

09;12

## Проникновение микроволнового излучения в воду (эффект „самопросветления“)

© В.Ю. Князев,<sup>1</sup> И.А. Косый,<sup>1</sup> Н.И. Малых,<sup>1</sup> Е.С. Ямпольский<sup>2</sup><sup>1</sup> Институт общей физики РАН,  
117942 Москва, Россия<sup>2</sup> Сухумский физико-технический институт АН Республики Абхазия,  
384914 Сухуми, Республика Абхазия  
e-mail: <kosyi@fpl.gpi.ru>

(Поступило в Редакцию 15 декабря 2002 г. В окончательной редакции 25 марта 2003 г.)

Экспериментально исследовано распространение микроволнового излучения с высокой плотностью потока энергии в столбе воды. Обнаружен эффект „самопросветления“ воды, связанный с последовательным прогревом узких водяных слоев от поверхности в глубь столба. В рамках модели, учитывающей изменение электрофизического состояния водной среды под действием микроволнового излучения высокой эффективности, проведены расчеты, сопоставляемые с результатами эксперимента.

### Введение

При относительно малых уровнях микроволновой мощности распространение микроволн в жидкостях подчиняется хорошо известному в линейной электродинамике закону Бугера [1]

$$I = I_0 e^{-\alpha Z}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент поглощения микроволн, с интенсивностью  $I_0$  падающих на поверхность плоского полубесконечного слоя воды;  $Z$  — координата вдоль оси, направленной ортогонально поверхности слоя, отсчитываемая от поверхности в глубь жидкости.

При этом  $\alpha$  — величина, не зависящая ни от  $Z$ , ни от уровня микроволновой мощности. Величина, обратная  $\alpha$ , определяет глубину проникновения электромагнитной волны в воду  $d_0 \approx 1/\alpha$ .

Для „слабых“ микроволн поглощающие и отражающие свойства жидкостей исследованы достаточно подробно (см., например, [2,3]). Интерес может представлять лишь определение коэффициентов поглощения и отражения для конкретных сред, данные о которых либо недостаточно точны, либо отсутствуют.

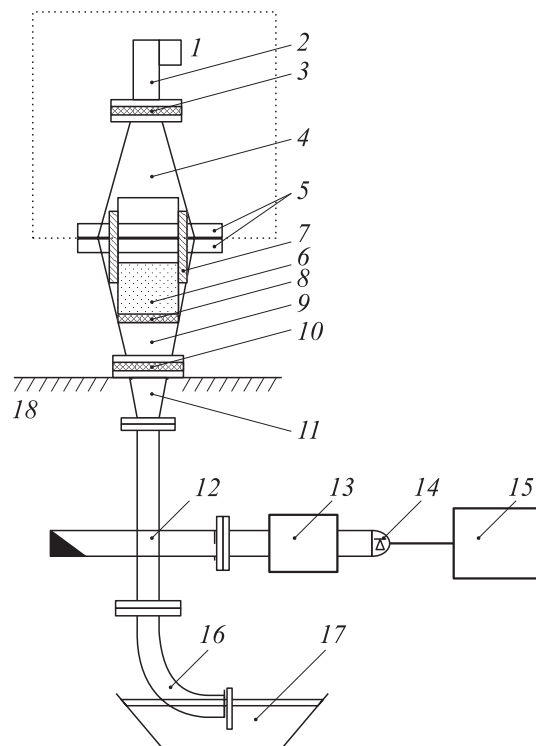
Наибольшую актуальность же проблема распространения микроволн приобретает в тех случаях, когда энергия, переносимая электромагнитной волной, столь велика, что она меняет состояние жидкой среды и характер проникновения излучения в жидкость не может быть описан линейной электродинамикой.

Задача настоящей работы состоит в определении именно закономерностей проникновения мощного микроволнового излучения в воду и в ее растворы.

### Описание экспериментальной установки. Результаты эксперимента

Установка, на которой проводились эксперименты, на рис. 1. Магнетрон 1 подсоединен к стандартному волноводу 2. Волноводный выход магнетрона через со-

ответствующие фланцы соединен с двумя коническими переходами 4 и 9. К переходу 9 подключена измерительная система, составленная из направленного ответвителя 12, калиброванного аттенюатора 13, к которому подключен детектор 14. С детектора сигнал подается на осциллограф 15.



**Рис. 1.** Схема эксперимента: 1 — магнетрон; 2 — прямоугольный волновод; 3, 10 — тефлоновые прокладки; 4, 9, 11 — конические переходы; 7 — прокладка; 12 — направленный ответвитель; 13 — калиброванный аттенюатор; 14 — детектор; 15 — осциллограф; 16 — волноводный изгиб; 17 — сосуд с водой (элемент согласованной нагрузки); 18 — плоскость крепления нижней части установки.

Верхняя часть установки, обведенная пунктиром, имеет разъем во фланцах 5 и может быть приподнята и отведена в сторону, позволяя установить стеклянный цилиндрический сосуд 6 на тефлоновое дно 8. В сосуд заливается определенное количество воды, через которую проходит СВЧ сигнал.

Магнетрон генерировал последовательность микроволновых импульсов длительностью порядка 8 ns. Частота генерации составляла 50 Hz, средняя мощность равнялась 480 W, пиковая мощность достигала 1.8 kW. Длина волны, генерируемой магнетроном, равнялась 12.4 cm. Вокруг кюветы с водой устанавливается медная прокладка 7, устраняющая прямое проникновение микроволнового излучения от магнетрона к измерительной системе.

Описанный выше экспериментальный стенд позволяет проводить измерения коэффициента поглощения и исследовать закономерности проникновения микроволн в жидкую среду как в условиях, описываемых законом Бугера (соотношение (1)), так и в условиях неприменимости линейной электродинамики, в которых воздействие микроволновым излучением существенно меняет электрические свойства облучаемой жидкости. Переход от одного режима к другому осуществляется путем изменения времени облучения ( $t$ ) слоя жидкости. При кратковременном облучении ( $t < 1$  s) распространение электромагнитной волны соответствует распространению, описываемому линейной электродинамикой, и может быть классифицировано как облучение слабыми микроволнами. При длительном же облучении ( $t > 10$  s) характер проникновения микроволн в слой жидкости кардинально меняется и режим может быть классифицирован как режим распространения мощного микроволнового излучения.

Рассмотрим сначала режим облучения „слабыми“ микроволнами. Измерения проводились с дистиллированной водой, проводимость которой ничтожно мала, с водопроводной водой с проводимостью  $380 \mu\text{S/cm}$  и раствором соли в воде с проводимостью  $2000 \mu\text{S/cm}$ .

На рис. 2 представлены графики, построенные по результатам измерений. Кривая 1 соответствует результатам измерений с дистиллированной и водопроводной водой. Обе кривые полностью совпали. Коэффициент поглощения  $\alpha = 2 \text{ cm}^{-1}$  и соответственно толщина слоя  $d_2$ , на которой происходит падение интенсивности в  $e$  раз, составила 5 mm. При добавлении в воду соли и доведении ее проводимости до  $2000 \mu\text{S/cm}$  коэффициент поглощения возрастал до  $4 \text{ cm}^{-1}$  (кривая 2), а толщина слоя  $d_1$  составляла 2.5 mm.

Режим распространения микроволнового излучения, существенно меняющего диэлектрические свойства жидкости (режим нелинейной электродинамики), реализован на той же экспериментальной установке.

Магнетрон 1 включался на определенное и существенно большее, чем 1 s, время (циклы включения по 10, 20, ..., 120 s), после чего верхняя часть установки отводилась в сторону и производилось измерение температуры слоев воды. Для этого в столб

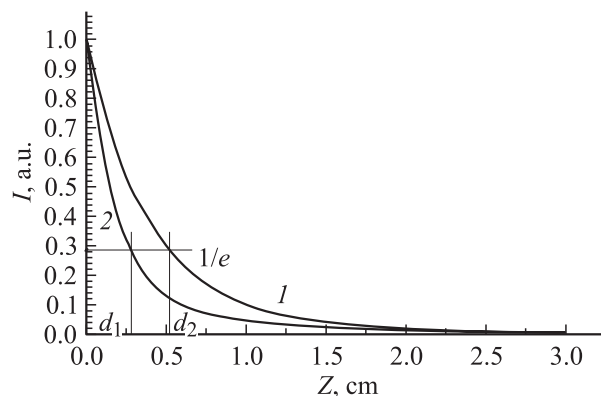


Рис. 2. Проникновение „слабого“ микроволнового излучения в столб воды (1) и водного раствора соли (2).

воды погружалась миниатюрная термопара, которую перемещали по оси столба от поверхности воды до дна, при этом фиксировалось значение температуры в каждом слое (отсчет производился в течение нескольких секунд, т.е. за время, в течение которого аксиальное распределение температуры остается неизменным).

После окончания каждого цикла измерений вода в сосуде перемешивалась диэлектрическим стержнем и производилось измерение средней температуры, по которой рассчитывалась величина мощности, поглощенная столбом воды по формуле

$$I_{ab} = \rho c_p (T_1 - T_0) / t, \quad (2)$$

где  $T_1$  и  $T_0$  — конечная и начальная температуры соответственно,  $c_p$  — удельная теплоемкость воды,  $\rho$  — ее плотность.

Уровень поглощенной мощности при всех промежутках времени  $t$  составлял величину, близкую к 480 W. Мощность, проходящая через слой воды, фиксировалась детектором 14.

Результаты измерений приведены на рис. 3. Система экспериментальных кривых показывает, как при облучении мощными микроволнами меняется со временем температура воды на разных координатах  $Z$ , отсчитываемых от поверхности слоя жидкости. Времена проникновения температуры в глубь слоя, связанные с теплопроводностью, оказываются существенно больше временных интервалов, использованных в эксперименте (это проверялось непосредственно на установке помещением омического нагревателя в воду вблизи ее поверхности). Поэтому динамика распространения вдоль  $Z$  температуры однозначно отражает динамику проникновения микроволновой энергии внутрь водяного столба. Наблюдаемый эффект проникновения микроволн в глубь воды на расстояния, существенно превосходящие глубину  $d_2$ , определяемую в режиме линейной электродинамики (согласно рис. 2, она составляет примерно 5 mm в случае слабопроводящей воды), может быть классифицирован как эффект „самопросветления“ воды под действием „мощного“ излучения. Скорость

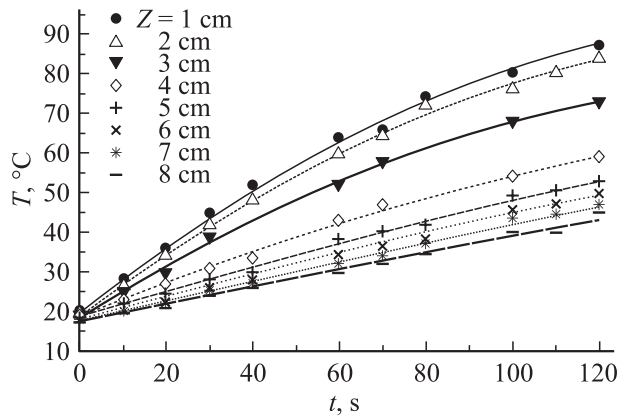


Рис. 3. Температура водяного столба на разных глубинах в зависимости от времени облучения.

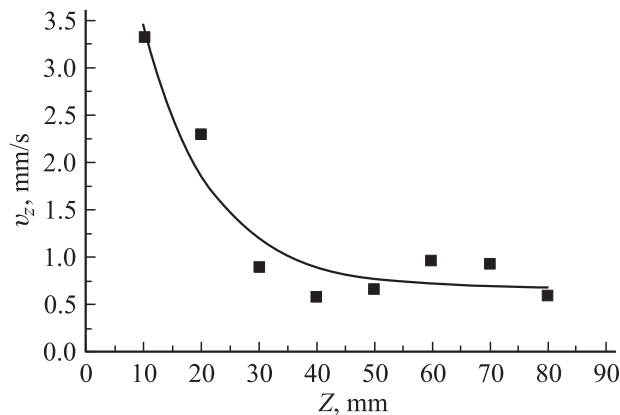


Рис. 4. Аксиальная скорость „просветления“ столба воды на различных его глубинах.

этого „просветления“, определенная по кривым рис. 3, приведена на рис. 4. Она максимальна у поверхности водяного столба (порядка 0.1 см/с) и падает с ростом координаты  $Z$ .

## Обсуждение результатов эксперимента

Таким образом, в проведенных экспериментах обнаружено явление „самопросветления“ воды при воздействии на нее микроволн, характеризуемых большим потоком энергии. Поглощаемое в узком приповерхностном слое толщиной  $d_0$ , определяемой законом Бугера (см. (1)), микроволновое излучение прогревает этот слой. Коэффициент затухания микроволн  $\alpha$  является функцией температуры воды  $T$ . Характерная зависимость этого коэффициента для слабопроводящей воды (дистиллированная, питьевая) приведена в таблице (данные заимствованы из [2]). Как следует из таблицы, с ростом температуры  $T$  коэффициент затухания падает от примерно  $2.2 \text{ см}^{-1}$  при  $T \approx 5^\circ\text{C}$  до  $0.4 \text{ см}^{-1}$  при  $T \approx 50^\circ\text{C}$ . Таким образом, нагрев приповерхностного слоя сопровождается его просветлением и проникновением излуче-

ния в глубь водяного столба за счет последовательного прогрева его слой за слоем.

Величину скорости аксиального просветления  $v_z$  и ее характерные зависимости можно оценить из очевидного приближенного соотношения

$$v_z \cong I_0 \exp(-\alpha_T Z) / \rho c_p \Delta T, \quad (3)$$

где  $I_0$  — интенсивность падающего на водяной столб микроволнового излучения;  $\alpha_T$  — коэффициент поглощения в нагретом („просветленном“) слое (согласно [2], примем его соответствующим температуре  $T_h \cong 50^\circ\text{C}$  и составляющим  $\approx 0.4 \text{ см}^{-1}$ ;  $\Delta T = (T_h - T_0)$  — прирост температуры воды от начальной до  $T_h$ ).

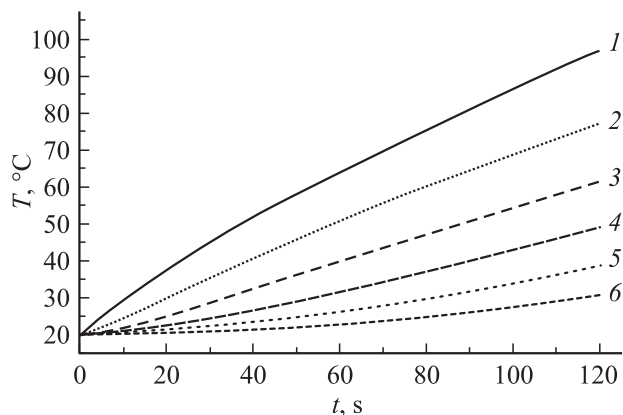
Как по порядку величины, так и по характерному спаду в глубь водяной мишени, аксиальная скорость просветления, оцененная в (3), соответствует результатам эксперимента (рис. 4).

С результатами эксперимента может быть сопоставлен и машинный счет, выполненный по следующему алгоритму. Столб воды разбивался на равные слои толщиной  $d = 1 \text{ мм}$ . Выбран временной интервал, равный  $\Delta t = 1 \text{ с}$ , в течение которого предполагается неизменность аксиального распределения потока микроволновой энергии. Распределение это меняется скачком в начале каждого следующего временного интервала. Считая начальную температуру одинаковой для всех слоев (и следовательно, в первый временной интервал  $\Delta t_1$  неизменным по глубине коэффициент поглощения  $\alpha$ ), по формуле

$$I_n = I_{n-1} \exp(\alpha d_n),$$

где  $I_n$  — мощность, падающая на слой;  $n$  — номер слоя;  $d_n$  — глубина слоя, находим аксиальное распределение мощности по слоям. Величина  $\Delta I = I_{n-1} - I_n$  есть мощность, поглощенная в слое  $n$ . Используя соотношение  $\Delta I = \rho c_p (T_1 - T_0) / \Delta t_1$ , находим распределение температуры по слоям в конце первого временного интервала ( $\Delta t_1$ ). Полученному распределению температуры соответствует новое распределение микроволновой мощности в глубь столба, определяемое с использованием зависимости  $\alpha(T)$ , взятой из [2]. Это распределение предполагается возникающим скачком в конце первого временного интервала и остающимся неизменным в

$T, ^\circ\text{C}$	$\alpha, \text{см}^{-1}$
2	2.2
6	1.66
14	1.38
25	0.82
36	0.64
46	0.46
56	0.42
65	0.40
75	0.35
85	0.30
95	0.30



**Рис. 5.** Расчетные значения температуры водяного столба на разных его глубинах в зависимости от времени облучения.

течение всего второго интервала времени  $\Delta t_2$ . В соответствии с ним рассчитывается температура всей последовательности слоев к концу интервала  $\Delta t_2$ , аксиальному распределению которой отвечает новое аксиальное распределение микроволновой мощности, скачком образующееся в конце второго интервала времени  $\Delta t_2$ . Таким образом, процедура повторяется шаг за шагом многократно и строится серия кривых, представленных на рис. 5. Видно, что расчетные кривые подобны экспериментальным кривым, приведенным на рис. 3. Имеющуюся разницу можно объяснить недостаточно малым шагом расчета тем, что при расчете не учитывалось охлаждение верхних слоев воды, отсутствием учета испарения и т. д.

Эксперименты, проведенные с водными растворами соли, показали, что характер проникновения в них как „слабых“, так и „мощных“ микроволн начинает меняться по сравнению со случаем дистиллированной или питьевой воды, начиная со столь высоких проводимостей: как  $1500\text{--}2000\ \mu\text{S}/\text{cm}$  (см., например, кривую 2 на рис. 2). Это означает, что обнаруженное в настоящих экспериментах „самопросветление“ будет иметь место, по-видимому, не только в „чистых“ водных средах, но и в широком классе сбросовых вод и в водных растворах.

## Заключение

В работе обнаружен эффект „самопросветления“ воды под действием непрерывного (квазинепрерывного) микроволнового излучения ( $\lambda \cong 12\ \text{cm}$ ) высокой интенсивности ( $I_p \approx 5\ \text{W}/\text{cm}^2$ ). Если „слабое“ микроволновое излучение проникает в воду не более чем на  $5\ \text{mm}$ , то в случае падения на водяной столб „мощных“ микроволн глубина их проникновения существенно увеличивается за счет возникновения „волны просветления“, скорость которой у поверхности достигает  $10^{-1}\ \text{cm}/\text{s}$  и падает по мере аксиального продвижения волны до  $\sim 10^{-2}\ \text{cm}/\text{s}$ .

Полученные результаты могут оказаться полезными для целого ряда технологий и производственных циклов, включающих в себя микроволновый нагрев потоков жидкости (очистка сбросовых вод, стерилизация жидких пищевых продуктов и т. д.).

Авторы выражают благодарность Э.М. Бархударову, С.И. Грицинину и К.Ф. Сергейчеву за интерес к работе и полезные обсуждения.

## Список литературы

- [1] Тамм Е.И. Основы теории электричества. М.: ГИТТЛ, 1957.
- [2] Пошнер Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот. М.: Энергия, 1968.
- [3] Хабибулин И.Л. // ИЖФ. 2000. Т. 73. № 4. С. 832–838.