

УДК 532.529

ПРОЦЕССЫ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ И РАСТВОРЕНИЯ ЗА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ В ЖИДКОСТИ С ПУЗЫРЬКАМИ ГАЗА (СМЕСЬ АЗОТА И УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА)

В. Е. Донцов, В. Е. Накоряков, Е. В. Донцов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск
E-mail: dontsov@itp.nsc.ru

Экспериментально исследованы процессы растворения и гидратообразования за ударной волной умеренной амплитуды в воде с пузырьками газа (смесь азота и углекислого газа) при различных начальных статических давлениях в среде и концентрациях углекислого газа в пузырьках. Показано, что увеличение статического давления в газожидкостной среде приводит к увеличению влияния не реагирующего газа (азота) на процессы растворения и гидратообразования.

Ключевые слова: ударная волна, жидкость, газовые пузырьки, дробление пузырьков, растворение, гидратообразование.

Одним из наиболее важных факторов изменения климата на Земле является увеличение концентрации двуокиси углерода в атмосфере Земли. С увеличением объемов промышленного производства в России темпы роста выбросов углекислого газа в атмосферу в ближайшее время достигнут настолько значительных величин, что возникнет проблема их уменьшения в соответствии с Киотским протоколом. В настоящее время предлагаются различные технологии утилизации углекислого газа. Перспективным способом утилизации является перевод газа в газогидратное состояние и хранение на дне океана при низкой температуре и высоком статическом давлении [1–5]. Одним из главных параметров, характеризующих экономическую целесообразность данного способа, является скорость образования гидрата углекислого газа. Существуют различные методы интенсификации процесса гидратизации газов: мелкодисперсное распыление струи, насыщенной газом, в атмосфере газа [6–8]; интенсивное перемешивание воды, насыщенной растворенным в ней газом [7, 9, 10]; вибрационное воздействие на жидкость, насыщенную газом [11]; ультразвуковое воздействие на среду [12] и т. д. Главным недостатком предложенных методов является низкая скорость образования газогидратов и как следствие низкая производительность установок, принцип действия которых основан на этих методах.

В работе [13] предложен новый ударно-волновой способ интенсификации процесса образования газовых гидратов. Показано, что основным механизмом, обеспечивающим интенсификацию процесса гидратообразования, является дробление газовых пузырьков в ударной волне. В [14, 15] экспериментально исследован процесс растворения и гидратообразования за ударной волной умеренной амплитуды в воде с пузырьками фреона-12 при атмосферном статическом давлении. Предложена теоретическая модель процесса гидратообразования в газожидкостной среде за ударной волной со ступенчатым профилем. В работе [16] экспериментально изучен процесс дробления газовых пузырьков, растворения и

гидратообразования за ударной волной в воде с пузырьками углекислого газа при различных начальных статических давлениях. Показано, что увеличение статического давления в газожидкостной среде приводит к уменьшению относительной амплитуды ударной волны, при которой развивается неустойчивость Кельвина — Гельмгольца и происходит дробление пузырьков на мелкие газовые включения за фронтом ударной волны. Показано, что увеличение статического давления в среде при одной и той же относительной амплитуде волн приводит к увеличению скоростей гидратообразования и растворения газа в жидкости.

В данной работе экспериментально исследованы процессы растворения и гидратообразования за ударной волной умеренной амплитуды в воде с пузырьками газа (смесь азота и углекислого газа) при различных начальных статических давлениях в среде и концентрациях углекислого газа в пузырьках.

Эксперименты проводились на установке типа ударной трубы. Рабочий участок представлял собой вертикально расположенную толстостенную стальную трубу длиной 1,5 м с внутренним диаметром 53 мм, ограниченную снизу твердой стенкой. Рабочий участок заполнялся водопроводной водой под вакуумом, что позволяло избежать появления пузырьков воздуха в воде. В нижней части рабочего участка по его периметру через отверстия диаметром 0,6 мм в жидкость вводились газовые пузырьки. В качестве газовой фазы использовались смеси азота и углекислого газа различной концентрации. Такой способ ввода пузырьков обеспечивает достаточно большое объемное газосодержание. Средний радиус пузырьков изменялся в диапазоне $2 \div 3$ мм. В качестве рабочей жидкости использовалась водопроводная вода, насыщенная газовой смесью до равновесного состояния, соответствующего начальным условиям (температуре и статическому давлению). Статическое давление в газожидкостной среде изменялось от 0,5 до 1,3 МПа. Для поддержания необходимого статического давления в среде использовался электромагнитный клапан, управляемый тензодатчиком, установленным в рабочем участке. Рабочий участок термостатировался путем прокачивания охлаждающей жидкости между наружной стенкой и кожухом рабочего участка. Снаружи кожух покрывался теплоизолирующим материалом. Для прокачки охлаждающей жидкости использовались термостат и холодильная машина. Температура жидкости в рабочем участке измерялась двумя термометрами, расположенными в верхней и нижней частях рабочего участка. Опыты проводились при температуре среды $T = 10; 1$ °С. Среднее по длине рабочего участка начальное газосодержание φ_0 вычислялось по изменению высоты столба жидкости в рабочем участке при введении в нее пузырьков газа. Размер пузырьков определялся по фотографиям, полученным с помощью цифрового фотоаппарата с дополнительной оптикой через оптическое окно в верхней части рабочего участка.

Волны давления ступенчатой формы создавались при разрыве диафрагмы, разделяющей камеру высокого давления длиной 2 м и рабочий участок. При смене диафрагмы рабочий участок перекрывался шаровым краном, что позволяло избежать его разгерметизации и дегазации жидкости. Шаровой кран, внутренний диаметр которого равен внутреннему диаметру рабочего участка, располагался в его верхней части. Профили волн давления регистрировались пьезодатчиком давления и тензодатчиком, расположенными вдоль рабочего участка и установленными заподлицо с его внутренней стенкой. Для измерения локального профиля газосодержания за ударной волной умеренной амплитуды был изготовлен датчик проводимости в неэлектропроводной трубе квадратного сечения с торцами, имеющими круглое сечение, равное сечению рабочего участка. Электроды датчика проводимости устанавливались заподлицо с внутренней стенкой трубы квадратного сечения, что позволяло создавать в области измерения однородное электрическое поле. Кроме того, электроды датчика не меняли течение среды за волной, и датчик позволял измерять

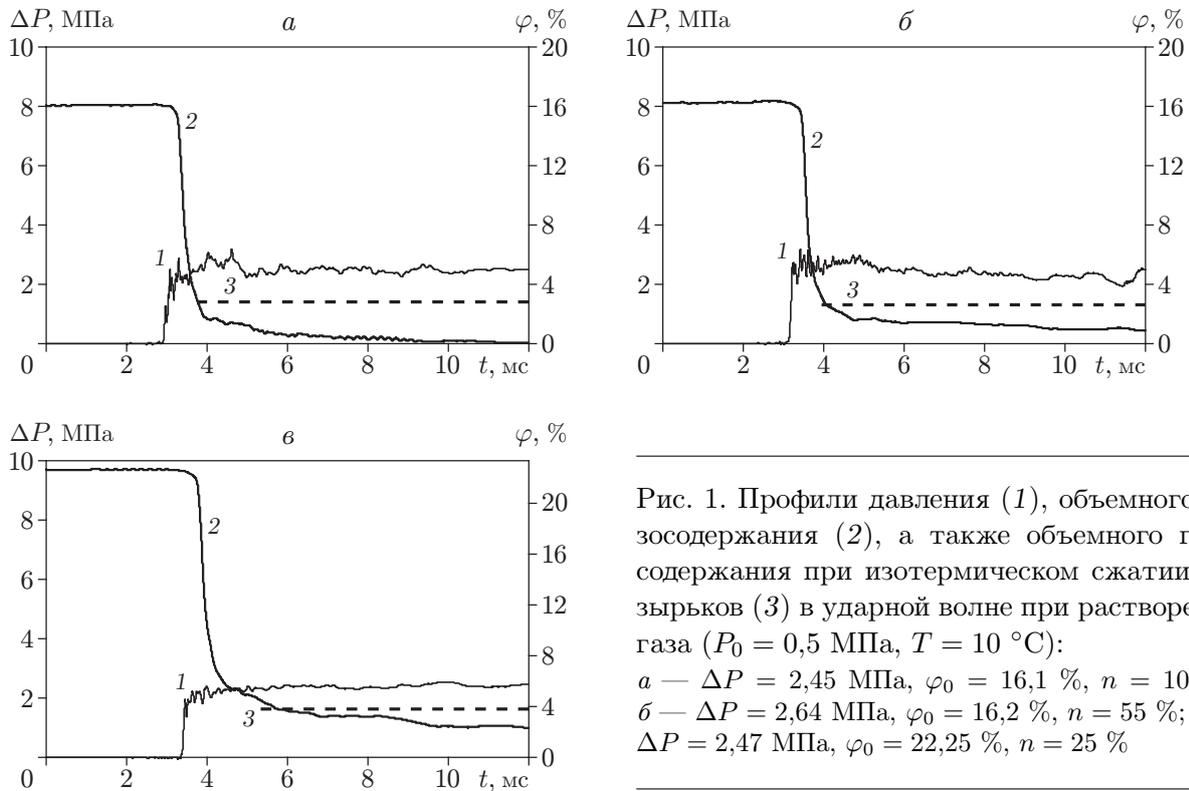


Рис. 1. Профили давления (1), объемного газосодержания (2), а также объемного газосодержания при изотермическом сжатии пузырьков (3) в ударной волне при растворении газа ($P_0 = 0,5$ МПа, $T = 10$ °С):

a — $\Delta P = 2,45$ МПа, $\varphi_0 = 16,1$ %, $n = 100$ %;
б — $\Delta P = 2,64$ МПа, $\varphi_0 = 16,2$ %, $n = 55$ %; *в* —
 $\Delta P = 2,47$ МПа, $\varphi_0 = 22,25$ %, $n = 25$ %

профили газосодержания за волной достаточно большой амплитуды. Датчик проводимости, расположенный в верхней части рабочего участка, измерял осредненное по сечению рабочего участка и высоте 20 мм значение объемного газосодержания. Характерное время осреднения определялось временем прохождения волны через датчик и составляло менее 0,2 мс. Расстояние между пьезодатчиком давления и датчиком проводимости составляло 60 мм. Сигналы датчиков подавались на аналого-цифровой преобразователь и обрабатывались на компьютере.

Экспериментально исследован процесс растворения газовых пузырьков (смесь азота и углекислого газа) в воде за ударной волной со ступенчатым профилем. Исследование поведения пузырьков азота за ударной волной в газожидкостной смеси показало, что для заданных параметров среды и волны (статическое давление в среде $P_0 = 0,5 \div 1,3$ МПа, амплитуда волны $\Delta P = 2 \div 3$ МПа, начальное объемное газосодержание $\varphi_0 = 15 \div 20$ %, $T = 1 \div 10$ °С) при $t = 9$ мс объемная доля растворенного в воде азота за фронтом волны составляет не более 10 %.

На рис. 1 представлены профили давления (кривые 1) и локального объемного газосодержания (кривые 2) за фронтом ударной волны при статическом давлении $P_0 = 0,5$ МПа, температуре среды $T = 10$ °С и различных начальных значениях объемной концентрации углекислого газа в газовой смеси n . Так как при данной температуре не происходит образования газогидратов ($T_{cr} = 10$ °С — критическая температура гидратизации для углекислого газа), газосодержание в жидкости за ударной волной определяется только сжимаемостью газов и количеством растворенного углекислого газа. Непосредственно за фронтом ударной волны газовые пузырьки сжимаются адиабатически (кривые 2) и дробятся вследствие неустойчивости Кельвина — Гельмгольца (см. [16]). По мере дробления пузырьков за фронтом волны происходит тепловая релаксация газа в пузырьках, газосодержания

держание должно уменьшаться до значений, соответствующих изотермическому сжатию пузырьков в ударной волне (как для нерастворимых пузырьков азота) (кривые 3). Однако процесс интенсивного растворения углекислого газа приводит к более значительному уменьшению объемного газосодержания за ударной волной. В течение исследуемого промежутка времени пузырьки чистого углекислого газа практически полностью растворяются за фронтом волны (см. рис. 1, *a*). На начальной стадии основной вклад в растворение вносит конвективная диффузия, обусловленная относительным движением газовых пузырьков в жидкости за фронтом ударной волны. Этот период времени определяется временем дробления газовых пузырьков и временем выравнивания скоростей газовой и жидкой фаз. На больших временах растворение обусловлено молекулярной диффузией газа в жидкость. Кроме того, вследствие дробления газовых пузырьков на мелкие включения в окрестности пузырька происходит интенсивное перемешивание жидкости, которое также вносит вклад в процесс растворения газа.

Результаты сравнения экспериментально полученных профилей газосодержания (кривые 2 на рис. 1) с аналогичными профилями в случае изотермического сжатия газовых пузырьков за ударными волнами близкой амплитуды (кривые 3 на рис. 1) при различных значениях концентрации углекислого газа в пузырьках позволяют сделать вывод, что добавление нерастворимого (или слабо растворимого) газа (азота) приводит к увеличению газосодержания за волной. Однако сравнение значений объемной концентрации растворенного газа при $t = 9$ мс на рис. 1, *a–в* показывает, что эти значения соответствуют начальным значениям объемной концентрации углекислого газа в пузырьках (в пределах погрешности измерения профиля газосодержания). Таким образом, наличие нерастворимого газа в пузырьке практически не оказывает влияния на процесс растворения, в то время как при абсорбции (или конденсации) даже малые добавки неабсорбируемого газа приводят к существенному замедлению этого процесса вследствие блокирования межфазной границы неабсорбируемым газом [17]. Блокирование межфазной границы неабсорбируемым газом обусловлено наличием конвективного потока абсорбируемого и неабсорбируемого газов к межфазной границе. В исследуемой задаче о растворении пузырьков смеси газов в жидкости процесс определяется кинетикой растворения и скоростью отвода растворенного газа с межфазной границы в жидкость. При этом время выравнивания концентрации углекислого газа в пузырьке τ_d значительно меньше времени растворения. Действительно, для параметров среды, соответствующих рис. 1, $\tau_d = R^2/(\pi D) < 0,5$ мс (R — характерный радиус газовых включений раздробленного пузырька; D — коэффициент диффузии углекислого газа в азоте). Следовательно, в процессе растворения пузырьков смеси газов углекислый газ успевает приблизиться к межфазной границе, а азот — удалиться от нее, концентрация углекислого газа в пузырьке выравнивается, и замедления процесса растворения не происходит.

Отметим, что на рис. 1 несовпадение фронтов волны давления и объемного газосодержания обусловлено последовательным расположением датчиков в ударной трубе.

На рис. 2 представлены профили давления (кривые 1) и локального объемного газосодержания (кривые 2) за фронтом ударной волны при статическом давлении $P_0 = 1,3$ МПа, температуре среды $T = 10$ °С и различных начальных значениях объемной концентрации углекислого газа в газовой смеси n . Увеличение статического давления P_0 в среде при близких абсолютных значениях амплитуд волн ΔP приводит к увеличению времени дробления пузырьков за фронтом волны и времени тепловой релаксации газа в пузырьках, а главное, к уменьшению скорости растворения углекислого газа в воде (ср. рис. 1, *a* и рис. 2, *a*). Если при $P_0 = 0,5$ МПа (см. рис. 1, *a*) на исследуемых временах углекислый газ полностью растворился, то при $P_0 = 1,3$ МПа (см. рис. 2, *a*) растворилось немногим более половины объема углекислого газа. В основном это обусловлено уменьшением отно-

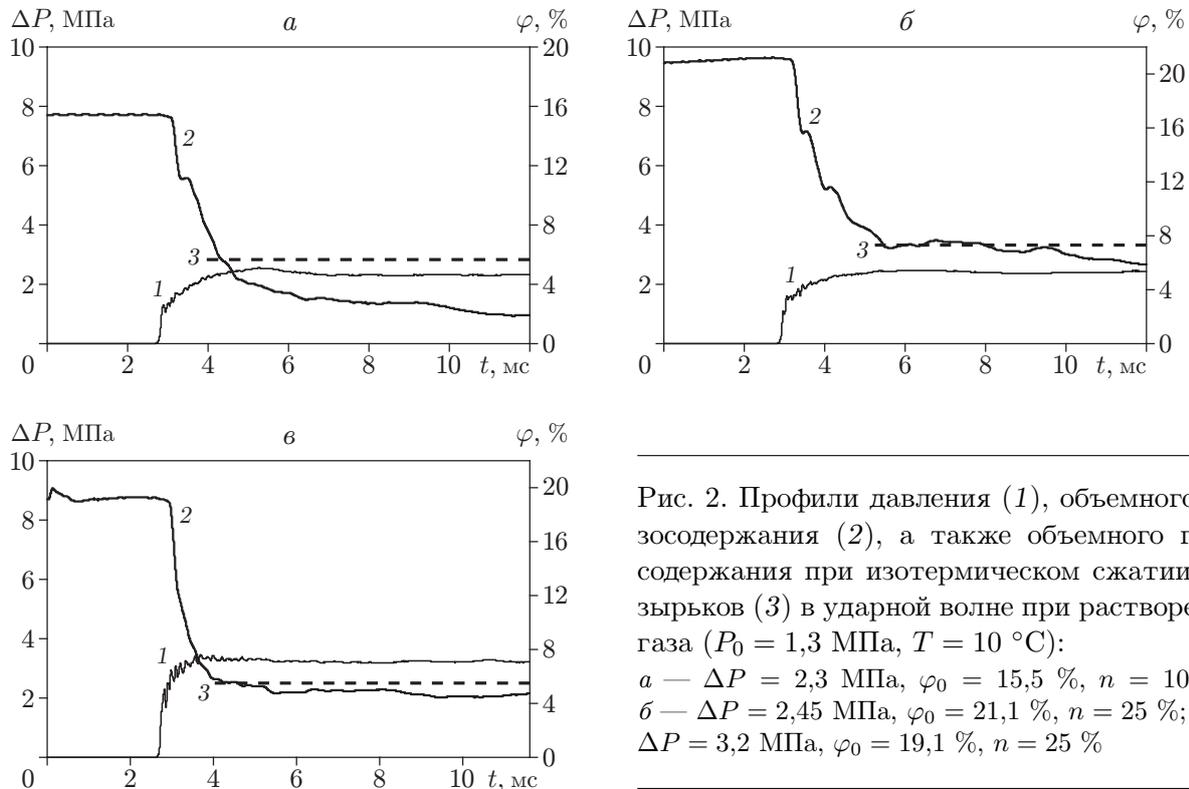


Рис. 2. Профили давления (1), объемного газосодержания (2), а также объемного газосодержания при изотермическом сжатии пузырьков (3) в ударной волне при растворении газа ($P_0 = 1,3$ МПа, $T = 10$ °С):

a — $\Delta P = 2,3$ МПа, $\varphi_0 = 15,5$ %, $n = 100$ %;
б — $\Delta P = 2,45$ МПа, $\varphi_0 = 21,1$ %, $n = 25$ %; *в* —
 $\Delta P = 3,2$ МПа, $\varphi_0 = 19,1$ %, $n = 25$ %

сительной скорости газовых пузырьков за фронтом волны и увеличением размера газовых включений [16].

Добавление в пузырьки нерастворимого в воде газа (азота) при статическом давлении $P_0 = 1,3$ МПа и постоянной амплитуде волны приводит к практически полному прекращению растворения углекислого газа (см. рис. 2, б). Таким образом, наличие нерастворимого газа в пузырьке при повышении статического давления оказывает влияние на процесс растворения, что обусловлено влиянием выравнивания концентрации углекислого газа в пузырьке. С ростом статического давления увеличивается размер раздробленных пузырьков и линейно уменьшается коэффициент диффузии в газовой фазе. Время выравнивания концентрации углекислого газа в пузырьке τ_d (см. рис. 2, б) составляет несколько миллисекунд, что сравнимо со временем растворения.

При увеличении амплитуды ударной волны размер раздробленных пузырьков и время выравнивания концентрации углекислого газа в пузырьках уменьшаются, что приводит к уменьшению влияния нерастворяющегося газа в пузырьках и увеличению растворимости (см. рис. 2, в).

Рассмотрим процесс образования гидрата углекислого газа в пузырьках из смеси азота и углекислого газа в воде за ударной волной со ступенчатым профилем при температуре среды $T = 1$ °С. Этой температуре соответствует равновесное давление $P_e \approx 1,35$ МПа, при котором образуется гидрат углекислого газа [18]. В этом случае в газожидкостной среде за ударной волной с большей амплитудой возможно гидратообразование. Отметим, что при изменении температуры среды от значения $T = 10$ °С до значения $T = 1$ °С степень растворимости углекислого газа в воде увеличивается на 50 %. На рис. 3 представлены профили давления (кривые 1) и локального объемного газосодержания (кривые 2) за фронтом ударной волны при статическом давлении $P_0 = 0,5$ МПа, температуре среды

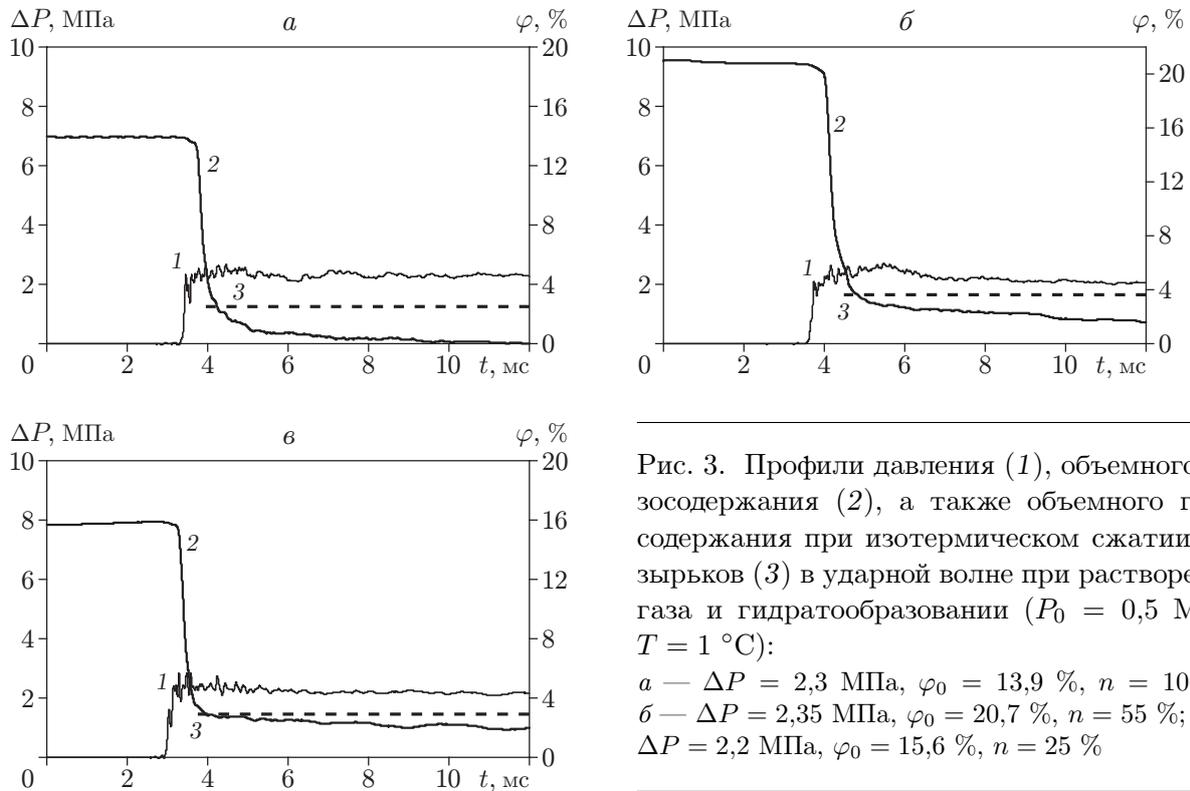


Рис. 3. Профили давления (1), объемного газосодержания (2), а также объемного газосодержания при изотермическом сжатии пузырьков (3) в ударной волне при растворении газа и гидратообразовании ($P_0 = 0,5$ МПа, $T = 1$ °С):

a — $\Delta P = 2,3$ МПа, $\varphi_0 = 13,9$ %, $n = 100$ %;
б — $\Delta P = 2,35$ МПа, $\varphi_0 = 20,7$ %, $n = 55$ %; *в* —
 $\Delta P = 2,2$ МПа, $\varphi_0 = 15,6$ %, $n = 25$ %

$T = 1$ °С и различных начальных значениях объемной концентрации углекислого газа в газовой смеси n . Как показано в [16], в случае пузырьков чистого углекислого газа гидратообразование за ударной волной происходит со скоростью, приближенно равной скорости растворения углекислого газа в воде за ударной волной близкой амплитуды. Следовательно, изменение характера зависимости $\varphi(t)$ на рис. 3, *a* обусловлено совместным влиянием процессов растворения и гидратообразования. Из результатов сравнения объемной концентрации частично растворенного и частично гидратизированного углекислого газа за ударными волнами с близкими амплитудами на рис. 3, *a–в* следует, что они соответствуют начальным значениям объемной концентрации углекислого газа в пузырьках (в пределах погрешности измерения профиля газосодержания). Таким образом, наличие нерастворимого газа (азота) в пузырьке практически не оказывает влияния на процессы растворения и гидратообразования.

Результаты сравнения профилей газосодержания на рис. 3 и рис. 1 для соответствующих начальных концентраций углекислого газа в пузырьках показывают, что уменьшение температуры среды не приводит к увеличению скорости изменения газосодержания, обусловленного процессом гидратообразования. Это может быть обусловлено процессом образования на межфазной границе частиц газогидрата, приводящим к уменьшению площади межфазной поверхности газ — жидкость и соответственно к уменьшению скорости растворения углекислого газа в воде.

На рис. 4 представлены профили давления (кривые 1) и локального объемного газосодержания (кривые 2) за фронтом ударной волны при статическом давлении $P_0 = 1,3$ МПа, температуре среды $T = 1$ °С и различных начальных значениях объемной концентрации углекислого газа в газовой смеси n . На рис. 4, *a, б* представлены профили давления и объемного газосодержания в воде с пузырьками чистого углекислого газа при различных

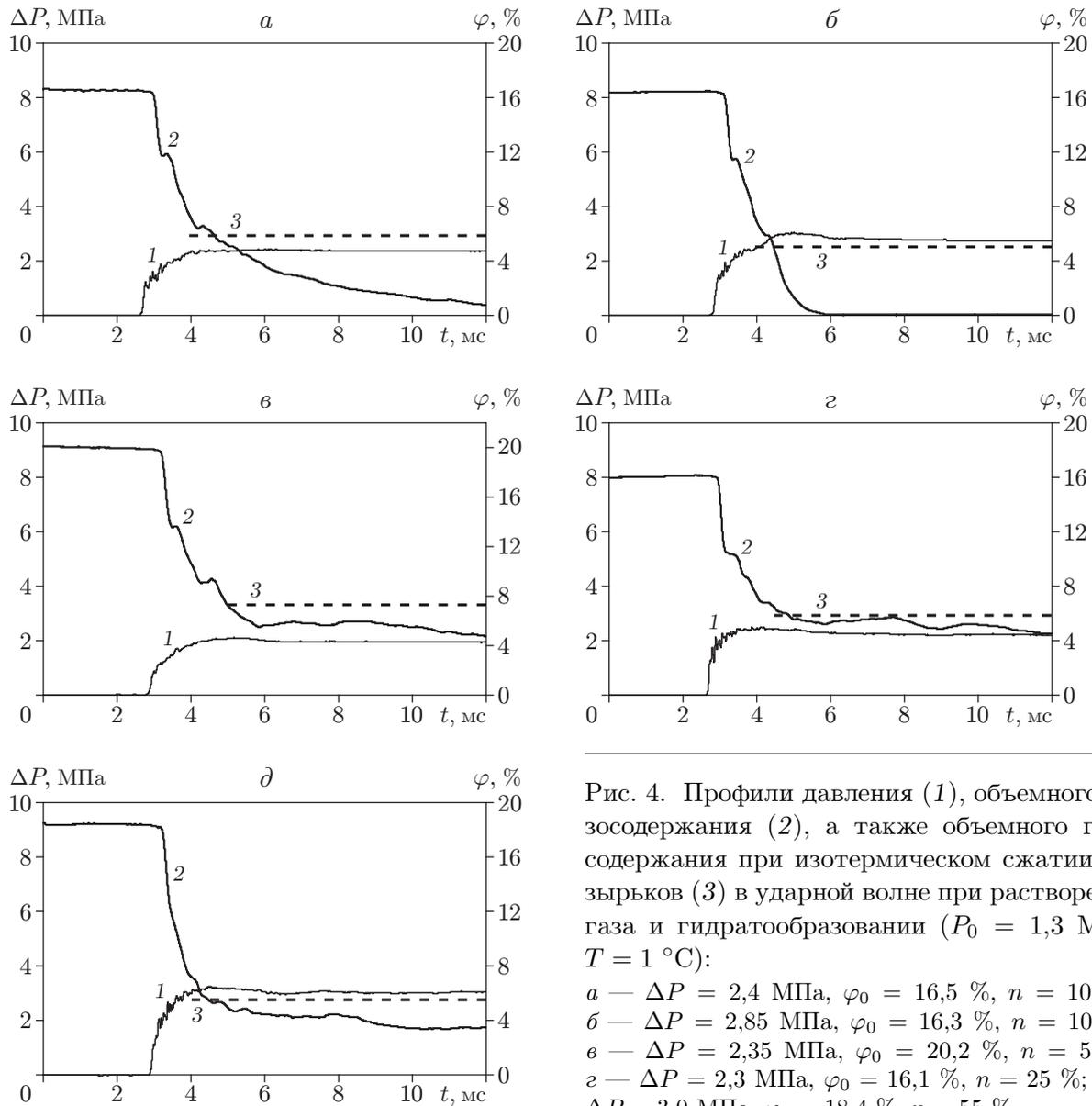


Рис. 4. Профили давления (1), объемного газосодержания (2), а также объемного газосодержания при изотермическом сжатии пузырьков (3) в ударной волне при растворении газа и гидратообразовании ($P_0 = 1,3$ МПа, $T = 1$ °С):

a — $\Delta P = 2,4$ МПа, $\varphi_0 = 16,5$ %, $n = 100$ %;
б — $\Delta P = 2,85$ МПа, $\varphi_0 = 16,3$ %, $n = 100$ %;
в — $\Delta P = 2,35$ МПа, $\varphi_0 = 20,2$ %, $n = 55$ %;
г — $\Delta P = 2,3$ МПа, $\varphi_0 = 16,1$ %, $n = 25$ %; *д* —
 $\Delta P = 3,0$ МПа, $\varphi_0 = 18,4$ %, $n = 55$ %

амплитудах волн. Видно, что уменьшение газосодержания, обусловленное растворением углекислого газа и гидратообразованием, существенно зависит от амплитуды ударной волны. Увеличение амплитуды на 20 % приводит к уменьшению общего времени реакции (растворения и гидратообразования) в несколько раз. Это обусловлено тем, что при небольших относительных амплитудах волн часть газовых пузырьков за ударной волной дробится на мелкие газовые включения, а другая часть остается в более крупных газовых включениях [16], что существенно затягивает процессы гидратообразования и растворения (рис. 4, *a*).

Добавление в пузырьки нерастворимого в воде газа (азота) при статическом давлении $P_0 = 1,3$ МПа и постоянной амплитуде волны приводит к значительному замедлению процессов гидратообразования и растворения углекислого газа (рис. 4, *a, в, г*). В случае пузырьков с концентрацией углекислого газа $n = 100$ % в течение исследуемого промежутка времени за фронтом волны гидратизируется и растворяется почти 90 % углекислого газа

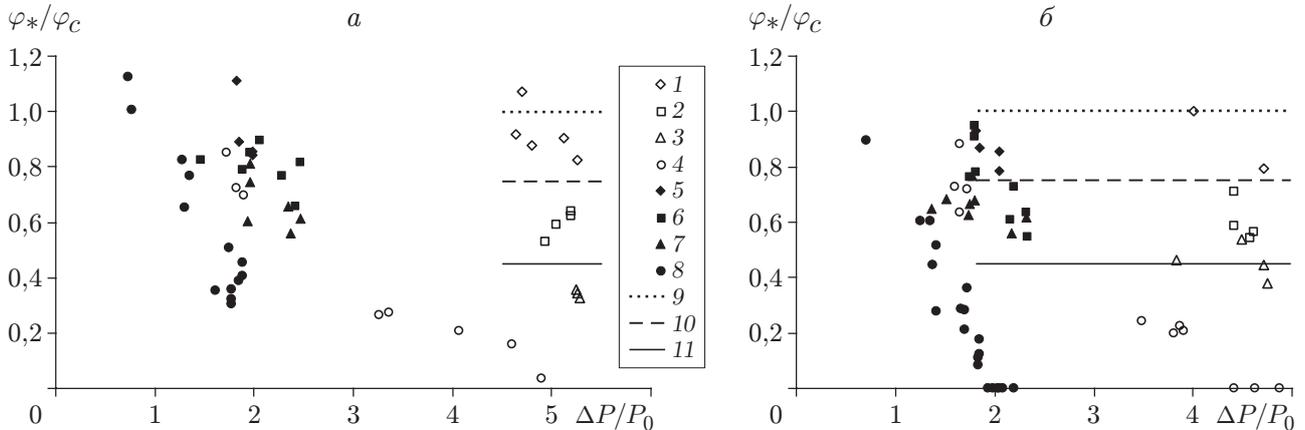


Рис. 5. Зависимость изменения относительного объемного газосодержания ($t = 9$ мс) за фронтом ударной волны от ее амплитуды:

a — $T = 10$ °C, b — $T = 1$ °C; 1–4 — $P_0 = 0,5$ МПа (1 — $n = 0$, 2 — $n = 25$ %, 3 — $n = 55$ %, 4 — $n = 100$ %); 5–8 — $P_0 = 1,3$ МПа (5 — $n = 0$, 6 — $n = 25$ %, 7 — $n = 55$ %, 8 — $n = 100$ %); 9 — $\varphi_*/\varphi_c = 1$; 10 — линия, соответствующая полному растворению (гидратизации) углекислого газа в пузырьках с концентрацией $n = 25$ % ($\varphi_*/\varphi_c = 0,75$); 11 — линия, соответствующая полному растворению (гидратизации) углекислого газа в пузырьках с концентрацией $n = 55$ % ($\varphi_*/\varphi_c = 0,45$)

(рис. 4, a), в то время как в случае газожидкостной среды с $n = 55$ % — только около 60 % (рис. 4, b). Как отмечено выше (при исследовании процесса растворения углекислого газа), это обусловлено выравниванием концентрации углекислого газа в пузырьке. Кроме того, коэффициент диффузии в газовой фазе зависит не только от давления в среде, но и от температуры среды. Поэтому с уменьшением температуры время выравнивания концентрации углекислого газа в пузырьке τ_d будет увеличиваться, что приведет к увеличению влияния инертного газа на процесс и соответственно к уменьшению скоростей растворения и гидратообразования.

Увеличение амплитуды ударной волны в жидкости с пузырьками смеси газов с одинаковой концентрацией приводит, с одной стороны, к росту давления за фронтом волны, с другой — к уменьшению размера раздробленных пузырьков в среде. Рост давления приводит к уменьшению коэффициента диффузии в газовой фазе и соответственно к увеличению времени выравнивания концентрации углекислого газа в пузырьках. Наоборот, уменьшение размера раздробленных пузырьков в среде приводит к уменьшению времени выравнивания концентрации углекислого газа в пузырьках. Поскольку τ_d более существенно зависит от радиуса пузырьков, увеличение амплитуды ударной волны приводит к уменьшению влияния нерастворяющегося газа в пузырьках на процессы гидратообразования и растворения и соответственно к увеличению скоростей исследуемых процессов (рис. 4, b, d).

На рис. 5 представлены экспериментальные зависимости относительного объемного газосодержания при $t = 9$ мс за фронтом ударной волны от ее амплитуды при различных значениях начальной концентрации углекислого газа в пузырьках, температуры и начального статического давления в газожидкостной среде (φ_* — измеренное значение объемного газосодержания в момент времени $t = 9$ мс за фронтом ударной волны; φ_c — расчетное значение, соответствующее изотермическому сжатию пузырьков в ударной волне). Экспериментальные точки на рис. 5, a соответствуют температуре среды $T = 10$ °C, равной критической температуре образования газогидратов углекислого газа, следовательно, изменение газосодержания обусловлено только растворимостью газа. Точки на рис. 5, b

соответствуют процессу растворения и гидратообразования за ударной волной. Следует отметить, что при одинаковой температуре растворимость в воде азота почти в 50 раз меньше растворимости углекислого газа, тем не менее при исследованных параметрах среды и волны около 10 % азота в пузырьках растворяется в воде (точки 1 и линия 9 на рис. 5). Результаты сравнения экспериментальных точек 8 (а также точек 4) для пузырьков чистого углекислого газа ($n = 100\%$) на рис. 5, *a, б* показывают, что уменьшение температуры среды приводит к уменьшению относительного объемного газосодержания для данной амплитуды волны. Это обусловлено увеличением растворимости углекислого газа с уменьшением температуры среды и влиянием процесса гидратообразования [16]. При температуре $T = 1\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 5, *б*) процессы гидратообразования в среде начинаются при амплитуде волны $\Delta P/P_0 \approx 2$ в случае $P_0 = 1,3\text{ МПа}$ или $\Delta P/P_0 \approx 4$ в случае $P_0 = 0,5\text{ МПа}$. Определить долю гидратизированного газа в процессе растворения и гидратообразования путем сравнения точек на рис. 5, *a, б* достаточно сложно, так как образование на межфазной границе частиц газогидрата приводит к уменьшению площади межфазной поверхности газ — жидкость, что вызывает уменьшение скорости растворения углекислого газа в воде. Разделить процессы растворения и гидратообразования во времени также невозможно вследствие близости их скоростей.

Определим влияние на процессы растворения и гидратообразования наличия в газовых пузырьках слаборастворимого в воде и негидратизируемого газа (азота). Как отмечено выше, при статическом давлении $P_0 = 0,5\text{ МПа}$ наличие в пузырьках нереагирующего газа не оказывает влияния на исследуемые процессы. Действительно, точки 2 достаточно близки к линии 10, соответствующей полному растворению (гидратизации) углекислого газа в пузырьках с концентрацией $n = 25\%$, а точки 3 — к линии 11 (рис. 5). Следует отметить, что отклонение экспериментальных точек от расчетных линий обусловлено неучетом частичного растворения азота в пузырьках. С увеличением статического давления ($P_0 = 1,3\text{ МПа}$) экспериментальные точки 7 для пузырьков с концентрацией углекислого газа $n = 55\%$ значительно отклоняются от линии 11, что обусловлено влиянием процесса выравнивания концентрации углекислого газа в пузырьках на процессы растворения и гидратообразования.

Таким образом, экспериментально исследованы процессы растворения и гидратообразования углекислого газа за фронтом ударной волны умеренной амплитуды в воде с пузырьками газа (смесь азота и углекислого газа) при различных начальных статических давлениях и концентрациях углекислого газа. Показано, что при $P_0 = 0,5\text{ МПа}$ наличие нереагирующего газа (азота) в пузырьках практически не оказывает влияния на процессы растворения и гидратообразования углекислого газа в воде, в то время как при абсорбции (или конденсации) даже малые добавки неабсорбируемого газа приводят к существенному замедлению этого процесса вследствие блокирования межфазной границы неабсорбируемым газом. При статическом давлении $P_0 = 1,3\text{ МПа}$ добавление азота в пузырьки углекислого газа приводит к значительному замедлению процессов растворения углекислого газа и гидратообразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Direct** ocean disposal of carbon dioxide / Ed. by N. Handa, T. Oshumi. Tokyo: Terrapub., 1995.
2. **Anderson V., Woodhouse S., Graff O. Fr., Gudmundson J. S.** Hydrates for deep ocean storage of CO₂ // Proc. of the 5th Intern. conf. on gas hydrates, Trondheim (Norway), June 13–16, 2005. Trondheim: S. n., 2005. P. ref. 4006. P. 1135–1139.
3. **Tanaka S., Maruyama F., Takano O., et al.** Experimental study on CO₂ storage and sequestration in form of hydrate pellets // Proc. of the 5th Intern. conf. on gas hydrates, Trondheim (Norway), June 13–16, 2005. Trondheim: S. n., 2005. P. ref. 4028. P. 1314–1319.

4. **Tanaka S., Takano O., Uchida K., et al.** Gas hydrate formation technology using low-temperature and low-pressure conditions. Pt 2. Study on application to CO₂ separation with a bench plant // Proc. of the 5th Intern. conf. on gas hydrates, Trondheim (Norway), June 13–16, 2005. Trondheim: S. n., 2005. P. ref. 4031. P. 1332–1339.
5. **Ota M., Seko M., Endou H.** Gas separation process of carbon dioxide from mixed gases by hydrate production // Proc. of the 5th Intern. conf. on gas hydrates, Trondheim (Norway), June 13–16, 2005. Trondheim: S. n., 2005. P. ref. 4032. P. 1340–1343.
6. **Ohmura R., Kashiwazaki S., Shiota S., et al.** Structure-1 and structure-2 hydrate formation using water spraying // Proc. of the 4th Intern. conf. on gas hydrates, Yakohama (Japan), May 19–23, 2002. Yakohama: S. n., 2002. P. 1049–1054.
7. **Miyata K., Okui T., Hirayama H., et al.** A challenge to hige-rate industrial production of methane hydrate // Proc. of the 4th Intern. conf. on gas hydrates, Yakohama (Japan), May 19–23, 2002. Yakohama: S. n., 2002. P. 1031–1035.
8. **Пат. 2200727 РФ, С 07 С 5/02.** Способ получения гидратов газов для транспортировки и хранения / И. С. Гудмундссон. № 97112086/06; Заявл. 02.07.1997; Оpubл. 20.03.2003, Бюл. № 8.
9. **Пат. 2198285 РФ, Е 21 В 43/01.** Способ добычи и транспорта природного газа из газовых и газогидратных морских месторождений — “цветы и пчелы” / В. С. Якушев. № 98113838/03; Заявл. 13.07.1998; Оpubл. 10.02.2003, Бюл. № 4.
10. **Tajima H., Yamasaki A., Kiyono F., et al.** Continuous gas hydrate formation process by static mixing of fluids // Proc. of the 5th Intern. conf. on gas hydrates, Trondheim (Norway), June 13–16, 2005. Trondheim: S. n., 2005. P. ref. 1010. P. 75–80.
11. **Пат. 2045718 РФ, F 25 D 3/12.** Установка для получения газовых гидратов / К. Б. Комиссаров, В. А. Финоченко. № 5044706/13; Заявл. 29.05.1992; Оpubл. 10.10.1995, Бюл. № 28.
12. **Pat. 2347938 A GB, С 07 С 7/152.** Production method for gas hydrates and device for producing same / Y. Kozo, F. Tetsuro, K. Takahiro, K. Yuichi. N 0006039.2. Publ. 20.09.2000.
13. **Пат. 2270053 РФ, В 01 F 3/04.** Способ получения газовых гидратов / В. Е. Донцов, В. Е. Накоряков, Л. С. Черной. № 2003133051/15; Заявл. 11.11.2003; Оpubл. 20.02.2006, Бюл. № 5.
14. **Донцов В. Е., Накоряков В. Е., Чернов А. А.** Образование газовых гидратов в газожидкостной смеси за ударной волной // Докл. РАН. 2006. Т. 411, № 2. С. 190–193.
15. **Донцов В. Е., Накоряков В. Е., Чернов А. А.** Ударные волны в воде с пузырьками фреона-12 с образованием гидрата газа // ПМТФ. 2007. Т. 48, № 3. С. 58–75.
16. **Донцов В. Е., Чернов А. А., Донцов Е. В.** Ударные волны и образование гидрата углекислого газа при повышенном начальном давлении в газожидкостной среде // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14, № 1. С. 23–46.
17. **Habib H. M., Wood B. D.** Simultaneous heat and mass transfer in film absorption with the presence of non-absorbable gases // Trans. ASME. 2001. V. 123. P. 984–989.
18. **Макогон Ю. Ф.** Газовые гидраты, предупреждение их образования и использование. М.: Недра, 1985.

*Поступила в редакцию 4/IX 2007 г.,
в окончательном варианте — 7/XII 2007 г.*