

Радиационно-температурная зависимость воды на миллиметровых длинах волн

С.Н. Гаврилин

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: Экспериментально исследована радиационно-температурная зависимость для пресной воды в интервале температур 30-50 градусов Цельсия. Установлено, что радиационная температура водной поверхности на волнах миллиметрового диапазона определяется исключительно эффективной температурой скин-слоя.

Ключевые слова: радиационная температура, скин-слой, вода, излучательная способность.

Исследования фундаментальных физических процессов взаимодействия излучения с веществом в твёрдом [1-3] и жидком [4] состоянии, процессов энергетического обмена между атмосферой и водной поверхностью, являются чрезвычайно важными с точки зрения понимания законов природного теплового баланса [5] и влияния таких процессов на экологию. Отражательная способность и собственное излучение воды в различных диапазонах длин волн [6] является объектом пристального теоретического и экспериментального изучения [7-8].

Радиационно-температурная зависимость для пресной воды была исследована нами на длине волны 8 мм в интервале температур от 30 °С до 50°С. Использовался абсолютный метод измерения интенсивностей распределённых излучений [9-10]. В качестве антенны применялся рупор с раскрывом 30х30 мм. В волновой зоне рупора, на расстоянии 250 мм, устанавливались излучающие тела, полностью перекрывавшие диаграмму направленности рупора.

Приёмная аппаратура имела чувствительность (флуктуационный порог) 0,2 К при постоянной времени $\tau = 1$ сек. При измерениях сигнал регистрировался по отношению к температуре калибровочного эталона,

длительность записи сигнала составляла 1 минуту. В результате, случайная ошибка измерений составляла около $0,03\text{ K}$, систематическая ошибка определялась погрешностями измерений температур эталонов, которая составляла $0,15\text{ K}$. Во всех измерениях систематические погрешности оставались одинаковыми.

Калибровка интенсивности принимаемого излучения осуществлялась по собственному излучению абсолютно черного тела [11] при разных температурах. Для этого поглощающее покрытие охлаждалось в морозильной камере до температуры -16°C и устанавливалось перед рупором. После этого оно нагревалось естественным образом до температуры окружающего воздуха. В эксперименте изменение температуры абсолютно чёрного тела равнялось 44 K . Затем перед рупором вместо поглощающего тела устанавливалась кювета с водой, температура которой измерялась погружённым термометром. Отсчёты при измерении температуры радиоизлучения воды делались относительно уровня излучения чёрного тела, находившегося при $t = 34^{\circ}\text{C}$. Водная поверхность была плоской, не искажённой взволнованностью.

В таблице 1 приведены результаты измерений и теоретических значений измеряемых величин.

Таблица № 1

Результаты измерений и теоретических значений измеряемых величин.

$t_{\text{воды}}\text{ }^{\circ}\text{C}$	n , мм	$t_{\text{я воды}}$, K (измерено)	$\Delta t_{\text{я воды}}$, K	$t_{\text{я воды}}$, K (вычислено)
29,9	116,5	164,87	0	163,68
35,5	116	165,48	0,61	166,23
40,3	115,5	166,09	1,22	168,42
50,6	114	167,92	3,05	173,12

n , мм –приращение амплитуды сигнала от воды в мм относительно чёрного тела, имевшего температуру 34°C , калибровочный множитель:

$$k=1,22^{\circ}/\text{мм.}$$

$$\Delta t_{\text{я воды}}, K = \Delta t_{\text{я воды}}(^{\circ}\text{C}) - \Delta t_{\text{я воды}}(30^{\circ}\text{C})$$

В эксперименте использовалась пресная вода.

В условиях эксперимента существовала подсветка водной поверхности излучением окружающего фона, включая излучение атмосферы:

$$T_{\text{я воды}} = T_{\text{воды}}(1-R) + RT_{\phi} \quad (*)$$

Кроме того, рупор имеет достаточно широкую диаграмму направленности и, следовательно, коэффициенты отражения могут отличаться от расчётных для нормального падения. С целью выяснения влияния этих факторов были сделаны дополнительные измерения с металлическим листом. Излучение T_{ϕ} , отражённое от листа, принималось рупором:

$$T_{\text{ч.т.}}(34^{\circ}\text{C}) - T_{\phi} = 260 \text{ K}$$

$$T_{\phi} = 47 \text{ K}$$

Заметим, что температура неба в зените была измерена в это время:

$$T_{\text{атм(зенит)}} = (27 \pm 0,2) \text{ K}$$

то есть, принимается ещё дополнительно 20 К за счёт переотражения окружающего излучения листом.

При температуре воды, равной температуре окружающего воздуха, для яркостной температуры, в соответствии с (*), имеем:

$$T_{\text{я воды}}(35^{\circ}\text{C}) = 166 \text{ K},$$

что совпадает полностью с измеренной радиационной температурой.

Температурные изменения коэффициента отражения, в соответствии с расчетом, не превосходят $(3 \div 5) \cdot 10^{-3}$, поэтому изменение яркостной температуры при нагреве воды не превосходит 0,2- 0,3 К, что не превосходит погрешности отсчёта уровней сигнала при записи.

В последнем столбце таблицы 1 приведены вычисленные в соответствии с (*), яркостные температуры при реальных измеренных величинах T_{ϕ} . На рис.1 представлен график отклонений от равновесных радиационных температур воды, измеренных и вычисленных. Из графика видно, что реальная способность собственного излучения воды при нагреве существенно меньше ожидаемой. По результатам проведённого эксперимента можно сделать вывод, что

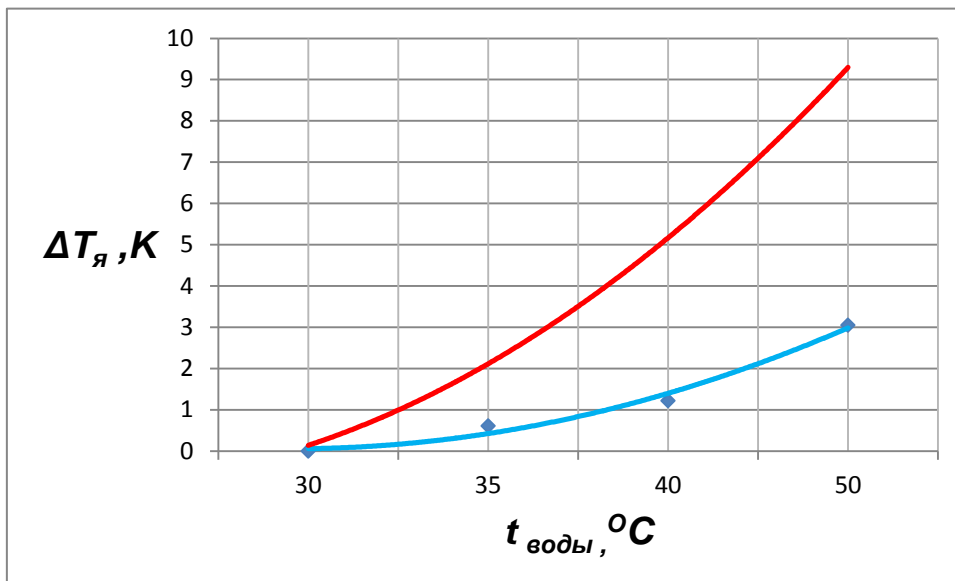


Рис. 1. – Зависимость отклонения яркостной температуры от температуры нагрева воды (красная линия – теория, синяя - эксперимент).

радиоизлучение водной поверхности формируется в тонком приповерхностном слое на границе воздух-вода, скин-слое. На $\lambda = 8 \text{ мкм}$ толщина скин-слоя воды составляет около 0,3 мм. Вычислим с помощью (*) температуру воды, соответствующую наблюдаемой яркостной температуре собственного излучения.

Измерение радиационно-температурной зависимости проводились в безветренную сухую солнечную погоду при $t = 34^\circ\text{C}$ воздуха. При температуре воды $29,9^\circ\text{C}$ эффективная температура скин-слоя оказалась выше ($32,5^\circ\text{C}$) за счёт нагрева поверхности.

Таблица № 2

Температура воды, соответствующая наблюдаемой яркостной температуре собственного излучения.

$T_{\text{воды}} \text{ } ^\circ\text{C}$	$(T_{\text{воды}} \text{ } ^\circ\text{C})_{\text{скин-слой}}$
29,9	32,50 $^\circ\text{C}$ (305,50 K)
35,5	33,84 $^\circ\text{C}$ (306,84 K)
40,3	35,18 $^\circ\text{C}$ (308,18 K)
50,6	39,19 $^\circ\text{C}$ (312,19 K)

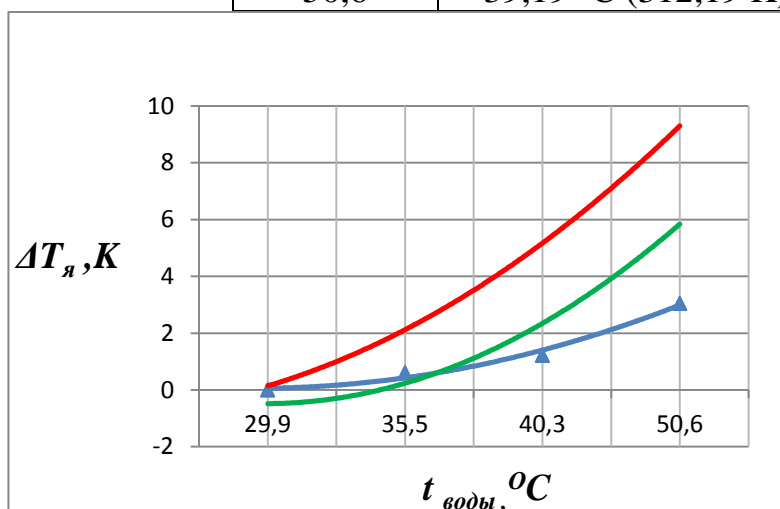


Рис. 2. – Зависимость отклонения яркостной температуры от температуры нагрева воды. Красная линия – для яркостной температуры воды (теория), зелёная линия – для яркостной температуры скин-слоя (теория), синяя линия - яркостная температура образца (эксперимент).

При последующем увеличении температуры воды (выше температуры воздуха) эффективная температура скин-слоя воды повышается медленно. В интервале температур воды:

$$\Delta t_{\text{воды}} = 40,3 - 35,5 \text{ (} ^\circ\text{C)}$$

эффективная температура скин-слоя растет 0,28 градуса на градус нагрева воды, в интервале:

$$\Delta t_{\text{воды}} = 50 - 40 (^{\circ}\text{C})$$

эта величина составляет $0,4^{\circ}\text{C}$ на 1°C нагрева.

Вывод

Таким образом, радиационная температура водной поверхности на волнах миллиметрового диапазона определяется не температурой воды, измеряемой в приповерхностном слое с помощью любого термометрического измерителя, а эффективной температурой скин-слоя, формируемой под влиянием теплообмена с атмосферой.

Литература

1. Гаврилин С.Н. Бистабильность нелинейной циркулярно-поляризованной волны в антиферромагнетике, помещённом в магнитное поле. Нелинейные волны - 2022 (XX научная школа). Тезисы докладов. Нижний Новгород: ИПФ РАН. 2022. С.63-64. URL: nonlinearwaves.ipfran.ru/images/NW-2022.pdf
2. Вукович С., Гаврилин С. Н., Никитов С. А. Нелинейные электромагнитные волны в антиферромагнитной пластине, помещенной во внешнее магнитное поле // ЖЭТФ. 1990. Т. 98, № 5(11). С. 1718 - 1725.
3. Вукович С., Гаврилин С. Н., Никитов С. А. Бистабильность электромагнитных волн в легкоосном антиферромагнетике, помещенном в постоянное магнитное поле. // ФТТ. 1992. Т. 34. № 11. С. 3412–3416.
4. Бубукин И.Т., Станкевич К.С. Измерение отражательной способности и диэлектрической проницаемости воды в плёночном слое морской поверхности в миллиметровом диапазоне // Радиотехника и электроника. 2013. Т.58. №10. С. 660-668.
5. Хайруллин А.Р. Хайбуллина А.И., Синявин А.А. Теплогидравлическая эффективность пористых сред в потоке воздуха и воды при симметричных и несимметричных пульсациях. // Инженерный вестник Дона, 2022, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2022/7561.

6. Машков Ю.А. Дистанционное определение температур естественных поверхностей в инфракрасной области спектра. // Инженерный вестник Дона, 2022. №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7766.

7. Бубукин И.Т., Станкевич К.С. Радиометрия температурной плёнки морской поверхности // Успехи современной радиоэлектроники. 2006. №11. С.39-55.

8. Бубукин И.Т., Станкевич К.С. Дистанционная диагностика плёночного слоя морской поверхности в инфракрасном диапазоне // Радиотехника и электроника. 2012. Т.57. №10. С. 1089-1098.

9. Klein L.A., Swift C.T. An improved model for the dielectric constant of sea water at microwave frequencies. IEEE Trans. Antennas Propag. 1977. V. AP-25. №1. pp. 104-111.

10. Salmon N. Outdoor Passive Millimeter-Wave Imaging: Phenomenology and Scene Simulation/ IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2018. V. 66. №2. pp. 897-908.

11. Dietlein Ch., Popović Z., Grossman E. Aqueous blackbody calibration source for millimeter-wave/terahertz metrology. Appl. Opt. 2008. №47. pp. 5604-5615.

References

1. Gavrilin S.N. Nonlinear waves - 2022 (XX scientific school. Abstracts of reports). Nizhny Novgorod, 2022, pp.63-64. URL: nonlinearwaves.ipfran.ru/images/NW-2022.pdf

2. Vukovich S., Gavrilin S. N., Nikitov S. A. ZETP. 1990. V. 98. №5 (11). pp.1718 – 1725.

3. Vukovich S., Gavrilin S. N., Nikitov S. A. FTT. 1992. V. 34, №11. pp. 3412-3416.

4. Bubukin I.T., Stankevich K.S. Journal of Communications Technology and Electronics.2013. № 58. pp. 673-681.



5. Khairullin A.R. Khaybullina A.I., Sinyavin A.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7561.
6. Mashkov Yu.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7766.
7. Bubukin I.T., Stankevich K.S. Successes of modern radio electronics. 2006. №11. pp. 39-55.
8. Bubukin I.T., Stankevich K.S. Journal of Communications Technology and Electronics .2012. №57. pp. 1094-1102.
9. Klein L.A., Swift C.T. IEEE Trans. Antennas Propag. 1977. V. AP-25. №1. pp. 104-111.
10. Salmon N. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2018. V. 66. №2. pp. 897-908.
11. Dietlein Ch., Popović Z., Grossman E. Appl. Opt. 2008. №47. pp. 5604-5615.