

Измерение геометрических параметров поверхностей раздела газожидкостных систем

М. М. МОРДАСОВ, А. П. САВЕНКОВ

Тамбовский государственный технический университет,
Тамбов, Россия, e-mail: savencow@yandex.ru

Описан оптический метод измерений формы и размеров углубления на поверхности жидкости, образованного струей газа. Разработана установка для реализации данного метода, основанного на пропускании коллимированного лазерного луча параллельно недеформированной поверхности жидкости с проецированием изображения углубления на экране. Даны рекомендации по применению метода, позволяющие повысить точность измерений.

Ключевые слова: лазерный диод, коллимирующая линза, поверхность жидкости, углубление, струя газа.

The optical method for determining the shape and dimensions of cavity formed by gas jet on a liquid surface, and the installation for its realization are presented. The method is based on the transmission of collimated laser beam parallel to undistorted liquid surface with projection of the cavity on a screen. The recommendations for application of this method allowing to increase the measurement accuracy are given.

Key words: laser diode, collimator lens, liquid surface, cavity, gas jet.

Взаимодействие газа и жидкости с формированием свободной поверхности раздела фаз встречается во многих технологических процессах и природных явлениях. Один из видов подобного взаимодействия — формирование углубления на поверхности жидкости под действием газовой струи. Воздействие струи на жидкость применяют в металлургии, авиации и космонавтике, химической технологии, при исследовании тонких поверхностных пленок, например пленок Ленгмюра—Блоджетт и др. [1—8]. Часто для исследований и моделирования процессов в различных газожидкостных системах используют прозрачные жидкости, что позволяет применять оптические методы измерений геометрических параметров поверхности раздела фаз.

В большинстве случаев исследователи определяют геометрические параметры взаимодействия струи газа с поверхностью жидкости по фотографиям поверхности раздела [1, 7—10]. Такой способ обладает невысокой точностью в силу ряда особенностей: размеры полученного изображения необходимо соотносить с мерой длины, лежащей, как правило, в другой плоскости; источник освещения поверхности раздела создает блики, которые могут исказить форму изображения; поверхность жидкости, недеформированная струей газа, не является плоской, что создает трудности при определении высоты углубления по его фотографии.

Чтобы повысить точность измерений параметров поверхности раздела фаз, используют теневой

метод, заключающийся в просвечивании жидкости коллимированным лучом света с получением изображения углубления на полупрозрачном экране [6, 11]. Современная техника позволяет добиться высокой точности определения параметров при простоте технической реализации измерений.

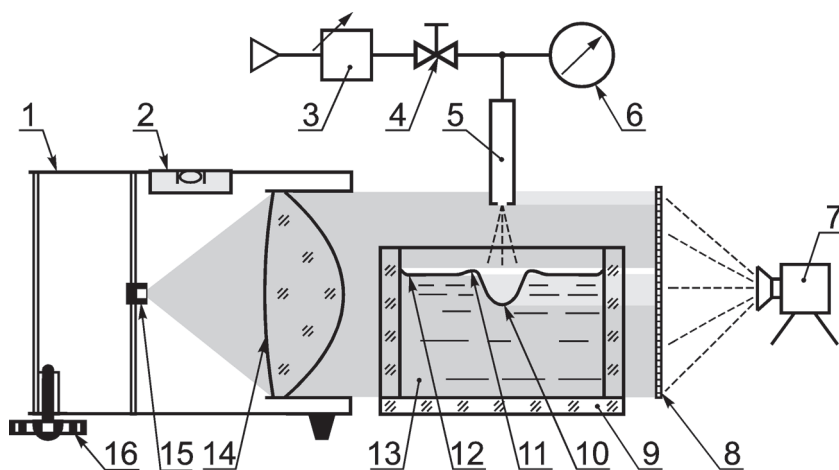


Рис. 1. Схема установки для измерения геометрических параметров взаимодействия струи газа с поверхностью жидкости:

1 — источник коллимированного лазерного излучения; 2 — гидростатический указатель уровня; 3 — стабилизатор давления; 4 — пневматическое сопротивление; 5 — струйная трубка; 6 — микроманометр; 7 — камера; 8 — экран; 9 — стеклянная ювета; 10 — углубление; 11 — кромка; 12 — капиллярные мениски; 13 — жидкость; 14 — асферическая коллимирующая линза; 15 — лазерный диод; 16 — винт

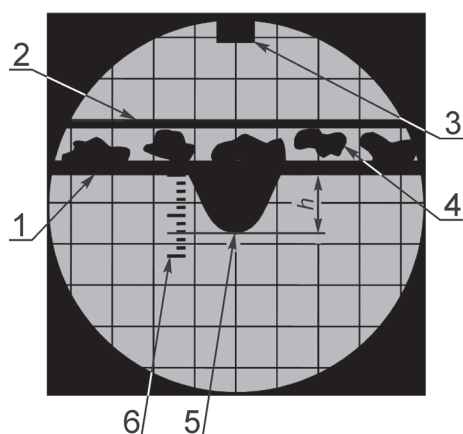


Рис. 2. Эскиз изображения на экране:

1 — недеформированная поверхность; 2 — край кюветы; 3 — струйная трубка; 4 — капли жидкости, оставшейся после смачивания кюветы; 5 — углубление; 6 — шкала (линейка)

В статье описан теневой метод измерений геометрических параметров поверхности раздела газовой и жидкой фаз и даны рекомендации по его применению.

На рис. 1 представлена схема установки для реализации оптического метода измерений геометрических параметров углубления, формируемого струей газа на поверхности жидкости, на рис. 2 — эскиз изображения, получаемого на экране.

Струя газа формируется диафрагмой, установленной на выходе трубки 5, и направляется на поверхность жидкости 13, находящейся в стеклянной кювете 9 (см. рис. 1). Количество движения в струе определяется давлением перед выходным отверстием трубки 5, контролируемым по микроманометру 6, и устанавливается при помощи стабилизатора давления 3 и переменного пневматического сопротивления 4. Под действием струи поверхность жидкости деформируется с образованием углубления 10 и кромки 11, поднимающейся выше уровня недеформированной поверхности. В результате смачивания жидкостью поверхности боковых стенок кюветы вблизи стенок формируются капиллярные мениски 12.

В корпусе источника 1 коллимированного лазерного излучения закреплены гидростатический указатель уровня 2, асферическая коллимирующая линза 14 типа 582.3711010/011 производства ОАО «Автосвет» и лазерный диод 15 типа HLDPM10-650-3 без коллимирующей линзы, кристалл которого расположен в фокусе линзы 14. При установке источника 1 с помощью винта 16 по указателю уровня 2 горизонтальный коллимированный луч лазерного излучения проходит через кювету с жидкостью и создает на полупрозрачном экране 8 с сеткой изображения любых предметов, препятствующих его прямолинейному распространению. Изображение, полученное на экране, с помощью камеры 7 передается в персональный компьютер для увеличения и обработки.

Прямолинейному распространению лазерного излучения препятствуют процессы поглощения, отражения и прелом-

ления света. По этой причине на экран 8 проецируются изображения всех частей установки, участвующих в этих процессах. На рис. 2 представлены изображения недеформированной поверхности 1 жидкости, краев 2 кюветы, струйной трубки 3 и углубления 5, формируемого струей газа.

Высота h углубления является основной геометрической характеристикой взаимодействия струи газа с жидкостью. Она определяется силами, действующими на поверхность раздела фаз, и в любых исследованиях системы струя газа — жидкость высоту необходимо определять с большой точностью. С помощью рассматриваемого метода можно найти высоту h относительно недеформированной поверхности 1 исследуемой жидкости (см. рис. 2). Определить высоту кромки 11 углубления 10 нельзя из-за капиллярных менисков 12 у стенок кюветы 9 (см. рис. 1), однако это и не требуется, так как составление уравнений баланса сил, действующих только на поверхность углубления, дает возможность упростить математическое описание процессов взаимодействия без снижения точности.

Измерить высоту h с большой точностью при непосредственном фотографировании поверхности взаимодействия затруднительно, так как изображения не позволяют однозначно определить границы углубления на уровне недеформированной поверхности жидкости. Изображение, формируемое коллимированным лучом на экране, не только обеспечивает высокую четкость, но и позволяет избежать проблем с фокусировкой. Любая камера легко фокусируется на плоскости экрана в автоматическом режиме.

При измерениях параметров углубления рассматриваемым методом важно направлять лазерный луч горизонтально. Недеформированная поверхность контролируемой жидкостью занимает горизонтальное положение под действием силы тяжести. Луч, направленный горизонтально, проходит параллельно поверхности жидкости и проецирует на экран изображение всего объема углубления. При отклонении от горизонтального распространения верхняя часть изображения углубления теряется вследствие отражения светового потока от недеформированной поверхности. Экспериментально установлено, что при отклонении луча от горизонтали на угол не более 20° для кюветы длиной 50 мм не наблюдается значительное снижение точности измерений.

На рис. 2 изображены капиллярные мениски, возвышающиеся над недеформированной поверхностью 1, и капли жидкости 4, оставшейся на стенках кюветы после их смачивания. Смачивание после заполнения кюветы необходимо проводить с целью исключения формирования углублений вблизи стенок, что может внести погрешность в измерения высоты h . После смачивания стенок до проведения исследований целесообразно дать выдержку по времени для стекания жидкости, что обеспечит лучшую четкость изображения поверхности раздела фаз.

В ходе обработки изображений на компьютере для получения точности до десятых долей миллиметра целесообразно использовать виртуальную меру длины (например, линейку 6), перемещаемую поверх изображения на экране персонального компьютера, или систему распознавания

образов. При необходимости мера оперативно калибруется по линиям сетки для каждого изображения. Линии сетки на экране в отдельных случаях затрудняют точное измерение геометрических параметров углубления. Для повышения точности измерений возможно уменьшение толщины линий сетки, нанесение сетки с более крупным шагом или ее замена на две опорные (горизонтальную и вертикальную) меры длины. В последнем случае все измерения проводятся исключительно по виртуальной линейке, которая калибруется по изображениям мер, нанесенным на экране.

Для получения яркого изображения на экране не требуется высокой мощности излучения. Достаточно использовать лазерный диод с выходной мощностью, не превышающей нескольких единиц милливатт. В связи с особенностями лазерного излучения изображение, получаемое цифровой фотокамерой, более качественное, чем видимое наблюдателем непосредственно на экране. При фотографировании изображения целесообразно использовать ручные настройки чувствительности, диафрагмы и выдержки.

С целью определения погрешности измерений рассматриваемым методом проведена его экспериментальная проверка. В жидкость (эпоксидную смолу) на разную глубину (в интервале 0—9,3 мм) вертикально погружали микрометрический винт. В исходном положении винт находился над поверхностью жидкости. Нулевую глубину погружения определяли в момент касания торцом винта поверхности жидкости. Измерения проводили при прямом и обратном ходе. По результатам эксперимента установлено, что погрешность измерений не превышает 0,1 мм, т. е. с использованием кюветы длиной 50 мм можно получить изображение углубления минимальной высотой $h = 0,1$ мм. Для больших значений h погрешность измерений меньше.

Достигнутая точность измерений не является пределом. Основными источниками инструментальных погрешностей являются: aberrации коллимирующей линзы; смещение кристалла лазерного диода от фокуса линзы; зернистость материала полупрозрачного экрана; линии сетки и отклонение луча от горизонтали. Уменьшение влияния этих факторов позволит измерять геометрические параметры поверхностей раздела с более высокой точностью.

Рассмотренный метод можно успешно применять в любых многофазных системах: газ — жидкость; жидкость — твердое тело; жидкость — жидкость и т. д. Условием реализуемости метода является прозрачность одной из фаз. Пример применения подобной системы для измерений размеров газовых пузырьков в жидкости представлен в [11]. При необходимости кювету с исследуемой жидкостью можно термостатировать, поместив в проточную кювету большего раз-

мера, заполненную прозрачной термостатирующей жидкостью, уровень которой выше уровня исследуемой.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 14-08-31060-мол_а).

Л и т е р а т у р а

1. **Hwang H. Y., Irons G. A.** A water model study of impinging gas jets on liquid surfaces // *Metal. Mater. Trans. B*. 2012. V. 43B. N. 2. P. 302—315. DOI: 10.1007/s11663-011-9613-3.
2. **Erssohn M., Tillander A., Jonsson L., Jönsson P.** A mathematical model of an impinging air jet on a water surface // *ISIJ Intern.* 2008. V. 48. N. 4. P. 377—384. DOI: 10.2355/isijinternational.48.377.
3. **Labus T. L., Aydelott J. C.** Gas-jet impingement normal to a liquid surface: NASA technical note TN D-6368. Washington, D. C.: NASA, 1971.
4. **Bradshaw A. V., Chatterjee A.** Mass transfer from a carbon dioxide jet to a tap water // *Chem. Eng. Sci.* 1971. V. 26. N. 6-B. P. 767-772. DOI: 10.1016/0009-2509(71)83038-5.
5. **Berendsen C. W. J., Zeegers J. C. H., Kruis G. C. F. L., Riepen M., Darhuber A. A.** Rupture of Thin Liquid Films Induced by Impinging Air-Jets // *Langmuir*. 2012. V. 28. N. 26. P. 9977—9985. DOI: 10.1021/la301353f.
6. **Pfund A. H., Greenfield E. W.** Surface-tension measurements of viscous liquids // *Ind. Eng. Chem. Res.* 1936. V. 8. N. 2. P. 81—82. DOI: 10.1021/ac50100a001.
7. **Мордасов Д. М., Мордасов М. М., Савенков А. П.** Аэрогидродинамические эффекты в бесконтактных струйных методах неразрушающего контроля вязкости жидких веществ. М.: Физматлит, 2012.
8. **Мордасов М. М., Савенков А. П.** Бесконтактные методы измерения вязкости жидкостей (обзор) // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2013. Т. 79. № 1. С. 27—35.
9. **He A., Belmonte A.** Deformation of a liquid surface due to an impinging gas jet: A conformal mapping approach // *Phys. Fluids*. 2010. V. 22. N. 042103. N. 4. P. 042103-1—042103-7. DOI:10.1063/1.3327209.
10. **Solórzano-López J., Zenit R., Ramírez-Argáez M. A.** Mathematical and physical simulation of the interaction between a gas jet and a liquid free surface // *Appl. Math. Model.* 2011. V. 35. N. 10. P. 4991—5005. DOI:10.1016/j.apm.2011.04.012.
11. **Jiang S., Fan W., Zhu C., Ma Y., Li H.** Formation behavior of gas bubbles with laser image visualization technique // *Chin. J. Proc. Eng.* 2008. V. 8. N. 1. P. 13—17.

Дата принятия 24.01.2015 г.