.

Волна «привязана» к поверхности, ее фазовая скорость несколько превышает скорость света в вакууме и зависит от свойств подстилающей поверхности. Ценнек считал, что поле реального излучателя на большом удалении от него будет иметь вид найденной им волны. Однако из его работы следует лишь возможность существования ПВ, но поле никак не связано с антенной, т. е. не раскрыт основной момент проблемы излучения.

2. Задача о возбуждении электромагнитного (ЭМ) поля вертикальным диполем, установленным над плоской проводящей поверхностью, является классической задачей радиофизики. Впервые она была рассмотрена в 1909 г. А. Зоммерфельдом, нашедшим, что в излучении диполя присутствуют как объемные ЭМ волны, так и ПВ. Он считал, что на больших расстояниях от источника преобладает ПВ Ценнека, и таким образом им установлена связь ПВ с источником излучения. Концепция ПВ Ценнека, подкрепленная авторитетом Зоммерфельда, долгое время была почти общепринятой. Однако начиная с 1919 г. в работах Вейля, Ван-дер-Поля, В. А. Фока и др. этот вывод был оспорен и признан ошибочным. Попытки возбудить ПВ Ценнека в естественных условиях над поверхностью суши, пресной и морской воды также окончились неудачей. Одна из таких попыток — крупномасштабный эксперимент, проведенный в 1934—1941 гг. в нашей стране под руководством академиков Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси. С тех пор в советской радиофизике прочно утвердилось мнение о том, что возбуждение ПВ Ценнека реальными излучателями невозможно и что сама концепция поверхностной волны ошибочна. Это мнение вошло в учебники по радиофизике и господствует по сей день.

3. Однако в последние годы ПЭВ наблюдались экспериментально в различных лабораториях мира. По современным теоретическим представлениям возможны два случая:

а) $\epsilon < 0$ — действительная величина, и тогда на границе раздела существуют так называемые волны Фано с фазовой скоростью $v < c$, наблюдающиеся в газоразрядной плазме (поверхностные плазмоны), в полупроводниках и металлах. В настоящее время они активно исследуются и применяются в спектроскопии поверхности.

б) $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$ — комплексная величина, $\epsilon'' > 0$. На границе раздела возникает волна Ценнека с фазовой скоростью $v > c$. До наших работ 1980—1982 гг. волна Ценнека экспериментально не наблюдалась.

4. Любой реальный источник ЭМ поля, расположенный на границе раздела двух сред, возбуждает как поверхностные, так и объемные волны, и разделение их оказывается сложной экспериментальной задачей. В наших опытах ПВ Ценнека наблюдалась в лабораторных условиях на поверхности воды различной солености (преимущественно 35 ‰) в диапазоне частот 0,7—6 ГГц. Были разработаны методы возбуждения и исследования стоячей и бегущей поверхностных волн.

В режиме бегущей волны, используя излучатель специальной конструкции, удалось «оторвать» объемное излучение от поверхности и направить его вверх под большими углами к горизонту, освободив тем самым ПВ от примеси объемного поля. В излучении такого источника, расположенного над поверхностью воды, зафиксировано наличие волны, распространяющейся вдоль поверхности, амплитуда которой убывает с расстоянием ρ до излучателя как $1/\rho^{1/2}$, что соответствует расходимости ПВ. Измерения вертикальной структуры поля в этой волне показали, что поле экспоненциально спадает по мере удаления от поверхности, причем измеренные зависимости высоты локализации от частоты и солености воды оказались в хорошем согласии с теоретическими расчетами. Кроме того, наблюдалась трансформация ПВ в объемное излучение на неоднородности волноведущей поверхности. В режиме стоячей волны ПВ Ценнека возбуждалась в прямоугольном резонаторе в условиях ее размерного резонанса. При этом было осуществлено однозначное отделение ПВ от объемных волн и измерена ее вертикальная фазо-амплитудная структура, оказавшаяся в полном согласии с теорией. Помимо этого была измерена частотная зависимость затухания ПВ и зависимость фазовой скорости от величины поверхностного импеданса воды.

5. Проведен анализ результатов единственного известного нам эксперимента (Хансен, США, 1974) по распространению ЭМ волн декаметрового диапазона (5—30 МГц), возбуждаемых специальными антеннами, над океанской

поверхностью на трассе протяженностью 237 км. В отличие от Хансена, нашедшего необъяснимую аномалию в распространении ЭМ поля, нами сделан вывод о том, что в его эксперименте возбуждалась смесь объемных и поверхностных волн, причем трасса сама «выбирала» менее затухающие волны. Мы показали, что на частотах меньше некоторой критической частоты, зависящей от солености (15 МГц в случае Хансена), ПВ Ценнека затухает значительно слабее, чем «земной луч». Следовательно, на частоте выше 15 МГц распространение ЭМ поля происходило «земным лучом», а на частотах менее 15 МГц — в виде ПВ Ценнека, чем и объясняется аномалия. Данные по относительному затуханию ПВ, полученные из работы Хансена, хорошо согласуются с результатами наших собственных лабораторных измерений.

6. Существование ПВ Ценнека долгое время оспаривалось прежде всего из-за отсутствия экспериментальных данных. Наблюдение ПВ в естественных условиях требует специфических средств и методов измерения, которые предварительно должны быть развиты в лаборатории, где возбуждение и идентификация этой волны особых затруднений не вызывают. В настоящее время существование ПВ Ценнека доказано прямыми экспериментами, поэтому необходимо пересмотреть устаревшие взгляды и развернуть исследования, особенно в естественных условиях над морской поверхностью, с целью разработки новых каналов радиосвязи и способов радиолокации.

Материалы доклада опубликованы в следующих работах:

- Б а й б а к о в В. И., К и с т о в и ч Ю. В., Д а ц к о В. Н. //Письма ЖТФ. 1980. Т. 6. С. 394.
 Б а й б а к о в В. И., К и с т о в и ч Ю. В. //Ibidem. 1980. Т. 6. С. 19, 1172; 1981. Т. 51. С. 2597, 2599; 1982. Т. 52. С. 846; 1983. Т. 53. С. 1172.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Z e n n e c k J. //Ann. d. Phys. 1907. Bd 23. S. 846.
 S o m m e r f e l d A. //Ibidem. 1909. Bd 28. S. 665.
 W e y l H. //Ibidem. 1919. Bd 60. S. 481.
 Ф о к В. А. //Ann. d. Phys. 1933. Bd 17. S. 401; его же: //Ф р а н к Ф., М и з е с Р. Дифференциальные и интегральные уравнения математической физики.— М.: ОНТИ, 1937.— Гл. XXIII.
 V a n d e r P o l B. //Physica. 1935. V. 2. P. 843.
 Новейшие исследования радиоволн: Сб. статей/Под ред. Л. И. Мандельштама, Н. Д. Папалекси.— М.: Гостехиздат, 1946.
 А л ь п е р т Я. Л., Г и н з б у р г В. Л., Ф е й н б е р г Е. Л. Распространение радиоволн.— М.: Гостехиздат, 1953.
 Ф е й н б е р г Е. Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности.— М.: Изд-во АН СССР, 1961.— С. 169.
 M a r s h a l l N., F i s h e r B., Q u e s s e r H. //Phys. Rev. Lett. 1971. V. 27. P. 95.
 H a n s e n P. //Radio Sci. 1977. V. 12. P. 397.
 S h i v a r o v a, Z h e l y a z k o v //Plasma Phys. 1978. V. 20. P. 1049.
 S i n g h A. R., G o b e n C. A., D a v a g r a n a h M., B o o n e J. L. //J. App. Opt. 1978. V. 17. P. 3459.
 Поверхностные поляритоны: Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред/Под ред. В. М. Аграновича, Д. Л. Миллса.— М.: Наука, 1985.