

Э.А. Таиров¹, Б.Г. Покусаев², М.Ю. Гриценко¹, С.А. Васильев¹

Институт систем энергетики СО РАН им. Л.А. Мелентьева, г. Иркутск, Россия (1)

Московский государственный университет инженерной экологии, Россия (2)

СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МАЛЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ В ШАРОВОЙ ЗАСЫПКЕ С ДВУХФАЗНОЙ СРЕДОЙ*

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты экспериментов по изучению особенностей распространения малых возмущений давления в канале с шаровой засыпкой при фильтрации паро- и газожидкостного потока. Измерения проведены для двух значений давления 0,2 и 0,6 МПа со свинцовыми 3; 4 и 8 мм и стеклянными 3,6 мм шариками. Результаты опытов позволили выделить режимные условия, при которых скорость движения волны давления приближается к «равновесной» скорости звука в парожидкостной смеси, проследить влияние давления и размеров частиц засыпки на распространение малых возмущений в исследуемой среде.

1. ВВЕДЕНИЕ

Вопросам распространения волн в газо- и парожидкостных средах посвящено большое количество исследований, среди них ограничимся указанием наиболее известных монографических публикаций [1, 2]. В подавляющем большинстве экспериментальных работ изучение волновых процессов осуществляется в прямых каналах, заполняемых газо- и парожидкостной средой. Особенности нестационарных процессов в каналах с двухфазным потоком, при его фильтрации через зернистый слой, мало изучены. В этой связи достаточно неожиданными оказались результаты опытов, представленные в [3, 4], по измерению скорости возмущений давления в круглой вертикальной трубе с парожидкостным потоком при наличии твердого пористого скелета, образуемого шаровой засыпкой. Значения скорости распространения волн давления здесь оказались существенно ниже, чем в этой же трубе без засыпок, и составили единицы метров в секунду. Этот экспериментальный результат был получен впервые, и необходимость его объяснения побудила обратить внимание на описанный Л. Ландау [5] особый механизм распространения возмущений в мелкодисперсной двухфазной системе — за счет изменения паросодержания при изменении давления. Расчетное значение этой скорости, называемой скоростью звука Ландау, для парожидкостной среды при $p_0 = 0,1$ МПа и предельно малом паросодержании составляет 1,1 м/с [2].

Выдвинутое нами в [4] предположение о возможности проявления в опытах с засыпками описанного в [5] особого механизма распространения волн давления, который сопровождается интенсивным межфазным массообменом в волне возмущения, вызывает необходимость дополнительных экспериментов.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Из выражения для плотности парожидкостной смеси, находящейся в состоянии термодинамического равновесия,

$$\frac{1}{\rho_{см}} = \frac{1-x}{\rho'} + \frac{x}{\rho''} \quad (1)$$

следует, что $\rho_{см}$ функционально зависит от трех параметров ρ' , ρ'' и x , каждый из которых чувствителен к изменению давления.

В частном случае, когда $x = \text{const}$, например, для воздушно-водяной смеси, при допущении о гомогенности среды расчет скорости звука, определяемой как

$$c = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_S}, \quad (2)$$

приводит к выражению [1, 6]:

$$c^2 = \left[\rho_{см} \left[\frac{\varphi}{\rho'' c_2^2} + \frac{1-\varphi}{\rho' c_1^2} \right] \right]^{-1}. \quad (3)$$

Другой предельный случай возникает, если полагать, что $\rho' = \text{const}$ и $\rho'' = \text{const}$, а сжатие или разрежение системы сопровождается переходом вещества из одной фазы в другую в соответствии с условиями термодинамического равновесия, т.е. $x = x(p)$.

Осуществляя дифференцирование (2) по схеме [1], получаем:

$$c^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_S = \frac{L^2}{\rho_{см}^2 c_* T \left(\frac{1}{\rho''} - \frac{1}{\rho'}\right)^2}, \quad (4)$$

где $c_* = c''x + c'(1-x)$ — эффективная удельная теплоемкость среды; c' и c'' — удельные теплоемкости воды и пара на линии насыщения.

Полагая при малых давлениях $\frac{1}{\rho''} \gg \frac{1}{\rho'}$, получаем выражение:

$$c = \frac{L\rho''}{\rho_{см} \sqrt{c_* T}}. \quad (5)$$

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 05-02-16313

Если $x \ll 1$ (мелко дисперсная смесь жидкости с небольшим количеством пара), и рассматривая пар как идеальный газ, приходим к приведенной в [1, 2, 5] формуле для скорости звука

$$c = \frac{pL}{\rho'RT\sqrt{c'T}}, \quad (6)$$

здесь R — удельная газовая постоянная.

Зависимости (4)—(6) справедливы, когда массообмен в смеси обусловлен тепловым взаимодействием только между паровой и жидкой фазами, и их, строго говоря, нельзя применять к течению в шаровых засыпках из теплопроводного материала. Поэтому при обработке экспериментальных данных представленные зависимости рассматриваются как некие верхняя и нижняя предельные оценки, позволяющие судить о роли межфазного массообмена в процессе сжимаемости парожидкостной среды при прохождении волны давления через трехфазную систему «пар — жидкость — шаровая засыпка».

3. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследования, как и в работе [4], проводились в вертикальном цилиндрическом канале внутренним диаметром 33 мм и толщиной стенки 7,5 мм, покрытом снаружи тепловой изоляцией. В качестве засыпок использовались свинцовые шарики диаметром 3 мм, 4 мм и 8 мм, а также стеклянные — диаметром 3,6 мм. Парожидкостная смесь создавалась дросселированием горячей воды повышенного давления через шайбу, установленную непосредственно у входа в вертикальный канал. Возмущения давления создавались импульсным вдувом пара от внешнего парогенератора через нижний торец рабочего участка, а его амплитуда в рассматриваемых сечениях канала не превышала 10 % давления в канале. Распространение волны давления по каналу регистрировалось высокочастотными датчиками давления типа ДДИ-21.

Малые значения массовой скорости, от 35 до 110 кг/(м²·с), обеспечивали низкий перепад давления и, тем самым, слабое его влияние на паросодержание в зоне измерения в канале. Коэффициент скольжения фаз в засыпке рассчитывался по рекомендации [7]. Опыты проводились при двух значениях давления в рабочем канале — 0,2 МПа и 0,6 МПа. Ввиду медленного течения теплоносителя его собственная скорость не учитывалась при обработке опытных данных.

Для проверки методики исследования были выполнены тестовые эксперименты по измерению скорости звука в засыпках с однофазной жидкостью. Полученная на установке скорость распространения возмущений давления в пористой среде из свинцовых частиц диаметром 8 мм, насыщенной водой при температуре 17 °С и давлении 0,11 МПа, составила 1492 м/с, что с погрешностью 1,3 % согласуется с табличным значением термодинамической скорости звука в чистой воде при данных условиях [8].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Засыпка, насыщенная воздушно-водяной смесью. Использование в качестве газовой фазы неконденсируемого компонента позволяет полностью исключить вклад межфазного массообмена в общую сжимаемость смеси. Была выполнена серия опытов с заполнением межпорового пространства в засыпке воздушно-водяной смесью. Смесь заданного газосодержания создавалась пропусканием через залитый водой канал пузырьков воздуха при известном его объемном расходе. Истинное объемное газосодержание определялось с учетом скорости всплытия пузырей в шаровых засыпках [9].

В данном случае изменение плотности газожидкостной смеси в волне давления происходит только за счет сжимаемости компонентов смеси, и распространение малых возмущений давления должно происходить со скоростью, близкой к «замороженной» скорости звука в этой среде, определяемой по формуле (3). Результаты опытов, которые приведены на рис. 1, показывают, что как при отсутствии шаровой засыпки, так и при ее наличии, волна возмущения давления распространяется по закону «замороженной» скорости звука для газожидкостной смеси.

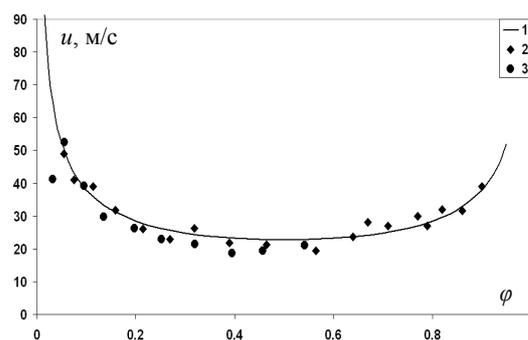


Рис. 1. Скорость акустических волн в водовоздушной смеси в сопоставлении с расчетом: 1 — расчет по (3); 2 — водовоздушная среда без засыпки; 3 — водовоздушная среда со свинцовой засыпкой диаметром частиц 8 мм

Засыпки, насыщенные пароводяной средой. Вследствие интенсификации межфазного массообмена в волне давления скорость ее распространения способна существенно замедлиться, и тем больше, чем благоприятнее условия теплообмена. Результаты опытов с засыпкой из частиц диаметром 3 мм, представленные на рис. 2, а, являются тому подтверждением.

Присутствие в потоке мелкопористого слоя привело к резкому снижению скорости волны давления до значений «равновесной» скорости звука, описываемой зависимостью (4). Этот факт может свидетельствовать о том, что в рассмотренном диапазоне объемных паросодержаний $0,2 < \varphi < 0,6$ присутствие пористого слоя в потоке создает благодаря многократно возросшей площади поверхности межфазного обмена благоприятные условия достижения термодинамического равновесия в волне возмуще-

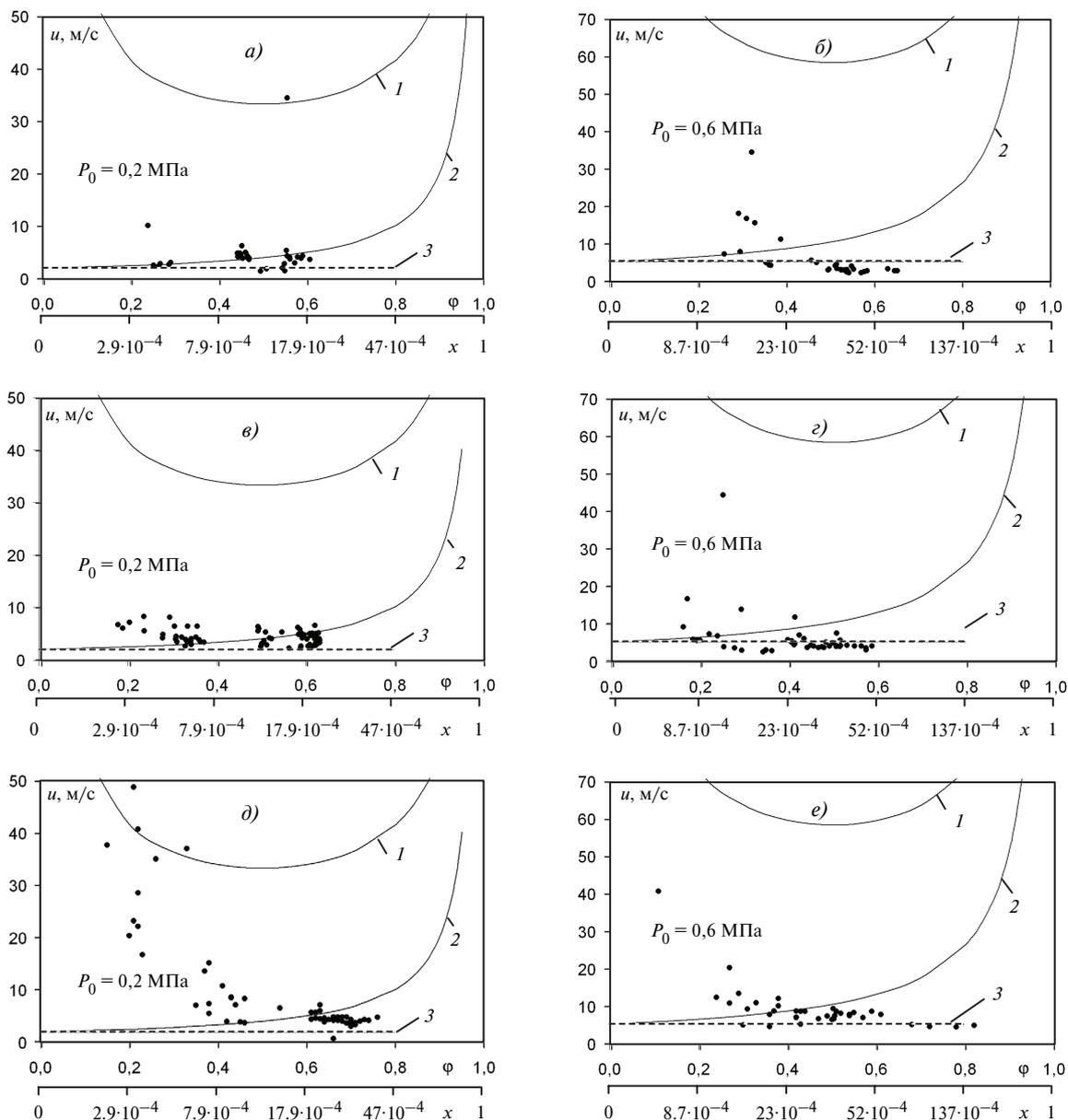


Рис. 2. Скорость распространения возмущений в свинцовой засыпке диаметром 3 мм (а, б); 4 мм (в, з) и 8 мм (д, е), омываемой двухфазным потоком при давлении $p_0 = 0,2$ МПа и $p_0 = 0,6$ МПа: 1 — расчет по (3); 2 — расчет по (4); 3 — расчет по (6); темные точки — результаты экспериментов

ния. Темп нарастания давления во фронте составлял от 0,1 до 0,25 МПа/с, а характерная частота процесса — 3...7 Гц.

Заметим, что скорость фильтрации двухфазного потока в опытах могла составлять 1...10 % величины измеряемой скорости, а истинное массовое паросодержание x составляет всего 10^{-4} ... 10^{-2} .

Аналогичные результаты получены в опытах с частицами размером 4 мм и 8 мм (рис. 2, в—е). Как видно, в области $\phi < 0,4$, особенно при давлении $p_0 = 0,2$ МПа и крупных частицах размером 8 мм, экспериментальные точки располагаются заметно выше линии равновесной скорости (рис. 2, д). Здесь, по-видимому, можно выделить два фактора, влияющие на интенсивность межфазного массообмена в волновом процессе.

Во-первых, течение полидисперсного двухфазного потока, который создается дросселированием, характеризуется в крупных засыпках большей неоднородностью по сечению, и, следовательно, уже является существенно негомогенным, при этом нарушаются теоретические предпосылки существования «равновесной» скорости звука.

Во-вторых, с укрупнением размеров частиц засыпки сокращается общая площадь теплообмена в потоке, тем самым падает интенсивность массообмена в волне давления.

Таким образом, можно выделить четко прослеживаемую промежуточную зону (на рис. 2, д это область $0,2 < \phi < 0,4$) действия смешанного механизма сжимаемости парожидкостного потока в волне давления, в которой скорость распространения

давления изменяется от «равновесной» скорости звука до значений «замороженной» скорости.

Опыты со стеклянными шариками, результаты которых показаны на рис. 3, подтверждают общую тенденцию поведения скорости волны давления в потоке в рассмотренном диапазоне паросодержания. Так же как и в засыпке из металлических частиц, здесь увеличение давления от 0,2 до 0,6 МПа расширяет область паросодержаний, где наблюдается приближение к «равновесной» скорости звука.

Из опытных данных видно также, что в засыпках с более мелкими частицами достигаются более низкие значения скорости волны давления.

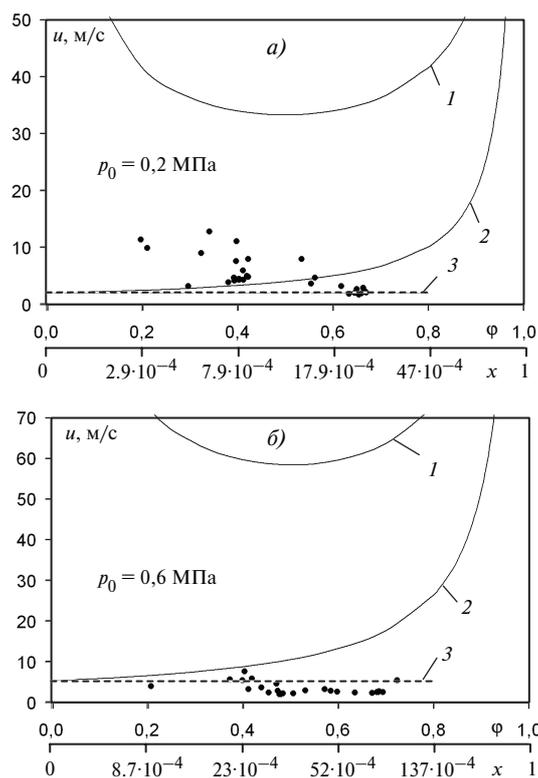


Рис. 3. Скорость распространения возмущений в стеклянной засыпке диаметром 3,6 мм, омываемой двухфазным потоком при давлении $p_0 = 0,2$ МПа (а) и $p_0 = 0,6$ МПа (б): 1 — расчет по (3); 2 — расчет по (4); 3 — расчет по (6); темные точки — результаты эксперимента

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В двухфазных газопарожидкостных средах, движущихся в слое шаровых засыпок, скорость малых возмущений давления может изменяться от термодинамически «замороженной» до «равновесной» скорости звука. Определяющим фактором для достижения «равновесной» скорости является интенсификация межфазного массообмена за счет создания большой поверхности раздела фаз введением в поток пронизываемого пористого скелета и обеспечением однородной структуры потока по его сече-

нию. Принципиального влияния материала частиц (свинец, стекло) не обнаружено, этот вопрос нуждается в дальнейшем изучении. Требуется специальное рассмотрение структура парожидкостного потока в засыпках и ее влияние на эволюцию возмущения давления.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

φ — объемное паросодержание;
 ρ — плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 τ — время, с;
 L — теплота фазового перехода, $\text{кДж}/\text{кг}$;
 p — давление, Па;
 R — удельная газовая постоянная, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;
 T — абсолютная температура, К;
 c — скорость звука, м/с;
 c^* — эффективная удельная теплоемкость, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;
 x — массовое паросодержание;
 u — скорость распространения возмущения, м/с.

Индексы:

0 — невозмущенное состояние;
1 — жидкость;
2 — газ;
 s — адиабатный процесс;
см — смесь;
', '' — вода, пар на линии насыщения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р. Распространение волн в газо- и парожидкостных средах. Новосибирск: Институт теплофизики, 1983. 237 с.
2. Нигмагулин Р. И. Динамика многофазных сред. Т. 2. М.: Наука, 1987. 359 с.
3. Pokusaev B.G., Tairov E.A., Gritsenko M.Yu. Propagation of Shock Disturbances In A Porous Medium Washed by The Two-Phase Flow // Intern. Thermal Science Seminar II (ITSS- II), Bled, Slovenia, 2004, Ljubljana: ZSIS, 2004. P. 635—641.
4. Покусаев Б.Г., Таиров Э.А., Гриценко М.Ю. Распространение возмущений давления в пористой среде при фильтрации двухфазного потока // ТВТ. 2004. Т. 42. № 6. С. 947—953.
5. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 736 с.
6. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. М.: Мир, 1972. 440 с.
7. Гидродинамическое сопротивление при течении двухфазной смеси в шаровой засыпке / А.А. Авдеев, Б.Ф. Балунов, В.А. Рыбин и др. // ТВТ. 2003. Т. 41. № 3. С. 432—438.
8. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. М.: Издательство МЭИ, 1999. 168 с.
9. Покусаев Б. Г. Процессы переноса в многофазных (газ — жидкость — твердые частицы) средах // Труды 28 Сибирского теплофизического семинара. Новосибирск, 12—14 октября 2005 г. Электронная публикация. Статья № 96. Новосибирск. 2005.