

Трансформация волн сжатия при распространении в газожидкостной среде

О. Н. Сизоненко

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Киев,
e-mail: sizonenko43@rambler.ru

Представлен алгоритм определения параметров трансформации волны сжатия при распространении в газожидкостной среде с заданными свойствами, определяющимися главным образом газосодержанием, радиусом пузырьков, гидростатическим давлением, плотностью жидкой фазы, скоростью звука. Получены зависимости давления волны сжатия от газосодержания при фиксированном радиусе пузырька и от радиуса пузырька при фиксированном газосодержании, которые свидетельствуют о наличии дополнительного гидродинамического воздействия при высоковольтных электрических разрядах в дисперсной системе углеводородная жидкость—порошок.

Ключевые слова: высоковольтный электрический разряд, дисперсная система углеводородная жидкость—порошок, волна сжатия, газожидкостная среда.

Постановка проблемы

В настоящее время наблюдается значительный интерес к использованию высокодисперсных порошков в производстве композиционных материалов, сверхпроводников, солнечных батарей, присадок к смазочным маслам, компонентов высокопрочных припоев и т. д. Использование высокодисперсных порошков перспективно благодаря их особым свойствам, которые зависят от технологии получения. В зависимости от природы материала и его назначения к диспергированию предъявляются разнообразные требования, однако в большинстве случаев ставится задача получения как можно более дисперсных порошков при ограничении затрат энергии и времени [1].

Анализ последних достижений и публикаций

Известно, что наиболее эффективные и безопасные методы воздействия на различные дисперсные системы — физические, которые способствуют изменению их свойств [2]. Одним из таких методов воздействия на физико-химические свойства гетерогенных систем является высоковольтный электрический разряд (ВЭР). При ВЭР обработке на частицы порошков воздействуют волны сжатия-растяжения с пиковым давлением 10^6 — 10^8 Па, высокие температуры ($\sim 10^4$ К) и давления ($\sim 10^9$ Па) в плазменном канале разряда, гидротоки, возникающие при пульсации послеразрядной парогазовой полости, высокие значения силы тока, проходящего через обрабатываемый материал (более 10^4 А), микрокавитация, сильные электромагнитные поля и т. д. [3, 4]. Все это создает условия для достижения высокой степени дисперсности обработанных порошков с незначительным загрязнением при низких затратах времени, энергии и без ущерба для экологии. Использование в качестве рабочей

среды углеводородной жидкости, в частности керосина ($C_{7.20101}H_{3.2936}$), позволяет избежать окисления порошков и способствует инициированию химических реакций между исходными порошками и активным наногуглеродом, который образуется в результате деструкции углеводородных цепочек под действием плазменного канала разряда. В результате воздействия низкотемпературной плазмы на углеводородную жидкость синтезируется не только твердая фаза (углеродный наноматериал), но и газообразная (H_2 ; C_2H_4 ; C_3H_6 ; C_3H_8) [5, 6].

Поскольку одним из основных факторов воздействия при ВЭР обработке порошков является волна сжатия, то при выборе режимов процесса подбираются такие значения параметров, чтобы давление в канале разряда генерировало ударные волны, которые бы обеспечивали разрушение частиц микропорошка. Поэтому возникает необходимость в теоретической оценке полей давлений при ВЭР в дисперсных системах углеводородная жидкость—порошок.

Однако во всех известных работах, в частности в [7, 8], при теоретической оценке гидродинамических характеристик ВЭР в дисперсных системах углеводородная жидкость—порошок не учитывалось влияние газовой фазы.

В работе [9] на основе метода асимптотически эквивалентных функций [10] в сочетании с методом интегральной интерполяции [11] разработан простой и эффективный способ приближенного аналитического определения значений переходной функции краевой задачи о распространении волн сжатия в газожидкостной среде.

Цель работы — провести теоретический анализ трансформированной волны давления в дисперсной системе углеводородная жидкость—порошок при высоковольтных электрических разрядах.

Основные результаты работы

Информация [9] о переходной функции $F(x, t)$ позволяет учесть преобразование формы и величины амплитуды волны сжатия $P(t)$ при прохождении ее в газожидкостной среде. Указанный учет сводится к нахождению потенциала скоростей $\phi(x, t)$ нестационарной задачи [12, 13] по известной формуле

$$\phi(x, t) = -\frac{1}{\rho_0} \int_0^t F(x, t - \tau) P(\tau) d\tau = -\frac{1}{\rho_0} \int_0^t P(t - \tau) F(x, \tau) d\tau, \quad (1)$$

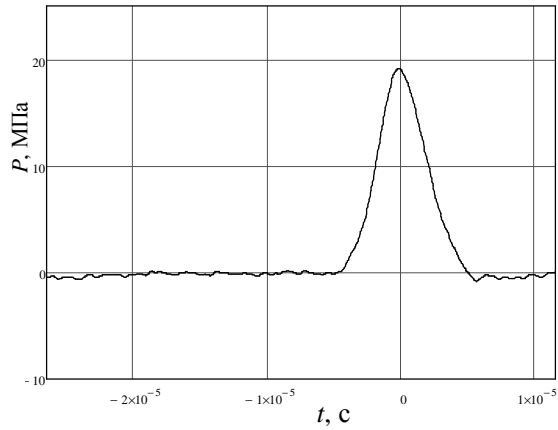
где x — пространственная координата точки, в которой рассматривается поле, м; t — время, с; ρ_0 — плотность жидкой фазы, kg/m^3 ; τ — мгновенное значение времени, с; $P(t)$ — заданная функция времени, описывающая волну давления при $x \rightarrow 0$.

Давление в волне, распространяющейся в газожидкостной среде при известном потенциале скоростей $\phi(x, t)$, определяется дифференцированием по времени функции $\phi(x, t)$, то есть

$$\begin{aligned} P(x, t) &= -\rho_0 \frac{\partial \phi(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_0^t F(x, t - \tau) P(\tau) d\tau = \\ &= F(x, 0) P(t) + \int_0^t F_t'(x, t - \tau) P(\tau) d\tau = P(0) F(x, t) + \int_0^t P'(t - \tau) F(x, \tau) d\tau, \quad (2) \end{aligned}$$

где штрихом обозначена производная по времени.

Рис. 1. Профиль волны давления при ВЭР в дисперсной системе керосин—порошок Ti.



Из приведенных формул следует, что для определения давления $P(x, t)$ в распространяющейся волне необходимо располагать, кроме переходной функции $F(x, t)$, еще и ее производной по времени или

(принимая во внимание осциллирующий характер функции $F(x, t)$ производной функции $P(t)$. Последнее представляется более предпочтительным, поскольку функция $P(t)$, как правило, является более гладкой по сравнению с переходной функцией $F(x, t)$. Однако функция $P(t)$ в интересных с точки зрения практических приложений случаях задается либо табличным, либо графическим способом, что создает дополнительные трудности при расчете характеристик волнового поля $P(x, t)$ с использованием вычислительной техники. Указанные трудности, вызванные необходимостью аналитического описания функции $P(t)$ и ее производной по времени $P'(t)$, в настоящей работе преодолеваются следующим образом. Заданная таблично или графически функция $P(t)$ аппроксимируется кубическим сплайном, представляющим собой непрерывную вместе со своими первой и второй производными функцию, определенную на некотором отрезке $[a, b]$. Концы a и b отрезка, на котором определяется сплайн-функция, представляют собой наименьшее (a) и наибольшее (b) значения аргумента, при котором задана функция $P(t)$.

Таким образом, расчет трансформированной волны давления $P(x, t)$, соответствующей заданной функции $P(t)$, при распространении в газожидкостной среде с заданными свойствами (газосодержании, радиусе

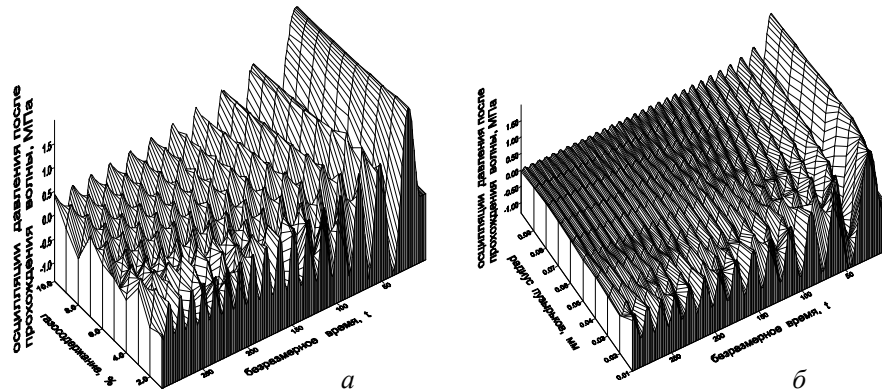


Рис. 2. Осцилляции давления после прохождения волны сжатия при фиксированных радиусе пузырьков ($R_0 = 0,1$ мм) (а) и газосодержании ($\epsilon_0 = 3\%$) (б).

пузырьков газа, скорости распространения звука в жидкой фазе, плотности, гидростатическом давлении и др.) сводится к аппроксимации функции $P(t)$ и ее производной $P'(t)$ кубическим сплайном с последующим вычислением интеграла свертки в смысле преобразования Лапласа функций $P'(t)$ и $F(x, t)$.

Такой подход позволил создать программу расчетов функции $P(x, t)$ при различном сочетании параметров газожидкостной среды, главными из которых являются: газосодержание ε_0 , %; радиус пузырьков R_0 , м; гидростатическое давление P_r , Па; плотность жидкости ρ_0 , кг·м⁻³; скорость звука c_0 при заданных плотности и давлении, м/с. Именно эти параметры варьируют при использовании той или иной рабочей среды.

На рис. 1, 2 представлены зависимости давления волны сжатия от газосодержания при фиксированном радиусе пузырька и от радиуса пузырька при фиксированном газосодержании, которые свидетельствуют о наличии дополнительного гидродинамического воздействия на порошки.

Выводы

Представлен алгоритм определения параметров трансформации волны сжатия при распространении в газожидкостной среде с заданными свойствами, характеризующихся главным образом газосодержанием, радиусом пузырьков, гидростатическим давлением, плотностью жидкой фазы, скоростью звука.

Получены зависимости давления волны сжатия от газосодержания при фиксированном радиусе пузырька и от радиуса пузырька при фиксированном газосодержании, которые свидетельствуют о наличии дополнительного гидродинамического воздействия при высоковольтных электрических разрядах в дисперсной системе углеводородная жидкость—порошок.

1. *Скорород В. В.* Химические, диффузионные и реологические процессы в технологии порошковых материалов / В. В. Скорород, Ю. М. Солонин, И. В. Уварова. — К. : Наук. думка, 1990. — 248 с.
2. *Сизоненко О. Н.* Перспективные процессы изготовления порошковых материалов / О. Н. Сизоненко, А. И. Ивлиев, Г. Б. Баглюк. — Николаев : НУК, 2014. — 376 с. — ISBN 978-966-321-292-0.
3. *Гаврилов Г. Н.* Разрядноимпульсная технология обработки минеральных сред / [Г. Н. Гаврилов, Г. Г. Горовенко, П. П. Малошевский и др.]. — Киев : Наук. думка, 1979. — 163 с.
4. *Курец В. И.* Электроимпульсная дезинтеграция материалов / В. И. Курец, А. Ф. Усов, В. А. Цукерман. — Апатиты : Изд. Кольского научного центра РАН, 2002. — 324 с.
5. *Кускова Н. И.* Получение углеродных наноматериалов в процессе электролразрядной обработки органических жидкостей / [Н. И. Кускова, А. Н. Ющишина, А. П. Малошевская и др.] // Электронная обработка материалов. — 2010. — № 2. — С. 72—76.
6. *Липян Е. В.* Термодинамический анализ гетерогенных химических реакций в системе смесь порошков Fe—Ti—углеводородная жидкость под воздействием высоковольтных электрических разрядов / [Е. В. Липян, О. Н. Сизоненко, А. С. Торпаков, А. А. Жданов] // Вісник НТУ "ХПІ". — 2015. — № 51 (1160). — С. 59—65.

7. Chang E. J. Shock wave interactions with particles and liquid fuel droplets / E. J. Chang, K. Kailasanath // Shock Waves. — 2003. — No. 12. — P. 333—341.
8. Sizonenko O. N. Variation in the particle size of Fe—Ti—B₄C powders induced by high-voltage electrical discharge / [O. N. Sizonenko, G. A. Baglyuk, A. I. Raichenko et al.] // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. — 2012. — 51, is. 3. — P. 129—136.
9. Сизоненко О. Н. Разработка способа расчета переходной функции при распространении волн сжатия в газожидкостной среде / О. Н. Сизоненко, Л. М. Дыхта // Геотехническая механика. — 2004. — Вып. 49. — С. 114—129.
10. Слепьян Л. И. Интегральные преобразования в нестационарных задачах механики / Л. И. Слепьян, Ю. С. Яковлев. — Л. : Судостроение, 1980. — 344 с.
11. Власов В. Г. Интегральное интерполирование и интерполирование по начальным и конечным производным. — Л. : Судпромгиз, 1959. — Т. 5. — 355 с.
12. Бескаравайный Н. М. О расчете волн давления в газожидкостной среде / Н. М. Бескаравайный, В. Г. Ковалев, В. А. Поздеев // Акустический журн. — 1985. — 31, № 4. — С. 517—519.
13. Поздеев В. А. Импульсные возмущения в газожидкостных средах / В. А. Поздеев, Н. М. Бескаравайный, В. Г. Ковалев. — Киев : Наук. думка, 1988. — 116 с.

Трансформація хвиль стиснення при розповсюдженні у газорідному середовищі

О. Н. Сизоненко

Наведено алгоритм визначення параметрів трансформації хвилі стиснення при розповсюдженні у газорідному середовищі із заданими властивостями, які визначаються головним чином газовмістом, радіусом бульбашок, гідростатичним тиском, густиною рідкої фази, швидкістю звуку. Отримано залежності тиску хвилі стиснення від газовмісту при фіксованому радіусі бульбашки та від радіуса бульбашки при фіксованому газовмісті, які свідчать про наявність додаткового гідродинамічного впливу при високовольтних електричних розрядах у дисперсній системі вуглеводнева рідина—порошок.

Ключові слова: високовольтний електричний розряд, дисперсна система вуглеводнева рідина—порошок, хвиля стиснення, газорідне середовище.

Transformation of compression waves during propagation in gaseous-liquid medium

O. N. Suzonenko

An algorithm for determination of parameters of transformation of compression wave during propagation in gas-liquid medium with given properties that are defined mainly by gas content, bubbles radius, hydrostatic pressure, density of liquid phase and sound velocity, is presented. Dependences of compression wave pressure on gas content at fixed bubble radius and on bubble radius at fixed gas content, which indicate the presence of additional hydrodynamic impact during high voltage electric discharges in disperse system hydrocarbon liquid—powder, are obtained.

Keywords: high voltage electric discharge, disperse system hydrocarbon liquid—powder, compression wave, gas-liquid medium.