

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 621.373.54

**УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН
НА МИКРОВОЛНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ВЗВОЛНОВАННОЙ ВОДНОЙ
ПОВЕРХНОСТИ**

©2025 г. В. В. Стерлядкин^{a,*}, К. В. Куликовский^a, А. В. Кузьмин^{a,b}

^a МИРЭА – Российский технологический университет

Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78

^b Институт космических исследований

Российской академии наук

Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

*e-mail: sterlyadkin@mail.ru

Поступила в редакцию 31.10.2024 г.

После доработки 25.03.2025 г.

Принята к публикации 08.03.2025 г.

Описана оригинальная установка для исследования вклада капиллярных волн в диапазоне волновых чисел $k=100-1200$ рад/м в микроволновое излучение водной поверхности. Особенностью технического решения является генерация почти монохроматической решетки капиллярных волн на поверхности плоского сосуда, что позволяет в “чистом” виде изучать критические явления, возникающие в микроволновом излучении поверхности при определенных углах наблюдения. Генерация капиллярных волн заданной частоты и амплитуды проводилась тонкой планкой на поверхности, а ее колебания задавались устройством, расположенным под поверхностью воды. Форма полученной волны регистрировалась с точностью до 0.03 мм оригинальным методом по изображению светящейся линии, отраженной от поверхности. Вертикальный угол наблюдения варьировался от 8° до 70° , а азимутальные углы поворота капиллярной решетки изменялись на 360° . Микроволновый радиометр позволял измерять вариации яркостной температуры на четырех поляризациях с чувствительностью 0.1 К при времени накопления 1 с. Обнаружено, что капиллярные волны амплитудой всего 0.15–0.20 мм вызывают резонансное увеличение интенсивности излучения, достигающее 5–6.5 К. С теорией согласуются как амплитуда, так и положение резонансного пика, которое смещалось к меньшим углам места при стремлении длины капиллярной волны к длине волны излучения.

1. ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы являлось измерение влияния капиллярных волн на собственное микроволновое излучение водной поверхности. Капиллярные волны вносят значительный вклад в излучательную способность и эффективный коэффициент отражения взволнованной морской поверхности, что важно учитывать в задачах дистанционного зондирования Земли из космоса. В частности, были обнаружены эффекты резонансного

усиления коэффициента излучения при определенных соотношениях между длиной гравитационно-капиллярных волн на водной поверхности и углами наблюдения. В микроволновой радиометрии их называют критическими явлениями. Обоснование теории критических явлений было сделано Эткиным и Кравцовым [1, 2]. Существенный вклад в их развитие и обобщение на произвольные углы наблюдения выполнено Ирисовым [3, 4]. Лабораторные исследования критических явлений проводились в ИКИ РАН в работах Трохимовского с сотrud. [5–8]. Было показано, что азимутальная анизотропия теплового излучения морской поверхности имеет высокую чувствительность к параметрам гравитационно-капиллярных волн, что позволяет перейти к решению обратной задачи – восстановлению параметров волнения по радиометрическим измерениям [9, 10]. Недостатком проведенных лабораторных измерений являлась сложная негармоническая форма капиллярной решетки, которая за счет поверхностного натяжения создавалась параллельными диэлектрическими струнами, приподнимаемыми над водной поверхностью. В данном эксперименте пространственный спектр капиллярной решетки состоял из набора гармоник, влияние которых на собственное излучение поверхности трудно было разделить. В рассмотренном в настоящей работе эксперименте авторам удалось создать почти монохроматическую пространственную решетку, что позволило избирательно исследовать влияние каждой составляющей пространственного спектра волнения на собственное излучение взволнованной водной поверхности. Такой анализ взволнованной водной поверхности аналогичен измерению амплитудно-частотной характеристики четырехполюсника, при котором на вход подается гармонический сигнал изменяемой частоты и регистрируется амплитуда сигнала на выходе.

Для достижения заявленной цели была создана оригинальная измерительная установка, состоящая из трех независимых устройств, которые дополняли друг друга. Первым устройством был блок генерации плоских капиллярных волн заданной амплитуды и частоты. При этом для проведения корректных измерений рассеивающих свойств капиллярной решетки важным требованием было минимальное влияние самого устройства генерации на регистрируемое собственное излучение взволнованной поверхности. Блок генерации должен был располагаться на поворотной платформе, которая позволяла бы устанавливать произвольный азимутальный угол распространения капиллярной решетки. Вторая часть установки – система оптической регистрации профиля создаваемых волн – обеспечивала возможность расчета пространственного спектра создаваемой капиллярной решетки. Третья часть – микроволновый радиометр, установленный на поворотной раме, позволял регистрировать как падающее на капиллярную решетку излучение атмосферы, так и результирующее излучение капиллярной решетки. При этом поворотная рама обеспечивала

возможность изменения угла падения, а вращение блока генерации позволяло изменять азимутальный угол между осью радиометра и волновым вектором капиллярной решетки. Генерация почти монохроматической капиллярной волны позволяла детально исследовать критические явления, которые проявляются в радиометрическом сигнале.

2. ОБЩАЯ СХЕМА ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 1 показана общая схема измерений и установки для исследования критических явлений, возникающих в радиометрическом сигнале от капиллярной решетки на водной поверхности. Эти явления носят резонансный характер и проявляются при определенных соотношениях между длиной электромагнитной волны λ и длиной волны на поверхности Λ , азимутальным и вертикальным углами наблюдения. Поэтому важно было создать максимально однородную систему плоских капиллярных волн с управляемой амплитудой и частотой и предусмотреть возможность изменения угла падения β и азимутального угла α между волновым вектором капиллярной решетки $\mathbf{k}$ и плоскостью наблюдения XZ .

Рис. 1. Схема эксперимента по исследованию влияния капиллярных волн на собственное микроволновое излучение поверхности

Методика исследования влияния капиллярных волн на собственное микроволновое излучение заключается в измерении яркостного контраста $\Delta T_{\text{я}}$ между возмущенной и невозмущенной водными поверхностями при заданном угле падения β и азимутальном угле α между волновым вектором $\mathbf{k}$ и плоскостью наблюдения XZ :

$$\Delta T_{\text{я}}(\alpha, \beta, \Lambda, A) = T_{\text{я}}(\alpha, \beta, \Lambda, A) - T_{\text{я}0}(\alpha, \beta), \quad (1)$$

где $T_{\text{я}0}(\alpha, \beta)$ – яркостная температура гладкой поверхности, $T_{\text{я}}(\alpha, \beta, \Lambda, A)$ – яркостная температура водной поверхности при наличии капиллярных волн с длиной волны Λ и амплитудой A . Очевидно, что этот контраст можно получить, сравнивая сигнал от созданной капиллярной решетки с заданной амплитудой волны A с сигналом от той же поверхности при амплитуде колебаний, равной нулю.

Другая научная задача заключалась в измерении зависимости эффективного коэффициента отражения $R_{\text{эфф}}(\beta, \Lambda, A)$ водной поверхности от параметров капиллярных волн и направления измерений α, β . Регистрируемую радиометром яркостную температуру водной поверхности можно описать уравнением

$$T_{\text{я}}(\alpha, \beta, \Lambda, A) = T_{\text{пов}} [1 - R_{\text{эфф}}(\beta, \Lambda, A)] + T_{\text{я}}^{\text{атм}}(\beta) \cdot R_{\text{эфф}}(\beta, \Lambda, A), \quad (2)$$

где $T_{\text{пов}}$ – термодинамическая температура воды, $T_{\text{я}}^{\text{атм}}(\beta)$ – яркостная температура атмосферы, измеряемая радиометром, который направлен в атмосферу под зенитным углом β , что соответствует углу падения на поверхность. Первое слагаемое в уравнении (2) – собственное

излучение водной поверхности, в котором ее эффективная излучательная способность связана с эффективным коэффициентом отражения соотношением

$$E_{\text{эфф}}(\beta, \Lambda, A) = 1 - R_{\text{эфф}}(\beta, \Lambda, A). \quad (3)$$

Второе слагаемое в уравнении (2) описывает излучение атмосферы, которое отражается взволнованной водной поверхностью. Из уравнения (2) по измеренным значениям $T_{\text{я}}^{\text{атм}}(\beta), T_{\text{я}}(\alpha, \beta, \Lambda, A), T_{\text{пов}}$ проводится расчет эффективного коэффициента отражения:

$$R_{\text{эфф}}(\beta, \Lambda, A) = \frac{T_{\text{пов}} - T_{\text{я}}(\alpha, \beta, \Lambda, A)}{T_{\text{пов}} - T_{\text{я}}^{\text{атм}}}. \quad (4)$$

Таким образом, предложенная схема проведения измерений позволит исследовать как критические явления, возникающие при появлении капиллярных волн на водной поверхности, так и поведение эффективного коэффициента отражения/излучения при различных условиях проведения радиометрических измерений. Далее мы опишем конструктивные решения, которые позволили решить поставленную задачу.

3. МЕТОД ГЕНЕРАЦИИ ПЛОСКИХ КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН ЗАДАННОЙ ЧАСТОТЫ И АМПЛИТУДЫ НА ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Генерация бегущих капиллярных волн на водной поверхности является стандартной задачей, если нет строгих требований к структуре самой капиллярной волны и к системе генерации. Для достижения поставленной в работе цели было необходимо выполнить ряд жестких требований к устройству для генерации волн. Во-первых, требовалось создать плоскую решетку капиллярных волн заданной частоты и амплитуды на площади, которая перекрывает диаграмму направленности радиометра. С учетом ширины диаграммы направленности радиометра $\theta_{\text{рад}} = 9^\circ$ и расстояния от антенны до поверхности 0.7 м площадка с капиллярной волной должна иметь размеры не менее $25 \times 40 \text{ см}^2$, что и было обеспечено в данном эксперименте.

Во-вторых, устройство для генерации волн не должно попадать в диаграмму направленности радиометра или вносить искажения в радиометрический сигнал, получаемый от капиллярной решетки. Устройство для генерации волн, которое представляет собой тонкую гидрофильную планку, закрепленную на колеблющейся опоре, обычно располагается над водной поверхностью [11]. Такая стандартная конструкция неизбежно вносила бы искажения в радиометрический сигнал, поскольку элементы конструкции частично попадали бы в диаграмму направленности приемной антенны радиометра. Было предложено оригинальное решение – поместить устройство для генерации волн под водной поверхностью, а на поверхности расположить только гидрофильную колеблющуюся планку. На рис. 2а схематически показано реализованное техническое решение. К центру диффузора звукового

динамика 1 был прикреплен толкатель 2 с переходной втулкой. Для обеспечения строго вертикального перемещения толкателя на верхней части динамика (рис. 2б) были расположены упругие полоски в форме креста, которые удерживали толкатель в вертикальном положении при колебаниях. Частота колебаний толкателя могла изменяться от 5 до 60 Гц, а амплитуда на нижних частотах могла достигать 2 мм. Это обеспечивало генерацию как коротких гравитационных волн, так и капиллярных волн в широком диапазоне волновых чисел от 100 до 1200 рад/м. Над динамиком (рис. 2а) был установлен осесимметричный сосуд 3 (тазик), в центре которого высверлено отверстие, над которым герметично в вертикальном направлении закреплен пустотелый направляющий цилиндр 4. Через этот цилиндр пропущен Т-образный шток с гидрофильной горизонтальной планкой 5, которая и служит генератором волн на поверхности сосуда. Снизу Т-образный шток соединяется с толкателем 2 с помощью переходной втулки. С целью обеспечения вертикального перемещения Т-образного штока и исключения боковых колебаний верхняя часть направляющего цилиндра 4 закреплена на оси сосуда с помощью распорки 6, которая жестко упирается в стенки сосуда. Чтобы вода из сосуда не выливалась вниз в зазор между направляющим цилиндром 4 и подвижным Т-образным штоком 5, проводилась герметизация подвижного участка с помощью резиновой трубки толщиной 20 мкм, нижний конец которой герметично закреплялся на верхней части цилиндра 4, а верхний конец герметично крепился на штоке 5. Важным элементом конструкции являлась гидрофильная хлопчатобумажная ткань 7, которая была прикреплена вдоль всего верхнего скошенного края сосуда. Пористая структура наклонно расположенной ткани, частично погруженной в воду, обеспечивала отсутствие волн, отраженных от границы сосуда. Это позволило создать почти монохроматическую капиллярную волну на водной поверхности, что важно для решения поставленной задачи. Для обеспечения поворота капиллярной решетки в азимутальном направлении на 0–360° вся конструкция генератора была установлена на поворотное устройство 8. На рис. 2в показано изображение поверхности, на которой создана плоская капиллярная волна частотой 30 Гц. Для очистки водной поверхности от поверхностно-активных веществ в сосуд наливалась дистиллированная вода, которая начинала сливаться через край сосуда. Дополнительно поверхностная пленка и пылинки сдувались потоком воздуха.

Рис. 2. Схема генератора капиллярных волн

Известно, что микроволновое излучение испытывает очень сильное ослабление в воде (более 10^4 м^{-1}), поэтому радиометр не чувствует предметов, расположенных под водной поверхностью. Созданная конструкция генератора капиллярных волн с этой точки зрения почти идеальна, поскольку на поверхности остается только тонкая гидрофильная планка. Вклад этой планки в радиометрический сигнал пропорционален ее надводной площади 6 см^2 , что

составляло около 0.5–1% от общей площади $30 \cdot 40 \text{ см}^2 = 1200 \text{ см}^2$ взволнованной водной поверхности.

4. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРОФИЛЯ КАПИЛЛЯРНОЙ РЕШЕТКИ

Для контроля профиля созданной капиллярной решетки был предложен оригинальный метод, который удобно применять именно для плоских волн в лабораторных условиях. Метод заключается в формировании светящейся линии вдоль волнового вектора распространяющейся волны (рис. 3). Отраженное от взволнованной поверхности изображение этой линии регистрируется на видеокамеру, расположенную вдоль оси X перпендикулярно волновому вектору. На рис. 3 линия формируется нижним краем линейки, расположенной над поверхностью, а отраженное капиллярной волной изображение края линейки прописывает форму капиллярной волны. Волна распространяется слева направо вдоль оси Y , а ось видеокамеры X направлена перпендикулярно волновому вектору.

Рис. 3. Видеокадр, на котором край линейки или яркая линия отражаются от плоской капиллярной решетки, созданной на водной поверхности.

На рис. 4 показан ход лучей в видеокамеру при генерации плоской капиллярной волны в направлении оси Y , перпендикулярном рисунку. При этом уклон ξ_x волны по оси X равен нулю, и в плоскости XZ поверхность горизонтальна, но ее высота периодически изменяется на величину амплитуды волны $\pm A$. Пусть изображение светящейся точки на нижнем краю линейки находится на высоте H над невозмущенной водной поверхностью. Тогда на матрице видеокамеры будет зарегистрирован луч 1 , который зафиксирует изображение светящейся точки, находящейся в зеркальном положении относительно отражающей поверхности (это точка с координатой $z_1=0, H$). На гребне капиллярной волны, где высота поверхности поднята на амплитуду волны A , зеркальное изображение светящейся точки (луч 2) окажется в положении $z_2=A - (H - A) = -H+2A$, т.е. поднимется относительно положения невозмущенного луча 1 на $z_2 - z_1 = 2A$. Таким образом, на видеокадре мы будем регистрировать профиль капиллярной волны с удвоенной амплитудой.

Рис. 4. Ход лучей при регистрации нижнего края линейки на камеру.

Данная методика имеет преимущество по сравнению с прямым измерением профиля волнения путем регистрации излучения, рассеянного от лазерной линии, сформированной на поверхности раздела [12]. Дело в том, что с целью уменьшения количества примесей и поверхностно-активных веществ мы использовали дистиллированную воду, в которой очень мало рассеивателей. По этой причине лазерный луч, падающий на поверхность, почти не рассеивался и его регистрация становилась затруднительной.

С учетом калибровки изображения был рассчитан профиль отраженного края линейки, а на рис. 5 представлен профиль капиллярной волны, сформированной на поверхности, который по амплитуде равен половине профиля отраженного края линейки. Погрешность определения профиля составила 0.03 мм.

Рис. 5. Профиль капиллярной волны вдоль оси направления распространения Y .

5. РАДИОМЕТР НА ПОВОРОТНОЙ РАМЕ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ ИЗМЕРЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ И ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ПЕРЕМЕННЫМИ УГЛАМИ НАБЛЮДЕНИЯ

Третьей частью установки является микроволновый радиометр, установленный на поворотной раме, предназначенный для обеспечения измерения яркостной температуры водной поверхности при различных вертикальных углах наблюдения β , которые отсчитываются от направления вертикальной оси Z . Кроме этого, необходимо было предусмотреть возможность измерения яркостной температуры атмосферы $T_{\text{я}}^{\text{атм}}(\beta)$ при различных вертикальных углах β (угол места). На рис. 6 представлена фотография изготовленной конструкции. Радиометр 1 монтировался на жесткой раме 2, которая могла поворачиваться вокруг горизонтальной оси 3, проходящей через центр капиллярной решетки, которая формировалась на водной поверхности сосуда. Это позволяло изменять угол β встречи с взволнованной водной поверхностью 4 и проводить измерения величины $T_{\text{я}}(\alpha, \beta, \Lambda, A)$. Сосуд с водой располагался на поворотном блоке генерации капиллярных волн 5.

Рис. 6. Фотография изготовленной конструкции: 1 – радиометр, 2 – поворотная рама

Микроволновый радиометр 1 мог также поворачиваться относительно оси вращения 6, проходящей вблизи его центра масс, что позволяло направлять его рупор в атмосферу под любым произвольным углом β . Это позволяло дополнительно измерять $T_{\text{я}}^{\text{атм}}(\beta)$ – зависимость яркостной температуры атмосферы от зенитного угла β , и по формуле (4) вычислять эффективный коэффициент отражения водной поверхности $R_{\text{эфф}}(\beta, \Lambda, A)$ как при наличии капиллярных волн, так и при их отсутствии.

Основные характеристики радиометра следующие: центральная частота приемника 36 ГГц, ширина полосы 2 ГГц, ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности 9° . Радиометр прямого усиления имеет программируемую ячейку Фарадея, позволяющую с частотой до 1000 Гц переключать до четырех различных углов поворота принимаемой поляризации. Чувствительность радиометра в режиме приема четырех поляризаций (вертикальная, горизонтальная и $\pm 45^\circ$) составляет 0.1 К при времени накопления 1 с. Более подробное описание радиометра дано в работе [13]. При расстоянии между

радиометром и центром капиллярной решетки, равном 70 см, и при вертикальном угле $\beta = 10^\circ$ размер эллипса на водной поверхности, который попадал в диаграмму направленности радиометра, составлял $12 \cdot 13 \text{ см}^2$ по главным осям. С увеличением угла β размер продольной оси эллипса увеличивался, и при $\beta = 70^\circ$ главные оси имели размер $12 \cdot 35 \text{ см}^2$. Таким образом, при размере капиллярной решетки $25 \cdot 40 \text{ см}^2$ вертикальный угол падения β мог изменяться в диапазоне от 10° до 70° . Этот интервал нас устраивает, поскольку он перекрывает диапазон углов, которые применяются при дистанционном зондировании Земли из космоса.

6. ПРОВЕДЕНИЕ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Важным требованием при проведении исследований являлось создание условий измерения, близких к режиму пассивного микроволнового зондирования Земли из космоса. Это означает, что водная поверхность и создаваемая решетка капиллярных волн должны располагаться под открытым небом. При этом количество посторонних предметов в верхней полусфере должно быть минимальным. По этой причине все измерения проводились на плоской крыше Института космических исследований, которая расположена на высоте около 50 метров, что выше окружающих зданий. Оптимальные условия измерений – однородное по яркостной температуре безоблачное небо, что и было в ночь с 18 на 19 сентября 2024 г. Ночные условия являются предпочтительными, поскольку ночью и термодинамическая, и яркостная температуры атмосферы меньше, чем днем, поэтому яркостный контраст, измеряемый радиометром, будет выше. Сигнал радиометра на четырех различных поляризациях регистрировался на ноутбук, дополнительно проводилась калибровка радиометра по двум черным телам, а также по вертикальному профилю яркостной температуры атмосферы $T_{\text{я}}^{\text{атм}}(\beta)$. В процессе измерений регистрировался яркостный контраст $\Delta T_{\text{я}}(\alpha, \beta, \Lambda, A)$ путем сравнения сигнала от водной поверхности при наличии капиллярной решетки и при ее отсутствии. Это достигалось просто выключением питания генератора звуковых колебаний. Исследовались зависимости яркостного контраста от азимутального угла α между волновым вектором капиллярной решетки и плоскостью XZ (плоскостью падения/отражения лучей) путем поворота устройства генерации вокруг вертикальной оси на заданный угол. Регистрировалась зависимость яркостного контраста от вертикального угла падения β путем поворота всей рамы с радиометром вокруг горизонтальной оси, проходящей через центр капиллярной решетки.

Для интерпретации получаемых данных важным условием был контроль формы и профиля капиллярных волн на водной поверхности. Эти измерения проводились перед началом радиометрических измерений при фиксированных напряжении и частоте звукового генератора, который обеспечивал возмущение водной поверхности и создание капиллярной решетки. Для обеспечения стабильной формы капиллярной волны настройки звукового генератора в процессе

измерений не менялись, а для создания гладкой поверхности проводился разрыв сигнала, идущего от генератора на динамик.

В качестве примера на рис. 7 приведены зависимости экспериментально измеренной величины яркостного радиоконтраста $\Delta T_{\text{я}}(\beta)$ от вертикального угла наблюдения β для двух капиллярных решеток при $\alpha = 0$. Первая решетка соответствует длине волны $\Lambda = 12 \pm 0.5$ мм и амплитуде $A = 0.15 \pm 0.03$ мм (на графике отмечена красными точками). Синими точками на рис. 7 показаны результаты измерений зависимости $\Delta T_{\text{я}}(\beta)$ для капиллярной решетки при длине волны $\Lambda = 9.0 \pm 0.5$ мм и амплитуде $A = 0.18 \pm 0.03$ мм. Сплошные линии – аппроксимация экспериментальных значений вблизи резонансного пика. Теоретическая кривая для $\Lambda = 9.0 \pm 0.5$ мм и амплитуды $A = 0.18 \pm 0.03$ мм показана черной сплошной линией. Видно, что капиллярные волны амплитудой всего 0.15–0.20 мм вызывают резонансное увеличение интенсивности излучения, достигающее 5–6.5 К. В рамках описываемого эксперимента были зарегистрированы как смещение резонансного пика в сторону меньших углов при стремлении длины капиллярной волны Λ к длине волны излучения, так и рост его абсолютного значения с увеличением амплитуды капиллярных волн. Эти эффекты согласуются с теорией “критических явлений” [6].

Рис. 7. Зависимость яркостного контраста на вертикальной поляризации от вертикального угла наблюдения.

Соответствие полученных экспериментальных данных и теории наблюдается и для азимутальных зависимостей яркостных температур. В частности, на рис. 8 синими точками представлена экспериментальная зависимость $\Delta T_{\text{я}}(\alpha)$ для третьего параметра Стокса теплового излучения при вертикальном угле наблюдений $\beta = 12.5^\circ$, длине волны $\Lambda = 9 \pm 0.5$ мм и амплитуде $A = 0.18 \pm 0.03$ мм. Черные точки – данные, полученные в работе [6] при проведении аналогичных измерений с негармонической решеткой, сформированной на приподнятых над водой струнах. Теоретическая зависимость показана сплошной черной линией. Экспериментальные зависимости имеют характерное расположение максимумов и нулей, что предсказывается в рамках теории “критических явлений” [6]. Проведенные измерения носят предварительный характер, они показали корректность и высокое качество созданной экспериментальной установки. Детальные исследования критических явлений и их анализ планируется провести на следующих этапах работы.

Рис. 8. Зависимость третьего модифицированного параметра Стокса теплового излучения

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе описана установка, которая позволила исследовать влияние капиллярных волн на собственное микроволновое излучение водной поверхности. Установка состоит из трех основных узлов. Первый узел – генератор плоских капиллярных волн на поверхности сосуда, который имеет вертикальную ось симметрии. Генератор и волновой вектор капиллярной решетки могли поворачиваться вокруг вертикальной оси на произвольный азимутальный угол, что позволило исследовать азимутальные зависимости микроволнового излучения капиллярных волн. Важным свойством генератора волн являлось расположение всех элементов конструкции под водой, при этом на поверхности оставалась лишь тонкая гидрофильная планка, которая и служила источником возмущения поверхности. Вертикальное перемещение планки задавалось диффузором динамика, что позволяло выбирать нужную частоту и амплитуду капиллярной решетки. Контроль формы и профиля созданной капиллярной волны проводился по оригинальной методике с помощью видеокамеры, которая регистрировала изображение прямой линии, отраженное от водной поверхности. Для плоской решетки профиль отраженных искажений соответствовал удвоенной деформации водной поверхности. Третьим узлом установки являлся микроволновый радиометр, установленный на жесткой поворотной раме. Ось вращения рамы проходила по центру капиллярной решетки, что позволяло проводить измерения яркостной температуры водной поверхности под различными углами падения, параметры Стокса, исследовать критические радиотепловые явления, возникающие при определенных соотношениях между длиной электромагнитной волны, длиной капиллярных волн на поверхности и углами наблюдения.

В результате экспериментальных измерений оказалось, что при генерации капиллярных волн с амплитудой 0.15–0.20 мм появляется резонансное увеличение интенсивности микроволнового излучения на 5–6.5 К, которое регистрировалось радиометром. Наблюдаемый эффект согласуется с теоретическими предположениями, согласно которым положение резонансного пика смещается к меньшим углам места при приближении величины длин волн водной поверхности к длине волны микроволнового излучения. Созданная установка и оригинальная методика измерений являются важным шагом в изучении физики рассеяния микроволнового излучения на взволнованной морской поверхности. Уточнение физических процессов формирования собственного излучения водной поверхности за счет капиллярных волн является актуальной проблемой при интерпретации микроволновых измерений со спутников.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-17-00189).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Эткин В.С., Ворсин Н.Н., Кравцов Ю.А., Мировский В.Г., Никитин В.В., Попов А.Е., Троицкий И.А.* // Известия ВУЗов. Радиофизика. 1978. Т. 21. № 3. С. 454.
2. *Кравцов Ю.А., Мировская Е.А., Попов А.Е., Троицкий И.А., Эткин В.С.* // Изв. АН СССР. ФАО. 1978. Т. 14. № 7. С. 733.
3. *Ирисов В.Г.* Исследование излучения электромагнитных волн периодически неровной поверхностью. Препринт. Пр-944. Москва: ИКИ АН СССР, 1984.
4. *Ирисов В.Г., Трохимовский Ю.Г., Эткин В.С.* Дистанционные методы исследования океана. Сб. науч. тр. Горький: ИПФ, 1987. С. 34.
5. *Pospelov M.N., Kuzmin A.V., Trokhimovskii Yu.G.* // Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'01). Sydney, Australia. 2001. P. 1561.
6. *Садовский И.Н., Кузьмин А.В., Поспелов М.Н.* // Исследование Земли из космоса. 2005. № 1. С. 21.
7. *Trokhimovskii Yu., Kuzmin A., Pospelov M., Irisov V., Sadovsky I.* // Radio science. 2003. V. 38. №. 3. P. 8039.
8. *Трохимовский Ю.Г., Эткин В.С.* Лабораторные и натурные исследования критических явлений в радиотепловом излучении взволнованной водной поверхности. Препринт. Пр-988. Москва: ИКИ АН СССР, 1985.
9. *Трохимовский Ю.Г.* // Исследование Земли из космоса. 1997. № 1. С. 39.
10. *Трохимовский Ю.Г., Хатин Ю.Б., Эткин В.С.* Поляризационные и спектральные характеристики радиотеплового излучения взволнованной поверхности моря: Препринт. Пр-821. Москва: ИКИ АН СССР, 1983.
11. *Стерлядкин В.В., Куликовский К.В.* // Российский технологический журнал. 2022. Т. 10. № 5. С. 100. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-100-110>
12. *Sterlyadkin V.V., Kuzmin A.V., Sharkov E.A., Likhacheva M.V.* // J. Atmos. Oceanic Technol. 2021. V. 38. № 8. P. 1415. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-21-0036.1>
13. *Анискович В.М., Кузьмин А.В., Сазонов Д.С., Хайкин В.Б.* // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 213. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-2-213-223>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Схема эксперимента по исследованию влияния капиллярных волн на собственное микроволновое излучение поверхности: 1 – радиометр, 2 – капиллярная решетка на водной поверхности, 3 – “холодное” излучение атмосферы.
- Рис. 2.** а – Схема генератора капиллярных волн, б – диффузор динамика и гибкий крестообразный ограничитель, в – плоская капиллярная волна, созданная на водной поверхности.
- Рис. 3.** Видеокадр, на котором видно, что край линейки или яркая линия отражаются от плоской капиллярной решетки, созданной на водной поверхности.
- Рис. 4.** Ход лучей при регистрации нижнего края линейки на камеру. Луч 1 отражается от невозмущенной границы раздела, луч 2 отражается от гребня капиллярной волны.
- Рис. 5.** Профиль капиллярной волны вдоль направления оси распространения Y .
- Рис. 6.** Фотография изготовленной конструкции: 1 – радиометр, 2 – поворотная рама, 3 – ось вращения рамы, 4 – центр водной поверхности, 5 – поворотный блок генерации капиллярных волн сосуда, 6 – ось вращения радиометра.
- Рис. 7.** Зависимость яркостного контраста на вертикальной поляризации от вертикального угла наблюдения.
- Рис. 8.** Зависимость третьего модифицированного параметра Стокса теплового излучения от азимутального угла визирования. Вертикальный угол наблюдения равен 12.5° .

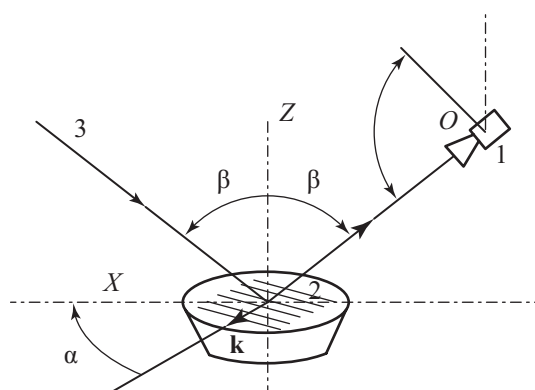
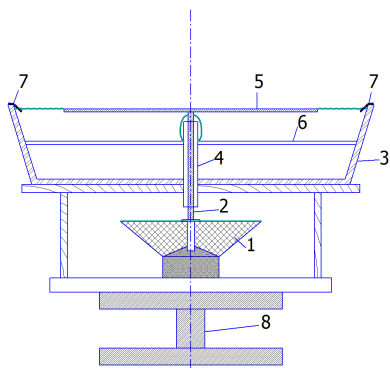
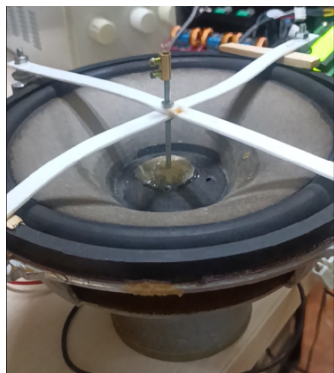


Рис. 1.



(a)



(б)



(в)

Рис. 2.

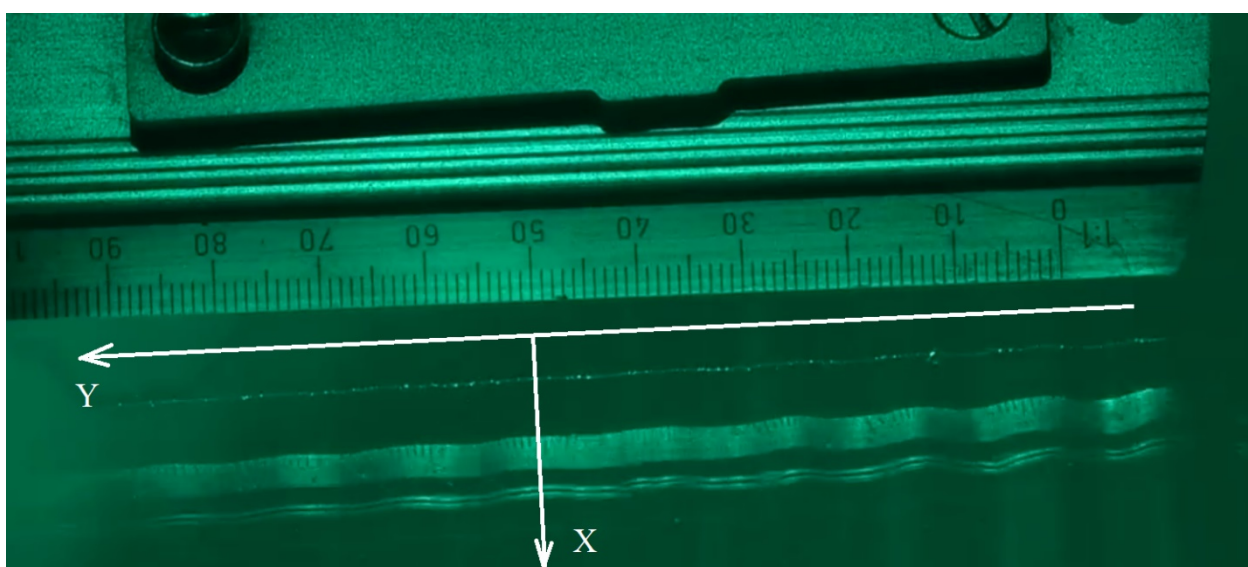
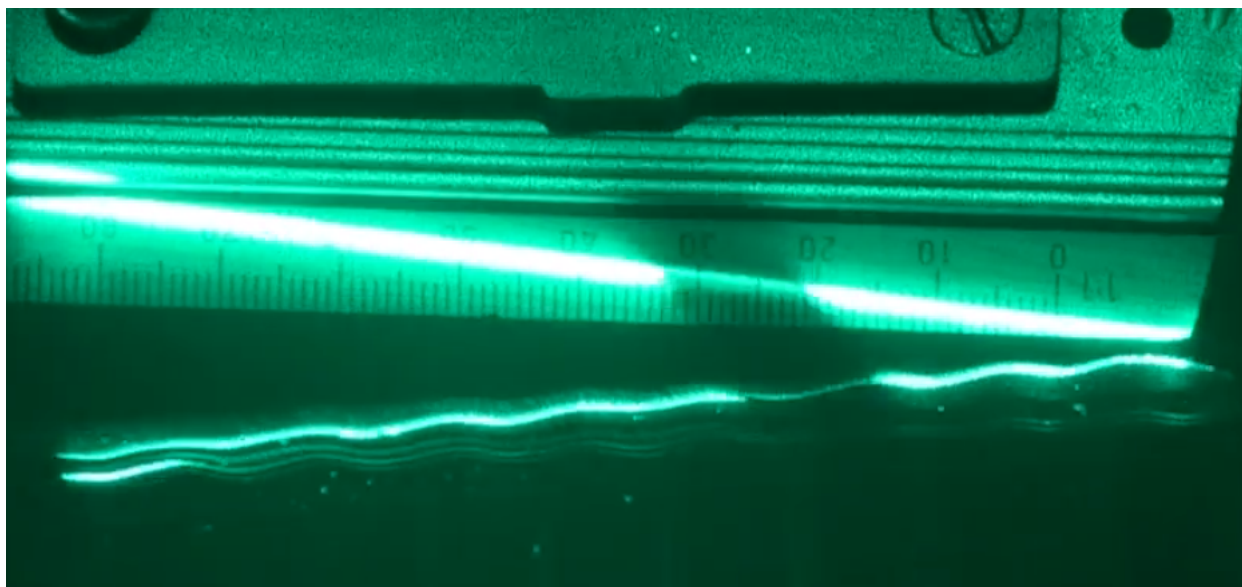


Рис. 3.

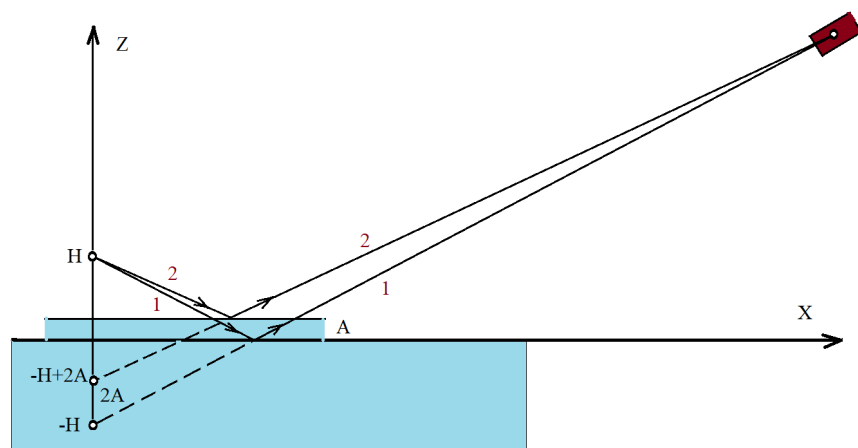


Рис. 4.

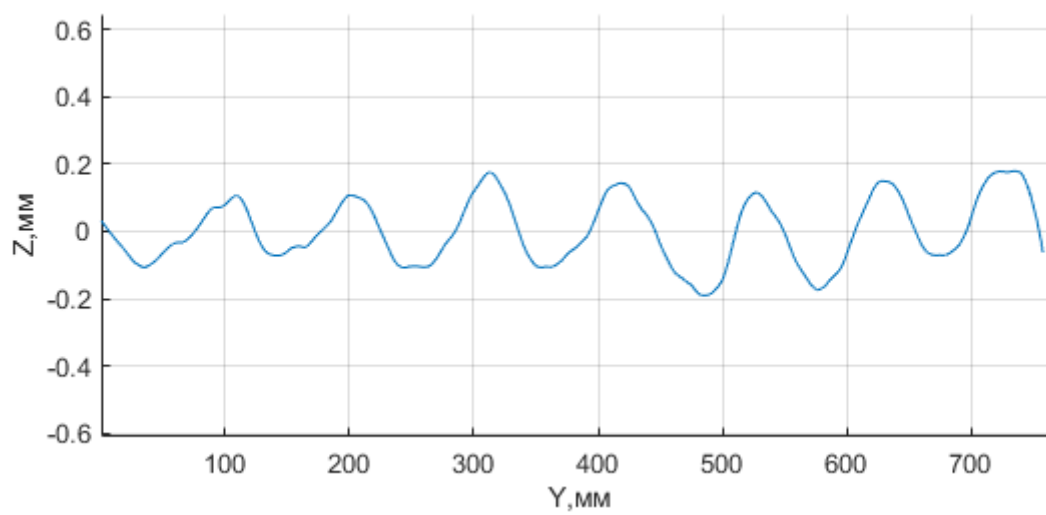


Рис. 5.

сетку убрать

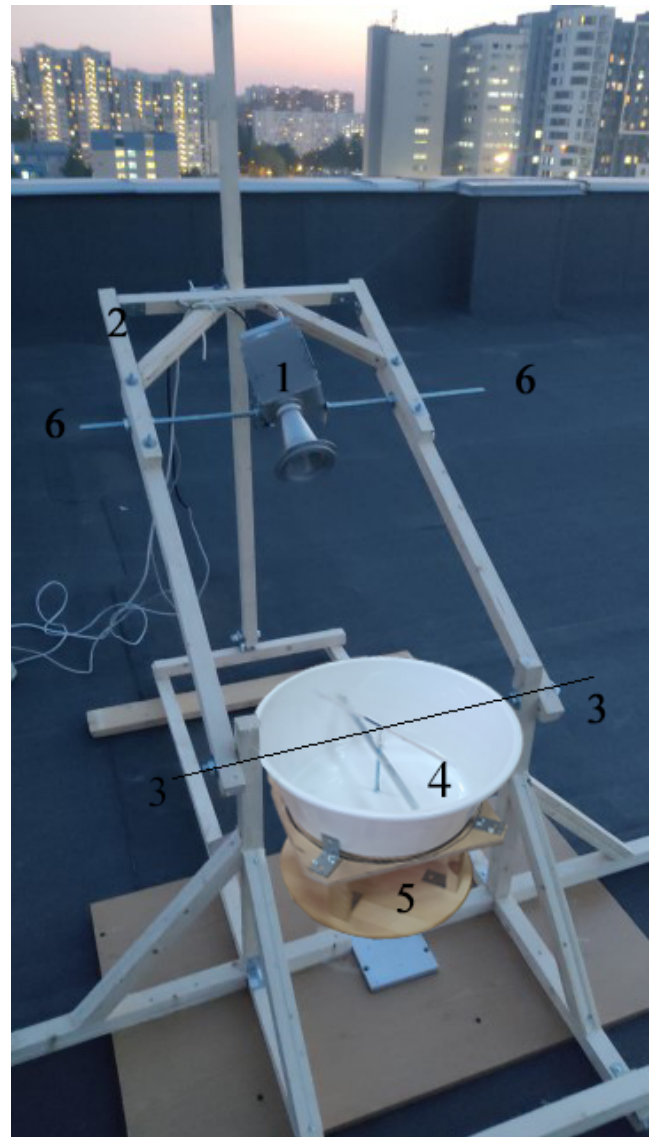


Рис. 6.

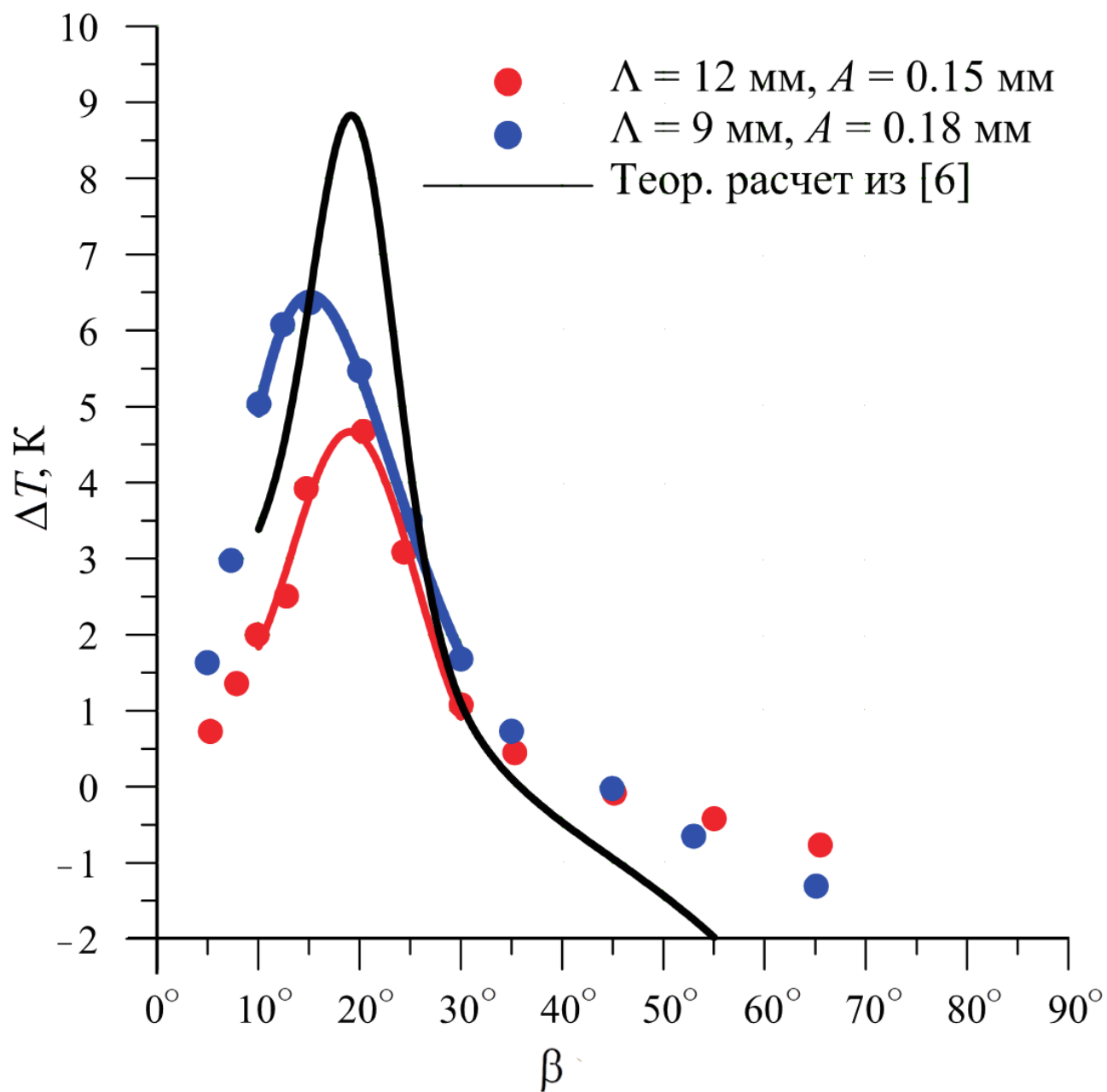


Рис. 7.

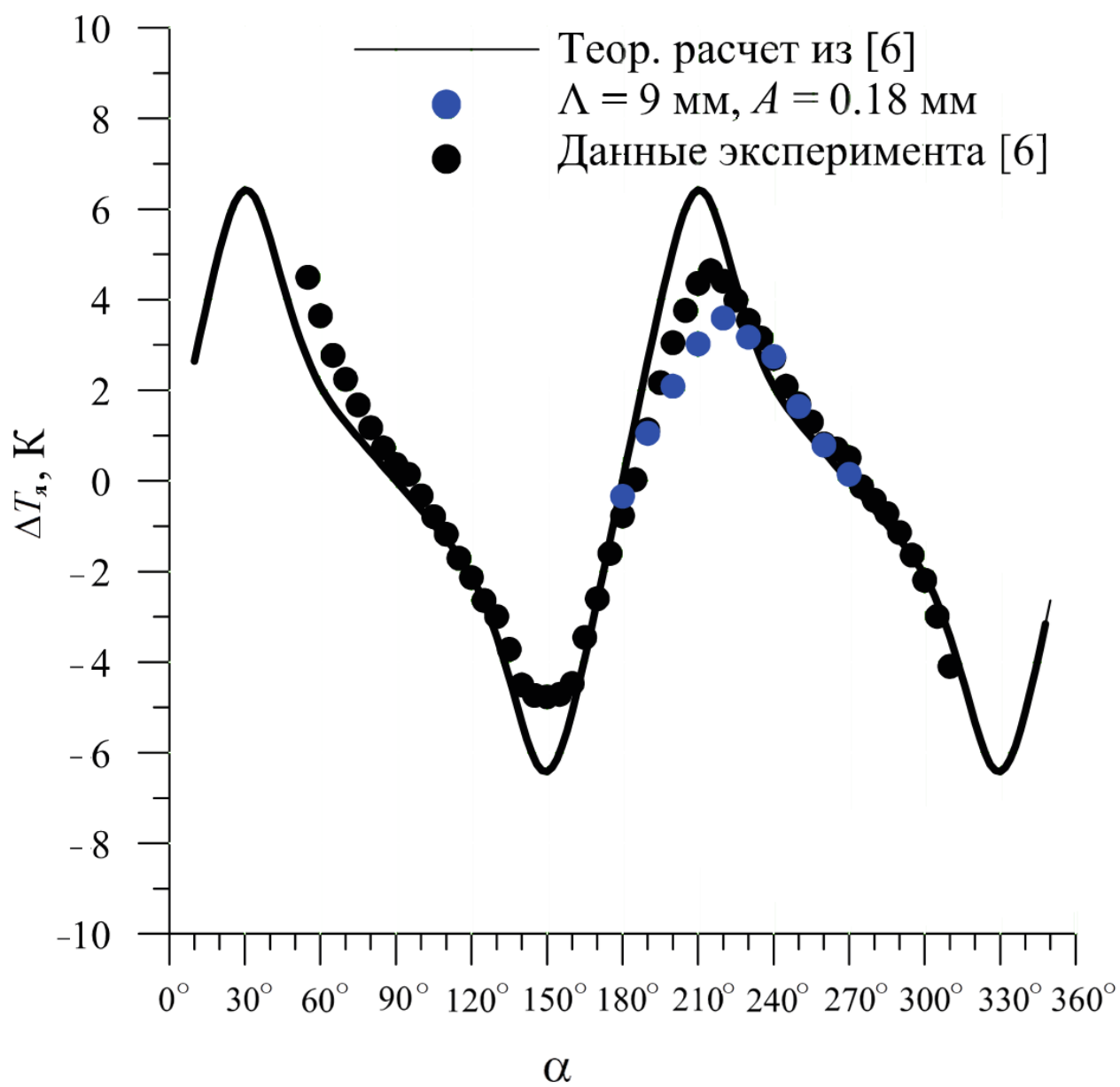


Рис. 8.