

нение жидкостью 2 среды 1 происходит в узком зазоре, энергия смачивания частично запасается в виде избытка энергии тонкой пленки. В адиабатическом приближении $f(h) = -2(\sigma_{23} - \sigma_{13})$. Из условия смачивания жидкостью 2 поверхности 3 $\sigma_{23} + \sigma_{12} - \sigma_{13} < 0$ следует, что $-(\sigma_{23} - \sigma_{13}) > \sigma_{12}$.

Нижний предел максимально возможной энергии расклинивающего давления определяется поверхностным натяжением дисперсионной среды. Для воды $\sigma_{12} = 0,073 \text{ Дж/м}^2 \approx 0,1 \text{ Дж/м}^2$. За характерный размер элементарных чешуек твердой фазы, отслоившихся от первоначального агрегата, примем [10] $\delta = 10^{-8} \text{ м}$, тогда при объемном содержании $\alpha = 10\%$ для оценки формулы (3.6) имеем

$$\Delta p = p_1 - p_{10} = 2 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Данная оценка энергии $f(h)$, используемая в [11], качественно совпадает с результатами эксперимента.

В единичном контакте максимальное избыточное давление оценивается как [7]

$$P(h_{\min}) \approx 2\sigma_{12}/h_{\min} \approx 300 \text{ МПа,}$$

где $h_{\min} \approx 6 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ — толщина мономолекулярного слоя воды.

Согласно изложенным представлениям о причинах возникновения избыточного давления в волне, эффект должен проявляться, когда среднее расстояние h_0 между частицами дисперсной фазы близко к удвоенному радиусу действия поверхностных сил. Этому расстоянию соответствует некоторая критическая концентрация дисперсной фазы, при достижении которой обеспечивается коллективное перекрывание ПС во фронте сравнительно слабой волны сжатия. Таким образом, природа, концентрация и агрегатные состояния взаимодействующих фаз оказывают влияние на структуру фронта УВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нигматулин Р. И., Пыж В. А., Симоненков И. Д. Эффект аномальных колебаний с интенсивными всплесками давления в ударной волне, распространяющейся по водной суспензии бентонитовой глины. — Изв. вузов. Нефть и газ, 1983, № 11.
2. Мирзаджанзаде А. Х., Нигматулин Р. И., Пыж В. А. Об аномальном повышении давления при ударных нагружениях водной суспензии бентонитовой глины. — ДАН СССР, 1984, т. 278, № 6.
3. Пыж В. А. Экспериментальное исследование волновых процессов в водной суспензии бентонитовой глины. — ПМТФ, 1986, № 3.
4. Пыж В. А. Об ударных волнах в бентонитовой суспензии. — Коллоид. журн., 1985, № 5.
5. Леонтович М. А. Введение в термодинамику. — М.—Л.: ИТТЛ, 1952.
6. Яминский В. В., Пчелин В. А., Амелина Е. А., Щукин Е. Д. Коагуляционные контакты в дисперсных системах. — М.: Химия, 1984.
7. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкости. — Л.: Наука, 1975.
8. Дерягин Б. В. Устойчивость коллоидных систем. — Успехи химии, 1979, № 48.
9. Бабак В. Г., Щукин Е. Д. Прочность дисперсной пористой структуры в различных напряженных состояниях. — Коллоид. журн., 1973, № 5.
10. Осипов В. И. Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород. — М.: Изд-во МГУ, 1979.
11. Ребиндер П. А., Шрейнер Л. А., Жигач К. Ф. Понизители твердости в бурении. — М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1944.

Поступила 2/IX 1985 г.

УДК 532,595

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА ДАВЛЕНИЯ В ТРУБАХ, ЗАПОЛНЕННЫХ ВОДОЙ

Н. Н. Гердюков, Ю. А. Крысанов, С. А. Новиков

(Москва)

Результаты исследований распространения импульсных давлений в заполненных жидкостью трубах представляют большой практический интерес. Наиболее полные обзоры теоретических и экспериментальных работ, посвященных этому вопросу, приведены в [1, 2]. При расчетах распространения ударных импульсов в трубах с жид-

костью применяется разработанная в [3] и развитая в [4] теория неустановившегося движения идеальной жидкости. В [1] для решения задач о гидравлическом ударе в длинных трубопроводах разработана теория, учитывающая вязкость жидкости. Влияние упругоэластических деформаций стенок трубы на процесс распространения в жидкости импульса давления (ИД) рассмотрено в [2]. Показано, например, что роль вязкости жидкости значительно снижается при наличии деформации трубы.

Упругие колебания стенок трубы, распространяющиеся, как правило, со скоростью, большей скорости ИД в жидкости, могут приводить к размыванию фронта импульса. В [5] теоретически показано, что уже на длине ~ 10 диаметров трубы фронт ИД размывается и по жидкости распространяется акустическая волна сжатия.

Количество известных экспериментальных работ значительно меньше. В [6] проводилось изучение волнового поля внутри трубы с водой при взрыве в ней небольших зарядов взрывчатого вещества (ВВ). Получены эмпирические формулы для зависимости основных параметров ИД от расстояния до места взрыва. В [7] представлены результаты экспериментального определения скорости распространения ИД в жидкости и в стенках трубы, а также величины деформации стенок труб из различных материалов. Возбуждение ИД осуществлялось ударом шарика о закрытый торец трубы. В [8] даны результаты экспериментального изучения затухания ИД по длине трубы, заполненной жидкостью, и показано, что при крутом фронте ИД результаты расчетов по [3] не согласуются с данными эксперимента.

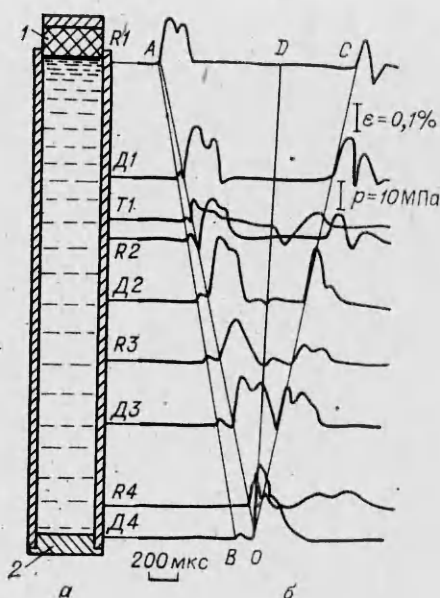
В настоящей работе приводятся экспериментальные данные о распространении возбуждаемого взрывом ИД в заполненных водой отрезках труб из стали Ст. 3 и алюминиевого сплава Д16Т. ИД трапецеидальной формы с крутым передним фронтом формировался в воде, заполняющей трубы, с помощью описанного в [9] взрывного нагружающего устройства. Амплитуда и длительность ИД при этом определяются плотностью пенопластирола, его толщиной и кинетической энергией пластины ударника. Давление в опытах изменялось от 10 до 30 МПа, а длительность от 100 до 300 мкс.

Эксперименты проводились с отрезками труб трех типов: 1 — стальные трубы размерами 40×4 мм (наружный диаметр, толщина стенки), длиной 1 и 3 м; 2 — трубы из алюминиевого сплава Д16Т размерами $30 \times 1,5$ мм, длиной 0,6 м; 3 — трубы из сплава Д16Т размерами 146×13 мм, длиной 0,8 м.

Параметры ИД в воде, заполняющей трубу, измерялись пьезоэлектрическими датчиками давления ПДД1 и ПДД7, конструкция и метод калибровки которых изложены в [10]. В трубах первого и второго типов датчиками ПДД7 записывался профиль давления, действующего на торцевую заглушку трубы. По разности во времени появления сигналов с датчика ПДД1, установленного в верхней части трубы, и с датчика ПДД7 определялась средняя скорость переднего фронта ИД. В опытах с трубами третьего типа регистрировались датчиками типа ПДД7 также давление в проходящей и отраженной волне, а тензодатчиками — деформации наружной поверхности трубы. Схема проведения опытов с трубой типа 3 приведена на рисунке, а, где 1 — взрывное нагружающее устройство; 2 — торцевая заглушка, Д — датчик давления, Т — тензорезистор для измерения осевой деформации трубы, Р — тензорезистор для измерения радиальной деформации стенки трубы. Датчики давления и тензорезисторы использовались так же, как отметчики времени, для определения средней скорости фронта ИД. Погрешность измерения амплитуды ИД и деформации стенок трубы не превышала 15%, погрешность определения скорости фронта ИД не более 8% при доверительной вероятности 95%.

На рисунке, б показаны осциллограммы сигналов с датчиков давления и тензодатчиков, отнесенные к сечениям трубы, в которых проведены измерения. Характер профиля ИД и деформации стенок трубы хорошо воспроизводится от опыта к опыту, анализ полученных результатов позволяет представить картину распространения ИД в заполненных жидкостью трубах следующим образом.

Перед фронтом основного ИД в жидкости наблюдается предвестник (луч АВ на рисунке, б), распространяющийся со скоростью ~ 1450 м/с, которая практически совпадает со скоростью звука в воде (аналогичное явление наблюдалось в алюминиевом стержне [11]), амплитуда предвестника на порядок ниже амплитуды ИД. Амплитуда и крутизна фронта ИД



при распространении по жидкости в опытах практически не изменялись. ИД, отраженный от торца трубы, имеет практически те же величины амплитуды и крутизны фронта.

Скорость распространения фронта ИД в прямом и обратном направлении (лучи *AO* и *OC* соответственно) одинакова и равна 1200 ± 40 м/с, что хорошо согласуется со значением, рассчитанным по формуле Н. Е. Жуковского:

$$c = c_0(1 + Kd/hE)^{-1/2},$$

где c_0 — объемная скорость звука; K — модуль объемного сжатия жидкости; E — модуль Юнга материала трубы; d , h — диаметр и толщина стенки трубы. Для трубы типа 3 $c = 1230$ м/с.

Аналогичное поведение ИД наблюдалось и при использовании труб

типа 1 и 2: измеренные скорости распространения ИД хорошо согласуются с расчетными значениями.

Измерения деформации стенки трубы в осевом и окружном направлении позволили связать напряженное состояние в стенке трубы с амплитудой импульса давления в жидкости. Измеренная деформация стенки трубы в осевом направлении хорошо согласуется с величиной, рассчитанной по закону Гука $\epsilon_1 = p/E$, а величина окружной деформации трубы — с $\epsilon_2 = pd/E2h$ [12], где ϵ_1 , ϵ_2 — осевая и окружная деформации трубы; p — амплитуда ИД.

Примененный способ создания ИД в жидкости позволил избежать одновременного нагружения стенки трубы в осевом направлении. Тензодатчики, ориентированные в осевом направлении, зарегистрировали лишь деформацию, вызванную прохождением ИД. Однако отражение импульса давления от закрытого торца трубы привело к возбуждению растягивающих напряжений в стенке трубы, и тензодатчик *T1* зарегистрировал волну растяжения, распространяющуюся по трубе со скоростью 5200 ± 200 м/с, т. е. практически совпадающей со скоростью распространения звука в тонких алюминиевых пластинах (~ 5300 м/с) — луч *OD*.

Амплитуда деформации в волне растяжения хорошо согласуется с оценкой по закону Гука $\epsilon_3 = p_1 S_1 / (E S_2)$, где p_1 — давление отражения на торце трубы; S_1 , S_2 — площадь внутреннего сечения и стенок трубы соответственно. Заметного влияния волны в стенке трубы на давление в жидкости не обнаружено. В опытах не замечено размытия фронта ИД, по крайней мере, в пределах разрешающей способности регистратора. Возможно, это объясняется тем, что звуковая волна, распространяющаяся по стенке металлической трубы перед ИД, вызывает изгибные колебания весьма малой амплитуды, недостаточной для заметного возмущения жидкости и размытия фронта ИД.

Как следует из оценок результатов [6, 8], затухание амплитуды ИД, вызванное вязкостью воды, можно обнаружить лишь по прохождению ИД расстояния в несколько сотен диаметров трубы. В наших опытах, в которых максимальная длина трубы не превышала сотни диаметров, затухания амплитуды ИД не наблюдалось, что свидетельствует о правильности сделанных выше оценок. Влияния амплитуды ИД на скорость его распространения в трубах одного вида при упругой деформации стенок трубы не обнаружено.

Результаты представленных экспериментов показывают, что распространение ИД по жидкости, заключенной в трубе, носит сложный ха-

ракти. Показано, в частности, что перед основным ИД, скорость которого определяется упругими характеристиками жидкости и материала трубы, со скоростью звука в жидкости распространяется предвестник с амплитудой на порядок меньше амплитуды ИД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чарный И. А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах.— М.: Недра, 1975.
2. Varez F., Goldsmith W., Sackman J. L. Longitudinal waves in liquid-filled tubes.— Int. J. Mech. Sci., 1979, v. 21, p. 213.
3. Жуковский И. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах.— М.— Л.: Гостехиздат, 1949.
4. Лейбензон Л. С. Собрание трудов.— М.: Изд-во АН СССР, 1955, т. 3.
5. Szumowski A. Pressure wave pattern in a liquid filling an elastic pipe.— Arch. Mech., 1978, v. 30, N 4—5.
6. Гераськин А. С., Корчагин В. И., Ловля С. А. Экспериментальное исследование взрыва в волноводе.— ДАН СССР, 1970, т. 195, № 2.
7. Krause N., Goldsmith W., Sackman J. L. Transients in tubes containing liquids.— Int. J. Mech. Sci., 1977, v. 19, p. 53.
8. Магдалинская И. В., Розенберг Г. Д. Экспериментальное исследование затухания волны давления при гидравлическом ударе.— ДАН СССР, 1980, т. 255, № 4.
9. Новиков С. А., Погорелов А. П., Синицын В. А. Расчет взрывного нагружающего устройства для создания импульса давления заданных параметров.— ФГВ, 1980, № 6.
10. Бодренко С. И., Гердюков Н. И. и др. Применение кварцевых датчиков давления для исследования ударно-волновых процессов.— ФГВ, 1981, № 3.
11. Иванов А. Г., Хохлов Н. П. и др. Исследование формирования воли в стержнях при коротком ударе.— Акуст. журн., 1977, т. XXIII, вып. 2.
12. Беляев Н. М. Сопротивление материалов.— М.: Физматгиз, 1962.

Поступила 9/VII 1985 г.

УДК 532.529

РАСЧЕТ МЕЖФАЗНОЙ СИЛЫ В МОНОДИСПЕРСНОЙ ПУЗЫРЬКОВОЙ СРЕДЕ С ИДЕАЛЬНОЙ НЕСУЩЕЙ ФАЗОЙ И ХАОТИЧЕСКИМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ВКЛЮЧЕНИЙ

А. Е. Крошилин, В. Е. Крошилин

(Москва)

Для расчета движения пузырей относительно жидкости необходимо знать силу, действующую на них. В дисперсной среде взаимодействие включений через несущую фазу может существенно влиять на силу, действующую на включения, причем эта сила зависит от микроструктуры смеси [1]. Предельные микроструктуры: регулярная, когда расстояния между соседними включениями примерно одинаковы, и хаотическая, когда включения расположены хаотически.

Вычисление межфазной силы в пузырьковой смеси в частном случае (при отсутствии градиента параметров течения) сводится, как показано, например, в [2], к расчету присоединенной массы пузыря в смеси. Присоединенная масса включений в дисперсной среде выводилась при различных предположениях во многих работах, обзор и анализ которых дан в [2].

Межфазная сила в пузырьковой жидкости в общем случае с учетом градиентов параметров течения исследована существенно меньше. Подробный анализ при этом проведен лишь для смесей, имеющих регулярную структуру,— в [1] методом ячеек детально изучены все слагаемые межфазной силы и дан соответствующий обзор литературы.

В настоящей работе излагается методика расчета методом осреднения микроуравнений межфазного взаимодействия в смесях, имеющих хаотическую структуру. В отличие от [2] рассматривается случай, когда характеристики дисперсной среды меняются вдоль оси z . Изучено влияние градиентов средних параметров смеси на межфазную силу.

1. Основные допущения. Допустим, что несущая среда идеальная, а пузыри имеют сферическую форму. В [3] показано, что для пузырей умеренных размеров эти допущения оправданны. Кроме того, предполагаются монодисперсность среды [1], потенциальность течения несущей фазы и ха-