

03

Взаимодействие струи газа с поверхностью жидкости в режиме стабильных колебаний

© М.М. Мордасов, А.П. Савенков

Тамбовский государственный технический университет

E-mail: savencow@yandex.ru

Поступило в Редакцию 29 апреля 2016 г.

Представлено описание взаимодействия струи газа с поверхностью жидкости в режиме стабильных колебаний, при которых форма углубления в различных фазах периодически повторяется с высокой точностью. Такой режим наблюдается при действии газовой струи под углами 30° – 40° на поверхность вязкой жидкости (вязкость более $1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$). Рассматривается механизм взаимодействия газовой и жидкой фаз в колебательном процессе, обуславливающий изменение формы углубления на поверхности жидкости. Установлено, что колебания носят релаксационный характер. Отмечена характерная особенность колебательного процесса — отрыв струи газа, выходящей из углубления, от поверхности жидкости. Стабильные колебания в системе „струя газа–жидкость“ могут быть использованы в бесконтактных методах измерения физических свойств жидкости, например ее вязкости.

Традиционно исследования взаимодействия струи газа с поверхностью жидкости связаны с моделированием кислородно-конверторного процесса производства стали [1–3]. Кинематическая вязкость расплава в конверторе близка к вязкости воды. По этой причине при проведении экспериментальных и теоретических исследований, как правило, используют невязкие жидкости. Отсутствие внутреннего трения приводит к образованию хаотических колебаний поверхности жидкости в области действия газовой струи. Эти колебания в большинстве случаев настолько нестабильны, что их изучение возможно только с применением частотного анализа [1,4,5].

Исследованию взаимодействия струи газа с вязкой жидкостью посвящено ограниченное число работ [6,7]. При действии струи на поверхность вязкой жидкости значительно увеличивается максимальная скорость газа в стабильном режиме, при котором образованное

углубление устойчиво и хаотические колебания отсутствуют. Однако высокая вязкость жидкости не является достаточным условием для формирования стабильных колебаний на ее поверхности. На поверхности вязкой жидкости колебания возникают при локальном уменьшении силы действия струи. Давление со стороны газовой фазы становится меньшим гидростатического давления, что и приводит к зарождению волны и нарушению устойчивости в двухфазной системе „струя газа–жидкость“. В случае действия струи перпендикулярно поверхности жидкости появление волны равновероятно по всей боковой поверхности образованного углубления, поэтому в разных периодах колебаний его деформация происходит в разных направлениях, и колебания хаотичны. Вторым необходимым условием формирования стабильных колебаний является действие струи на поверхность жидкости под углом меньшим 90° , при котором направление деформации углубления однозначно задается направлением действия струи. Очевидно, что повышению стабильности колебаний способствует уменьшение угла α между осью струи и поверхностью жидкости. Практический интерес представляет диапазон 30° – 40° .

Несмотря на многочисленные исследования системы „струя газа–жидкость“ известно малое число работ, в которых используется неперпендикулярное струйное воздействие [2,8]. В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований режима стабильных колебаний, обнаруженного при неперпендикулярном воздействии газовой струи на поверхность жидкости, и теоретическое обоснование механизма взаимодействия двух фаз.

На рис. 1 представлены зависимости максимальной высоты h_{\max} углубления на поверхности жидкости и критической скорости w_{osc} газа в струе от угла α действия струи. При скорости газа в струе большей w_{osc} углубление теряет устойчивость и система „струя газа–жидкость“ переходит в колебательный режим. В экспериментах использованы воздушные струи, вытекающие из отверстия диаметром 1.05 mm, действующие на эпоксидную смолу марки ЭД-20 с вязкостью $\sim 20 \text{ Pa} \cdot \text{s}$. Расстояние по оси струи от отверстия истечения до недеформированной поверхности жидкости при изменении угла α поддерживалось постоянным и равным 20 mm. Зависимость $h_{\max}(\alpha)$ получена при постоянном значении $w = 42 \text{ m/s}$ скорости газа в струе.

Критическое значение w_{osc} скорости газа в струе значительно снижается при минимальном отклонении угла α от 90° (рис. 1). При

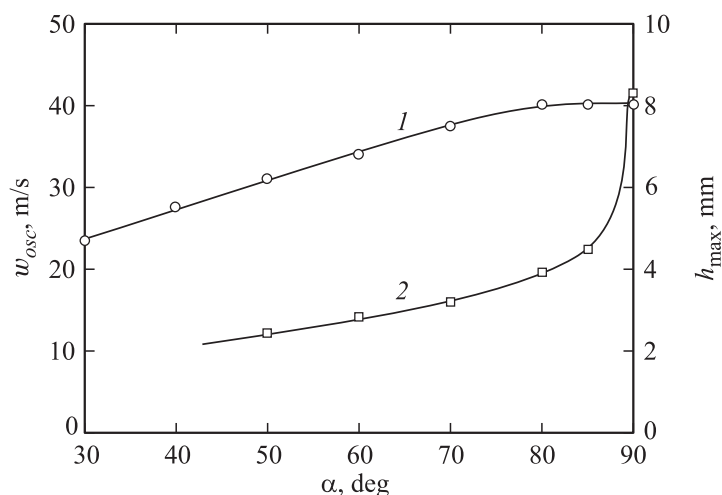


Рис. 1. Зависимости максимальной высоты h_{max} углубления (1) и критической скорости w_{osc} газа в струе (2) от угла α действия струи.

этом эффективность действия струи сохраняется, так как максимальная высота h_{max} углубления изменяется в меньшей степени. Следовательно, для получения колебательного режима взаимодействия газа и жидкости предпочтительно использовать неперпендикулярное воздействие, для стабильного — перпендикулярное.

На рис. 2 показаны формы углубления на поверхности эпоксидной смолы ЭД-20 в различных фазах колебаний при $\alpha = 30^\circ$. Вертикальное расстояние от отверстия истечения диаметром 1.05 mm до недеформированной поверхности жидкости было равным 20 mm. Период колебаний составил 10 s. Формы углублений в различных периодах для одинаковых фаз колебаний совпадают. На рис. 3 представлены схемы взаимодействия струи газа с жидкостью в колебательном режиме.

Волна 3, сформированная струей газа, движется вдоль поверхности жидкости 2 по направлению действия струи (рис. 2, *a, b*; рис. 3, *a*). Сила, с которой струя действует на левый по схеме склон углубления, уменьшается, так как в этой области направление потоков газа параллельно поверхности жидкости. В этом месте под действием гидростатического давления поверхность жидкости поднимается, что приводит к заро-

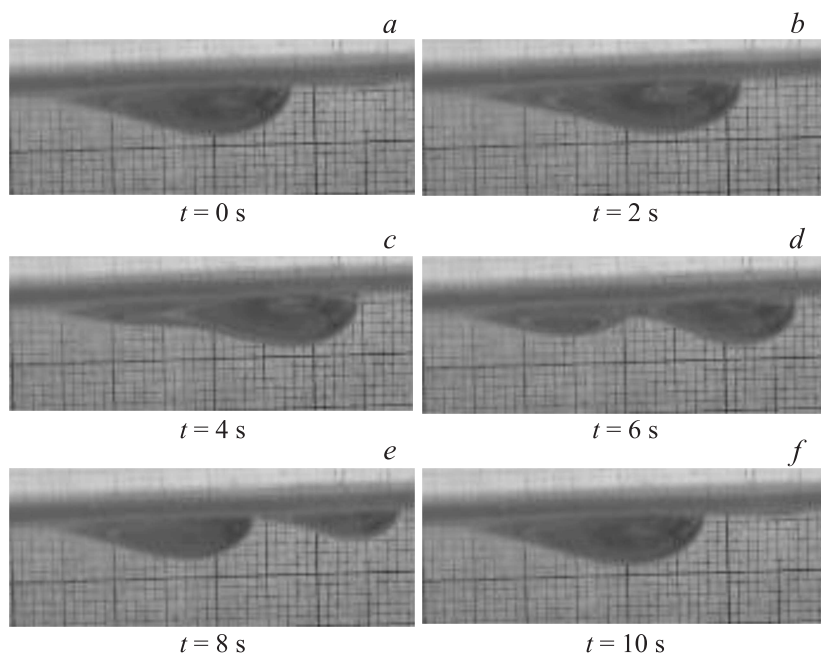


Рис. 2. Формы углубления на поверхности эпоксидной смолы в различных фазах колебаний (в различные моменты времени t).

дению новой волны. Этот процесс иллюстрирует фотография рис. 2, *c*. Поверхность жидкости становится непараллельной направлению потоков газа, вследствие чего на зарождающуюся новую волну 3 (рис. 3, *b*) действует сила, приводящая к ее перемещению и росту. Увеличение размеров волны обусловлено действием положительной обратной связи. С одной стороны, увеличение площади поверхности, непараллельной направлению потоков газа приводит к увеличению силы, действующей на нее, с другой — увеличение силы, действующей со стороны струи, способствует росту кривизны поверхности и размеров новой волны. Рост и движение новой волны 3 сопровождается исчезновением предыдущей волны 4 (рис. 2, *d–f*; рис. 3, *b*). Это объясняется тем, что количество движения струи перераспределяется между двумя волнами, а импульс, поступающий к исчезающей волне 4, зависит от положения и

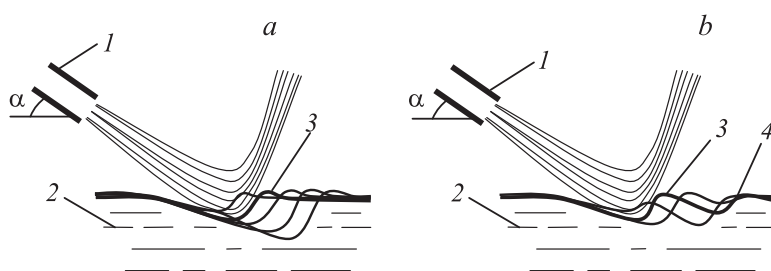


Рис. 3. Схемы взаимодействия струи газа с жидкостью в колебательном режиме: *a* — в начале действия газовой струи, *b* — в установившемся колебательном процессе; 1 — сопло, 2 — жидкость, 3 — зарождающаяся волна, 4 — исчезающая волна.

размеров зарождающейся волны 3. Во время роста волны 3 количество движения струи, поступающее к волне 4, убывает. После исчезновения волны 4 существует только одна новая волна 3 (рис. 2, *f*, *a*). После достижения волной 3 определенного положения зарождается следующая волна (рис. 2, *c*) и т. д.

Механизм стабильных колебаний в системе „струя газа–жидкость“, рассмотренный выше, говорит об их релаксационном характере. Движение волны в направлении действия струи и рост размеров углубления подобны увеличению энергии в накопителе релаксационного генератора (например, в конденсаторе). Появление новой волны подобно срабатыванию нелинейного ключевого элемента, перераспределяющего энергию между двумя накопителями (в системе „струя газа–жидкость“ — зарождающейся и исчезающей волнами).

Режим стабильных релаксационных колебаний в системе „струя газа–жидкость“, при которых формы углублений неизменно повторяются из периода в период, возможен в диапазоне углов α от 30° до 40° при вязкости не менее $1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$. В случае больших углов (60°) и меньшей вязкости ($0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) колебания также сохраняют стабильность, но на поверхности жидкости присутствуют небольшие случайные волны, форма и положение которых изменяются от периода к периоду. При углах менее 30° количество движения струи используется неэффективно.

Кроме возможности получения режима стабильных колебаний перпендикулярное действие струи обеспечивает отрыв потоков, вы-

ходящих из углубления, от поверхности жидкости (рис. 3). При перпендикулярном струйном воздействии потоки, выходящие из углубления, растекаются вдоль поверхности жидкости в результате взаимодействия с потоками, вытекающими из сопла.

Одно из технических применений режима стабильных релаксационных колебаний в системе „струя газа–жидкость“ — это бесконтактное измерение физических свойств жидкостей. Например, период колебаний прямо пропорционален вязкости жидкости, что при стабилизации влияющих величин позволяет определять значение вязкости по результатам измерения периода [9]. Проведение бесконтактных измерений особенно важно именно в случае вязких жидкостей, на поверхности которых и наблюдаются стабильные колебания. Повышение стабильности колебаний путем уменьшения угла α способствует снижению случайной составляющей погрешности измерения. Кроме того, при малых углах α происходит почти линейное движение волны вдоль поверхности жидкости, при котором в наибольшей степени проявляется действие вязкости. При больших α имеют место более сложные изменения формы углубления, сопровождаемые более сильным влиянием поверхностного натяжения и плотности жидкости на частоту колебаний, а следовательно, и на результат измерения вязкости. Определение положения волны на поверхности жидкости при больших углах α представляет более сложную задачу, чем при малых.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований и их теоретическая интерпретация, представленные в настоящей работе, говорят о возможности возбуждения стабильных релаксационных колебаний поверхности вязкой жидкости под действием энергии газовой струи. Прямым техническим применением этого процесса является бесконтактное измерение физических свойств жидкости, например, ее вязкости. Для развития фундаментальных знаний в области аэрогидродинамики двухфазных систем и практических аспектов разработки бесконтактных методов измерения физических свойств жидкостей в качестве направлений дальнейших исследований следует отметить следующие: математическое моделирование процессов, происходящих в двухфазной системе „струя газа– жидкость“ в режиме стабильных колебаний; исследование влияния параметров системы (расстояние от отверстия истечения до поверхности жидкости, угол α , количество движения в струе, плотность, поверхностное натяжение и вязкость жидкости) на величины максимальной высоты углубления, максимального

перемещения волны по поверхности жидкости и период колебаний; выявление и изучение закономерностей выхода газового потока из углубления в различных фазах колебаний.

Работа выполнена в рамках программы президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ (грант № НШ-2411.2014.3).

Список литературы

- [1] *Hwang H.Y., Irons G.A.* // Metall. Mater. Trans. B. 2012. V. 43. N 2. P. 302–315. 10.1007/s11663-011-9613-3.
- [2] *Solórzano-López J., Zenit R., Ramírez-Argáez M.A.* // Appl. Math. Model. 2011. V. 35. N 10. P. 4991–5005. 10.1016/j.apm.2011.04.012.
- [3] *Park S.S., Dyussekenov N., Sohn H.Y.* // Metall. Mater. Trans. B. 2010. V. 41. N 1. P. 51–62. 10.1007/s11663-009-9310-7.
- [4] *Evestedt M., Medvedev A.* // J. Jap. Soc. Exp. Mech. 2007. V. 7. Special Iss. P. 93–98. 10.11395/jjsem.7.s93.
- [5] *Gelderloos R.* // 2010 Program of Study: Swirling and Swimming in Turbulence. Woods Hole, Massachusetts (US): Woods Hole Oceanographic Institution, 2011. P. 196–212.
- [6] *He A., Belmonte A.* // Phys. Fluids. 2010. V. 22. N 042103. P. 042103(1–7). 10.1063/1.3327209.
- [7] *Мордасов М.М., Савенков А.П., Чечетов К.Е.* // ЖТФ. 2016. Т. 86. В. 5. С. 20–29. 10.1134/S1063784216050170.
- [8] *Collins R.D., Lubanska H.* // Brit. J. Appl Phys. 1954. V. 5. N. 1. P. 22–26. 10.1088/0508-3443/5/1/306.
- [9] *Мордасов Д.М., Мордасов М.М., Савенков А.П.* Аэрогидродинамические эффекты в бесконтактных струйных методах неразрушающего контроля вязкости жидких веществ. М.: Физматлит, 2012. 352 с.