

## ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

## О существовании и физическом смысле волны Ценнека

А.В. Кукушкин

*Рассмотрен вопрос о физическом смысле волны Ценнека. Указывается на существование модальных базисных функций, в полном спектре которых такая волна отсутствует. Обсуждаются вопросы, связанные с требованиями, которые должны быть предъявлены к экспериментальной установке по проведению решающего эксперимента в этой области.*

PACS numbers: 41.20.Jb, 78.68.+m

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200907j.0801

В недавно опубликованном в УФН письме [1], как и в ранее опубликованном сообщении [2], делается утверждение, что их авторы реально наблюдали над границей раздела воздух–вода (последнее существенно) волну Ценнека.

Достоверность этого утверждения, как будет показано ниже, может и должна быть оспорена на основании следующего.

Волна Ценнека — это быстрая поверхностная волна открытого *бесконечного* (в продольном направлении) волновода. История вопроса о возможности возбуждения такой волны, в общем, изложена в [1, 3], и мы не будем долго останавливаться на этом. Тем не менее отметим, как неопровержимый экспериментальный факт, что до сих пор эта волна никогда и никак не проявляла себя прямо или косвенно в процессе практического освоения все более и более высоких частот спектра электромагнитных волн, несмотря на то, что в минувшем столетии этот процесс отличался очень глубокой интенсивностью и широтой и даже предпринимались специальные, но безуспешные попытки возбудить и обнаружить волну Ценнека [3, 4]. Наоборот, все эффекты, которые нашли применение или объяснение в разнообразных физических приложениях [3], имели и имеют отношение к реальному существованию только таких волн открытого волновода, как *медленная* поверхностная (собственная волна открытого волновода, волна его дискретного спектра) и вытекающая (быстрая несобственная волна открытого волновода). Природа демонстрировала свою индифферентность к выбору методов решения соответствующих задач, в которых волна Ценнека то появлялась, то исчезала, и к многочисленным дискуссиям на эту тему, так что А.А. Олинер [3],

например, вообще относил тему, связанную с вопросом о возможности возбуждения волны Ценнека, к числу эзотерических.

Поэтому утверждение авторов [1, 2] о наблюдении волны Ценнека, которое вступает в противоречие с широкой исследовательской практикой, требует особого внимания.

Поднимая снова вопрос о возможности возбуждения волны Ценнека, авторы работ [1, 2] вполне обоснованно констатируют отсутствие единой точки зрения по этому вопросу у теоретиков. Если не различать разнообразных оттенков во мнениях специалистов и говорить кратко, то в целом можно констатировать следующее.

Преобладающей точкой зрения [3, 5] (условно назовём её "стандартной") является укоренившееся мнение, что *реальные* антенны не способны возбудить эту волну. Как правило, здесь имеется в виду то, что размеров апертуры реальных антенн недостаточно для эффективного возбуждения волны Ценнека, которая по структуре очень близка к обычной однородной плоской волне, скользящей по поверхности волновода. Вместе с тем при этом считается, что сама по себе волна Ценнека обладает физическим смыслом волноводной волны открытого волновода. Иначе говоря, её структура такова, что подстилающая поверхность с определёнными свойствами импеданса способна направлять эту волну вдоль себя, независимо от каких-либо характеристик реальных источников. Имеется, однако, и другая точка зрения, которую мы полностью разделяем.

Эта точка зрения неоднократно высказывалась в литературе, авторы [1] также приводят её. Речь идёт о том, что, согласно методу представления поля с помощью интеграла Зоммерфельда по разветвлённым контурам интегрирования, быстрая поверхностная волна никогда не выделяется в виде вычета подынтегральной функции из-под интеграла при деформировании исходного контура интегрирования и переходе его в перевальный. На этом основании Дж. Уэйт в аналогичной дискуссии с Г. Барлоу [6], который защищал "стандартную" точку зрения, высказал предположение, что волна Ценнека должна быть исключена из спектра нормальных волн открытого волновода вследствие того,

А.В. Кукушкин. Нижегородский государственный технический университет  
ул. Минина 24, 603600 Нижний Новгород, Российская Федерация  
Тел. (831) 436-78-40  
E-mail: alku@rol.ru

Статья поступила 24 марта 2008 г.

что её коэффициент замедления меньше единицы. Иначе говоря, эта волна, несмотря на то, что она удовлетворяет обычному граничному условию на поперечной бесконечности, имеет такую структуру поля, которая не позволяет считать её волноводной волной, независимо от каких-либо характеристик источников. В дальнейшем эта аргументация была дополнена и усилена в наших работах [7–10], где мы указали на существование базисных функций (включающих в себя комплексные интегралы Френеля)<sup>1</sup>, спектр которых априори свободен от таких волн открытого волновода, как быстрые собственные и медленные несобственные.

Итак, из изложенного следует, что эксперимент В.Н. Дацко с соавторами [1, 2] как будто подтверждает "стандартную" точку зрения<sup>2</sup> и опровергает предположение Дж. Уэйта, которое получило соответствующую поддержку и доведено до известной степени завершённости в наших работах [7–10], причём с использованием независимой аргументации. Однако было бы большой ошибкой делать из этого поспешные выводы.

Сами авторы [1, 2] считают, что после их эксперимента "в теоретическом споре поставлена точка" [1]. Действительно, физика — это опытная наука, в связи с чем к постановке физического опыта предъявляются очень жёсткие требования, особенно тогда, когда среди специалистов нет единого мнения.

Наше мнение в связи с этим сводится к следующему.

Если авторы сообщений [1, 2] действительно зарегистрировали распространение именно поверхностной, а не объёмной волны над поверхностью воды, то фазовая скорость её распространения была все-таки меньше, а не больше скорости света, т.е. они могли наблюдать обычную медленную волну с очень низким замедлением, но приняли её за быструю. Это мнение основывается на следующих предположениях.

Элементарные расчёты показывают, что в частотном диапазоне 0,7–6 ГГц, где проводились измерения в [1, 2], при комнатной температуре и значении солесодержания воды  $S = 35$  г (общий вес твёрдого вещества в граммах на килограмм морской воды [12]) теоретическое значение коэффициента замедления волны Ценнека (отношение вещественной части продольного волнового числа волны к волновому числу в воздухе) монотонно пробегает интервал<sup>3</sup> 0,999–0,995. Следует подчеркнуть, что эксперименты в [1, 2] проводились над водой, содержание солей в которой (35 % [1, 2]) на порядок выше, чем в морской [12]. Прямо пропорциональная зависимость проводимости морской воды от  $S$  [12], как

показывают элементарные физические соображения, сохранится и для более высоких значений  $S$ , данные по которым отсутствуют в [12]. Это позволяет провести оценку фазовой скорости волны Ценнека в условиях эксперимента [1, 2]. Получается, что фазовая скорость волны Ценнека над водой, перенасыщенной солями, при прочих равных условиях станет ещё ближе к скорости света (разница будет иметь место уже в четвёртой значащей цифре).

Согласно предположению Дж. Уэйта и только что изложенной точке зрения, такая волна не является волноводной<sup>4</sup> и её невозможно возбудить никакими антеннами. Экспериментальная установка, однако, находится при этом в неустойчивом состоянии. Достаточно очень малого возмущения поверхности воды в виде ряби от микровибраций, чтобы ситуация резко изменилась из-за того, что рябь, которую экспериментаторы могли даже просто не заметить, образует синусоидальный замедляющий гофр. В результате этого и близости установки к критическому режиму в ней могла появиться имитирующая волну Ценнека медленная поверхностная волна (чем больше насыщена вода солями, тем меньший уровень микровибраций нужен для её появления), скорость распространения которой меньше скорости света на величину, которую невозможно контролировать с достаточной точностью (держать под контролем третью или даже четвёртую значащую цифру в сантиметровом диапазоне длин волн, по-видимому, не представляется возможным), и её легко спутать с волной Ценнека.

К сожалению, нам не известны работы, в которых бы рассматривался вопрос о распространении поверхностной волны над синусоидально возмущённой поверхностью воды. Поэтому нельзя провести количественной оценки влияния величины такого рода возмущения на фазовую скорость поверхностной волны. Тем не менее возможность существования имитационного фактора такого рода отрицать нельзя. Поэтому решающий эксперимент нужно проводить не над поверхностью воды, а над твёрдой поверхностью суши. Такие эксперименты уже проводились [4] и дали отрицательный результат.

Резюмировать изложенное можно следующим образом.

Частный вопрос о физическом смысле волны Ценнека имеет глубокую связь с общими вопросами теории распространения электромагнитных волн. Поэтому к сообщениям, в которых делаются утверждения о наблюдении быстрых поверхностных волн *над поверхностью*

<sup>1</sup> Эти функции являются по существу аналитическим продолжением по параметру хорошо известного аналитически замкнутого решения Зоммерфельда [11] для дифракции однородной плоской волны на идеально проводящей полуплоскости. Простое обобщение записи этого решения, проведенное нами в [7], делает его в высшей степени эффективным применительно к решению некоторых модельных задач теории открытых волноводов, в которых бесконечно тонкая волноводящая полуплоскость (с "мягкими" граничными условиями на её гранях) является идеальным объектом для моделирования соответствующих волновых процессов.

<sup>2</sup> Остаётся неясным вопрос, каким образом с помощью обычной антенны с небольшой апертурой удалось возбудить волну Ценнека с амплитудой, достаточной для её уверенного отделения от объёмной волны на малых расстояниях.

<sup>3</sup> Необходимые для этого данные для значений объёмной проводимости морской воды в зависимости от её солесодержания и температуры имеются в книге [12].

<sup>4</sup> Поле этой волны можно рассматривать, однако, как поле неоднородной плоской волны, которая падает на указанную поверхность раздела двух сред под некоторым углом, выбранным таким образом, что волна не испытывает отражения от поверхности (комплексный угол Брюстера). Легко показать, что условие равенства нулю коэффициента отражения этой волны от поверхности совпадает с "дисперсионным уравнением" для волны Ценнека. Такая трактовка физического смысла волны Ценнека имеет право на существование. Более того, *ближняя зона* любой антенны содержит спектр неоднородных плоских волн и, следовательно, в его составе имеется волна с подходящим волновым числом. Присутствие этой волны в ближней зоне диполя согласуется с фактом выделения вклада волны Ценнека в общее поле излучателя вблизи подстилающей поверхности, но только в пределах зоммерфельдовского "численного расстояния" [13], что не имеет никакого отношения к возбуждению волны, направляемой открытым волноводом.

воды, нужно относиться критически и предъявлять к ним жёсткие требования по точности и подавлению имитационных факторов. Кроме того, как всегда в подобных случаях, для достоверности факта наблюдения волны Ценнека требуется его подтверждение в независимых экспериментах *над твёрдой подстилающей поверхностью*.

### Список литературы

1. Дацко В Н, Копылов А А *УФН* **178** 109 (2008) [Datsko V N, Kopylov A A *Phys. Usp.* **51** 101 (2008)]
2. Байбаков В И, Дацко В Н, Кистович Ю В *УФН* **157** 722 (1989) [Baibakov V I, Datsko V N, Kistovich Yu V *Sov. Phys. Usp.* **32** 378 (1989)]
3. Oliner A A *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **32** 1022 (1984)
4. Мандельштам Л И, Папалекси Н Д (Ред.) *Новейшие исследования распространения радиоволн вдоль земной поверхности*. Сб. статей (М.-Л.: Гостехиздат, 1945)
5. Вайнштейн Л А *Электромагнитные волны* 2-е изд. (М.: Радио и связь, 1988)
6. Wait J R *Electron. Lett.* **3** 396 (1967)
7. Кукушкин А В *УФН* **163** (2) 81 (1993) [Kukushkin A V *Phys. Usp.* **36** 81 (1993)]
8. Кукушкин А В *Изв. вузов. Радиофизика* **33** 1138 (1990) [Kukushkin A V *Radiophys. Quantum Electron.* **33** 835 (1990)]
9. Кукушкин А В *Изв. вузов. Радиофизика* **33** 1242 (1990) [Kukushkin A V *Radiophys. Quantum Electron.* **33** 912 (1990)]
10. Кукушкин А В, Дисс. ... канд. техн. наук (Н. Новгород: НГТУ, 1995)
11. Sommerfeld A *Math. Ann.* **47** 317 (1896)
12. King R W P, Smith G S *Antennas in Matter* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1981) [Кинг Р, Смит Г *Антенны в материальных средах* (М.: Мир, 1984) с. 399]
13. Felsen L, Marcuvitz N *Radiation and Scattering of Waves* (Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1973) [Фелсен Л, Маркувиц Н *Излучение и рассеяние волн* (М.: Мир, 1978) Т. 2, с. 91]

### On the existence and physical meaning of the Zenneck wave

**A.V. Kukushkin**

*Nizhny Novgorod State Technical University,  
ul. Minina 24, 603600 Nizhny Novgorod, Russian Federation  
Tel. (7-831) 436-78-40  
E-mail: alku@rol.ru*

The physical meaning of the Zenneck wave is discussed. Basic modal functions whose full spectra do not feature such a wave are shown to exist. Questions concerning setup requirements for proof-of-concept experiments are addressed.

PACS numbers: 41.20.Jb, **78.68.+m**

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200907j.0801

Bibliography — 13 references

*Received 24 March 2008*

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **179** (7) 801–803 (2009)

*Physics – Uspekhi* **52** (7) (2009)