

УДК 535.8, 551.466.4, 551.46.086

EDN: AXHEOY

© В. В. Баханов, В. И. Казаков, Д. Д. Разумов, М. Б. Салин, 2025

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ ПО ВИДЕОЗАПИСИ В КАНАЛЕ С ПРОЗРАЧНЫМИ СТЕНКАМИ

Измерение отклонения поверхности воды в лабораторных экспериментах стандартным методом с помощью струнного волнографа позволяет получить информацию только о временных характеристиках поверхностных волн. В данной работе предлагается метод распознавания с помощью видеозаписи профиля волны — зависимости отклонения поверхности воды от времени и координаты. Для работы метода необходимо, чтобы профиль волны был визуально наблюдаем, например, через прозрачную стенку лабораторной установки. Для реализации метода необходимы только видеокамера и источники света под водой. Разработан алгоритм определения отклонения поверхности воды, создано соответствующее программное обеспечение. Демонстрируется хорошее визуальное соответствие (алгоритм распознает то, что видит глаз человека) и совпадение по спектру с сигналом использованных в экспериментах волнографов.

*Ключевые слова:* поверхностные волны, компьютерное зрение, камера обскура, дискретный оператор Лапласа от гауссова сглаживания, дилатация

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение поверхностного волнения важно не только как интересная научная задача, но и имеет практическую значимость, потому что данные о волнении необходимы во многих прикладных областях, таких как кораблестроение, гидролокация, прогнозирование погоды и климата. Активно развиваются радиолокационные, оптические и контактные методы измерения параметров поверхностного волнения. Бесконтактные методы измерения волнения оптическими средствами используются как в лабораторных [1, 2], так и в естественных условиях [3, 4].

В определенных случаях, при специальной постановке эксперимента, алгоритм определения положения поверхности воды можно реализовать простым сравнением яркости с пороговым значением. В работе [3] вода засвечивается лазерным ножом в темном помещении или в темное время суток. Так как вода рассеивает лазерное излучение намного заметнее, чем воздух, все, что ниже границы воды, — светлое, а выше — темное. В работе [2] отдельно стоящий канал приподнят, и есть возможность наблюдать через близкую боковую стенку всю толщу воды и границу раздела, при диффузной подводной подсветке граница воды отделяет светлую область от темной.

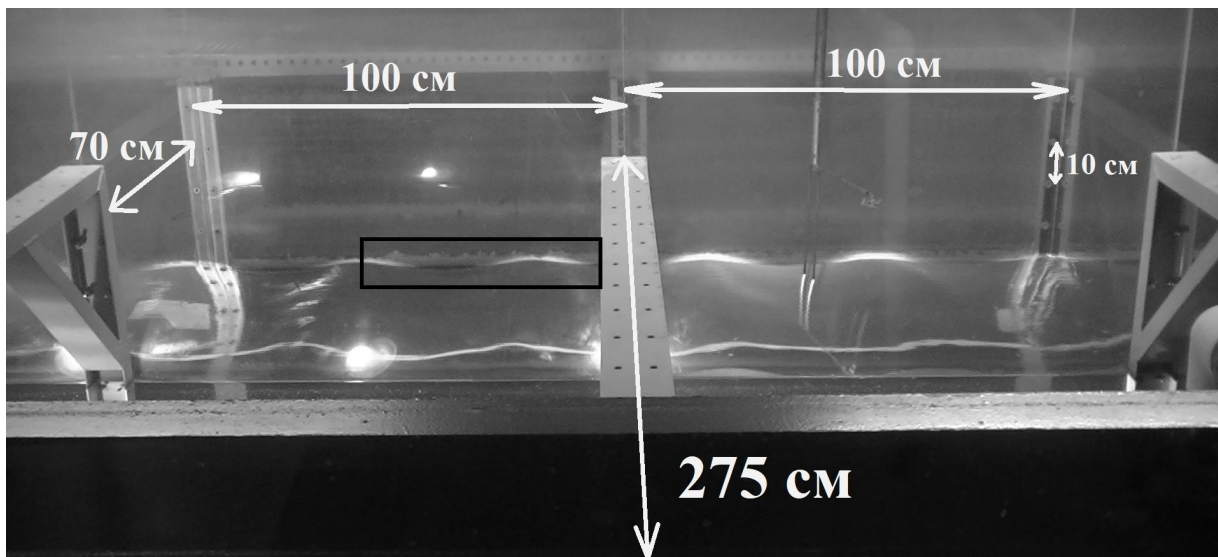
Когда яркостная картина более сложная, границу воды можно пытаться обнаружить алгоритмом "edge" распознавания краев. В работе [1] используется распознавание с помощью поиска макси-

мумов производных по направлениям от яркости. Однако на выходе алгоритма обнаружения краев получается бинарное изображение, где единица — это все краевые точки. При этом требуются дополнительные условия, чтобы исключить лишние точки: в качестве границы будут распознаны также элементы конструкции установки, блики, капли воды и загрязнения на стенке бассейна.

В данной работе для определения границы раздела воздух — вода используется похожий подход: сначала применяется алгоритм обнаружения краев, затем проводится сравнение яркости изображения с пороговыми значениями для получения дополнительных условий на принадлежность точки границе воздух — вода.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В ветроволновом канале большого термостратифицированного опытового бассейна ИПФ РАН была собрана установка для исследования трансформации поверхностного волнения на неоднородном течении. Для создания течения с одной стороны канала под поверхностью воды на глубине 5–7 см располагался инжектор течений, с другой — всасывающий клапан. Для создания поверхностных волн в канале использовался волнопродуктор, расположенный на расстоянии 6 м от инжектора течений. Характеристики поверхностного волнения измерялись несколькими калиброванными струнными волнографами и созданной для этого эксперимента оптической установкой.



**Рис. 1.** Кадр из видео (обрезан по вертикали) в эксперименте с поверхностными волнами частоты 2 Гц без течения.

Белым цветом обозначены расстояния между объектами, черной рамкой обведена обрабатываемая область, показанная на рис. 4

Сразу отметим, что данная установка и отработанные с ее помощью алгоритмы измерения смещения водной поверхности могут использоваться в других лабораторных экспериментах, где есть возможность видеофиксации изображения поверхности воды.

Видеокамера JVC Everio GZ-NM200 снимала две метровые секции канала с частотой 25 кадров в секунду, разрешением  $1920 \times 1080$  пикселей, увеличение минимальное. Камера была предварительно откалибрована путем съемки сетки  $10 \times 10$  см с известного расстояния, угловое разрешение  $\Delta\varphi = 0.02352^\circ / \text{пиксель}$ , дисторсия отсутствовала — изображение сетки не искажалось.

Для измерений описываемым способом нужно знать расстояние до измеряемой волны и угол зрения камеры на спокойную воду. Высота камеры над уровнем воды в канале — 105 см, расстояние по горизонтали от камеры до передней стенки канала — 275 см, ширина канала — 70 см, расстояние между болтами крепления стенки канала — 10 см. Для наглядности размеры отмечены на кадре из видео на рис. 1.

Задача состояла в том, чтобы с помощью машинного зрения на каждом кадре обвести "захлест" волн на задней стенке канала. Исследовались необрушивающиеся волны. По матрице изображения нужно получить однозначную функцию границы воды в пикселях  $y_p(x_p)$ , а затем пере-

считать размеры распознанной функции  $y_p(x_p)$  в реальные размеры в метрах  $y(x)$ , где  $y$  — вертикальная координата, а  $x$  — координата вдоль канала.

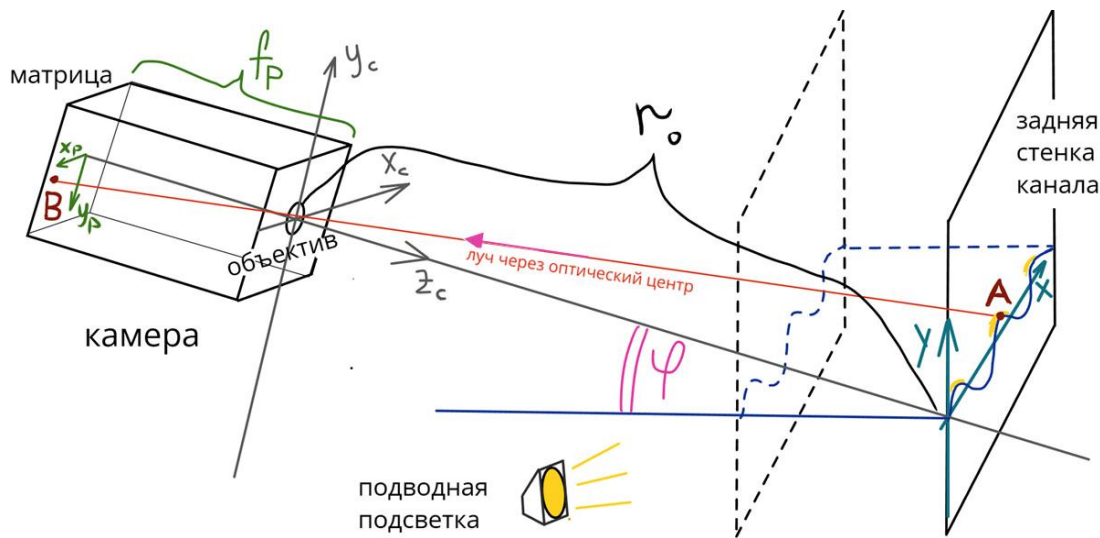
#### ПРЕОБРАЗОВАНИЕ КООРДИНАТ

Схема оптической установки и упрощенная модель видеокамеры в виде камеры-обскуры изображены на рис. 2.

Так как дисторсия отсутствует, то можно пользоваться моделью камеры-обскуры [5], координаты изображения точки в пикселях на матрице пропорциональны ее пространственным координатам относительно камеры:

$$\frac{x_p}{f_p} = \frac{x_c}{z_c}, \quad \frac{y_p}{f_p} = \frac{y_c}{z_c}, \quad (1)$$

где  $x_c, y_c$ , и  $z_c$  — пространственные координаты точки, проецируемой на матрицу камеры (точка А на рис. 2), относительно камеры (начало координат в объективе, ось  $z_c$  проходит через объектив и центр кадра);  $x_p$  и  $y_p$  — измеряемые в пикселях горизонтальные и вертикальные координаты точки на матрице относительно центра кадра (точка В на рис. 2);  $f_p$  — расстояние от объектива до матрицы.



**Рис. 2.** Схема оптической установки с камерой-обскурой.  
Точка A на задней стенке канала отображается в точку B на матрице камеры

Для удобства выразим  $f_p$  в пикселях через известное угловое разрешение  $f_p = \text{ctg}(\Delta\varphi) = 2436$  пикс.

Координаты относительно камеры связаны с координатами  $x$  и  $y$  на задней стенке бассейна:

$$x = x_c, \quad y_c = y \cos \varphi, \quad z_c = r_0 - y \sin \varphi, \quad (2)$$

где  $r_0 = 3.6$  м — расстояние от камеры до уровня спокойной воды на задней стенке по центру кадра,  $\varphi$  — угол между осью  $z_c$  и нормалью к стенке (совпадает с углом наклона камеры к горизонту). Тогда координаты на стенке бассейна можно вычислить, зная координаты пикселя на матрице следующим образом:

$$\begin{aligned} x &= \frac{r_0}{f} x_p = 1.477 \left[ \frac{\text{мм}}{\text{пикс}} \right] x_p, \\ y &\approx \frac{r_0}{f \cos \varphi} y_p = 1.544 \left[ \frac{\text{мм}}{\text{пикс}} \right] y_p. \end{aligned} \quad (3)$$

Полтора миллиметра — разрешение, достаточное для измерения поверхностных волн в этом эксперименте: амплитуда колебаний волнопродуктора — 10 мм, частота — от 1.4 до 3 Гц, соответственно длины волн — от 17 до 70 см (при отсутствии течения).

#### РАСПОЗНАВАНИЕ КРАЕВ

Алгоритм распознавания профиля работает с растровыми изображениями. Сначала видео рас-

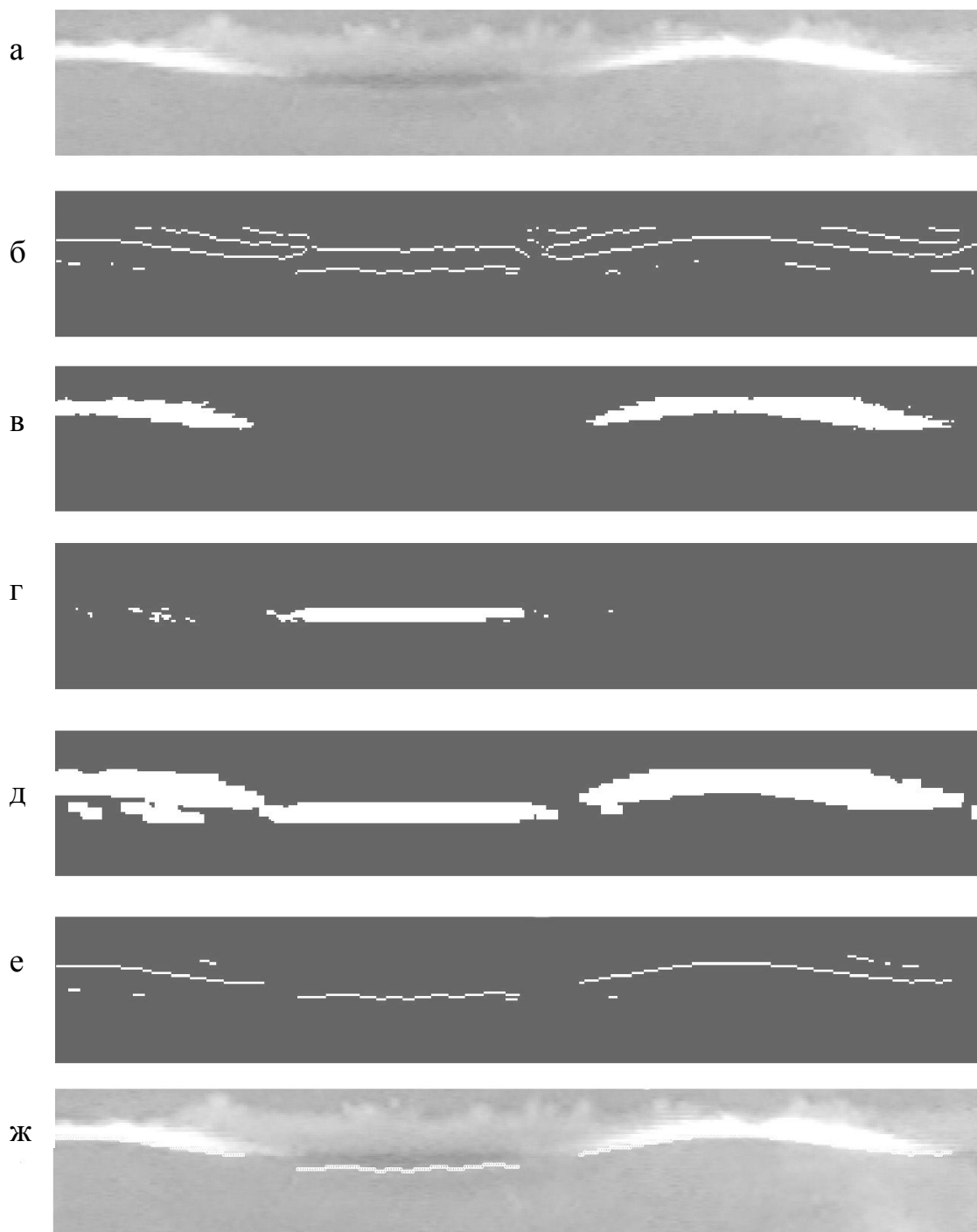
кадровывается в набор bmp-изображений с помощью FFmpeg [6]. Затем выбирается обрабатываемая область изображения и для нее подбирается набор параметров, числовых порогов. Область изображения (рис. 3, а) преобразуется в градации серого — матрицу натуральных чисел от 0 до 255  $I(x_n, y_n)$ . К ней применяется стандартный алгоритм обнаружения краев [7]. На рис. 3, б, белым цветом отмечены краевые пиксели, распознанные с помощью алгоритма "edge" MatLab, используется метод LoG (Laplacian of Gaussian).

Метод обнаружения краев заключается в свертке изображения с некоторым ядром, матрицей фильтра  $\mathbf{H}$ . В методе LoG в качестве матрицы фильтра  $\mathbf{H}$  берется дискретный оператор Лапласа от гауссова сглаживания:

$$\begin{aligned} \mathbf{H} = \text{LoG}(x_m, y_m) &= \\ &= - \left[ \frac{1}{\pi \sigma^4} \left( 1 - \frac{x_m^2 + y_m^2}{2\sigma^2} \right) \exp \left( - \frac{x_m^2 + y_m^2}{2\sigma^2} \right) \right], \end{aligned} \quad (4)$$

где квадратные скобки означают взятие целой части,  $\sigma$  — параметр сглаживания в пикселях,  $x_m$  и  $y_m$  — целочисленные координаты в пикселях в пределах  $\pm[3\sigma]$ .

Далее ищутся нули или максимумы результата свертки  $\mathbf{I} * \mathbf{H}$ . В LoG делается поиск нулей, но вместо строгого равенства надежнее найти пиксели, в которых модуль свертки меньше некоторого малого порогового значения  $thr_{edge}$ .



**Рис. 3.** Иллюстрация к алгоритму распознавания поверхности воды.

а — обрабатываемая область изображения (матрица  $\mathbf{I}$ ); б — края (матрица  $\mathbf{V}_{edge}$ ), распознанные методом LoG с порогом  $thr_{edge} = 4 \times 10^{-4}$ , сглаживание  $\sigma = 3$ ; в — точки изображения, ярче порогового значения  $thr_{light} = 120$ ; г — точки изображения, темнее порогового значения  $thr_{dark} = 80$ ; д — маска яркости (матрица  $\mathbf{V}_{bright}$ ) после дилатации и трансляции; е — точки краев, попадающие в маску яркости (матрица  $\mathbf{V}$ ); ж — выбранные в цикле точки границы **ур**, **хр** на фоне изображения

В результате попиксельного сравнения (5) получается бинарная матрица  $\mathbf{B}_{edge}(x_n, y_n)$  из значений 0 или 1, где 1 означает, что пиксель является краевым:

$$\mathbf{B}_{edge} = (|\mathbf{I} * \mathbf{H}| \leq thr_{edge}). \quad (5)$$

Альтернативные стандартные методы обнаружения краев, основанные на поиске максимумов после свертки с фильтром дискретного оператора производной по направлению, с нашей точки зрения, менее подходят для данной задачи, так как с большей вероятностью обнаруживают края именно в заданном направлении. Например, при использовании операторов Собеля и Превитта изображение краев получается из вертикальных и горизонтальных линий, для оператора Кэнни еще добавляются линии под  $45^\circ$ . Наклон необрушивающихся волн меняется плавно и обычно не превышает  $30^\circ$  (для волн Стокса это доказано [8]). Возможно, оператор, специально сконструированный для поиска линий с наклонами к горизонту в некотором небольшом диапазоне, в этой задаче будет работать лучше, чем оператор Лапласа от гауссова сглаживания.

#### МАСКА ЯРКОСТИ

Обнаруженная на предыдущем этапе граница — это матрица из 0 и 1, где столбцы — вертикальные координаты пикселей на изображении, строки — горизонтальные координаты. В одном столбце может быть несколько единиц, а нам нужна однозначная функция. Необходимо исключить как можно больше лишних единиц, краев, не лежащих на границе воздуха и воды.

Во-первых, все процедуры делаются в ограниченном по вертикали диапазоне. Во-вторых, из-за фокусировки подводной подсветки поверхностью воды гребни волн — светлые, а впадины — темные. На рис. 3, в, отмечены пиксели ярче порогового значения  $thr_{light} = 120$ , а на рис. 3, г — темнее значения  $thr_{dark} = 80$ . Пороговые значения являются входными параметрами метода и на данном этапе разработки алгоритма подбираются экспериментально. Поиск краев на рис. 3 имеет смысл делать от впадины до гребня поверхностной волны, поэтому поиск светлых пикселей делается в интервале по высоте выше спокойной границы воды до максимальной предполагаемой величины гребня, аналогично поиск темных — в интервале ниже спокойной воды до максимальной величины впадины.

Граница воды проходит под светлыми областями над гребнями и под темными областями у впадин. Даже при правильно выставленном пороге

темные или светлые области могут быть разрежены, поэтому стоит их "размазать", сделав сплошными, и сдвинуть вниз (рис. 3, д). Бинарную матрицу, маску яркости, которая выступает в качестве дополнительного условия на область, где могла бы проходить граница воды, можно записать как:

$$\mathbf{B}_{bright} = (((\mathbf{I} \geq thr_{light}) \cup (\mathbf{I} \leq thr_{dark})) \oplus \mathbf{s})_v, \quad (6)$$

где  $\oplus$  обозначает морфологическую операцию дилатации [3],  $\mathbf{s}$  — структурный элемент (здесь — прямоугольник из единиц  $8 \times 4$ ), нижний индекс  $v$  означает трансляцию на вектор  $v$  (здесь  $[0, 4]$  — сдвиг вниз на четыре пикселя).

#### ВЫБОР ТОЧЕК ГРАНИЦЫ ВОДЫ

Для сужения области поиска краевых пикселей, которые действительно являются границей воды, применяется логическое "И" (7) между краями, обнаруженными методом LoG (5) и маской яркости (6). На рис. 3, е, изображен результат этой операции, т.е. те белые пиксели из рис. 3, б, которые попадают в белую область на рис. 3, д:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_{edge} \cap \mathbf{B}_{bright}. \quad (7)$$

На следующем этапе выполняется цикл *for*, число шагов которого равно числу столбцов в матрице  $\mathbf{B}$  (т.е. длине изображения по горизонтали), внутри цикла есть несколько условий *if*. Будем последовательно перебирать столбцы  $\mathbf{B}$ , начиная с первого (либо с последнего), пока не встретится столбец, сумма чисел в котором равна единице, тогда происходит первая запись в массивы  $\mathbf{yр}$  и  $\mathbf{xр}$  вертикальных и горизонтальных координат границы воды. Мы записываем в массив  $\mathbf{xр}$  номер столбца, а в массив  $\mathbf{yр}$  — положение единицы в столбце. Возьмем следующий столбец и найдем сумму чисел в нем. Если она больше или равна единице, то это потенциальный кандидат на запись в массив: будем записывать в  $\mathbf{xр}$  номер этого столбца и в  $\mathbf{yр}$  положение единицы, когда она единственная, либо то положение точки границы, для которого модуль разницы с последним элементом в массиве  $\mathbf{yр}$  наименьший. Запись не производится, если точка-кандидат дает слишком большой скачок координаты (взяв порог больше трех пикселей,  $yр[j+1] - yр[j] > 3$ ) и слишком большую производную (выбран порог модуля производной 0.3,

$$|(yр[j+1] - yр[j]) / (xр[j+1] - xр[j])| > 0.3).$$

В результате заполняются два массива  $\mathbf{yр}$  и  $\mathbf{xр}$  вертикальных и горизонтальных координат границы

воды. На рис. 3, ж, белые линии сформированы отобранными по описанному выше алгоритму краевыми пикселями из рис. 3, д. При этом некоторые области поверхности воды оказались пропущены, потому что или "edge" не нашел края (такое бывает, когда границу плохо видно на глаз), или в этой области недостаточно яркости для прохождения порога яркости, или точки отброшены при проходе по горизонтали алгоритмом как не удовлетворяющие вышеописанным критериям.

Граница области поверхности воды восстанавливается в пропущенных местах с помощью интерполяции Акимы [9], которая в данном случае лучше сплайн-интерполяции, т.к. более устойчива к выбросам. Также, чтобы избавиться от выбросов, слева и справа за краями кадра добавляется по две точки на уровне спокойной воды. На рис. 4 изображена интерполированная на всей наблюдаемой камерой области поверхность воды на фоне задней стенки канала.

На рис. 5 представлена высота поверхности воды в зависимости от времени и горизонтальной координаты, пересчитанная из пикселей в сантиметры по формулам (3). На рис. 5, а, показаны ре-

зультаты обработки эксперимента с поверхностными волнами частотой 2 Гц, без течения; на рис. 5, б, — результаты обработки эксперимента с поверхностными волнами частотой 1.4 Гц при наличии неоднородного течения. Картина для поверхностных волн без течения (рис. 5, а) регулярна: бегущие в одну сторону вершины волн — светлые параллельные наклонные линии. Заметны искажения, вызванные особенностью обработки в районе  $x = 0$  см и  $x = 42$  см, где задняя стенка загорожена балкой канала и волнографом соответственно. Белые и черные тонкие горизонтальные линии появляются при неправильной обработке области кадра алгоритмом, когда он "срывается" в блик на воде или на стенке канала.

Для длинных поверхностных волн на неоднородном течении (рис. 5, б) заметна трансформация их фазовой скорости — меняется наклон светлых линий с координатой, на бегущие влево волны также накладывается отраженная бегущая вправо волна меньшей амплитуды, что приводит к формированию узлов — провалов почти до нуля вдоль светлой наклонной линии.

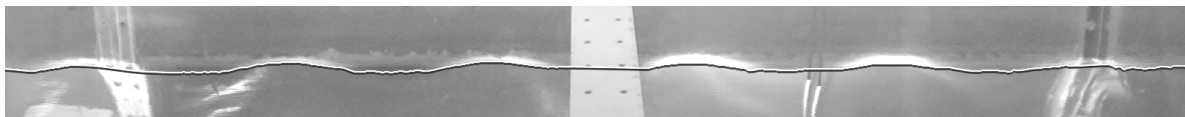


Рис. 4. Интерполированная поверхность воды на фоне задней стенки канала (черно-белая линия).

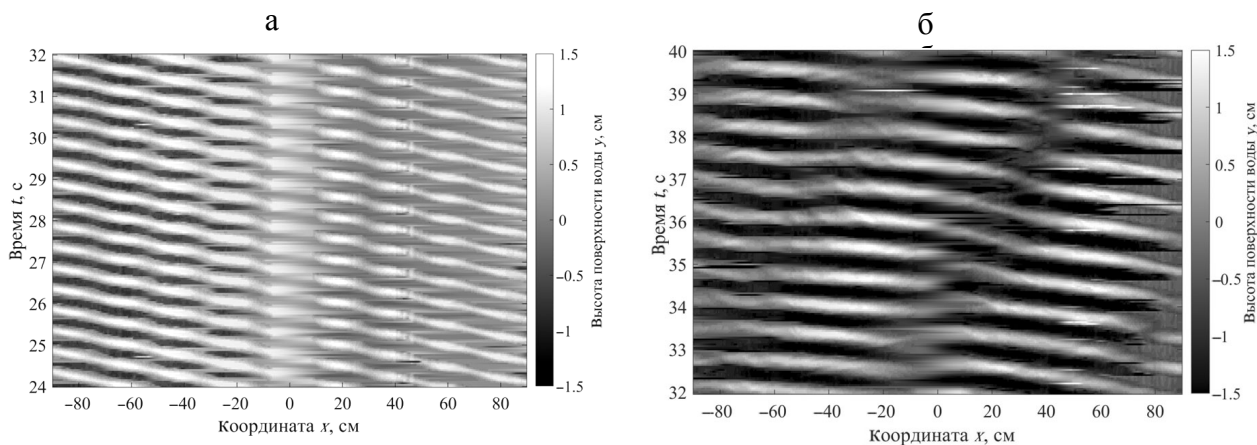


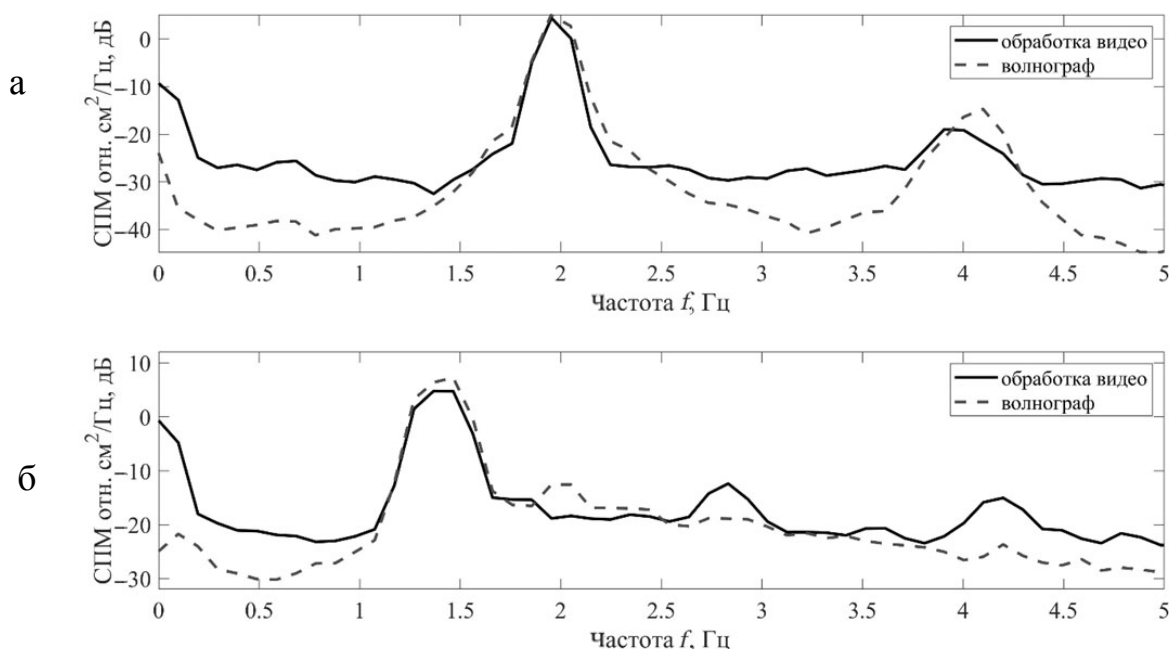
Рис. 5. Пример результата обработки видео алгоритмом.

а — волны  $\lambda = 40$  см, частота 2 Гц, без течения; б — волны  $\lambda = 70$  см (самые длинные из воспроизводимых в эксперименте), частота 1.4 Гц, в присутствии неоднородного течения. Высота отклонения поверхности воды на стенке канала в сантиметрах показана в градациях серого на плоскости (горизонтальная координата — время); ноль — посередине между секциями канала, ось  $x$  направлена вправо, волны бегут справа налево

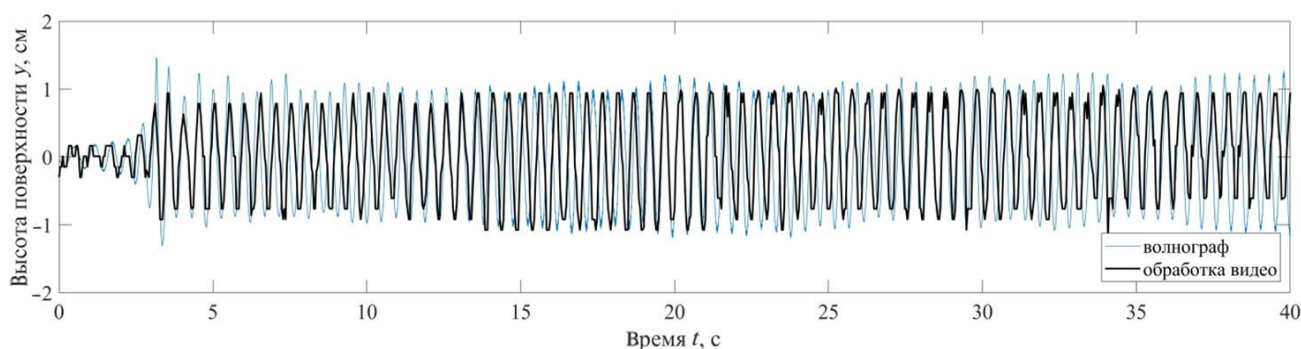
Для сигнала струнного волнографа и высоты смещения водной поверхности у задней стенки канала, полученной с помощью оптической установки, была вычислена спектральная плотность мощности (СПМ) по фрагменту записи длительностью 100 с в середине эксперимента методом периодограммы Уэлча (Welch) с окном 10 с перекрытием окон 15/16. Сравнение спектров для тех же экспериментов, что и на рис. 5, представлено на рис. 6. Метод демонстрирует близкое совпадение пиков СПМ по частоте, ширине и амплитуде. Мы предполагаем, что подъема в спектре волнения, оцененного по видео, в области 0 Гц можно

избежать, если использовать штатив со стабилизацией.

Прямое сравнение высоты водной поверхности, измеренной в одной и той же точке двумя методами, к сожалению, сделать не получилось, т.к. струна волнографа была натянута посередине канала и сам волнограф загораживал заднюю стенку. Тем не менее на рис. 7 на одном графике изображены осциллограммы, полученные двумя методами в близких точках для опыта с поверхностными волнами частотой 2 Гц без течения.



**Рис. 6.** Спектральные плотности мощности поверхностного волнения в точке, полученные при обработке видео и по записи сигнала волнографа. Параметры экспериментов (а) и (б) такие же, как на рис. 5



**Рис. 7.** Сравнение осциллограмм волнения в точке, измеренной струнным волнографом и полученной по обработке видео для эксперимента "поверхностные волны частотой 2 Гц, без течения" (см. рис. 5, а; 6, а)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан легко реализуемый метод дистанционного оптического измерения параметров поверхностных волн для лабораторных экспериментов. В отличие от стандартных методов измерения с помощью струнных волнографов, данный метод позволяет определять не только временные характеристики поверхностных волн, но и пространственные. Это становится принципиальным в экспериментах, в которых дисперсионное соотношение между периодом и длиной поверхностных волн становится сложным, например, вследствие воздействия неоднородных течений или нелинейности поверхностных волн.

Применение подхода в целом может быть намного шире, чем для конкретного канала и волн с конкретными параметрами в этом канале, снятых конкретной камерой. Подход заключается в:

- 1) калибровке камеры и измерении расстояния до объекта видеосъемки;
- 2) выделении границ на кадре одной из разновидностей стандартного метода обнаружения краев "edge";
- 3) введении дополнительных условий на точки границы, здесь — это ограничение по вертикали и канал яркости (для естественных условий, таких как захлест волн на вертикальной стенке пирса, можно попробовать использовать канал цвета);
- 4) применении логики выбора точек, принадлежащих границе воздух — вода;
- 5) использовании интерполяции.

**Финансирование**

Исследование поддержано грантом Российского научного фонда № 24-27-00363, <https://rscf.ru/project/24-27-00363/>.

**Благодарности**

В исследованиях использовано оборудование "Уникальной научной установки Комплекс крупномасштабных геофизических стендов ИПФ РАН".

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Cao R., Padilla E.M., Fang Y., Callaghan A. Identification of the free surface for unidirectional nonbreaking water waves from side-view digital images // IEEE J. Oceanic Eng. 2025. Vol. 50, no. 1. P. 204–212. DOI: 10.1109/JOE.2024.3467312

2. Ehlers S., Hoffmann N., Tang T., Callaghan A.H., Cao R., Padilla E.M., Fang Y., Stender M. Physics-informed neural networks for phase-resolved data assimilation and prediction of nonlinear ocean waves // Phys. Rev. Fluids. 2025. Vol. 10, no. 9. Id. 094901. P. 1–29. DOI: 10.1103/ytty-pvys
3. Стерлядкин В.В., Куликовский К.В. Измерение капиллярных волн лазерным волнографом // Российский технологический журнал. 2022. Т. 10, № 5. С. 100–110. DOI: 10.32362/2500-316X-2022-10-5-100-110
4. Баханов В.В., Разумов Д.Д., Салин М.Б. Определение параметров спектра поверхностного волнения с использованием видеосъемки в естественном свете // Научное приборостроение. 2025. Т. 35, № 1. С. 93–98. URL: <https://iairas.ru/mag/2025/full1/Art11.pdf>
5. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications, 2<sup>nd</sup> ed. Cham: Springer Nature, Switzerland, 2022. 925 p. DOI: 10.1007/978-3-030-34372-9
6. Программный пакет для работы с видео FFmpeg (дата обращения 11.11.2025). URL: [https://ffmpeg.org/faq.html#How-do-I-encode-movie-to-single-pictures\\_003f](https://ffmpeg.org/faq.html#How-do-I-encode-movie-to-single-pictures_003f)
7. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital Image Processing, 4th ed. New York: Pearson, 2018. 1024 p.
8. Плотников П.И. Обоснование гипотезы Стокса в теории поверхностных волн // Докл. АН СССР. 1983. Т. 269, № 1. С. 80–83. URL: <https://www.mathnet.ru/links/61f85cbaad3eb49b6c6a51cc29592609/dan45974.pdf>
9. Akima H. A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures // JACM. 1970. Vol. 17, no. 4. P. 589–602. URL: <http://www.leg.ufpr.br/lib/exe/fetch.php/wiki:internas:biblioteca:akima.pdf>

**Федеральный исследовательский центр "Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН", Нижний Новгород, Россия**

Контакты: Разумов Дмитрий Дмитриевич, [ddrazumov@ipfran.ru](mailto:ddrazumov@ipfran.ru)

Материал поступил в редакцию 29.11.2025

## VIDEO RECOGNITION OF SURFACE WAVE PROFILE IN A CHANNEL WITH TRANSPARENT WALLS

V. V. Bakhanov, V. I. Kazakov, D. D. Razumov, M. B. Salin

*Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the RAS,  
Nizhny Novgorod, Russia*

In laboratory experiments with waves on the surface of water, measuring the height at a single point is not always sufficient, for example when using a string wave recorder. The paper proposes a method for analyzing the wave profile - the relationship between height, time, and position. For this method to be effective, the wave profile must be visible, for instance, through a transparent wall or from above the water's surface. Additional equipment required for this method includes a video camera, underwater lights, and a measuring tape. A good match is achieved (the algorithm recognizes what the human eye can see) and there is a match in the waveform spectrum.

**Keywords:** surface waves, computer vision, pinhole camera, Laplacian of Gaussian edge detection, dilation

### REFERENCES

1. Cao R., Padilla E.M., Fang Y., Callaghan A. Identification of the free surface for unidirectional nonbreaking water waves from side-view digital images. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 2025, vol. 50, no. 1, pp. 204–212. DOI:10.1109/JOE.2024.3467312
2. Ehlers S., Hoffmann N., Tang T., Callaghan A.H., Cao R., Padilla E.M., Fang Y., Stender M. Physics-informed neural networks for phase-resolved data assimilation and prediction of nonlinear ocean waves. *Phys. Rev. Fluids.*, 2025, vol. 10, no. 9, id. 094901, pp. 1–29. DOI: 10.1103/ytty-pvys
3. Sterlyadkin V.V., Kulikovskiy K.V. [Measurement of capillary waves with a laser wave recorder]. *Rossiiskii Tekhnologicheskii Zhurnal* [Russian Technological Journal], 2022, vol. 10, no. 5, pp. 100–110. DOI: 10.32362/2500-316X-2022-10-5-100-110 (In Russ.).
4. Bakhanov V.V., Razumov D.D., Salin M.B. [Determination of surface wave spectrum parameters using video recording in natural light]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2025, vol. 35, no. 1, pp. 93–
98. URL: <https://iairas.ru/mag/2025/full1/Art11.pdf> (In Russ.).
5. Szeliski R. *Computer Vision: Algorithms and Applications*, 2<sup>nd</sup> ed. Cham: Springer Nature, Switzerland, 2022. 925 p. DOI: 10.1007/978-3-030-34372-9
6. FFmpeg Frequently Asked Questions (accessed 11.11.2025) URL: [https://ffmpeg.org/faq.html#How-do-I-encode-movie-to-single-pictures\\_003f](https://ffmpeg.org/faq.html#How-do-I-encode-movie-to-single-pictures_003f)
7. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing*, 4th ed. New York: Pearson, 2018. 1024 p.
8. Plotnikov P.I. [Justification of the Stokes's hypothesis in the theory of surface waves]. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* [Proc. Acad. Sci. USSR], 1983, vol. 269, no. 1, pp. 80–83. URL: <https://www.mathnet.ru/links/61f85cbaad3eb49b6c6a51cc29592609/dan45974.pdf>. (In Russ.).
9. Akima H. A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures // *JACM*. 1970. V. 17, no. 4. P. 589–602. URL: <http://www.leg.ufpr.br/lib/exe/fetch.php/wiki:internas:biblioteca:akima.pdf>

Contacts: Razumov Dmitrii Dmitrievich,  
ddrazumov@ipfran.ru

Article received by the editorial office on 29.11.2025

## INTRODUCTION

Studying surface waves is important not only as an interesting scientific problem, but also has practical significance, because wave data are needed in many applied fields, such as shipbuilding, sonar, weather forecasting, and climate change. Radar, optical, and contact methods for measuring surface wave parameters are actively developing. Non-contact methods for measuring waves using optical means are used both in laboratory [1, 2] and in natural conditions [3, 4].

In certain cases, with a specially designed experiment, an algorithm for determining the position of the water surface can be implemented by simply comparing the brightness with a threshold value. In [3], water is illuminated with a laser knife in a dark room or at night. Since water scatters laser radiation much more noticeably than air, everything below the water line is light, and above it is dark. In [2], a free-standing channel is elevated, allowing observation of the entire water column and the interface through the rear side wall. In diffuse underwater illumination, the water boundary separates the light from the dark region.

When the luminance pattern is more complex, the water boundary can be detected using an edge detection algorithm. In [1], edge detection is used by searching for the maxima of directional derivatives of brightness. However, the edge detection algorithm produces a binary image, where the value 1 represents all edge points. This requires additional conditions to eliminate unnecessary points: structural elements of the installation, glare, water droplets, and contaminants on the pool wall will also be recognized as boundaries.

In this study, a similar approach is used to determine the air-water interface: first, an edge detection algorithm is applied, then image brightness is compared with threshold values to derive additional conditions for determining whether a point belongs to the air-water interface.

## EXPERIMENTAL SETUP

A setup for studying the transformation of surface waves in a non-uniform flow was assembled in the wind-wave channel of a large thermostated experimental tank at the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences. To generate current, a current injector was located below the water surface at a depth of 5-7 cm on one side of the channel, and a suction valve on the other. A wave generator, located 6 m from the current injector, was used to generate surface waves in the channel. Surface wave characteristics were measured using several calibrated string wave recorders and an optical setup designed specifically for this experiment.

It should be noted that this setup and the algorithms developed for measuring water surface displacement can be used in other laboratory experiments where video recording of the water surface is possible.

A JVC Everio GZ-HM200 video camera filmed two meter-long sections of the channel at 25 frames per second, with a resolution of  $1920 \times 1080$  pixels and minimal zoom. The camera was pre-calibrated by filming a  $10 \times 10$  cm grid from a known distance. The angular resolution was  $\Delta\varphi = 0.02352^\circ/\text{pixel}$ , and there was no distortion — the grid image was unaffected.

Measurements using this method require knowledge of the distance to the wave being measured and the camera's angle of view on calm water. The camera's height above the water level in the channel is 105 cm, the horizontal distance from the camera to the front wall of the channel is 275 cm, the channel width is 70 cm, and the distance between the channel wall mounting bolts is 10 cm. For clarity, the dimensions are marked on the video frame in Fig. 1.

**Fig. 1.** A vertically cropped video frame from an experiment with 2 Hz surface waves without current. The distances between objects are shown in white, and the black frame outlines the treated area shown in Fig. 4

The task was to use machine vision to trace the wave "overlap" on the rear wall of the channel in each frame. Non-breaking waves (solitons) were studied. Using the image matrix, we needed to obtain a unique function of the water boundary in pixels,  $y_p(x_p)$ , and then convert the dimensions of the recognized function  $y_p(x_p)$  into actual dimensions in meters,  $y(x)$ , where  $y$  is the vertical coordinate and  $x$  is the coordinate along the channel.

## COORDINATE TRANSFORMATION

The diagram of the optical setup and a simplified model of an obscura (pinhole) camera are shown in Fig. 2.

Since there is no distortion, the obscura camera model [5] can be used; the pixel coordinates of a point on the sensor are proportional to its spatial coordinates relative to the camera:

$$\frac{x_p}{f_p} = \frac{x_c}{z_c}, \quad \frac{y_p}{f_p} = \frac{y_c}{z_c}, \quad (1)$$

where  $x_c$ ,  $y_c$ , and  $z_c$  are the spatial coordinates of the point projected onto the camera sensor (point A in Fig. 2), relative to the camera (in the lens, the  $z_c$  axis passes through the lens and the center of the frame);  $x_p$  and  $y_p$  are the horizontal and vertical coordinates of

the point on the sensor, measured in pixels, relative to the center of the frame (point B in Fig. 2);  $f_p$  is the distance from the lens to the sensor.

**Fig. 2.** Diagram of the optical setup with an obscura camera. Point A on the rear wall of the channel is mapped to point B on the camera sensor

For convenience, we express  $f_p$  in pixels using the known angular resolution:  $f_p = \text{ctg}(\Delta\varphi) = 2436$  pixels.

The coordinates relative to the camera are connected to the  $x$  and  $y$  coordinates on the rear wall of the pool:

$$x = x_c, \quad y_c = y \cos \varphi, \quad z_c = r_0 - y \sin \varphi, \quad (2)$$

where  $r_0 = 3.6$  m is the distance from the camera to the still water level on the rear wall at the center of the frame,  $\varphi$  is the angle between the  $z_c$  axis and the normal to the wall (coincides with the camera's angle to the horizon). Then the coordinates on the pool wall can be calculated from the pixel coordinates on the matrix as follows:

$$\begin{aligned} x &= \frac{r_0}{f} x_p = 1.477 \left[ \frac{\text{MM}}{\text{Пикс}} \right] x_p, \\ y &\approx \frac{r_0}{f \cos \varphi} y_p = 1.544 \left[ \frac{\text{MM}}{\text{Пикс}} \right] y_p. \end{aligned} \quad (3)$$

One and a half millimeters is the resolution sufficient for measuring surface waves in this experiment: the wave generator oscillation amplitude is 10 mm, the frequency is from 1.4 to 3 Hz, and the wavelengths, respectively, are from 17 to 70 cm (if there is no current).

## EDGE DETECTION

The profile recognition algorithm works with raster images. First, the video is framed into a set of BMP images using FFmpeg [6]. Then, the image region to be processed is selected, and a set of parameters and numerical thresholds is selected for it. The image region (Fig. 3, a) is converted to grayscale — a matrix of natural numbers from 0 to 255  $\mathbf{I}(x_n, y_n)$ . A standard edge detection algorithm is applied to it [7]. In Fig. 3, b, edge pixels, detected using the MatLab "edge" algorithm, are marked in white; the LoG (Laplacian of Gaussian) method is used.

The edge detection method involves convolving an image with a kernel, the filter matrix  $\mathbf{H}$ . In the LoG method, the filter matrix  $\mathbf{H}$  is the discrete Laplace operator of Gaussian smoothing:

$$\begin{aligned} \mathbf{H} &= \text{LoG}(x_m, y_m) = \\ &= - \left[ \frac{1}{\pi \sigma^4} \left( 1 - \frac{x_m^2 + y_m^2}{2\sigma^2} \right) \exp \left( - \frac{x_m^2 + y_m^2}{2\sigma^2} \right) \right], \end{aligned} \quad (4)$$

where square brackets denote the integer part,  $\sigma$  is the smoothing parameter in pixels, and  $x_m$  and  $y_m$  are integer coordinates in pixels within  $\pm[3\sigma]$ .

**Fig. 3.** Illustration of the water surface recognition algorithm.

a — image region being processed ( $\mathbf{I}$  matrix);  $\delta$  — edges (matrix  $\mathbf{B}_{edge}$ ) recognized by the LoG method with the threshold  $thr_{edge} = 4 \times 10^{-4}$ , smoothing  $\sigma = 3$ ; b — image points brighter than the threshold value  $thr_{light} = 120$ ; r — image points darker than the threshold value  $thr_{dark} = 80$ ; d — brightness mask ( $\mathbf{B}_{bright}$  matrix) after dilation and translation; e — edge points falling into the brightness mask ( $\mathbf{B}$  matrix); ж — the boundary points  $\mathbf{yp}$ ,  $\mathbf{xp}$  selected in the loop against the background of the image

Next, the zeros or maxima of the convolution  $\mathbf{I} * \mathbf{H}$  result are searched for. In LoG, zeros are searched for, but instead of strict equality, it is more reliable to determine pixels in which the convolution modulus is less than a small threshold value,  $thr_{edge}$ .

The pixel-by-pixel comparison (5) yields a binary matrix  $\mathbf{B}_{edge}(x_n, y_n)$  of values 0 or 1, where 1 indicates that the pixel is an edge pixel:

$$\mathbf{B}_{edge} = \left( |\mathbf{I} * \mathbf{H}| \leq thr_{edge} \right). \quad (5)$$

Alternative standard edge detection methods based on finding maxima after convolution with a discrete directional derivative filter are, in our opinion, less suitable for this task, since they are more likely to detect edges in a given direction. For example, using the Sobel and Prewitt operators, the edge image is obtained from vertical and horizontal lines; for the Canny operator, lines at  $45^\circ$  are added. The slope of non-breaking waves (solitons) changes smoothly and usually does not exceed  $30^\circ$  (this has been proven for Stokes waves [8]). Perhaps an operator specifically designed to find lines with slopes to the horizon within a small range will perform better in this task than the Laplace operator from Gaussian smoothing.

## BRIGHTNESS MASK

The boundary detected in the previous step is a matrix of 0 and 1, where the columns are the vertical coordinates of pixels in the image and the rows are the horizontal coordinates. A single column can contain several 1s, but we need a single-valued function. It is

necessary to exclude as many extra 1s as possible, i.e., edges that do not lie on the air-water boundary.

First, all procedures are performed within a limited vertical range. Second, due to the focusing of underwater illumination by the water surface, wave crests are light and troughs are dark. Figure 3, b, shows pixels that are brighter than the threshold value  $thr_{light} = 120$ , and Figure 3, r — that are darker than the value  $thr_{dark} = 80$ . The threshold values are input parameters of the method and are selected experimentally at this stage of algorithm development. It makes sense to search for edges in Figure 3 from the trough to the crest of the surface wave, so the search for light pixels is performed in the height interval above the calm water boundary up to the maximum estimated crest height, and similarly, the search for dark pixels is performed in the interval below the calm water up to the maximum basin depth.

The water boundary passes under the light areas above the crests and under the dark areas near the troughs. Even with a correctly set threshold, dark or light areas may be sparse, so it is worth "smearing" them, making them solid, and shifting them downward (Figure 3, d). A binary matrix, a brightness mask, which acts as an additional condition on the region where the water boundary could pass, can be written as:

$$\mathbf{B}_{bright} = \left( \left( (\mathbf{I} \geq thr_{light}) \cup (\mathbf{I} \leq thr_{dark}) \right) \oplus \mathbf{s} \right)_v, \quad (6)$$

where  $\oplus$  denotes the morphological dilation operation [3],  $\mathbf{s}$  is a structural element (here, a  $8 \times 4$  rectangle of 1), and the subscript denotes the relation to the vector  $\mathbf{v}$  (here,  $[0, 4]$  is a downward shift by four pixels).

#### SELECTING WATER BOUNDARY POINTS

To narrow the search area for edge pixels that actually represent the water boundary, a logical "AND" (7) is applied between the edges detected by the LoG method (5) and the brightness mask (6). Figure 3, e, shows the result of this operation, i.e., the white pixels from Fig. 3, b, that fall within the white area in Fig. 3, d:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_{edge} \cap \mathbf{B}_{bright}. \quad (7)$$

The next step involves executing a *for* loop, the number of steps of which is equal to the number of columns in matrix  $\mathbf{B}$  (i.e., the horizontal length of the image). Within the loop, there are several *if* conditions. We'll iterate through the columns  $\mathbf{B}$  sequentially, starting with the first (or last) one until we encounter a column which sum equals one, then the first entry into the  $\mathbf{yp}$  and  $\mathbf{xp}$  arrays of vertical and horizontal coordinates of the water boundary occurs. We enter the column number to the  $\mathbf{xp}$  array, and the position of

the one in the column to the  $\mathbf{yp}$  array. We take the next column and calculate the sum of the numbers in it. If it is greater than or equal to 1, then it is a potential candidate for entering the array: we enter this column number to  $\mathbf{xp}$  and the position of the 1 in  $\mathbf{yp}$  when it is the only, or the position of the boundary point for which the absolute value of the difference with the last element in the  $\mathbf{yp}$  array is the smallest. The input is not performed if the candidate point yields too large coordinate jump (a threshold greater than three pixels is chosen,  $yp[j+1] - yp[j] > 3$  and too large derivative (a threshold of 0.3 is chosen for the absolute value of the derivative,

$$|(yp[j+1] - yp[j]) / (xp[j+1] - xp[j])| > 0.3).$$

As a result, two arrays,  $\mathbf{yp}$  and  $\mathbf{xp}$ , of the vertical and horizontal coordinates of the water boundary are filled. In Figure 3, ж, the white lines are formed by the edge pixels from Figure 3, д, selected using the algorithm described above. However, some areas of the water surface were missed because either the "edge" function did not find an edge (this happens when the boundary is poorly visible to the eye), or the area lacks sufficient brightness to pass the brightness threshold, or the points were rejected by the algorithm during the horizontal scan as not satisfying the above-described criteria.

The boundary of the water surface area is reconstructed in the missed locations using Akima interpolation [9], which in this case is better than spline interpolation because it is more robust to outliers. Also, to eliminate outliers on the left and right edges of the frame, two points are added at the level of calm water. Figure 4 shows the water surface interpolated over the entire area observed by the camera against the background of the rear wall of the canal.

**Fig. 4.** Interpolated water surface against the back wall of the channel (black and white line).

Figure 5 shows the water surface height as a function of time and horizontal coordinate, converted from pixels to centimeters using formulas (3). Figure 5, a, shows the processing results for an experiment with surface waves at a frequency of 2 Hz, without current; Figure 5, б, shows the processing results for an experiment with surface waves at a frequency of 1.4 Hz in the presence of a non-uniform current. The pattern for surface waves without current (Fig. 5, a) is regular: the wave crests traveling in the same direction are light parallel inclined lines. Distortions caused by the processing feature are noticeable in the region of  $x = 0$  cm and  $x = 42$  cm, where the rear wall is blocked by the channel beam and the wave recorder, respectively. Thin white and black horizontal lines

appear when the algorithm incorrectly processes a region of the frame, causing it to "break down" into a highlight on the water or channel wall.

**Fig. 5.** An example of the result of video processing by the algorithm.

a — waves  $\lambda = 40$  cm, a frequency of 2 Hz, no current; 6 — waves  $\lambda = 70$  cm (the longest waves reproduced in the experiment), a frequency of 1.4 Hz, with a non-uniform current. The height of the water surface deviation on the channel wall in centimeters is shown in grayscale on the plane (horizontal coordinate–time); zero is the midpoint between the channel sections, the  $x$ -axis is directed to the right, and the waves travel from right to left

For long surface waves in a non-uniform current (Fig. 5, 6), a transformation of their phase velocity is noticeable: the slope of the light lines changes with the coordinate; a reflected wave traveling to the right of smaller amplitude is superimposed on the left-traveling waves, leading to the formation of nodes — dip points almost to zero along the light inclined line.

For the string wave recorder signal and the water surface displacement height at the rear wall of the channel, obtained using an optical setup, the power spectral density (PSD) was calculated from a 100-second recording fragment in the middle of the experiment by means of the Welch periodogram method with a window 10 and overlap of windows 15/16. A comparison of the spectra for the same experiments as in Fig. 5 is shown in Fig. 6.

**Fig. 6.** Power spectral density of surface waves at a point, obtained by video processing and from the wave recorder signal.

The parameters of experiments (a) and (6) are the same as in Fig. 5

The method demonstrates close agreement between the PSD peaks in frequency, width, and amplitude. We hypothesize that the increase in the wave spectrum estimated from the video at 0 Hz can be avoided by using a stabilized tripod.

Unfortunately, a direct comparison of the water surface height measured at the same point using the two methods was not possible, because the wave recorder string was stretched across the middle of the channel, and the wave recorder itself obscured the rear wall. Nevertheless, Figure 7 displays waveforms obtained by both methods at close points for the experiment with 2 Hz surface waves without current on a single graph.

**Fig. 7.** Comparison of oscillograms of waves at a point measured by a string wave recorder and obtained as a result of video processing in the experiment "surface waves with a frequency of 2 Hz, without current" (see Fig. 5, a; 6, a).

## CONCLUSION

An easily implemented method for remote optical measurement of surface wave parameters for laboratory experiments has been developed. Unlike standard measurement methods using string wavegraphs, this method allows one to determine not only the temporal characteristics of surface waves but also their spatial ones. This becomes crucial in experiments in which the dispersion relationship between the period and wavelength of surface waves becomes complex, for example, due to the effects of non-uniform currents or nonlinearity of surface waves.

The applicability of this approach as a whole can be much broader than just a specific channel and waves with specific parameters in that channel, captured by a specific camera. The approach involves:

- 1) calibrating the camera and measuring the distance to the video object;
- 2) detecting boundaries in the frame using one of the variations of the standard edge detection method;
- 3) introducing additional conditions on the boundary points, here it is a vertical constraint and a luminance channel (for natural conditions, such as waves crashing on a vertical pier wall, one can try using a color channel);
- 4) applying logic to selecting points belonging to the air-water boundary;
- 5) using interpolation.

## Acknowledgments

The research utilized equipment from the "Unique Scientific Facility: Complex of Large-Scale Geophysical Test Facilities at the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences."