ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 681.787.8+535.417

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КОРРЕКТНОСТИ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КОНТРАСТА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

© 2027 г. О.Н. Будаговская[a,*], А.И. Бутенко[b], А.В. Будаговский[a,b], И.А. Будаговский[c]

[a] *Федеральный научный центр им. И.В. Мичурина*

Россия, 393774 Мичуринск Тамбовской обл., ул. Мичурина, 30

[b] *Мичуринский государственный аграрный университет*

Россия, 393760, Мичуринск Тамбовской обл., ул. Интернациональная, 101

[c] *Физический институт им. П.Н. Лебедева*

Российской академии наук

Россия, 119991 ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, 53

**E-mail: budagovsky@mail.ru*

Поступила в редакцию 15.04.2026

После доработки 24.08.2026

Принята к публикации 11.09.2026

Приводится описание метода сравнительной оценки точности различных способов обработки данных при расчете контраста интерференционных полос поляризационного интерферометра. Метод основан на использовании закономерности изменения видности интерференционной картины и установлении ее фиксированной величины в зависимости от угла скрещивания поляризатора и анализатора. Приведены данные экспериментального тестирования метода. Показано, что на основе установленной зависимости контраста интерференционных полос от угла скрещивания поляризатора и анализатора можно уйти от неоднозначности определения видности интерференционных картин различными методами обработки данных, сравнивать их точность и выявлять оптимальные алгоритмы расчета.

Ключевые слова: поляризационная интерферометрия, угол скрещивания поляризатора и анализатора, контраст интерференционных полос, обработка интерферограмм

1. ВВЕДЕНИЕ

Поляризационная интерферометрия находит широкое применение в различных областях промышленности и научных исследований благодаря простой оптической схеме и достаточной виброустойчивости. Принцип работы поляризационного интерферометра заключается в форми-

ровании разности фаз между интерферирующими лучами с помощью двулучепреломляющих оптических элементов (таких как электрооптические ячейки, призмы Волластона, кристаллы кварца и т.п.) и в создании условий наблюдения интерференции с помощью поляризаторов [1–3]. В качестве двулучепреломляющего элемента может выступать и объект исследований со свойствами анизотропии, как это было сделано в работе [4] для исследования механических напряжений в закаленном стекле или в поляризационных микроскопах, широко применяющихся в фармацевтике, минералогии, химии, биологии, медицине, криминалистике и т.д. [5, 6]. Благодаря компактности и виброустойчивости конструкции поляризационная интерферометрия перспективна для исследования анатомических (структурных) свойств растительных объектов в процессе жизнедеятельности. Диапазон изменения контраста интерференционных полос (ИП) при этом весьма широк – от 0 до 70%, но в силу преобладания диффузного рассеяния чаще всего возникает необходимость в регистрации и обработке интерференционных картин низкой видности, не более 30% [7].

Несмотря на большой выбор методов компьютерной обработки изображений [8], нельзя быть до конца уверенным, что тот или иной способ расчета контраста ИП работает корректно во всем актуальном диапазоне видности ввиду отсутствия эталонных фазовых экранов. Положение усугубляется наличием паразитной спекл-картины, контраст и размер спеклов которой также могут варьироваться в широком диапазоне в зависимости от геометрической схемы измерений и топологии фазовых неоднородностей исследуемого объекта. На этапе предварительной обработки интерферограмм применяются алгоритмы и компьютерные программы различной степени сложности для подавления спекл-шумов, но большинство из них предназначено для лучшей идентификации формы полос и местоположения экстремумов, и они приводят к существенному изменению истинного контраста [9].

Цель данной работы заключается в разработке методики оценки корректности алгоритмов обработки данных при расчете контраста интерференционных полос, полученных с помощью поляризационного интерферометра.

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ КОРРЕКТНОСТИ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КОНТРАСТА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС

Предлагаемая методика основана на использовании известной связи между распределением интенсивности на выходе поляризационного интерферометра и углами между оптическими осями поляризатора, двулучепреломляющего элемента и анализатора [3, 4]. Типовая оптическая схема поляризационного интерферометра состоит из двулучепреломляющего элемента DV, помещенного между двумя скрещенными поляризаторами N_1 и N_2 [1, 2]. Исследуемый световой поток I_o, пройдя через поляризатор N_1, становится линейно-поляризованным и, падая на DV,

делится на два пучка с ортогональными поляризациями – обыкновенный (o) и необыкновенный (e). На выходе из двулучепреломляющего элемента DV электрическое поле световой волны описывается следующей формулой [1]:

$$E(r,t) = E_o(r,t) + E_e(r+s, t+\tau),$$

где E_o, E_e – поля соответствующих пучков; r, t – координаты пространства и времени наблюдения; s - относительное смещение в пространстве; τ – временная задержка.

Относительное смещение s и временная задержка τ зависят от толщины h_{DV} элемента DV, показателей преломления n_o, n_e и угла падения χ на элемент DV. Таким образом, разность фаз пучков $\Delta\varphi$ определяется формулой

$$\Delta\varphi = (2\pi h_{\mathrm{DV}} / \lambda \cos\chi)(n_e - n_o).$$

Поскольку колебания в этих волнах взаимно перпендикулярны, их сложение приводит к образованию эллиптически поляризованного света. После второго поляризатора N_2 от каждого пучка останется только та составляющая, которая параллельна главной плоскости поляризатора N_2. В области перекрытия пучков формируется интерференционная картина (ИК), при этом теоретическая зависимость интенсивности ИК вдоль оси ординат при условии, что ось абсцисс параллельна интерференционным полосам, представляет собой синусоиду, амплитуда которой зависит от степени пространственной когерентности исследуемого светового потока.

Известны наилучшие условия работы поляризационного интерферометра [2, 3]:

– угол между плоскостью пропускания поляризатора и оптической осью двулучепреломляющего элемента $\beta=45°$;

– угол между оптической осью двулучепреломляющего элемента и плоскостью пропускания анализатора $\alpha =45°$;

– угол между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора $\gamma = 90°$ (скрещенные поляризаторы и анализатор, и в условиях отсутствия двулучепреломляющего элемента свет через них не проходит).

Отклонение любого из этих углов от оптимальных значений вносит дополнительную разность фаз с соответствующим изменением контраста интерференционной картины. Теоретически разность экстремумов ИП меняется по косинусоидальному закону в зависимости от вносимой разности фаз [4], в связи с чем можно получить интерференционную картину любой видности простым вращением одного из поляризующих элементов, используя один и тот же фазовый экран. Затем фотоснимки интерференционных картин, видность которых изменяется по известному закону, можно использовать для сравнительной оценки точности и достоверности применяемых алгоритмов обработки изображения.

Методика реализуется следующим образом. На первом этапе используется стационарный фазовый экран (матовое стекло), формирующий от лазерного пучка при оптимальных условиях

работы поляризационного интерферометра наивысший контраст интерференционной картины из интересующего рабочего диапазона. В нашем случае, когда фазовым экраном является растительная ткань с размерами неоднородностей единицы-десятки микрон, наиболее вероятностный диапазон изменения пространственной когерентности составляет от 6% до 75%. Интерференционная картина фиксируется с помощью матричного фотоприемника, имеющего достаточную в рамках измеряемых экстремумов ИК линейность преобразования светового потока в электрический сигнал. При необходимости для уточнения границ линейной области передаточной характеристики проводится градуировка показаний камер [10]. Путем вращения поляризатора или анализатора (не меняя интенсивность зондирующего потока и зону засветки на матовом стекле) изменяется угол рассогласования $\Delta\gamma$ между анализатором и поляризатором в диапазоне от нуля до некоторого критического значения $\Delta\gamma^*$, обуславливающего минимальный контраст ИК. Полученные изображения ИК сохраняются и в дальнейшем с применением типовых алгоритмов обработки интерферограмм проводится расчет интересующих параметров ИК (например, профиля яркости, видности, разности интенсивности экстремумов, контраста и размера спеклов и т.д.) и строятся калибровочные графики (таблицы) зависимости их значений от угла рассогласования $\Delta\gamma$.

На втором этапе, с использованием модифицированных или новых алгоритмов обработки изображения обрабатываются все те же фотографии ИК, и полученные результаты сравниваются с калибровочными графиками. С помощью данной методики можно тестировать не только алгоритмы обработки данных, но и пригодность новых матричных фотоприемников для задач поляризационной интерференции (сравнивая два ряда изображений ИК с различными значениями видности, обработанных с помощью одного и того же алгоритма).

Методика была использована для сравнительной оценки алгоритмов обработки интерферограмм, полученных с помощью поляризационного интерферометра сдвига, разработанного для диагностики растительных объектов [7]. Для регистрации интерференционных картин использовалась цифровая веб-камера A4Tech PK-836FN (Китай), настроенная на работу в линейной области передаточной характеристики. В качестве стационарного фазового экрана использовалось матовое стекло, с помощью которого получалась интерференционная картина с контрастом 75±5% в условиях $\Delta\gamma = 0$.

Применяемый авторами поляризационный интерферометр на базе призмы Волластона формирует интерференционную картину в виде системы прямолинейных полос, фотоснимки были сделаны в условиях ориентации полос параллельно вертикальным столбцам матрицы видеокамеры. Меняя угол рассогласования $\Delta\gamma$ от нуля до 50° (путем вращения анализатора против часовой стрелки), мы фиксировали интерференционные картины с шагом 5° (рис. 1).

Для обработки интерференционных картин использовался следующий базовый алгоритм. Из видеопотока камеры захватывался единичный кадр размером 240 × 320 пикселей стандартными средствами DirectShow в формате RGB24. Далее формировалось монохромное изображение с 8-битной глубиной цвета путем прямого усреднения значений RGB для каждого пикселя. Для получения профиля яркости интерферограммы осуществлялась свертка по вертикальным столбцам матрицы без сглаживания и затем проводилось сглаживание вдоль горизонтальных строк матрицы методом скользящего среднего с окном 10–16 пикселей. В результате была получена синусоидально-подобная кривая профиля распределения интенсивности ИК (рис. 2), на базе которой фиксировались максимальное (I_{max}) и минимальное (I_{min}) значения экстремумов кривой и проводился расчет видности ИК по формуле $V = (I_{max} - I_{min})/(I_{max} + I_{min})$ с привлечением методики компенсации спекл-шума по алгоритму, описанному в работе [11].

Рис. 1. Типовые интерференционные картины, формируемые поляризационным интерферометром от тест-объекта при изменении Δγ

Рис. 2. Исходная интерференционная картина тест-объекта (**а**) и профили распределения интенсивности в результате процедур свертки по вертикали и сглаживания по горизонтали (**б**)

В итоге получаем аппаратную (присущую данному интерферометру) зависимость контраста ИП от угла рассогласования Δγ (рис. 3). Следует отметить, что для каждой конкретной модели интерферометра зависимость видности от угла Δγ будет индивидуальной, поскольку невозможно обеспечить абсолютно одинаковые геометрии оптической схемы и качество (оптические свойства) поляризационных и двулучепреломляющих элементов.

Таким образом можно найти уравнение, отражающее зависимость видности интерференционных полос от угла рассогласования поляризатора и анализатора Δγ (рис. 3) и определить поправочный коэффициент, связывающий исходную величину видности V_0 при Δγ = 0 с ожидаемым значением видности $V_{\Delta\gamma}$ при некотором угле рассогласования поляризатора относительно анализатора Δγ в диапазоне от нуля до 50° (табл. 1): $V_{\Delta\gamma} = K_{\Delta\gamma} V_0$. Например, в нашем случае поворот поляризатора на угол 10° относительно оптимального снижает видность на 10%, на 32° – вдвое, а при повороте на 45° происходит почти десятикратное снижение контраста интерференционных полос.

Рис. 3. Калибровочная кривая зависимости видности интерференционных полос от Δγ (линия с маркерами) и полиномиальная линия тренда (штриховая линия без маркеров).

Таблица 1. Поправочные коэффициенты $K_{\Delta\gamma}$ и Δγ

Δγ	$V_{\Delta\gamma}$	$K_{\Delta\gamma}$

0	75.3%	1.000
5°	73.2%	0.972
10°	68.1%	0.904
15°	63.2%	0.840
20°	55.9%	0.742
25°	50.0%	0.664
30°	41.2%	0.547
35°	33.9%	0.450
40°	21.9%	0.290
45°	8.6%	0.114
50°	0.0%	0.000

На заключительном этапе оценки корректности алгоритмов обработки данных мы используем полученные изображения интерференционных полос в зависимости от угла поворота поляризатора как тестовые объекты различной видности. В случае необходимости получения тест-объектов с видностью менее 8% определенную трудность вызывает точная фиксация угла поворота поляризатора в долях градуса. Для решения такой задачи легче применить стационарный фазовый экран с $V_0 < 10\%$ и далее путем поворота поляризатора сформировать тест-объект низкой видности.

При сравнительной оценке точности различных алгоритмов расчета контраста интерференционных полос мы учитываем степень совпадения графиков зависимости видности интерференционных полос от угла поворота поляризатора с калибровочной кривой на рис. 3. Точность регистрации степени снижения (увеличения) видности важнее точности совпадения их абсолютных значений, поскольку, с одной стороны, последние сильно зависят от оптической схемы экспериментальной установки и исходного состояния объекта, а с другой стороны, в большинстве измерительных задач (особенно, когда речь идет об исследовании структурных перестроек живой ткани) необходимо сравнить реакцию *различных* объектов на тот или иной фактор.

Для усиления наглядности следует построить графики зависимости поправочного коэффициента от расчетной видности интерферограмм. Теоретическая зависимость представляет собой прямую линию с пересечением с осями координат в нулевой точке. Если расчетные значения поправочных коэффициентов из-за некорректной работы алгоритмов определения видности отклоняются от теоретических, это будет хорошо заметно визуально, и чем меньше отклонение, тем точнее алгоритм обработки интерферограмм. В качестве количественной оценки

корректности новых методов обработки интерферограмм можно использовать величину достоверности аппроксимации[1] R^2.

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДИКИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕРА ОКНА ПРИ СГЛАЖИВАНИИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЫ СКОЛЬЗЯЩИМ СРЕДНИМ

Интерференционные картины, формируемые поляризационным интерферометром, существенно искажены спеклами, и для устранения спекл-шума прибегают к применению различных алгоритмов сглаживания, корректность работы которых также следует проверять.

Рассмотрим использование методики на примере оптимизации размера окна при использовании алгоритма сглаживания спекл-шума скользящим средним. В качестве базового фазового экрана использовалось матовое стекло, в условиях $\Delta\gamma = 0^o$ была получена тестовая интерференционная картина с видностью 80%, а затем путем поворота поляризатора на заданный угол были зафиксированы тестовые ИТК с видностями 45%, 18% и 6%. Затем определялась видность полос тестовых ИТК в условиях свертки по вертикали по полной высоте кадра и сглаживания по горизонтали с изменяющимся окном в пределах от 1 до 70 пикселей. Верхняя граница выбранного диапазона обусловлена тем, что при периоде интерференционной картины 140 пикселей увеличение размера окна выше половины периода заведомо будет приводить к значительному снижению видности. При расчете видности использовались два подхода в определении экстремумов. В первом в фиксированных зонах профиля яркости ИТК (в нашем случае максимум и минимум ИТК) лежат в области 62 и 133 пикселей соответственно (см. рис. 2б), но этот подход можно использовать только в случае фиксированного положения интерференционной картины относительно фотоприемной матрицы и постоянства периода ИТК. Если изменяется расстояние между экстремумами или возможен сдвиг всей интерференционной картины относительно столбцов матрицы, то необходимо использовать другой алгоритм поиска экстремумов, например, выбирая максимальные и минимальные значения сглаженного профиля яркости.

Для "неподвижной" интерференционной картины оптимальный диапазон окна сглаживания составляет от 8 до 13 пикселей, поскольку достоверность линейной аппроксимации для этих значений наивысшая (рис. 4). Тем не менее и при других размерах окна в диапазоне от 5 до 38 пикселей будет достигнута приемлемая точность оценки контраста полос. Размер окна более 50 пикселей неприемлем, так как R^2 резко падает ниже 0.9 (на рисунке не показано).

Рис. 4. Зависимость расчетной видности интерференционных картин и достоверности линейной аппроксимации от ширины окна сглаживания профиля интенсивности интерференционной

[1] При определении значения R^2 с помощью графических средств Excel следует задавать точку пересечения кривой тренда с осью *Y*, равной нулю, в противном случае будем получать несопоставимые значения.

В случае, если экстремумы интерференционной картины определяются методом выбора максимальных и минимальных значений профиля яркости в пределах одного периода ИТК, характер изменения абсолютных значений расчетной видности тестовых картин несколько меняется, что приводит к меньшей достоверности линейной аппроксимации и изменению допустимого диапазона окна сглаживания – от 8 до 36 пикселей (рис. 5). Оптимальные значения размера окна составляют 22–28 пикселей, что существенно больше, чем при фиксированных координатах экстремумов.

Рис. 5. Зависимость расчетной видности интерференционных картин и достоверности линейной аппроксимации от ширины окна сглаживания профиля интенсивности интерференционной

4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДИКИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕРА ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ОБЛАСТИ КАДРА

Для увеличения быстродействия обработки данных зачастую прибегают к уменьшению размера изображения, и в случае интерферограмм это может быть та из координат кадра, которая расположена вдоль полос, размер второй координаты обусловлен периодом интерференционной картины. Рассмотрим использование предлагаемой методики для оптимизации высоты кадра изображения с исходным размером 240 × 360 пикселей. Для этого из исходных изображений тестовых фазовых экранов видностью 80%, 45%, 18% и 6% мы вырезаем области высотой от 4 до 240 пикселей (ширина неизменна и составляет 360 пикселей), далее по предлагаемой методике вычисляем поправочные коэффициенты для каждого выбранного размера изображения и строим графики зависимости поправочного коэффициента от видности тестовых фазовых экранов (рис. 6). При определении контраста тестовых интерферограмм по размеру выбранной области мы используем свертку по вертикали и сглаживание по горизонтали скользящим средним с окном 12 пикселей.

Рис. 6. Зависимости поправочного коэффициента от видности тестовых фазовых экранов при разной высоте…

Использование данной методики позволило определить минимальный размер высоты кадра – не менее 35 пикселей, при меньших значениях расчетная кривая зависимости поправочного коэффициента от видности тестовых фазовых экранов существенно отклоняется от теоретической линейной (синяя линия на рис. 6). Достоверность линейной аппроксимации при полном кадре составляет 0.99972.

Рассмотрим, будет ли данная высота кадра подходящей, если введена функция поиска экстремумов по минимальным и максимальным значениям, а не по фиксированным координатам. Для этого проведем те же расчеты, но для высоты кадра 35 пикселей и ширины окна сглаживания скользящим средним от 1 до 50 пикселей.

С уменьшением выборки изображения по высоте кадра для получения максимальной достоверности оценки видности ИТК необходимо увеличивать размер окна сглаживания до 20–50 пикселей, но и в этом случае R^2 меньше, чем для аналогичных параметров сглаживания полного кадра (рис. 7).

Рис. 7. Зависимость видности интерференционных картин размером 35×240 пикселей и достоверности линейной аппроксимации от ширины окна сглаживания

5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДИКИ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРИЕМЛЕМОСТИ ТИПОВЫХ АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА КОНТРАСТА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВИДНОСТИ ИНТЕРФЕРОГРАММ

Для обработки и анализа качества цифровых изображений разработаны алгоритмы расчета контраста, несколько отличающиеся от классической формулы Михельсона $V = (I_{max} - I_{min})/(I_{max} + I_{min})$, эти алгоритмы претендуют на более точную его оценку [12–14]. Используя предложенную методику, для определения видности интерференционных полос рассмотрим применимость наиболее распространенных формул расчета локального и глобального контрастов, предложенных Кадничанским [13]. Для этого применялись тестовые ИТК, полученные путем поворота поляризатора поляризационного интерферометра видностью 80%, 45%, 27%, 18%, 6% и 2.6%. Затем изображения обрабатывались с помощью библиотек OpenCV2, NumPy и Pandas (представление двухмерным массивом в оттенках серого, расчет локального и глобального контрастов и статистическая обработка). Поскольку изображения тестовых картин имели неравномерное распределение яркости, это учитывалось посредством расчета тренда профиля распределения интенсивности с использованием модуля LinearRegression из библиотеки Sclen. Затем полученные средние значения локального контраста без тренда (ЛК), локального контраста с трендом ($ЛК_t$) и глобального контраста (ГК) (табл. 2) использовались для расчета зависимости поправочного коэффициента от видности тестовых фазовых экранов и определения достоверности ее линейной аппроксимации R^2 (рис. 8, табл. 2). На основании полученных данных было определено, что наиболее корректная оценка видности фазовых экранов в диапазоне от 2.6% до 80% происходит с применением алгоритма расчета локального контраста без тренда. Алгоритм расчета глобального контраста для оценки видности интерференционных полос неприемлем, так как он дает значительные искажения в оценках при видности уже менее 40%.

Таблица 2. Средние значения контрастов и зависимость поправочного коэффициента от видности тестового экрана

Тест-изображение	$ЛК_t$	ЛК	ГК
$V_{2.6\%}$	6.83	13.2	38.2
$V_{6\%}$	7.3	15.3	5.3
$V_{18\%}$	16.7	23.7	40.7
$V_{27\%}$	24.5	31.9	42.6
$V_{45\%}$	44.5	49.8	47.6
$V_{80\%}$	78.5	79.8	99.0
R^2	0.9224	0.9934	0.1499

Рис. *8.* Зависимости поправочного коэффициента от видности тестовых фазовых экранов при разных алгоритмах определения контраста интерференционных полос

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая методика использует присущую для поляризационных интерферометров зависимость контраста интерференционной картины от угла рассогласования анализатора и поляризатора по косинусоидальному закону. Благодаря этому можно получать тестовые фазовые экраны практически любой видности и использовать их для тестирования алгоритмов обработки интерферограмм. Приведены примеры применения методики, показывающие ее эффективность, при оптимизации размера обрабатываемого изображения, процедуры сглаживания спекл-шума и выбора алгоритма расчета контраста интерференционных полос. С помощью данной методики можно тестировать не только алгоритмы обработки данных, но и пригодность новых матричных фотоприемников для задач поляризационной интерференции.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Р Ф (проект № FGSU-2025-0018).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С.* Введение в статистическую радиофизику и оптику. Москва: Наука, 1981.

2. *Арутюнян А.Г., Тункин В.Г., Чиркин А.С.* Квантовая электроника. 1973. № 1. С. 111. https://doi.org/10.1070/QE1973v003n01ABEH004748.

3. *Шенявский Л.А., Шмальгаузен В.И.* Вестник МГУ. Сер. Физика, Астрономия. 1978. № 1 (19). С. 125. https://vmu.phys.msu.ru/file/1978/1/1978-19-1-125.pdf.

4. *Хомченко А.В., Примак И.У., Василенко А.Н.* Вестник Белорусско-Российского университета. 2019. № 1 (62). С. 88. https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-poley-mehanicheskih-napryazheniy-v-zakalennom-stekle-metodom-polyarizatsionnoy-interferometrii/viewer.

5. Физическая энциклопедия. Под ред. А.М. Прохорова. Москва: Изд. «Большая Российская энциклопедия», 1992. Т. 3. С. 146.

6. *Oldenbourg R.* Cold Spring Harbor Protocols. 2013. № 11. P. 1023. https://doi.org/10.1101/pdb.top078600.

7. *Будаговская О.Н., Будаговский А.В.* Дефектоскопия. 2015. V. 51. № 4. P. 236. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23856165_59351632.pdf.

8. Методы компьютерной обработки изображений. Под ред. В.А. Сойфера. Москва: Физматлит, 2003.

9. *Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Земцов А.Ю., Степанов С.А.* Компьютерная оптика. 2005. Т. 28. С. 140. https://journals.ssau.ru/computeroptics/article/view/1100.

10. *Андрийчук В.А., Осадца Я.М.* Оптический журнал**.** 2012. Т. 79. № 2. С. 40. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23322393_87484872.pdf.

11. *Будаговская О.Н., Будаговский А.В., Будаговский И.А.* ПТЭ. 2021. № 3. С. 75. https://doi.org/ 10.31857/S0032816221020130.

12. *Вудс Р., Гонсалес Р.* Цифровая обработка изображений. Москва: Техносфера, 2006.

13. *Кадничанский С.А.* Геодезия и картография. 2018. № 3. С. 46. https://doi.org/ 10.22389/0016-7126-2018-933-3-46-51.

14. *Голуб Ю.И., Старовойтов Ф.В.* Системный анализ и прикладная информатика. 2019. № 2. С. 4. https://doi.org/10.21122/2309-4923-2019-2-4-11

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Типовые интерференционные картины, формируемые поляризационным интерферометром от тест-объекта при изменении $\Delta\gamma$

Рис. 2. Исходная интерференционная картина тест-объекта (**а**) и осциллограмма профиля распределения интенсивности в результате процедур свертки по вертикали и сглаживания по горизонтали (**б**)

Рис. 3. Калибровочная кривая зависимости видности интерференционных полос от $\Delta\gamma$ (линия с маркерами) и полиномиальная линия тренда (штриховая линия без маркеров)

Рис. 4. Зависимость расчетной видности интерференционных картин и достоверности линейной аппроксимации от ширины окна сглаживания профиля интенсивности интерференционной картины скользящим средним при фиксированных координатах экстремумов

Рис. 5. Зависимость расчетной видности интерференционных картин и достоверности линейной аппроксимации от ширины окна сглаживания профиля интенсивности интерференционной картины скользящим средним в режиме поиска экстремумов

Рис. 6. Зависимости поправочного коэффициента от видности тестовых фазовых экранов при высоте кадров, равной 4 (**а**), 10 (**б**), 17 (**в**), 35 (**г**) пикселей

Рис. 7. Зависимость видности тестовых интерференционных картин размером 35×240 пикселей и достоверности линейной аппроксимации от ширины окна сглаживания скользящим средним в режиме поиска экстремумов

Рис. 8. Зависимости поправочного коэффициента от видности тестовых фазовых экранов при разных алгоритмах определения контраста интерференционных полос

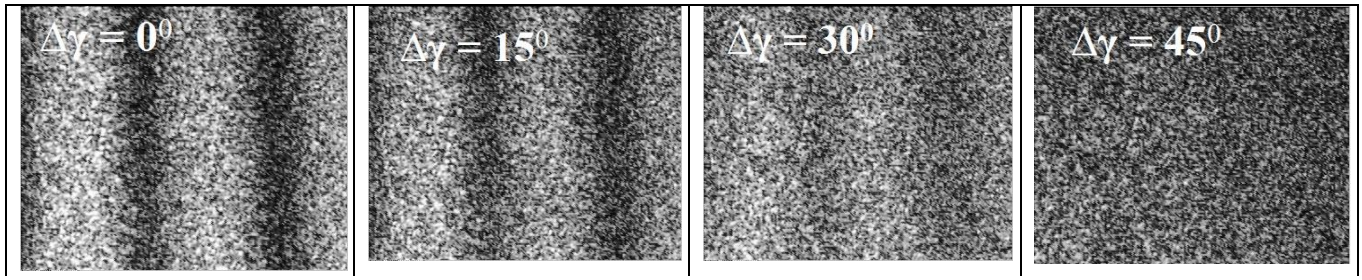


Рис. 1.

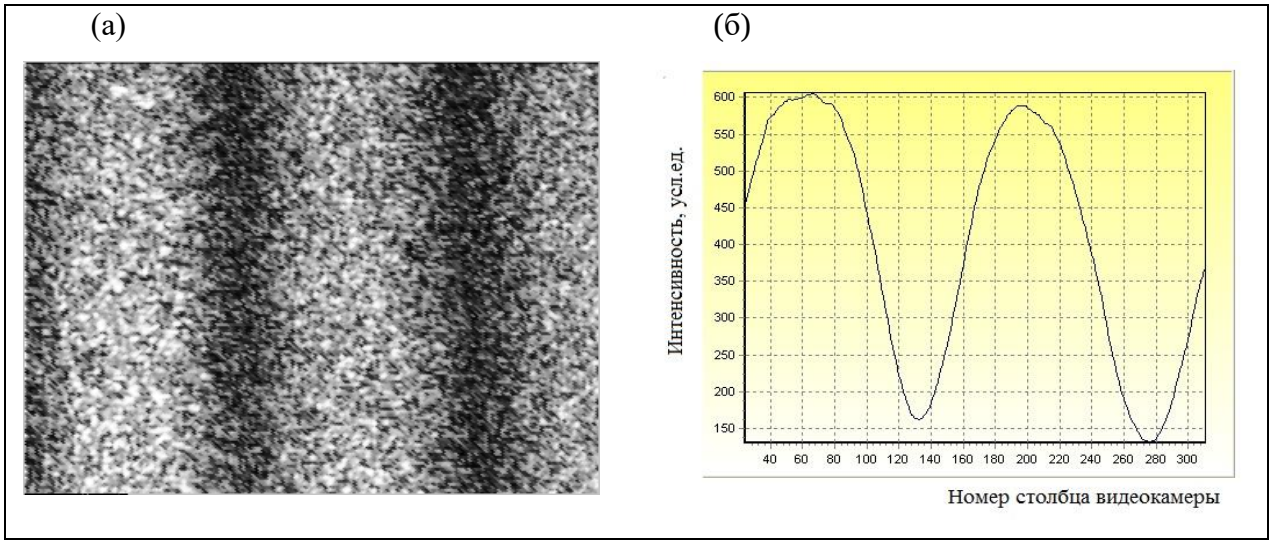

(а)
(б)
Интенсивность, усл.ед.
600
550
500
450
400
350
300
250
200
150
40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300
Номер столбца видеокамеры

Рис. 2.

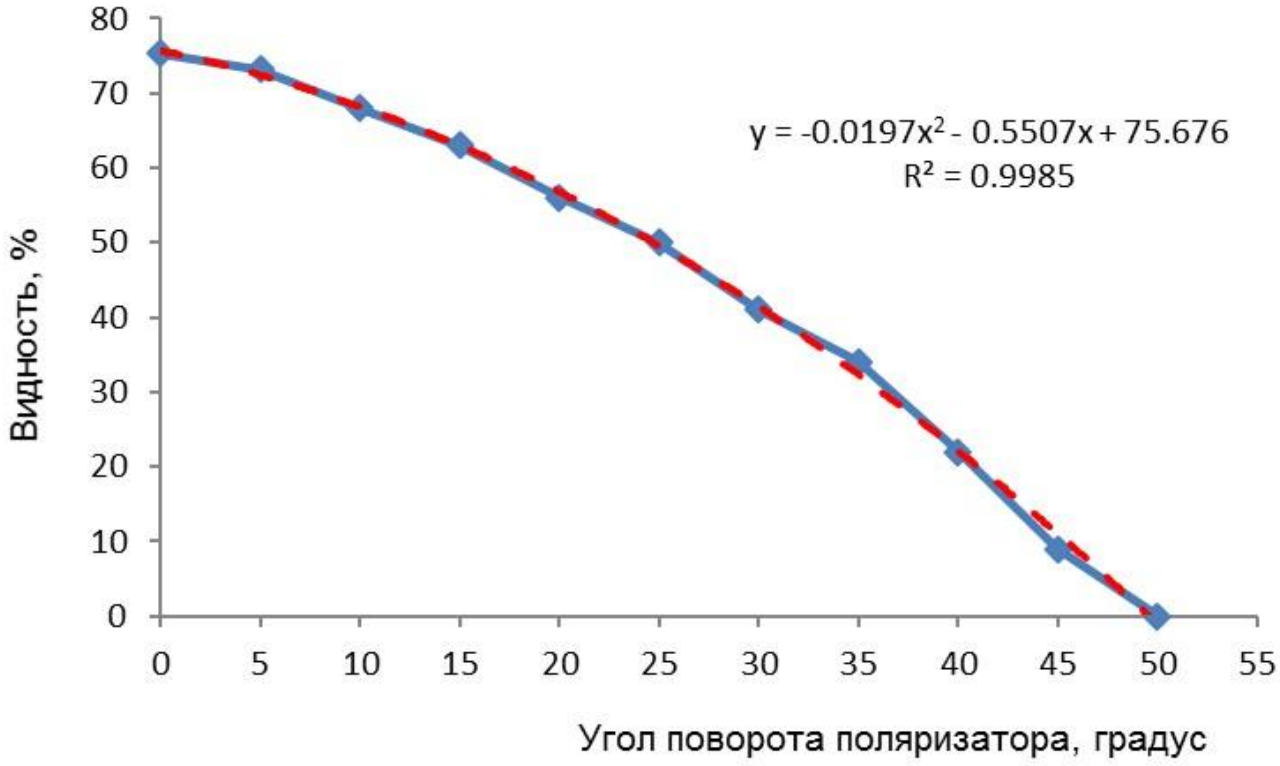

y = -0.0197x² - 0.5507x + 75.676
R² = 0.9985
Видность, %
Угол поворота поляризатора, градус
0
10
20
30
40
50
60
70
80
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55

Рис. 3.

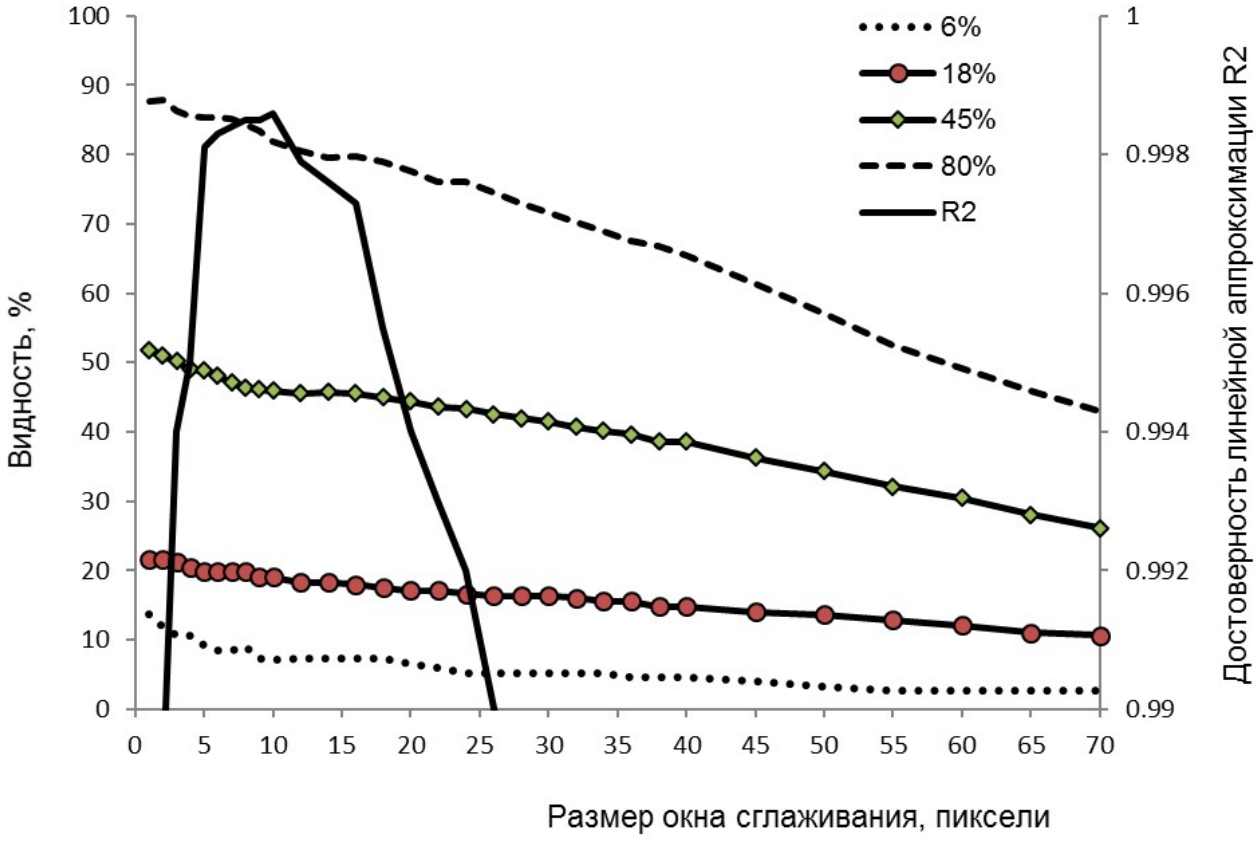

6%
18%
45%
80%
R2
Видность, %
Достоверность линейной аппроксимации R2
Размер окна сглаживания, пиксели
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
1
0.998
0.996
0.994
0.992
0.99
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55
60
65
70

Рис. 4

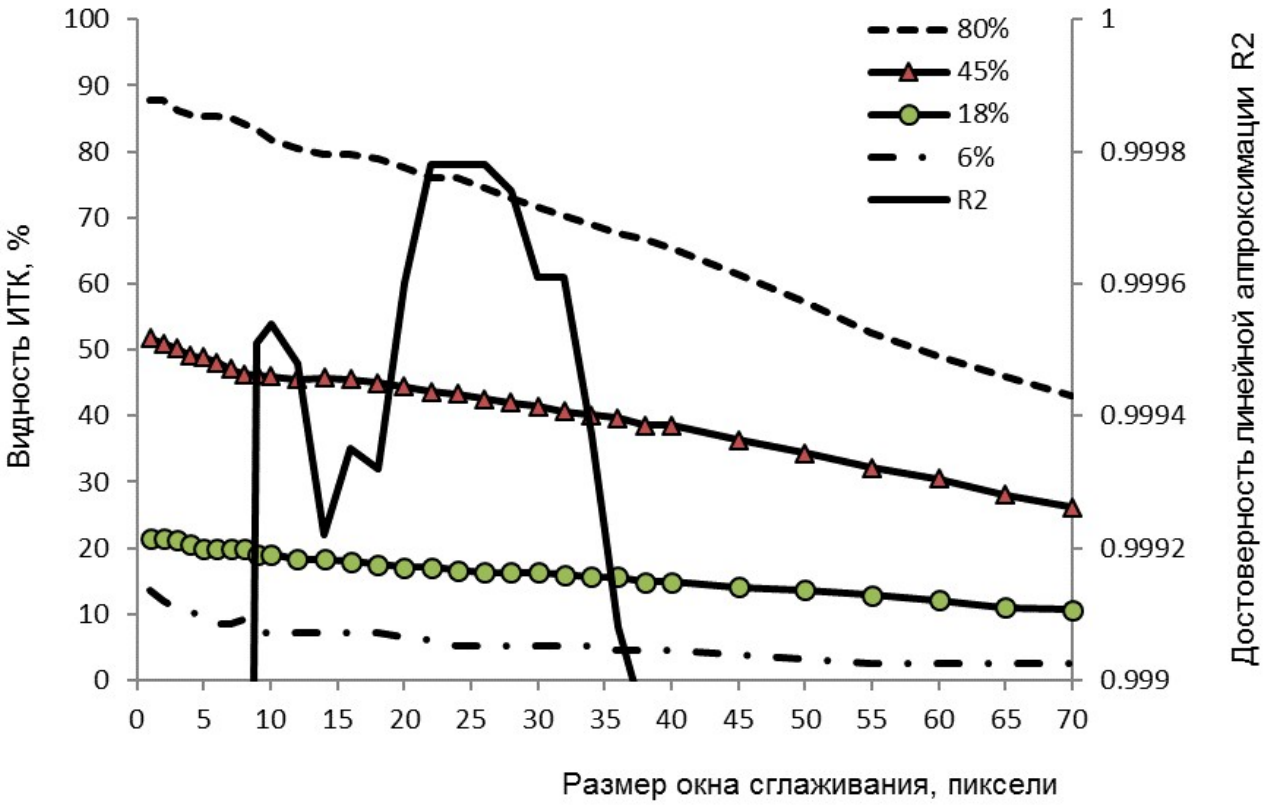

80%
45%
18%
6%
R2
Видность ИТК, %
Достоверность линейной аппроксимации R2
Размер окна сглаживания, пиксели
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
1
0.9998
0.9996
0.9994
0.9992
0.999
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55
60
65
70

Рис. 5.

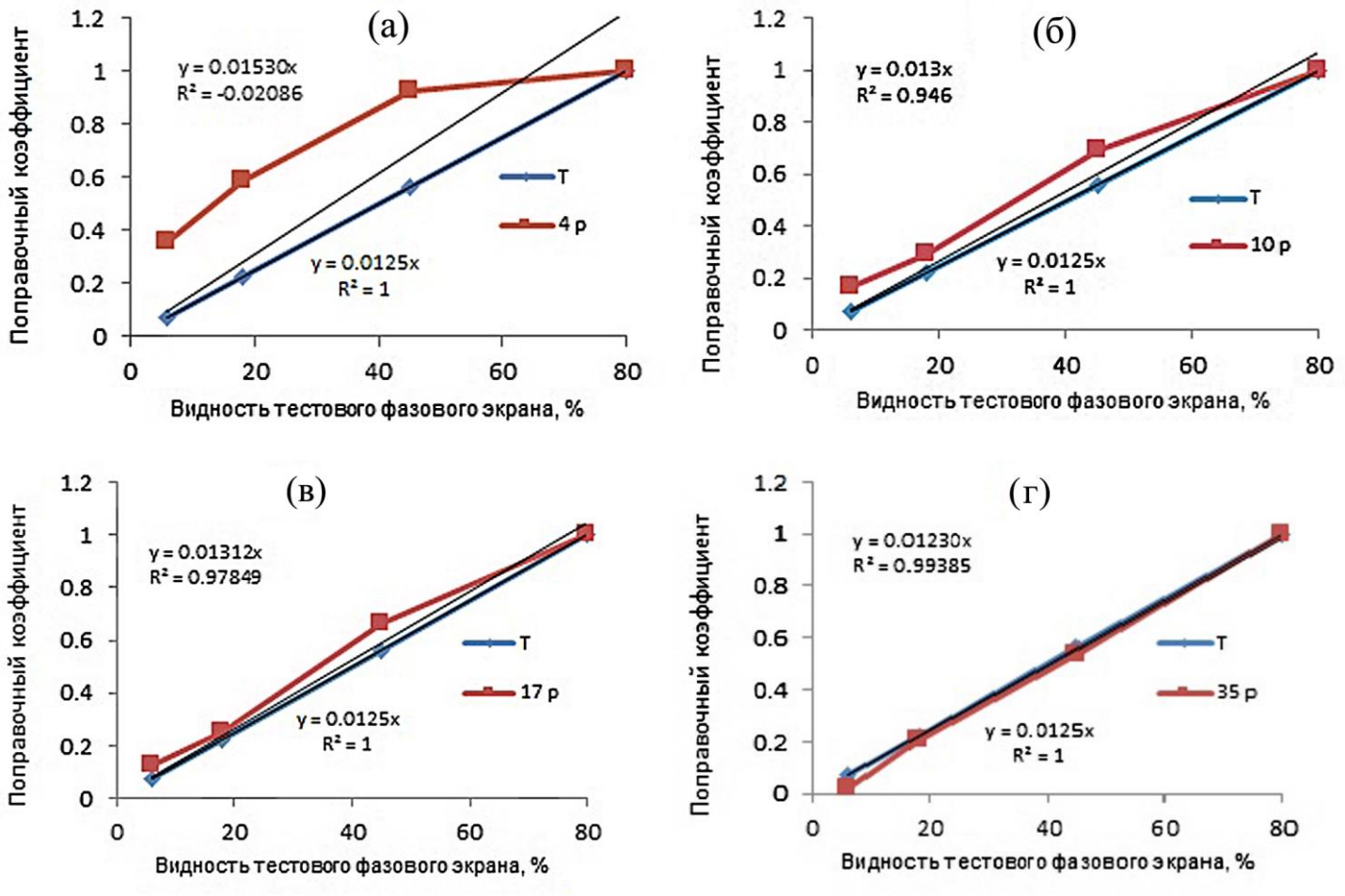

(а)
y = 0.01530x
R² = -0.02086
y = 0.0125x
R² = 1
T
4 р
Поправочный коэффициент
Видность тестового фазового экрана, %
(б)
y = 0.013x
R² = 0.946
y = 0.0125x
R² = 1
T
10 р
Поправочный коэффициент
Видность тестового фазового экрана, %
(в)
y = 0.01312x
R² = 0.97849
y = 0.0125x
R² = 1
T
17 р
Поправочный коэффициент
Видность тестового фазового экрана, %
(г)
y = 0.01230x
R² = 0.99385
y = 0.0125x
R² = 1
T
35 р
Поправочный коэффициент
Видность тестового фазового экрана, %

Рис. 6.

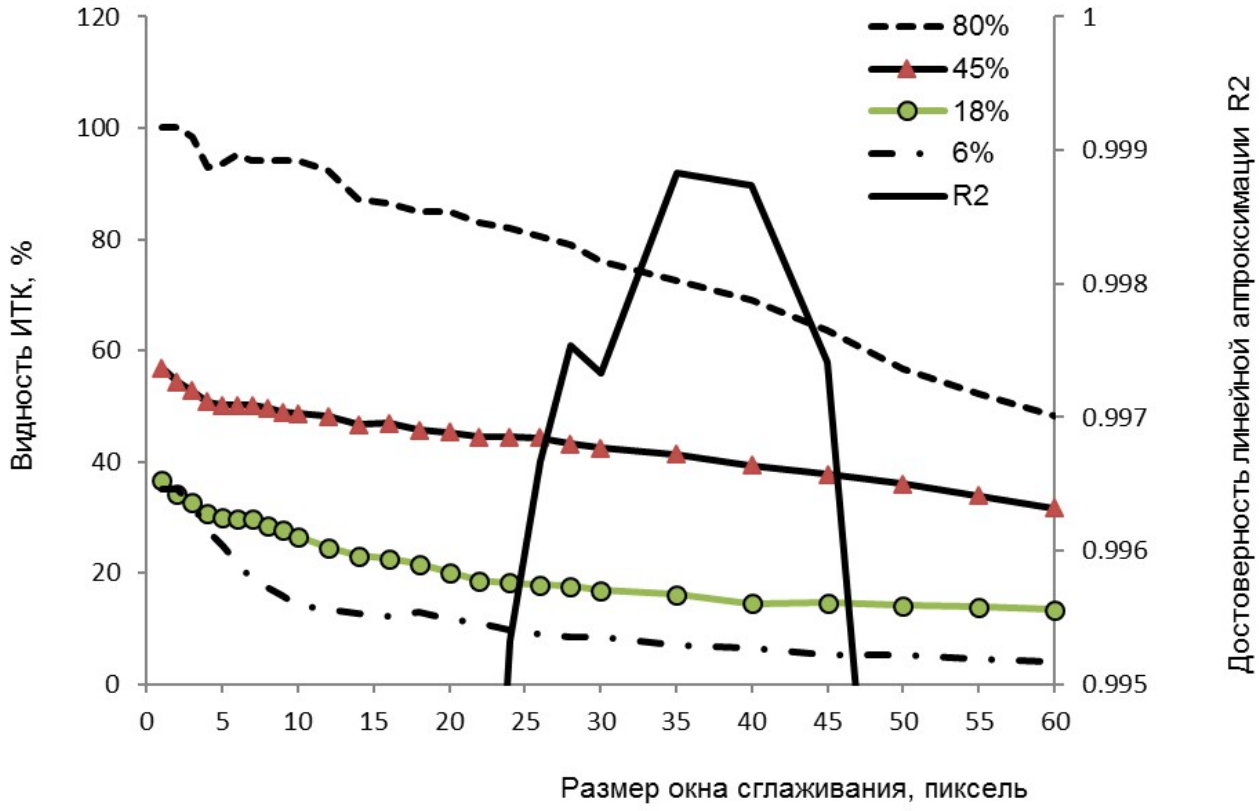

120
100
80
60
40
20
0
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55
60
1
0.999
0.998
0.997
0.996
0.995
80%
45%
18%
6%
R2
Видность ИТК, %
Достоверность линейной аппроксимации R2
Размер окна сглаживания, пиксель

Рис. 7.

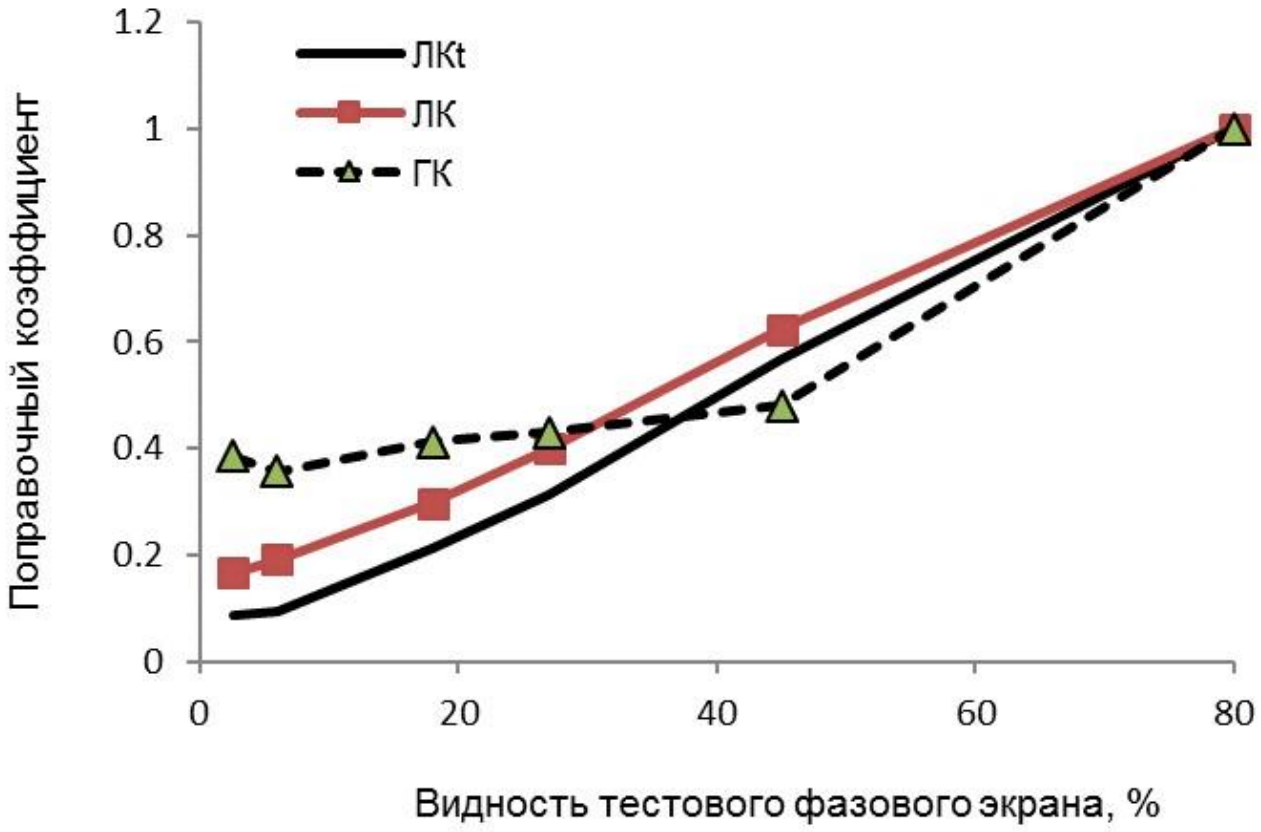

1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
20
40
60
80
ЛКt
ЛК
ГК
Поправочный коэффициент
Видность тестового фазового экрана, %

Рис. 8.