

УДК 629.735

А.В. УЗЛЕНКОВ

*Институт радиопластики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков*

## ИНФРАКРАСНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ СЕНСОР КАПИЛЛЯРНОГО ВОЛНЕНИЯ В ЖИДКОСТИ

*Предложено использование инфракрасной (ИК) широкоугольной оптической системы с открытым каналом и некогерентным излучением в качестве сенсора капиллярного волнения на поверхности жидкости. Рассмотрены физические особенности функционирования предложенного ИК сенсора, его геометрия, определены ограничения применения. Приведены результаты математического моделирования и экспериментального исследования свойств предложенного ИК сенсора. Установлено хорошее соответствие его параметров и параметров прецизионного лазерного волнографа. Отмечены имеющиеся различия, предложено их объяснений. Оценены частотные и динамические свойства, нелинейные искажения ИК сенсора. Отмечена его высокая чувствительность к присутствию поверхностно-активных веществ и газовыделением.*

**Ключевые слова:** капиллярные волны, поверхность жидкости, модуляция, световой поток, освещенность, поверхностно-активные вещества.

### Введение

Информация о параметрах волнения в открытых акваториях представляет значительный интерес во многих областях человеческой деятельности, связанных с морем. Однако, если в судовождении, морском строительстве важны данные о гравитационном волнении (ГВ), то в экологии и в отдельных задачах океанографии и радиолокации интерес представляет гравитационно-капиллярное (ГКВ) и капиллярное волнение (КВ).

ГКВ(КВ) играет также важную роль в рассеивании СВЧ и КВЧ сигналов при дистанционном зондировании морской поверхности, поскольку в значительной мере определяют удельную ЭПР морской поверхности. При проведении комплексных исследований акваторий, при аттестации и калибровке новых радиолокационных систем и методов и в исследовательских целях, как правило, применяются контактные волнографические средства, дислоцированные в заданных акваториях. Комплексный подход находит применение при оценке экологического состояния в районах нефтедобычи и транспортировки нефтепродуктов [1].

Большинство средств волнографического контроля, оснащенных разнообразными по принципу действия сенсорами: резистивными, ультразвуковыми, акселерометрическими, барометрическими, тензометрическими и т.п., являются относительно низкочастотными приборами. Это связано с потенциальными возможностями сенсоров, их конструкцией, массой и собственным влиянием на структуру

волнения и приводного ветра. Создание средств, одинаково эффективных в диапазонах ГВ и ГКВ, наталкивается на определенные противоречия, заключающиеся в разной природе возвращающих сил и разных характерных масштабах этих волн.

Контроль параметров ГКВ и КВ в лабораторных и природных условиях также представляет достаточно сложную задачу, поскольку в этих диапазонах, при относительно высоких частотах - свыше 50 Гц, предъявляются высокие требования к чувствительности сенсора к наклону поверхности воды. Наклоны поверхности  $\gamma = H/\lambda$ , где  $H$ ,  $\lambda$  - высота и длина поверхностных волн, в этих диапазонах составляют, как правило, не более 0,1.

В этой связи создание простых и эффективных сенсоров, работающих в диапазонах ГКВ и КВ, как в лабораторных, так и природных условиях, представляет неизменный интерес.

### 1. Основы работы и свойства ИК сенсора

В основе работы ИК сенсора лежит взаимодействие падающего светового потока и взволнованной поверхности воды, оказывающей влияние на преломленную часть потока. Исследования в этой области показали наличие достаточно простой связи между спектром мощности флуктуаций подводной освещенности  $A^2_E(v)$  и энергетическим спектром поверхностного волнения  $A^2_\xi(v)$  [2, 3]:

$$A^2_E(v) = c(v)A^2_\xi(v), \quad (1)$$

где  $c(v)$  - фокусирующий множитель;  $v$  - частота волнения.

Наличие в (1) фокусирующего множителя означает, что на глубине  $Z_0$  наибольший вклад в спектр мощности освещенности дают волны с вполне определенной длиной  $\lambda_m$  «оптически активной» для данной глубины. При нормальном падении потока значения  $Z_0$  и  $\lambda_m$  связаны соотношением [2]:

$$Z_0 = \frac{n_1}{n_1 - n_0} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2\pi\sigma_\gamma} \lambda_m, \quad (2)$$

где  $n_0 = 1$  – показатель преломления воздуха;

$n_1 = 1,338$  – показатель преломления воды;

$\sigma_\gamma$  – СКО наклонов поверхности  $\gamma$  вдоль ОХ.

На данной глубине  $Z_0$ , при увеличении волнового числа волн  $\chi = 2\pi/\lambda$  от 0 до  $\infty$ , фокусирующий множитель вначале растет пропорционально  $\chi^4$  и, достигнув максимума, экспоненциально убывает.

Кроме того, существует критическая глубина  $\tilde{H}_{кр}$ , начиная с которой волны с длинами меньше  $\lambda_i$ , перестают создавать флуктуации [3]:

$$\tilde{H}_{кр} = h^* (5 + \operatorname{tg}4\gamma \operatorname{tg}\delta') / (1 + \operatorname{tg}4\gamma \operatorname{tg}\delta),$$

где  $h^*$  – глубина фокусировки;

$\delta$  и  $\delta'$  – углы преломления в максимуме и в минимуме волны, связанные с высотой Солнца законом Снеллиуса.

Поскольку глубина фокусировки определяется глубиной пересечения преломленных лучей при данной высоте Солнца и длине волн, то на глубине  $\tilde{H}_{кр}$  расхождение преломленных лучей достигает величин, соизмеримых с  $\lambda_i$ , и влияние волн этой длины на флуктуации освещенности становится пренебрежимо малым. Именно этим объясняется уменьшение высокочастотных флуктуаций с ростом глубины.

Из приведенного следует, что требуемую «оптически активную» длину волны  $\lambda_m$  можно обеспечить выбором геометрии оптической системы. При этом рабочий диапазон длин волн будет включать  $\lambda_m$  и ее окрестности в обе стороны, с преимущественным смещением в сторону коротких волн. Это позволило для контроля спектров короткого капиллярного волнения предложить оптическую систему, представляющую собой оптическую пару с открытым каналом [4] – частный случай оптической схемы, рассмотренной в [3]. Различия заключаются в наличии собственного источника излучения и расходимости его светового потока. Для наблюдения волнения в интересующем диапазоне длин волн характерные размеры сенсора выбирают исходя из (2).

Для квазимонохроматического линейного волнения в воде, понимая под  $\sigma_\gamma$  отношение средней высоты волн  $\bar{H}_0$  к  $\lambda_m$ , можно привести (2) к выражению для фокусного расстояния преломляющей

поверхности с кривизной  $R$  [5]:

$$Z_0 = f = -\frac{n_1}{n_1 - n_0} \cdot R,$$

где  $R = \pm(\sqrt{2}/2\pi \bar{H}_0)\lambda_m^2$ .

Возможны два варианта облучения границы раздела сред: из воздуха в воду или из воды в воздух и соответственно два фокуса  $f_1, f_2$ , отделенных от источника излучения поверхностью раздела. Для длин волн в интервале  $1 < \lambda_m < 15$  мм, при наклонах волн  $\gamma = 0,1$  значения  $f_1$  лежат в интервале от 9,9 до 130 мм и  $f_2$  – от 7,4 до 97 мм.

Второй вариант оказывается предпочтительнее с точки зрения пространственного разрешения системы. Это вытекает из теоремы Штраубеля, в соответствии с которой размещение излучателя в более оптически плотной среде приводит к увеличению расходимости физического пучка на границе раздела сред [6]. Элементы поверхности воды не различимые при первом варианте облучения, воспринимаются при этом раздельно, что свидетельствует о повышении разрешения.

Видно, что  $Z_0$  мало зависит от направления просвечивания границы раздела и превосходит  $\lambda_m$  всего в 7 – 8 раз, что может затруднить практическую реализацию сенсора при параллельном световом пучке. Если падающий поток расходится под углом  $\beta$ , то значение  $Z_0'$  будет отличаться от  $Z_0$  в  $\mu$  раз [4]:

$$Z_0' = \mu \cdot Z_0,$$

где  $\mu \cong \frac{\operatorname{tg}\tau + \operatorname{tg}\Delta\tau}{(1 - \operatorname{tg}\tau \operatorname{tg}\Delta\tau) \cdot \operatorname{tg}\tau}$ ,

$$\operatorname{tg}\tau = Z_0/(\lambda_m/2), \quad \operatorname{tg}\Delta\tau \cong (n_0/n_1)\beta.$$

Коэффициент  $\mu$  может принимать значения от 1 до  $\infty$ , в зависимости от величины  $\beta$ . Это упрощает технику наблюдения волнения и конструкцию ИК сенсора вплоть до диапазона субмиллиметровых поверхностных волн.

На рис. 1 приведена оптическая схема предложенного ИК сенсора для варианта облучения поверхности раздела из воды. ИК сенсор состоит из точечного излучателя 1, размещенного в оптически более плотной среде – воде и фотоприемника 2 с площадью приемной апертуры  $S_{пр}$ , расположенного в воздухе. Световой поток 3 (или световая трубка) ограничен поверхностями  $S_\alpha(t)$  и  $S_{пр}$ , которые в фотометрии называют диафрагмами. Вырезаемая на поверхности воды диафрагма  $S_\alpha(t)$  условно показана плоской.

Излучатель 1 имеет размер менее  $0,1Z_1$  и поэтому является точечным.

Излучатель и приемник отделены друг от друга поверхностью воды.

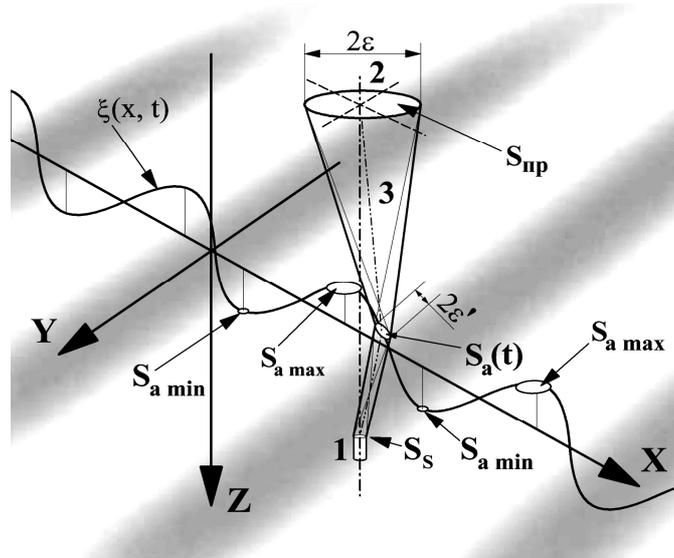


Рис. 1 Оптическая схема ИК сенсора:

1 – приемник светового потока, 2 – излучатель, 3 – световая трубка,  $S_{\alpha \min}$  – световая диафрагма на подошве волны,  $S_{\alpha \max}$  – световая диафрагма на гребне волны,  $S_{\alpha}(t)$  – диафрагма в момент времени  $t$

Важным свойством любого измерителя является его разрешающая способность. Разрешение ИК сенсора целесообразно характеризовать величиной обратной размер  $2\varepsilon'$  диафрагмы  $S_{\alpha}$  [4]:

$$\varepsilon' \cong \varepsilon(1 - \alpha \cdot Z_1),$$

где  $\alpha$  – половина угла, под которым из точки 1 виден приемник с поперечным размером  $2\varepsilon$ .

Для спокойной поверхности жидкости при высоте приемника над поверхностью  $Z_1$  и глубине излучателя  $Z_0$ :

$$2\alpha \cong 2/[(n_0/n_1)Z_0 + Z_1],$$

Например, при  $Z_1 = 35\text{мм}$ ,  $2\varepsilon = 5\text{мм}$ ,  $Z_0 = 10\text{мм}$  разрешающая способность позволит наблюдать волны с частотами до 1500 Гц. Для сравнения: при естественном уровне загрязненности воды в открытых водоемах частота волнения не превышает ~500Гц.

Характеристика преобразования ИК сенсора, строго говоря, является нелинейной, однако при выполнении условий:

$$H_0/\lambda \ll 1, \quad 2\varepsilon' \ll \lambda \quad (3)$$

влиянием нелинейности можно пренебречь [4].

### 1.2. Численное моделирование ИК сенсора

Поскольку в ИК сенсоре использован некогерентный излучатель, построение математической модели осуществлено методами фотометрии [2, 6].

Фототок в приемнике, без учета постоянной составляющей, создается световым потоком  $\Phi_{\alpha}(t)$ , проходящим через диафрагму  $S_{\alpha}(t)$ , полностью определяется состоянием поверхности  $\xi(x, y, t)$  и может быть записан в виде:

$$i(t) = k_{\Phi} \Phi_{\alpha}(t),$$

где  $k_{\Phi}$  – интегральная чувствительность приемника,

Поток  $\Phi_{\alpha}(t)$  находят интегрированием по поверхности приемника [4]:

$$\Phi_{\alpha}(t) = \int_{S_{\text{пр}}} T \cdot I_0 \cdot g(\vec{n}_s, \vec{r}) \cdot e^{-\kappa \cdot r} \cdot \frac{1}{r_0} \cos \varphi \cdot ds, \quad (4)$$

где  $I_0$  – сила света вдоль оптической оси;

$T$  – коэффициент Френеля для некогерентного излучения;

$g(\vec{n}_s, \vec{r})$  – характеристика направленности источника, заданного нормалью  $\vec{n}_s$  в направлении  $\vec{r}$ ;

$\kappa$  – коэффициента экстинкции в воде;

$r = |\vec{r}|$  – длина пути в воде;

$\vec{r}$  и  $\vec{r}_0$  – векторы падающего и преломленного поверхностью потоков, соответственно.

Если предположить двухмерность волнения -  $\xi(x, y, t) = \xi(x, t)$ , то интегрирование по поверхности может быть заменено интегрированием по  $x$ .

Выражения (4) использовались для моделирования сенсора. Численное интегрирование осуществлялось методом прямоугольников. Расчеты проводились при соблюдении условия линейности волнения (3). Волнение на поверхности моделировалось синусоидой  $z(t) = \xi(x, t) = H_0 \sin(\omega t - kx)$ , где  $\omega$  – круговая частота волнения,  $k = 2\pi/\lambda_x$  – волновое число.

Характеристика направленности  $g(\vec{n}_s, \vec{r})$  для случая ламбертовского излучателя описывалась функцией  $g(\theta) = \cos \theta$ , где  $\theta$  – угол азимута, или эллипсоидом для реальных излучающих диодов. Коэффициенты  $k_{\Phi}$  и сила света  $I_0$  для простоты приняты равными единице. Все относительные величины

получены нормированием результатов на свое максимальное значение.

Результаты математического моделирования сенсора представлены на рис. 2.

На рис. 2, а показаны расчетные временные реализации сигнала при длине волны  $\lambda = 10$  мм, соответствующей частоте 24,9 Гц. Наклоны волн  $H_0/\lambda$  указаны в полях соответствующих фрагментов рис. 2, а. С увеличением наклона волн и, соответственно, их амплитуды наблюдается рост искажений формы сигнала фотоприемника в максимумах и в минимумах, что объясняется нарушением условий линейности волнения (3).

Для количественной оценки этих искажений сигнала проведены расчеты коэффициента нелинейных искажений (коэффициента гармоник):

$$K_{\Gamma} = \sqrt{(A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_N^2)} / A_1^2 * 100\%,$$

где  $A_N$  - амплитуда N-й гармоники спектра.

В расчетах было использовано  $N = 1 \dots 7$ . На рис. 2, б, в представлены двумерные зависимости коэффициента гармоник  $K_{\Gamma}(Z_0, \epsilon)$  от геометрических параметров оптической системы: глубины излучателя и размера приемника при двух значениях длины волны – 80 и 10 мм, соответственно. Глубина излучателя  $Z_0$  на рис. 2, б, в обозначена  $h_s$ .

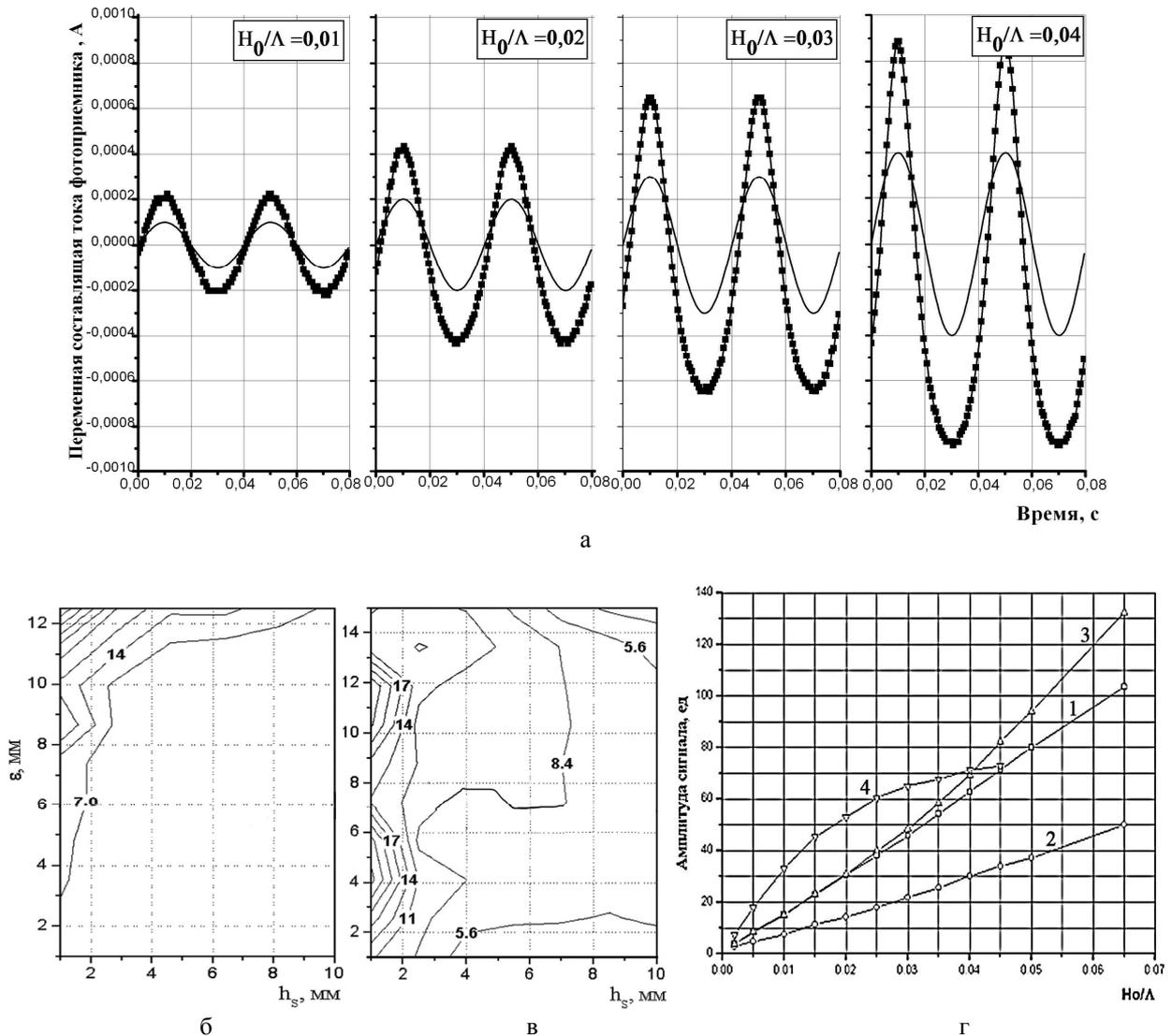


Рис. 2. Математическое моделирование ИК сенсора:  
 а – временные реализации сигналов сенсора при разных наклонах поверхности;  
 б, в – зависимости коэффициента гармоник от геометрии сенсора при  $\Lambda = 80$  и при  $\Lambda = 10$  мм;  
 г – амплитудные характеристики системы для длин волн  
 1 –  $\Lambda = 80$  мм, 2 – 20 мм, 3 – 5 мм, 4 – 1 мм

Зависимости  $K_{\Gamma}(Z_0, \epsilon)$  позволяют оценить область величин геометрических параметров, обеспечивающих наилучшее качество преобразования волнового процесса. С ростом глубины излучателя нелинейные искажения снижаются. Видно, что зависимости коэффициента гармоник не имеют экстремумов, однако можно выбрать область где коэффициент гармоник не превышает заданного предела в анализируемом диапазоне частот.

На рис. 2 г приведены расчетные амплитудные характеристики ИК сенсора для длин волн 80мм, 20мм, 5мм и 1мм, которые соответствуют частотам 4,51 Гц, 11,66 Гц, 63,49 Гц и 683 Гц. Данные характеристики (за исключением характеристики при 683 Гц) практически линейны в широком интервале наклонов волн от 0.002 до 0.07.

Расчетная АЧХ сенсора приведена ниже на общем графике с экспериментальной частотной характеристикой.

## 1.2. Экспериментальное исследование ИК сенсора

Экспериментальные исследования проводились в волновом бассейне размерами  $0,7 \times 0,7 \times 1,6$  м, заполненном фильтрованной водопроводной водой.

Внешний вид волнового бассейна, исследуемого ИК сенсора и измерительного волнографического комплекса показан на рис. 3, где 1, 2 - излучатель и приемник калибровочного лазерного волнографа [7]; 3 - исследуемый оптический сенсор; 4 - линейный активатор волнения; 5 - точечный капиллярный активатор волнения; 6 - спектроанализатор СК4-72; 7 - компьютер; 8 - ИК-приемник сенсора с оптическим ИК фильтром, 9 - ИК-излучатель сенсора. На рис. 3 б показан фрагмент волнения 10, создаваемого капиллярным активатором с частотой 100 Гц.

Многочастотное волнение возбуждалось турбулизированным воздушным потоком со скоростью 0 – 15 м/с. В эксперименте исследовался полупроводниковый сенсор, имеющий геометрические размеры, соответствующие математической модели.

В ИК сенсоре использованы излучающий светодиод АЛ1107Б, и фотодиод ФД263 (ФД256) в качестве приемника. Для исключения влияния естественного света излучение диода АЛ1107Б модулировалось меандром с частотой 14 кГц. Сигналы оптической системы наблюдались и исследовались с помощью комплекса СК4-72 и персонального компьютера. Ввод сигналов осуществлялся через звуковую карту компьютера.

Функциональная схема экспериментального комплекса приведена на рис. 4. Обозначения на рис. 4 соответствуют обозначениям на рис. 3. Дополнительно введены обозначения компонент лазерного волнографа: усилители ортогональных каналов матричного фотоприемника 2.1 и 2.2; компонент ИК сенсора 3: усилитель 3.1 и генератор меандра 3.2 (14 кГц), управляющего излучателем; селективный усилитель 3.3 с центральной частотой 14 кГц и полосой 1,5 кГц; прецизионный генератор ГЗ-110 – 11 и усилитель мощности 12, управляющих приводом волнопродуктора; источник вторичных напряжений 13.

Параметры ИК сенсора контролировались с помощью лазерного волнографа во всем диапазоне частот. Был проведен калибровка и сопоставительный анализ параметров сенсора и волнографа.

Волнограф представляет собой высокоточный измеритель наклона поверхности жидкости в двух плоскостях и находит широкое применение в исследовательских задачах [8, 9]. В полосе частот 0–300 Гц он обеспечивает точность измерения угла наклона не хуже  $0,1^\circ$ ; неравномерность АЧХ и

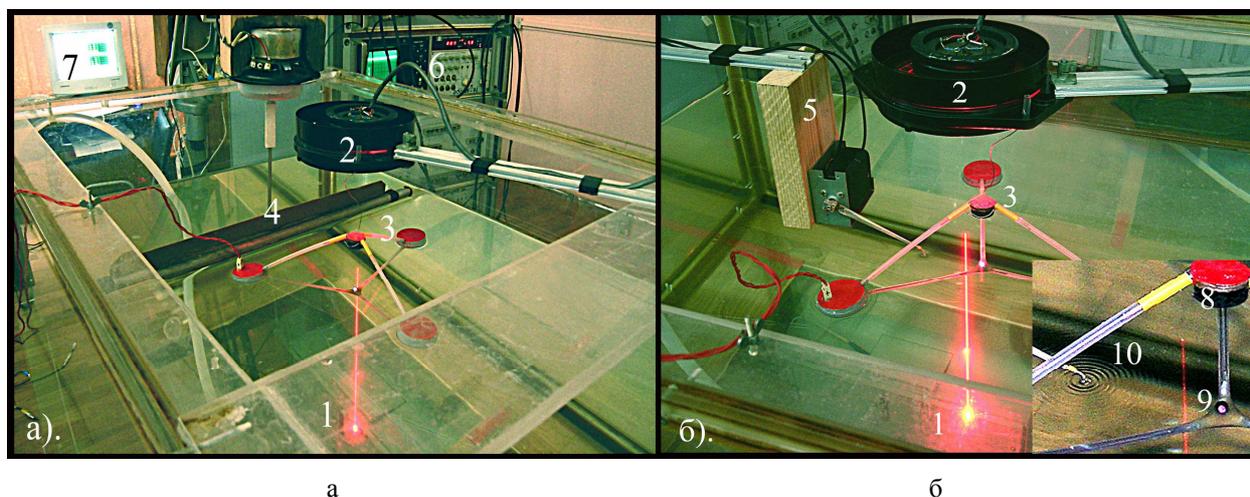


Рис. 3. Внешний вид волнового бассейна (а) и измерительного комплекса (б)

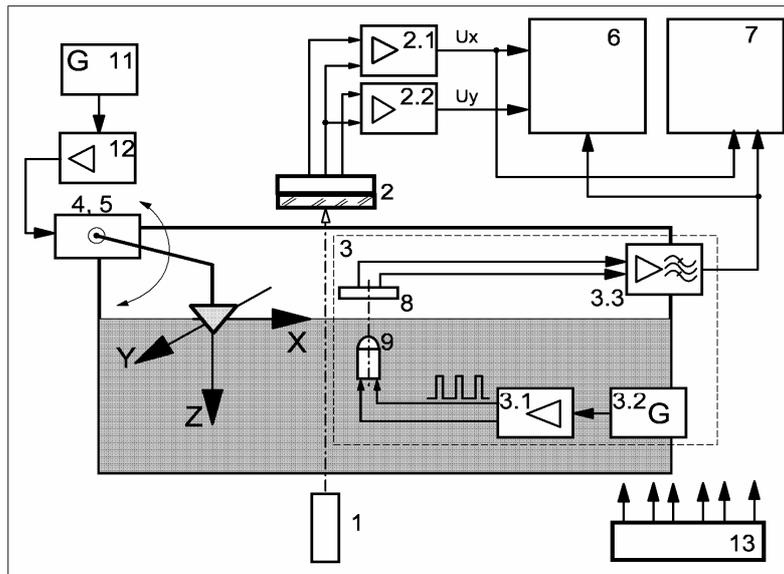


Рис. 4. Функціональна схема измерительного комплексу

динамической характеристики не хуже 0,5 % и 1%, чувствительность не хуже  $N/\lambda = 0,001$ .

Различные модификации лазерного волнографа на сегодняшний день являются наиболее точными измерительными приборами в этой области.

На рис. 5 представлены сигналы и спектры лазерного волнографа и ИК сенсора на частотах 10 и 100 Гц. Наблюдается хорошее совпадение спектров сигналов сенсора и лазерного волнографа на этих частотах и во всем диапазоне частот волнения от 10 до 300 Гц.

Имеющиеся отличия, заключаются в несовпадении абсолютных значений амплитуд гармоник, что связано с разной крутизной характеристик преобразования и очевидным влиянием частотно-зависимого фокусирующего множителя  $s(\nu)$ .

На рис. 6 приведены амплитудные характе-

ристики лазерного волнографа и ИК сенсора в трех диапазонах частот. Необходимость введения поддиапазонов связана со значительным отличием коэффициента затухания поверхностных волн в этих поддиапазонах (10 – 20 Гц, 50 – 150 Гц и 200 – 300 Гц), что вынуждало изменять расстояния от активатора до оптических осей волнографа и сенсора:  $R_{\text{LASER}}$  и  $R_{\text{IRD}}$ .

Как видно на рис. 6 наклоны амплитудных характеристик лазерного волнографа и ИК сенсора соответствуют друг другу во всем частотном диапазоне. Собственная нелинейность ИК сенсора во всем диапазоне амплитуд волн практически не обнаруживалась. Наблюдаемая на рис. 6 нелинейность была общей для обоих приборов и ее причины коренятся в нелинейности передаточных характеристик активаторов в области больших сигналов.

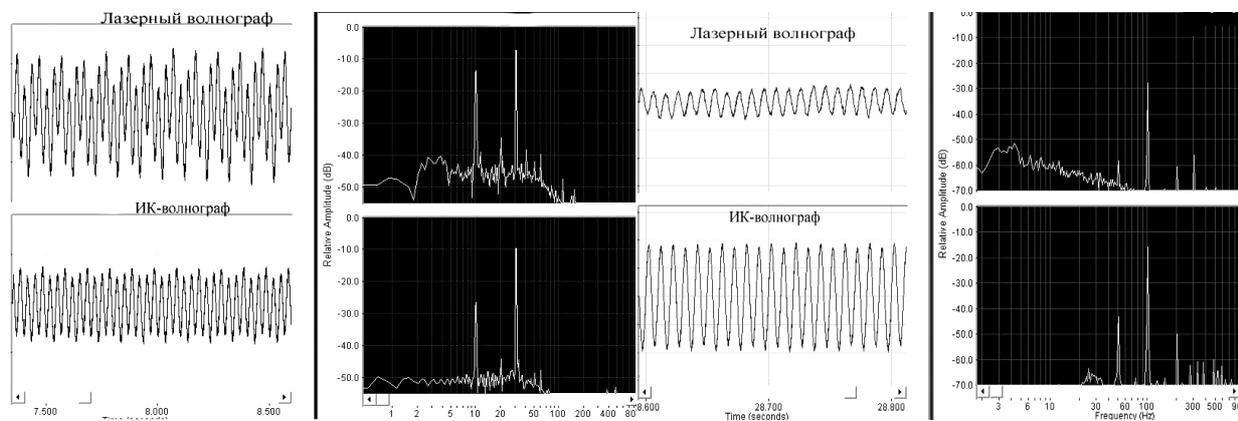


Рис. 5. Временные реализации и спектрограммы сигналов лазерного волнографа и ИК сенсора (на спектрограммах ИК сенсор назван ИК волнографом)

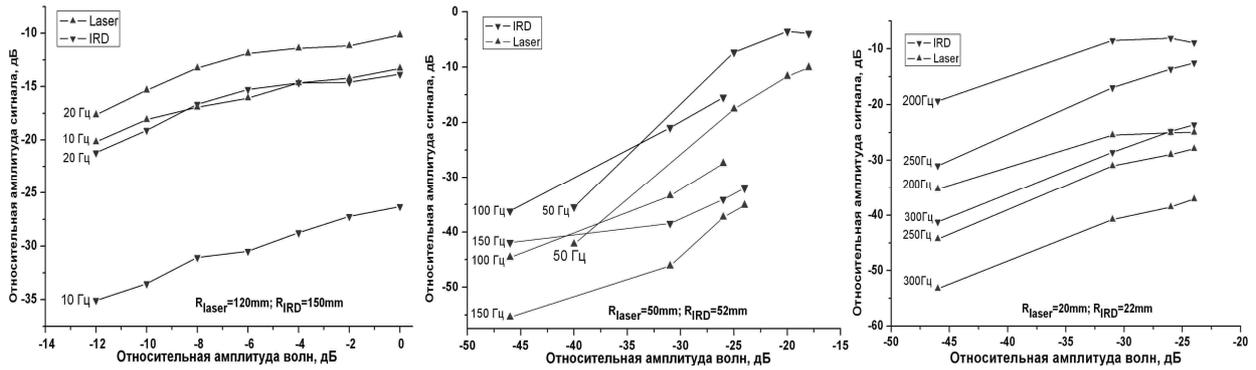


Рис. 6. Амплитудные характеристики лазерного волнографа и ИК сенсора

Сопоставление амплитудных характеристик сенсора и волнографа в разных поддиапазонах обнаруживает влияние фокусирующего множителя  $s(v)$  на крутизну преобразования сенсора. При селекции волнения заданного частотного диапазона это может оказаться преимуществом.

Было рассмотрено влияние на спектры волнения разных частот дестабилизирующих факторов, таких как низкочастотные сейши, порывистый ветер, подводные турбулентности. Результаты этих измерений на частоте 100 Гц приведены на рис. 7. На рис. 7 а – представлено воздействие низкочастотных сейшей высотой ~10 мм, на рис. 7 б – порывистого ветра от 2 до 6 м/с и на рис. 7 в – внутренней турбулентности с видимым выходом на поверхность.

В присутствии помех такого рода происходит естественное гашение волнения ГКВ(КВ). В спектре ИК сенсора на частоте 100 Гц это менее выражено по сравнению с лазерным волнографом. Разница в ослаблении спектральной компоненты 100 Гц составляла 15 - 20 дБ.

Такая «устойчивость» ИК сенсора к дестабилизирующим воздействиям определяется, по-видимому, его селективными свойствами [10].

Результаты экспериментальной оценки основных параметров сенсора приведены на рис. 8.

На рис. 8, а представлена оценка влияния нелинейности характеристики преобразования (интермодуляционных искажений) ИК сенсора в режиме двухчастотного волнения. В качестве критерия предполагалось использовать уровень комбинационных гармоник. Для этого возбуждалось двухчастотное волнение от двух независимых источников с частотами  $f_1 = 15$  Гц и  $f_2 = 23$  Гц. Возбуждаемые системы волн имели примерно равные амплитуды и распространялись практически в одном направлении. Соотношение частот было выбрано равным  $f_2 / f_1 = 1,5333$  для исключения резонансного взаимодействия волн, которое происходит при соотношении частот 1,775 [11]. На двух верхних фрагментах рис. 8, а показаны спектры при раздельном возбуждении частот. На нижнем фрагменте представлен спектр при одновременном возбуждении обеих систем волнений. Измерения проводились для наихудшего случая – при больших уровнях сигналов, когда условия (3) существенно нарушены. Это видно по уровням и количеству высших гармоник. На нижнем фрагменте рис. 8, а видно, что в динамическом диапазоне ~30 дБ спектр двухчастотного волнения,

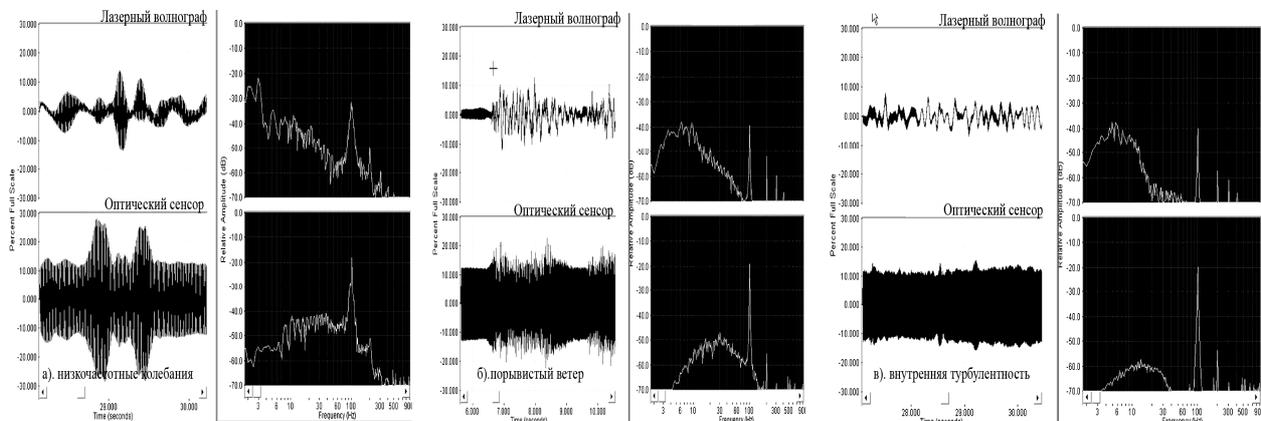


Рис. 7. Амплитудные характеристики лазерного волнографа и ИК сенсора

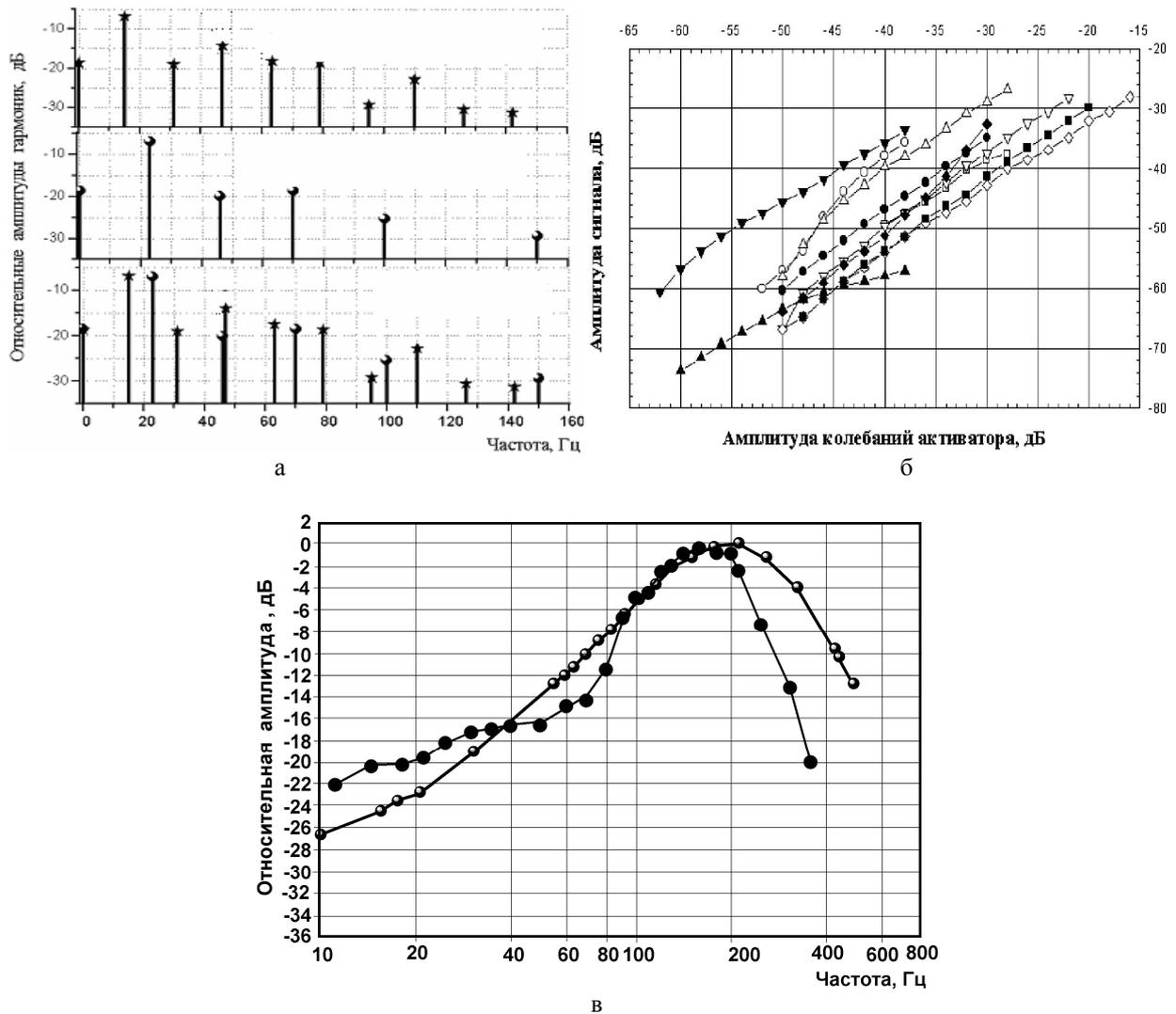


Рис. 8. Экспериментальные характеристики ИК сенсора:

а – оценка интермодуляционных искажений (● – частота 23 Гц, ★ - 15 Гц); б – амплитудные характеристики ИК сенсора (□ – 6 Гц; 1 ○ – 12 Гц; △ – 18 Гц; ▽ – 24 Гц; ◇ – 30 Гц; ■ – 50 Гц; ● – 75 Гц; ▲ – 100 Гц; ▼ – 150 Гц; ◆ – 250 Гц); в – АЧХ сенсора (○ - расчет, ● - эксперимент)

представляет собой простую сумму спектров парциальных сигналов. При существенно неравных амплитудах волн гармоники комбинационных частот также не наблюдались.

Таким образом, в интервале высот волн от  $10^{-3}$  мм (нижний порог активатора) до 1 мм (приблизительный предел условия (3)) комбинационные гармоники отсутствуют.

На рис 8, б показаны амплитудные характеристики ИК сенсора. Видно, что зависимость амплитуды сигнала ИК сенсора от амплитуды волн носит линейный характер. При аппроксимации амплитудных характеристик прямыми  $y=Ax+B$  были получены следующие усредненные по частотам значения коэффициентов:  $A_{cp}=1,24$  и  $B_{cp}=2,46$ . Отклонения от этих значений на разных частотах не превышают 1,5–2,5 дБ в динамическом диапазоне около 25 дБ.

Амплитуды волн при снятии амплитудных характеристик отсчитывались по аттенуатору возбуждающего генератора ГЗ-110 после соответствующей калибровки по лазерному волнографу.

На рис. 8, в представлены расчетная и экспериментальная АЧХ ИК сенсора. Наблюдается хорошее совпадение модельного и лабораторного экспериментов.

Более крутой спад натурной АЧХ относительно расчетной в области высоких частот связан с уменьшением эффективности волнопродуктора - на высоких частотах растет проскальзывание рабочей части активатора в воде за счет конечной вязкости жидкости.

При построении экспериментальной АЧХ в диапазоне от 10 до 40 Гц использовался линейный активатор и в диапазоне от 45 до 300 Гц – точечный

капиллярный. Необходимость смены активаторов вызвана демпфированием линейного активатора на высоких частотах и интерференцией волн от концов активатора. Излом АЧХ в области частот 40 – 55 Гц, по видимому, вызван сменой активаторов. Максимум АЧХ находится в окрестности 180 – 200 Гц для данного сенсора. Общая неравномерность характеристики составляет около 22 дБ.

Экспериментально установлено, что взаимное отклонение оптических осей излучателя и фотоприемника и общее отклонение оптической оси ИК сенсора от вертикали в диапазоне  $\pm 5^\circ$  приводят к снижению уровня сигнала на 1,2 – 2 дБ и менее, не нарушая работоспособности сенсора.

Оценка влияния поверхностно-активного вещества на работу ИК сенсора показала, что пороговым является влияние пленки толщиной около 15 – 20 мкм в диапазоне частот 40 – 100 Гц. Пленка приводила к снижению амплитуды сигнала сенсора на величину 10 – 25 дБ. Искусственное старение пленки, путем создания неоднородностей в виде локальных линз, разрывов, перепадов толщины пленки, воздушных пузырьков приводило к расширению спектра.

ИК сенсор способен обнаруживать волнение возникающее при всплытии мелкодисперсных пузырьков газов. При обнаружении газовой выделений с превышением шумов на 3 – 5 дБ для используемого в эксперименте сенсора, пороговым является волнение, создаваемое при всплытии одиночного трека пузырьков диаметром менее 2 мм, удаленного от оптической оси на расстояние более 25 см. Создаваемый при этом сигнал находится в полосе частот 15 – 35 Гц.

Важными свойствами ИК сенсора, при использовании его в естественных условиях, является его нечувствительность к юстировке, отсутствие ощутимых искажений, вносимых в процесс волнообразования, работоспособность в присутствии пленок ПАВ существенной толщины. Использование в ИК сенсоре радиоконтактного широкого назначения снижает стоимость его потери при работе в естественных условиях.

### Заключение

Математическая модель ИК сенсора получила подтверждение в лабораторных экспериментах. Полученные при этом оценки параметров сенсора, имевшего описанную выше геометрию, имели следующие значения:

- порог чувствительности к наклону волн не хуже 0,0015 в частотном диапазоне 4 – 300 Гц;
- расчетное значение нелинейных искажений имел минимум 5,6 % в полосе частот 4 – 200 Гц;
- нелинейность амплитудных характеристик не

превышала 1,5 – 2,5 дБ в динамическом диапазоне около 25 дБ (относительно уровня  $H_0/\lambda < 0,09$ ) в интервале частот 4,5 – 200 Гц;

- АЧХ сенсора имеет вид резонансной кривой с максимумом в области частот около 190 Гц.

Сопоставительный анализ параметров сенсора и прецизионного лазерного волнографа выявил их соответствие, что говорит о достаточно высоких метрологических свойствах сенсора.

ИК сенсор является селективным прибором, работающим в интервале частот, зависящем от его геометрии. Изменения размеров  $Z_0$  и  $Z_1$  приводят к изменению диапазона волновых чисел анализируемого волнения. Рассмотренный в лабораторном эксперименте макет сенсора обнаруживал волнение, имеющее  $\lambda \geq 1,9$  мм.

Использование некогерентного излучения исключает возникновение интерференционных эффектов на приемной апертуре, кроме того, применение в ИК сенсоре широкоугольных оптических приборов упрощает его юстировку.

Благодаря простоте оптической схемы, малому весу и потребляемой энергии, ИК сенсор может найти применение при измерении спектров ГКВ в лабораторных и естественных условиях, в составе мультисенсорных систем.

### Литература

1. Иванов А. Применение средств космической радиолокации для мониторинга морской добычи и транспортировки нефти / А. Иванов., А. Островский // Технологии ТЭК. – 2003. – №6. – С. 58-64.
2. Шевернев В.И. Статистическая структура поля освещенности под взволнованной границей раздела / В.И. Шевернев // Физика атмосферы и океана. - 1973. – Т. 9, № 6. – С. 596-607.
3. Николаев В.П. Статистические характеристики подводной освещенности / В.П. Николаев, О.И. Прокопов и др. // Физика атмосферы и океана. - 1972. – Т. 8, № 9. – С. 936-944.
4. Узленков А.В. Использование широкоугольной оптической системы для анализа капиллярного волнения в жидкости / А.В. Узленков // Радиофизика и электроника: сб. научн. тр. Ин-та радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2006. – Т. 11, № 3. – С. 456-466.
5. Борн М. Основы оптики / М.Борн, Э.Вольф. Изд. 2-е. Пер. с англ. - М.: Наука, 1973. – 719 с.
6. Сапожников Р.А. Теоретическая фотометрия / Р.А. Сапожников – М.: Энергия, 1977. – 264 с.
7. Lange P.A. Comparison between an amplitude measuring wire and slope measuring laser water wave gauge / P.A. Lange // Rev. Sci. Instrum. – 1982. – V. 53, №. 5. – P. 651-655.
8. Rozenberg A.D Free and bound capillary waves as microwave scatterers: laboratory studies /

*A.D. Rozenberg, M.J. Ritter. W.K. Melville et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1999. – 37(2). – P.1052-1065.*

9. *Fedorov Aleksey V. An experimental numerical study of parasitic capillary waves / Aleksey V. Fedorov, Kendall W., Melville W.K., Rosenberg A. D. // Phys. Fluids. – 1998. – 10(6). – P.1315-1323.*

10. *Узленков А.В. Оптический сенсор капиллярного волнения в воде / А.В. Узленков // Сенсорная электроника и микросистемные технологии: тез. докл. 3-й Международной научно-технической конференции, Одесса, 2 -6 июня 2008 г. – С. 108.*

11. *Филипс О.М. Динамика верхнего слоя океана / О.М. Филипс. – М.: Мир, 1969. – 267 с.*

*Поступила в редакцию 12.02.2010*

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф., зав. отделом «Распространения радиоволн в природных средах» Ф.В. Кивва, Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков.

## ІНФРАЧЕРВОНИЙ НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ СЕНСОР КАПІЛЯРНОГО ХВИЛЮВАННЯ В РІДИНІ

*О.В. Узленков*

Запропоновано використання інфрачервоної (ІЧ) ширококутної оптичної системи з відкритим каналом і некогерентним випромінюванням як сенсор капілярного хвилювання на поверхні рідини. Розглянуті фізичні особливості функціонування запропонованого ІЧ сенсора, його геометрія, визначені обмеження застосування. Приведені результати математичного моделювання і експериментального дослідження властивостей запропонованого ІЧ сенсора. Установлена хороша відповідність параметрів ІЧ сенсора і параметрів прецизійного лазерного волнографа. Відмічені наявні відмінності між ними, запропоновано пояснення спостережуваних відмінностей. Оцінені частотні, динамічні властивості та нелінійні спотворення ІЧ сенсора. Відмічена його висока чутливість до присутності поверхнево-активних речовин і газовиділень.

**Ключові слова:** фотострум, інфрачервоний світлодіод, капілярні хвилі, поверхня рідини, модуляція, світловий потік, поверхнево-активні речовини.

## INFRA-RED SEMICONDUCTOR SENSOR OF CAPILLARY WAVES IN LIQUID

*A.V. Uzlenkov*

The use of the wide-angle non-coherent optical infrared (IR) sensor of capillary waves on-water surface is offered. The physical features of functioning of the offered IR sensor in such application are considered, of its applicability are . The results of mathematical calculating and experimental research of the IR sensor are presented. Its frequency and dynamic properties are appraised. The high sensitivity of the IR sensor for surface-active substances presence is marked.

**Keywords:** photoelectric, infrared light diode, capillary waves, surface of liquid, modulation, light stream, , surface-active substances.

**Узленков Александр Валентинович** – ведущий инженер отдела физических основ радиолокации Института радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова Национальной академии наук Украины, Харьков, Украина, e-mail: uzlenkov31@ire.kharkov.ua.