

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ЕЁ ПЛОЩАДИ

У.Д. Сигитова, Р.Н. Голых

Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, г. Бийск

В рамках выполнения данной работы была поставлена цель осуществить разработку и создание усовершенствованного метода обработки стоп-кадра газового пузырька в жидкости в зависимости от её вязкости. Представленная работа обладает высокой степенью актуальности, поскольку межфазная поверхность является основным фактором, обеспечивающим эффективность процессов химических технологий в системах «газ-жидкость». Для достижения цели применён комплексный подход, включающий использование современных специализированных на обработке изображений библиотек компьютерного зрения, подходящих методов фильтрации изображений и наиболее подходящие языки программирования. Разработан алгоритм восстановления профиля межфазной поверхности по градиентам яркости изображения, а также было осуществлено тестирование отдельных этапов алгоритма на примере профиля тестового изображения межфазной поверхности «жидкость-пузырёк», полученного с помощью скоростной киносъёмки. Установлено наличие корреляции между протяжённостью контура и энергией коротковолновых гармоник межфазной поверхности. Установлено существование предельной вязкости, при которой достигается увеличение межфазной поверхности.

Ключевые слова: изображение, контур, межфазная поверхность, скоростная камера, информационная система.

ВВЕДЕНИЕ

Межфазная поверхность является основным фактором, обеспечивающим эффективность процессов химических технологий в системах «газ-жидкость» [1]. Один из наиболее перспективных способов увеличения межфазной поверхности «газ-жидкость» – применение ультразвуковых колебаний [1, 2].

Наиболее достоверный способ регистрации межфазной поверхности – применение скоростной киносъёмки [1, 3, 4], поскольку процесс характеризуется сложной структурой межфазной поверхности и быстротой протекания (период ультразвуковых колебаний не превышает 46 мкс). При этом желательно использовать повышенную контрастность [5].

Однако скоростная киносъёмка позволяет получить лишь 2D-изображение. Трёхмерное сканирование и томография отличаются крайне низкой скоростью и не позволяют оценивать изменение межфазной поверхности в реальном времени. Поэтому актуальна разработка метода обработки 2D-изображений, позволяющая оценить площадь трёхмерной поверхности пузырька.

Таким образом, цель представленного исследования – разработать метод обработки сделанного во время высокоскоростной съёмки стоп-кадра газового пузырька в жидкости, позволяющего рассчитать межфазную поверхность массообмена «газ-жидкость».

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

— определить методы для обработки и анализа снимков межфазной границы;

— создать алгоритм для вычисления площади межфазной границы;

— реализовать алгоритм в рамках информационной системы расчёта межфазной поверхности;

— выполнить тестирование и отладку реализованной информационной системы.

Решение поставленных задач описано далее.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Первой задачей является выбор подходящих методов и инструментов. В частности, был реализован выбор подходящего метода фильтрации шумов на изображении.

Разнообразные по интенсивности шумы матрицы камеры скоростной киносъёмки снижают качество исходной картинки. Особенно ярко зашумленность проявляется на однородных областях, особенно на темных участках. В данной работе использовался метод частотной и пространственной обработки исходного изображения для достижения высоких показателей в очистке изображения.

Использование частотного фильтра предоставляет возможность детально анализировать исследуемого сигнал, сохраняя при этом ключевую информацию без значительных потерь, отбрасывая только шумовую составляющую [6].

Пространственная фильтрация предназначена для устранения едва заметных визуальных помех на изображении, которые человеческий глаз не способен различить.

Поэтому была использована частотная фильтрация, реализованная в рамках библиотеки OpenCV [7].

Далее создается рамка изображения, благодаря чему размер нового изображения значительно увеличивается (что необходимо учитывать при дальнейшей работе) и благодаря чему появляется возможность нахождения и выделения всех имеющихся контуров у объектов (соответствующих газовой фазе), которые находятся на краю исходного изображения и которые можно выделить только после выполнения ранее описанной операции.

После выявления контуров объектов, соответствующих газовой фазе, выделяется наибольший по площади проекции объект. После выделения наибольшего объекта выполняется бинаризация изображения.

Бинаризованное изображение является образцом, где белый цвет – это объект, черный – фон объекта (рис. 1).



Рис. 1. Бинаризация изображения

Бинаризованное изображение служит маской для свёртки при вычислении межфазной поверхности.

Далее была рассчитана свёртка, для того чтоб реализовать процесс фильтрации составляющей возмущений обусловленными капиллярными возмущениями:

$$h_{i,j} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \begin{cases} \delta_{k,l} = 1 \& \delta_{i-k,j-l} = 1, g_{k,l} f_{i-k,j-l} \\ !(\delta_{k,l} = 1 \& \delta_{i-k,j-l} = 1), 0 \end{cases};$$

где $\delta_{k,l} = 1$, если координаты (k,l) находятся в пределах области бинаризованного изображения и цвет точки с координатой (k,l) белый; $\delta_{k,l} = 0$, если координаты (k,l) находятся за пределами области бинаризованного изображения или цвет точки с координатой (k,l) чёрный; $f_{k,l}$ – яркости исходного изображения; $g_{k,l}$ – коэффициенты Фурье-свёртки; $h_{k,l}$ – преобразованное изображение, градиенты яркости которого содержат только возмущения, вызванные капиллярными волнами под действием ультразвука.

Далее была рассчитана формула энергии гармоник:

$$E = \frac{\sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \begin{cases} \delta_{k,l} = 1, h_{k,l}^2 \\ !(\delta_{k,l} = 1), 0 \end{cases}}{\sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \delta_{k,l}}$$

Последней была рассчитана формула полиномиальной аппроксимации для того, чтобы по величине энергии полученных гармоник выполнить перерасчет в площадь межфазной поверхности:

$$\frac{S_{US}}{S_{No US}} = \sum_{n=0}^N A_n E^n;$$

где S_{US} – площадь межфазной поверхности пузырька с ультразвуком, м²; $S_{No US}$ – площадь межфазной поверхности пузырька без ультразвука, м².

Представленная формула основана на обнаруженной корреляции между протяжённостью контура, которая рассчитывалась в публикации [1], и энергией коротковолновых гармоник. Наличие корреляции выявлено путём генерации случайных капиллярных волн и расчёте для каждой суммы случайно сгенерированных капиллярных волн протяжённости контура и энергии гармоник (коэффициент корреляции составляет 0,875).

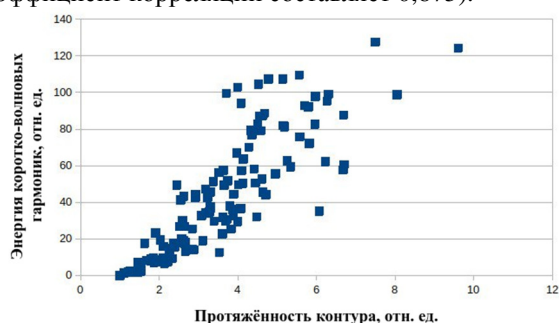


Рис. 2. Взаимосвязь энергии коротко-волновых гармоник и протяжённости контура

Далее на основании экспериментальных данных, полученных авторами Голых Р.Н. (Бийский технологический институт АлтГТУ), Карра Ж.-Б. (Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева) построены зависимости площади межфазной поверхности от концентрации глицерина в воде (табл. 1).

Табл. 1. Влияние концентрации глицерина в воде и вязкости на площадь межфазной поверхности

Концентрация, %	Вязкость, мПа·с	Относительное увеличение межфазной поверхности (относительная погрешность 5%)
0	1	1,636
37,5	4	1,478
60	12,7	1,000

Представленная таблица позволила установить наличие предельной вязкости, при которой увеличение межфазной поверхности прекращается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан алгоритм восстановления профиля межфазной поверхности по градиентам яркости изображения, а также было осуществлено тестирование отдельных этапов алгоритма на примере профиля тестового изображения межфазной поверхности «жидкость-пузырёк», полученного с помощью скоростной киносъёмки.

Установлено наличие корреляции между протяжённостью контура и энергией коротковолновых гармоник межфазной поверхности.

Установлено существование предельной вязкости, при которой достигается увеличение межфазной поверхности.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-12-00278, <https://rscf.ru/project/23-12-00278>.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Голых, Р.Н. Влияние ультразвукового кавитационного воздействия на межфазную поверхность «газ-жидкость» при принудительной аэрации [Текст] / Р. Н. Голых, Ж.-Б. Карра, В. Н. Хмелёв, И. А. Маняхин, В. Д. Минаков, Д. В. Генне., А.Р. Барсуков // «Прикладная механика и техническая физика». – 2024. – ONLINE FIRST.
2. Семенов И. А., Ульянов Б. А., Свиридов Д. П., Камаев А. С. Влияние ультразвука на массообмен в жидкой фазе при свободном всплытии пузырька газа // Изв. вузов. Прикл. химия и биотехнология. 2013. № 2. С. 57–61.
3. Быстрейший микроскоп увидел события за 1 квинтиллионную долю секунды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ferra.ru/news/techlife/bystreishii-mikroskop-uidel-sobytiya-za-1-kvintillionnyu-dolyu-sekundy-22-08-2024.htm>
4. Vinoth K. P., Jayaprakash N. Application of CED and HED techniques for shockwave detection with high-speed schlieren and shadowgraph images // Res. Square. 2023. DOI: 10.21203/rs.3.rs-3392084/v2
5. Ростех создал микроскоп с улучшенной оптической схемой [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ffoms.gov.ru/news/monitoring-smi/rostekh-sozdal-mikroskop-s-uluchshennoy-opticheskoy-skhemoy/?month=02&year=2025>
6. Гусев В.Ю., Методика фильтрации периодических помех цифровых изображений [Текст] / В.Ю.Гусев, Крапивенко А.В // «Труды МАИ», 2012.
7. Кэлер А., Брэдски Г. Изучаем OpenCV 3 [Текст] / А. Кэлер, Г. Брэдски. – ДМК-Пресс, 2017 г. – 826 с.

Сигитова Ульяна Дмитриевна – магистрант технологического факультета, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, e-mail: sigitova.ulyana@yandex.ru

Голых Роман Николаевич – д.т.н., ведущий научный сотрудник, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, e-mail: gm@u-sonic.ru

AN ALGORITHM FOR IMAGE PROCESSING OF THE INTERFACIAL SURFACE HAS BEEN DEVELOPED TO DETERMINE ITS AREA

U.D. Sigitova, R.N. Golykh
Biysk Technological Institute, Biysk

As part of this work, the goal was to develop and create an improved method for processing a freeze frame of a gas bubble in a liquid, depending on its viscosity. The presented work has a high degree of relevance, since the interfacial surface is the main factor ensuring the efficiency of chemical technology processes in gas-liquid systems. To achieve this goal, an integrated approach has been applied, including the use of modern computer vision libraries specialized in image processing, suitable image filtering methods, and the most appropriate programming languages. An algorithm for reconstructing the profile of the interfacial surface based on image brightness gradients was developed, and individual stages of the algorithm were tested using the example of the profile of the test image of the liquid-bubble interfacial surface obtained using high-speed cinematography. A correlation has been established between the length of the contour and the energy of the short-wave harmonics of the interfacial surface. The existence of a limiting viscosity at which an increase in the interfacial surface is achieved has been established.

Index terms: image, contour, interphase surface, high-speed camera, information system.

REFERENCES

1. Golykh, R.N. The effect of ultrasonic cavitation on the gas-liquid interface during forced aeration / R.N. Golykh, J.-B. Carra, V. N. Khmelev, I. A. Manyakhin, V. D. Minakov, D. V. Genne, A.R. Barsukov // *Applied Mechanics and Technical Physics*. – 2024. – ONLINE FIRST.
2. Semenov I. A., Ulyanov B. A., Sviridov D. P., Kamaev A. S. The effect of ultrasound on mass transfer in the liquid phase during free ascent of a gas bubble // *Izv. vuzov. Appl. chemistry and biotechnology*. 2013. No. 2. pp. 57-61.
3. The fastest microscope recorded events in 1 quintillionth of a second – The access mode: <https://www.ferra.ru/news/techlife/bystreishii-mikroskop-uvidel-sobytiya-za-1-kvintillionnyu-dolyu-sekundy-22-08-2024.htm>
4. Vinoth K. P., Jayaprakash N. Application of CED and HED techniques for shockwave detection with high-speed schlieren and shadowgraph images // *Res. Square*. 2023. DOI: 10.21203/rs.3.rs-3392084/v2
5. Rostek has created a microscope with an improved optical circuit – The access mode: <https://www.ffoms.gov.ru/news/monitoring-smi/rostekh-sozdal-mikroskop-s-uluchshennoy-opticheskoy-skhemoy/?month=02&year=2025>
6. Gusev V. Yu., Method of filtering periodic interference of digital images [Text] / V. Yu. Gusev, Krapivenko A. V. // «*Proceedings MAI*», 2012.
7. Keller A., Bredsky G. Studying OpenCV 3 [Text] / A. Keller, G. Bredsky. – DMK-Press, 2017 -826 p.

Sigitova Uliana Dmitrievna – master's student of the faculty of technology, Biysk Technological Institute, e-mail: sigitova.uliana@yandex.ru.

Golykh Roman Nikolaevich – Dr. Sc., leading researcher, Biysk Technological Institute (branch) of AltSTU, e-mail: grn@u-sonic.ru.