

УДК 532.529

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ НАСЫЩЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ ГАЗОМ ПУТЕМ ВОЗДЕЙСТВИЯ УДАРНЫХ ВОЛН

Н. А. Прибатурин, Д. П. Стасенко

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск

Исследовано влияние ударной волны на абсорбцию газа жидкостью в пузырьковых средах, различающихся степенью растворимости газа. Показано, что ударная волна, воздействующая на газожидкостную среду, может существенно увеличить скорость массообмена между газом и жидкостью.

Известно, что интенсивное перемешивание жидкости в газожидкостных системах увеличивает скорость массопередачи между газом и жидкостью. Аналогичного перемешиванию эффекта можно достичь при использовании звуковых колебаний. В частности, при абсорбции углекислого газа водой [1–3] скорость массопереноса резко возрастала при наложении на систему пузырьки газа — жидкость акустических колебаний с частотой 20 ÷ 200 Гц. Такое воздействие приводило к неустойчивости на границе раздела пузырька газа с жидкостью, что в конечном счете вызывало увеличение площади контакта фаз и коэффициента массообмена. Объемный коэффициент массообмена возрастал в 1,5–4 раза в зависимости от амплитуды и частоты акустических колебаний.

Некоторые результаты исследования волновой динамики многофазных систем [4, 5] позволяют говорить о возможности существенного увеличения скорости массообмена в пузырьковой жидкости. Это утверждение основано на закономерностях взаимодействия ударной волны (УВ) с газожидкостными системами. Действительно, генерация УВ в жидкости, насыщенной газовыми пузырьками, должна вызывать их разрушение и, следовательно, увеличение площади контакта фаз. Кроме того, особенности поведения среды за фронтом УВ вызывают интенсивное мелкомасштабное движение жидкости около межфазной поверхности, которое также способствует интенсивному диффузионному потоку в жидкость. Предполагаемый рост скорости массопереноса определяется интенсивностью и длительностью волны давления, возмущающей среду.

Целью данной работы является экспериментальная проверка гипотезы о существенной интенсификации абсорбции газа жидкостью при действии УВ на газожидкостную среду.

Эксперименты проводились в вертикально расположенных двухфазных ударных трубах с диаметрами каналов 8 и 25 мм и максимальными длинами рабочих каналов 3,5 и 2,5 м. Конструкция труб приведена в работе [6]. Схема эксперимента показана на рис. 1. Среда создавалась путем ввода газа в неподвижную жидкость, заполняющую рабочий участок ударной трубы. Подвод газа осуществлялся через игольчатые капилляры диаметром 0,1 мм, расположенные на дне рабочего участка. При проведении экспериментов контролировались атмосферное и статическое давления, температура, газосодержание, размер газовых пузырьков, регистрировались пульсации давления и изменение общего объема среды за фронтом УВ. Пульсации давления измерялись пьезометрическими датчиками давления, имеющими резонансную частоту 15 кГц. Изменение газосодержания

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 96-05-65956).

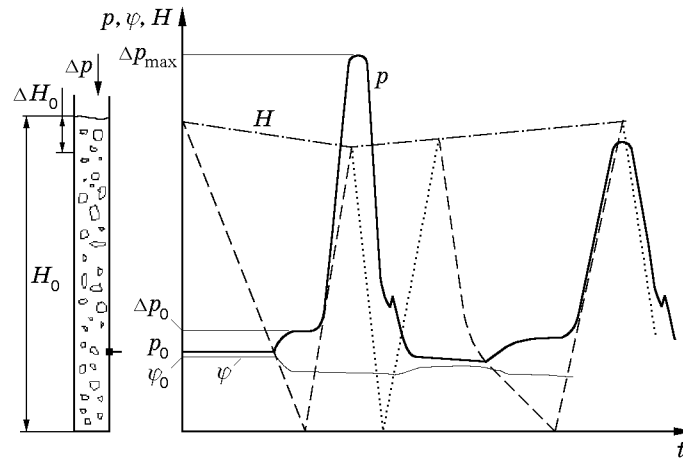


Рис. 1

в волне давления и свободного уровня среды регистрировалось с помощью оптической теневой схемы [6], основанной на различии в отклонениях лазерного луча при его прохождении через жидкость или газ. В этом случае синхронно с записью волны давления фиксировался сигнал с фотодатчика оптической измерительной системы, по которому восстанавливалось изменение газосодержания.

Погрешность измерений, связанная с регистрацией и обработкой пульсаций давления и газосодержания, в основном зависела от параметров измерительной системы, и ее величина определялась с помощью тарировки. Погрешность измерения газосодержания не превышала 10%. Ошибка измерения пульсаций давления, связанная с цепью датчик — усилитель, также не превышала 10%.

В экспериментах использовались системы с различной степенью растворимости газа в жидкости: вода — углекислый газ и вода — аммиак. Зависимость равновесной концентрации газа в жидкости от давления определена в работе [7]. В качестве тестовой среды применена система вода — пузырьки воздуха. Во всех опытах начальное статическое давление составляло $p_0 = 0,1$ МПа, а амплитуда возмущающей ударной волны Δp_0 изменялась от 0,02 до 2 МПа.

Перед каждым опытом рабочая часть ударной трубы заполнялась чистой жидкостью, затем в жидкость подавался газ. С целью уменьшения начального количества растворенного газа в жидкости время его подачи ограничивалось. Исходное газосодержание среды составляло $\varphi_0 = 1 \div 25$ %. Малые значения φ_0 соответствуют исходному состоянию среды в виде пузырьковой структуры, газосодержание $\varphi_0 = 20 \div 25$ % — снарядной структуре среды. В созданную газожидкостную среду вводилась УВ определенной интенсивности. По мере ее распространения по среде фиксировались профиль волны, изменения газосодержания и свободного уровня жидкости. По измеренным значениям давления и газосодержания определялся объемный коэффициент массообмена.

Непосредственное измерение концентрации газа, растворяющегося в жидкости за фронтом УВ, практически невозможно из-за большой инерционности газоанализаторов, поэтому в данной работе использовались измеряемые параметры УВ и газосодержания.

Профили волны давления $p(t)$ и газосодержания $\varphi(t)$ в рабочем участке ударной трубы и диаграмма распространения волны давления в среде приведены на рис. 1. Здесь же показан свободный уровень жидкости $H(t)$ (штрихпунктирная линия). Данные профили типичны для используемых сред, а количественные характеристики различаются только степенью размытости переднего фронта волны и максимальной амплитудой волны при постоянных прочих параметрах (амплитуде начальной волны давления, газосодержании).

Рассмотрим подробнее эволюцию волны в среде и поведение данной среды. На рис. 1 штриховой линией показана возмущающая УВ с амплитудой Δp_0 , которая, войдя в среду, начинает распространяться в ней со скоростью u_0 , превышающей определенную по однородной модели скорость звука в среде $c_0 = \sqrt{\gamma p_0 / (\rho_1 \varphi_0 (1 - \varphi_0))}$ (γ — показатель адиабаты, ρ_1 — плотность жидкости). При повышении давления двухфазная среда выходит из равновесного состояния и в ней начинается диффузионный процесс, выравнивающий концентрации компонентов согласно равновесным параметрам. Для системы жидкость — пузырьки растворимого газа это означает, что по мере роста давления газосодержание уменьшается за счет растворения газа в жидкости. При определенной амплитуде возмущающей волны давления наступает полное растворение газа за ее фронтом, вследствие чего плотность среды становится равной плотности жидкости.

Применяя интегральные законы сохранения для УВ в среде с изменяемой плотностью, можно определить параметры волны и среды: до фронта волны $p = p_0$, $\varphi = \varphi_0$, $v = 0$, за фронтом волны $p = p_1 = p_0 + \Delta p_0$, $\varphi = 0$, $v = v_1$. Таким образом, при полном исчезновении газовой фазы за фронтом волны жидкость приобретает скорость, значение которой согласно законам сохранения определяется соотношением $v_1 = \sqrt{\Delta p_0 \varphi_0 / (\rho_1 (1 - \varphi_0))}$. При отражении УВ от дна ударной трубы волна начинает распространяться вверх (пунктирная линия на рис. 1). В предельном случае полного исчезновения газовой фазы отраженная волна давления распространяется со скоростью звука в жидкости: $u_r \approx c_1$. Из закона сохранения импульса следует, что в этом случае амплитуда отраженной волны должна быть существенно больше амплитуды падающей на дно ударной трубы волны давления. Это наблюдается в эксперименте и на измеряемом профиле волны в виде мощного импульса с амплитудой Δp_{\max} (рис. 1). Последующее отражение волны давления от свободной границы жидкости вызывает волну разгрузки (пунктирная линия на рис. 1), ее очередное отражение от жесткого дна приводит к дальнейшему снижению давления. Возвращаясь затем на свободную границу жидкости и отражаясь от нее, волна разгрузки трансформируется в волну сжатия, и описанный выше процесс повторяется. Профиль газосодержания зависит от амплитуды волны давления. Для слабой волны с интенсивностью $(0,2 \div 0,5)p_0$ вначале он имеет пульсирующую форму, а затем монотонно спадает до нулевого уровня. Для сильной волны профиль $\varphi(t)$ имеет резко выраженный ступенчатый вид с нулевым асимптотическим значением за фронтом волны давления. Длительность уменьшения газосодержания от начального значения до нуля соответствует длительности фронта сильной волны давления и характеризует время растворения газового пузырька в жидкости.

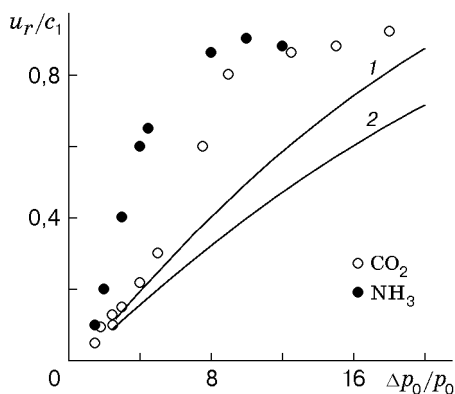


Рис. 2

Качественное представление о степени абсорбции газа жидкостью за УВ дают параметры отраженной от дна ударной трубы УВ. На рис. 2 точки — измеренные значения скорости отраженной волны u_r ; линии 1, 2 — результаты расчета по модели [5] при $\varphi_0 = 10, 20\%$ (среда с газовыми пузырьками постоянной массы). Из анализа рис. 2 следует, что чем больше амплитуда возмущающей волны, тем ближе скорость отраженной волны u_r к предельному значению, определяемому скоростью звука в чистой жидкости. Начиная с амплитуд $0,8 \div 1,0$ МПа скорость отраженной волны близка к скорости звука в жидкости, что является косвенным доказательством полного исчезновения газа за УВ и перехода среды из двухфазного состо-

яния в однофазное.

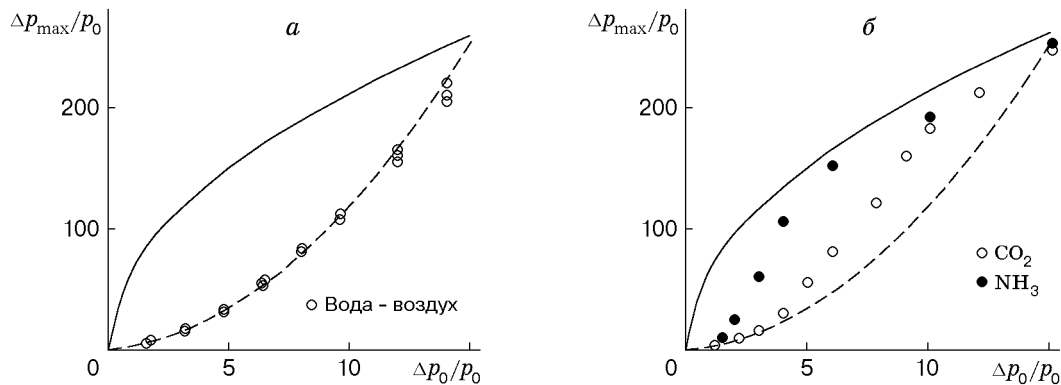


Рис. 3

С учетом того, что вся масса газа переходит в жидкость за фронтом УВ, согласно закону сохранения импульса выражение для амплитуды отраженной волны имеет вид $\Delta p_{\max} = \rho_1 c_1 v_1$. Подставляя сюда значение v_1 , получим выражение для максимальной амплитуды отраженной волны

$$\Delta p_{\max} = c_1 \sqrt{\rho_1/p_0} \sqrt{\Delta p_0 \varphi_0/p_0}. \quad (1)$$

В другом предельном случае полного сохранения массы газа (т. е. в отсутствие растворения газа) амплитуда отраженной волны будет зависеть от степени сжатия газа за фронтом прямой УВ и согласно модели [5] определяться соотношением

$$\Delta p_{\max}/p_0 = (\Delta p_0/p_0 + 1)^2 - 1. \quad (2)$$

Предельные значения, вычисленные при $\varphi_0 = 20\%$ по соотношениям (1) и (2), показаны на рис. 3 сплошными и штриховыми линиями соответственно. Измеренные значения амплитуды отраженной волны должны располагаться в областях, ограниченных этими линиями. Очевидно, чем выше степень перехода массы газа в жидкость в волне давления, тем ближе к линии, определяемой соотношением (1), располагаются измеренные значения амплитуды волны. Таким образом, по экспериментальным значениям амплитуды отраженной волны можно судить о степени растворимости газа при действии УВ на газожидкостную среду. На рис. 3 точками показаны экспериментальные данные. Результаты измерений на тестовой системе вода — воздух (рис. 3,а) согласуются с расчетом по соотношению (2). При использовании газа, растворимого в жидкости, ситуация меняется. На рис. 3,б видно, что поведение среды с растворимым газом соответствует поведению тестовой системы только при малых амплитудах возмущающей волны давления. При возмущении среды волной с амплитудой Δp_0 , большей 0,2 МПа для аммиака и 0,4 МПа для углекислого газа, значение Δp_{\max} значительно превышает амплитуду, определяемую ударной адиабатой пузырьковой среды. Таким образом, чем больше начальная растворимость газа в жидкости, тем меньшее возмущение давления влияет на процесс растворения газа в жидкости. С этой точки зрения указанные значения можно рассматривать как пороговые, определяющие начало существенного влияния УВ на абсорбцию газа жидкостью.

При превышении порогового значения и дальнейшем росте амплитуды УВ измеренные значения амплитуды отраженной волны приближаются к значениям, определяемым условием полного перехода массы газа в жидкость за фронтом волны, т. е. зависимостью (1). Из анализа рис. 3 следует, что полное растворение углекислого газа в воде за фронтом УВ наступает при $\Delta p_0 > 1$ МПа. Для системы вода — аммиак пороговое значение амплитуды волны, при котором наблюдается его полное растворение, меньше и составляет около 0,6 МПа.

По-видимому, пороговое значение амплитуды УВ, при котором происходит полное растворение газа за ее фронтом, зависит не только от растворимости газа в жидкости, но и от поведения газовых пузырьков. Известно [5, 8], что они начинают интенсивно разрушаться на мелкие пузырьки при достижении УВ порогового значения, определяемого сортом газа и условиями взаимодействия пузырьков с волной. Распад на мелкие пузырьки существенно увеличивает площадь контакта газа с жидкостью. Удельная межфазная поверхность увеличивается при распаде пузырька как D_0/d (D_0 — начальный диаметр пузырька, d — характерный диаметр образующегося мельчайшего пузырька). Кроме того, формируемые при разрушении пузырьков высокоскоростные кумулятивные струйки жидкости вызывают дополнительную мелкомасштабную турбулизацию жидкости, что способствует росту скорости массообмена на межфазной границе. Критическое значение амплитуды УВ, при котором начинается интенсивный процесс дробления пузырьков, определяется физической моделью развития поверхностной неустойчивости. Использование модели дробления [5] позволяет определить условие начала разрушения пузырьков $We = D_0 \rho_g v_1^2 / \sigma > We_{cr} \approx 2\pi$. Здесь We — число Вебера; ρ_g — плотность газа; σ — коэффициент поверхностного натяжения. Соответствующее значение амплитуды волны составляет $0,2 \div 0,4$ МПа, что согласуется с приведенным выше пороговым значением амплитуды, при котором начинается влияние УВ на интенсификацию растворения газа в жидкости.

Измеряя газосодержание среды за фронтом УВ и ее давление, можно определить количество газа, растворенного в жидкости за время действия волны. На рис. 4 представлены минимальные значения газосодержания среды φ_1 , достигаемые в УВ с амплитудой Δp_0 . Зависимость $\varphi_0/\varphi_1 = F(\Delta p_1/p_0)$ представляет собой уравнение состояния газожидкостной среды. Если бы в среде отсутствовал массообмен, то изменение газосодержания за фронтом УВ определялось бы только сжатием газа в волне давления с амплитудой Δp_1 . Для системы с газовыми пузырьками постоянной массы значение газосодержания за фронтом УВ можно найти из соотношения гомогенной модели газожидкостной среды, представляющего собой ударную адиабату [5]:

$$\varphi_0/\varphi_1 = \varphi_0 + (1 - \varphi_0)(1 + \Delta p_1/p_0)^\gamma. \quad (3)$$

Рассчитанные по этому соотношению значения газосодержания за фронтом УВ с амплитудой Δp_1 показаны на рис. 4 сплошной линией. Как следует из рис. 4, измеренные значения φ_1 соответствуют ударной адиабате только для малых амплитуд УВ. С ростом амплитуды волны наблюдается их устойчивое отклонение от адиабатического соотношения (3). Например, воздействие УВ интенсивности $0,6$ МПа на систему вода — углекислый газ приводит к уменьшению начального газосодержания $\varphi_0 = 20\%$ до газосодержания за фронтом волны $\varphi_1 = 2\%$, в то время как изотермическое сжатие газа в такой волне дает значение, большее в $2,5$ раза. Это различие существенно возрастает при увеличении амплитуды УВ. Из-за малости значений газосодержания за фронтом волны ($\varphi_1 \rightarrow 0$) существенно увеличивается ошибка измерений. Для значений $\Delta p_1 > 1$ МПа можно определить только, что величина φ_0/φ_1 лежит в диапазоне $50 \div 1000$. Значения Δp_1 , при которых наблюдается резкое отклонение газосодержания от величин, определяемых ударной адиабатой пузырьковой жидкости, можно рассматривать как пороговые, при превышении которых происходит полное растворение газа в воде за фронтом волны. Значения $\Delta p_1 = 0,4 \div 0,6$ МПа для аммиака и $\Delta p_1 = 0,8 \div 1,2$ МПа для углекислого газа (рис. 4) согласуются с данными, полученными при анализе измерений скорости и амплитуды отраженной волны давления.

Характерное время полного растворения углекислого газа при $\Delta p_1 = 1,5$ МПа составляет $t \approx 2 \div 3$ мс. Это значение может уменьшиться при увеличении Δp_1 . Отметим, что полное растворение газа происходит также при меньшей амплитуде возмущающей волны, однако в этом случае момент полного растворения наступает через промежуток времени

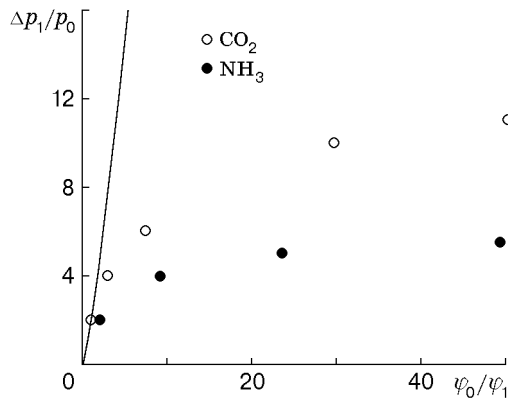


Рис. 4

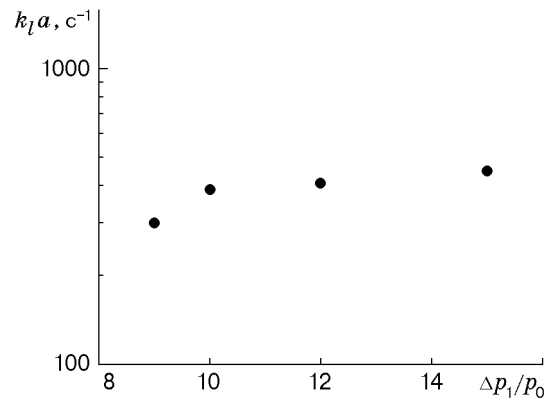


Рис. 5

(после прохождения фронта волны), превышающий время пробега волной столба пузырьковой жидкости. Связать время полного растворения с амплитудой волны довольно сложно вследствие влияния отраженной волны, между тем это значение может рассматриваться как нижняя оценка. Например, полное растворение углекислого газа в воде при воздействии волны с амплитудой 0,05 МПа наступает через 2–4 с. Заметим, что характерное время растворения пузырька углекислого газа диаметром 5 мм, свободно всплывающего в воде, составляет 20–30 с [9].

Оценим объемный коэффициент массообмена при растворении углекислого газа в воде под воздействием УВ с амплитудой, превышающей пороговую. Полагаем, что пузырьки содержат только чистый углекислый газ, перед воздействием УВ концентрация углекислого газа в воде близка к нулю, диффузионное сопротивление сосредоточено в жидкости, температура жидкости постоянна, полное давление в системе соответствует статическому после прохождения УВ. Ввиду малости объемной доли газа изменением концентрации образующегося раствора можно пренебречь. Уравнение материального баланса записывается в виде $dV/dt = -k_l S$ (V , S — объем газа и поверхность его соприкосновения с жидкостью, k_l — коэффициент массообмена). Поскольку при воздействии УВ на пузырек площадь его поверхности может многократно увеличиться за счет дробления, для исключения этой неизвестной величины определим значение $k_l a = (1/\Delta t_*) \ln(V_0/V_*)$, где Δt_* соответствует интервалу времени, на котором определяются начальный V_0 и конечный V_* объемы газа в среде; a — удельная межфазная поверхность. На рис. 5 приведена зависимость объемного коэффициента массообмена при абсорбции углекислого газа водой от интенсивности УВ, проходящей по пузырьковой среде. Видно, что коэффициент массообмена достигает больших значений. Отметим, что при барботаже углекислого газа через воду коэффициент массообмена достигает только 0,1–0,2 с⁻¹ [9], а интенсификация процесса абсорбции путем наложения звуковых колебаний дает величины 0,8–1,0 с⁻¹ [1, 2]. Таким образом, УВ вызывает существенный рост коэффициента массообмена и скорости насыщения жидкости газом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Harbaum K. L., Houghton G. J.** Effect of sonic vibrations on the rate of absorption of carbon dioxide in gas bubble-beds // J. Appl. Chem. 1962. V. 12, N 5. P. 234–240.
2. **Маргулис М. А.** Основы звукохимии. М.: Высш. шк., 1984.
3. **Долинский А. А., Щетанков О. К.** Использование дискретно-импульсного ввода энергии для интенсификации процессов абсорбции // Пром. теплотехника. 1985. Т. 7, № 3. С. 41–46.

4. Кутателадзе С. С., Накоряков В. Е. Теплоперенос и волны в газожидкостных системах. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1984.
5. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных систем. М.: Наука, 1987.
6. Покусаев Б. Г., Вассерман Е. С., Мулляджанов И. И., Прибатурин Н. А. Эффекты схлопывания и разрушения пузырей при распространении волн сжатия в двухфазной смеси // Нестационарные процессы в двухфазных потоках: Сб. науч. тр. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1989. С. 3–27.
7. Справочник по растворимости. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1962. Т. 1.
8. Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Прибатурин Н. А., Мулляджанов И. И. Взаимодействие ударной волны с газовым снарядом // Докл. АН СССР. 1990. Т. 311, № 4. С. 826–830.
9. Шервуд Т., Пигфорд Р., Уилки Ч. Массопередача. М.: Химия, 1982.

Поступила в редакцию 1/III 1999 г.
