АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1994, том 40, № 4, с. 683 - 685

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 532.546

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ В ГАЗОНАСЫЩЕННОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

© 1994 г. В. Е. Донцов, В. Е. Накоряков, Б. Г. Покусаев

Институт теплофизики СО РАН

630090 Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Поступила в редакцию 30.06.93 г.

Существует достаточно большое количество работ по исследованию эволюции и затухания волн давления и напряжения в газонасыщенных пористых средах. Ранее было показано, что в насыпных пористых средах волны давления имеют большое затухание [1], в то время как волны напряжения могут иметь ударную структуру на начальном этапе распространения [2]. Для консолидированных песчаников скорость и затухание волн определяются, в основном, параметрами пористой среды [3]. Значительное число работ посвящено взаимодействию воздушной ударной волны с твердой поверхностью, покрытой слоем пористого материала [4].

Целью данной работы является экспериментальное исследование эволюции и структуры волн давления в газонасыщенной насыпной пористой среде и сравнение этих результатов с расчетом по модели Био.

Опыты проводились на установке "ударная труба" [5]. Рабочий участок представлял собой вертикально расположенную толстостенную стальную трубу с внутренним диаметром 52 мм длиной 0.5 м, который заполнялся газонасыщенной пористой средой. В качестве пористой среды использовались оргстеклянные шарики диаметром (0.1 - 0.3) мм. Поровое пространство среды было заполнено воздухом. Пористость среды изменялась от $m = 0.33$ для плотноутрамбованной до $m = 0.50$ для очень рыхлой пористой среды. Волны давления ступенчатой формы создавались разрывом диафрагмы, разделяющей камеры высокого и низкого давлений. Ударная воздушная волна падала на границу раздела газ–газонасыщенная пористая среда и далее распространялась по рабочему участку. Вдоль рабочего участка располагались пьезоэлектрические датчики давления, заделанные заподлицо с внутренней стенкой рабочего участка. Датчики могли измерять либо профиль волны давления в воздухе (когда чувствительный элемент датчика не касался скелета пористой среды), либо суммарное значение давления в воздухе и напряжение в скелете. Сигналы с датчиков через высокоомные усилители подавались на АЦП и обрабатывались на ЭВМ.

В результате проведенных экспериментов в газонасыщенной пористой среде было обнаружено существование двух типов продольных волн, "быстрой" и "медленной" (по терминологии Био).

В случае плотноутрамбованной ($m = 0.33$) газонасыщенной пористой среды из входящего в среду сигнала образуется только одна продольная волна, которая соответствует "медленной" волне Био. При распространении такой волны происходит сильное ее затухание. Амплитуда же "быстрой" волны в этом случае на два порядка меньше амплитуды входного сигнала и в этом эксперименте практически не наблюдается. При увеличении пористости среды структура волны качественно изменяется.

На рис. 1 показана структура волн давления, распространяющихся в насыпных оргстеклянных шариках, насыщенных воздухом, для различных параметров волн и среды на различных расстояниях x от входа в среду (сплошная линия). Параметры среды: плотность газа $\rho_2 = 1.21 \times 10^3$ кг/м^3, модуль объемной упругости газа $K_2 = 1.4 \times 10^5$ н/м^2, плотность и модуль объемной упругости материала пористой среды, соответственно, $\rho_1 = 1.18 \times 10^3$ кг/м^3, $K_1 = 5.8 \times 10^9$ н/м^2, вязкость воздуха $\nu = 14.5 \times 10^{-6}$ м^2/с были одинаковы для всех приведенных опытов. Модуль сдвига вычисляется через модуль объемной упругости пористого скелета K_B, $\mu = 1.1 \times K_B$.

Видно, что из начального сигнала ступенчатой формы выделяется "быстрая" волна – (1), скорость которой обусловлена, в основном, сжимаемостью и плотностью пористого скелета, и "медленная" (диффузионная) волна – (2), скорость которой определяется сжимаемостью газа – рис. 1а. "Быстрая" волна практически не затухает и сохраняет ступенчатую форму на всем отрезке измерения (крутизна переднего фронта "быстрой" волны мало отличается от крутизны входного сигнала). В то же время диссипация, обусловленная межфазным трением на границе газ– твердый скелет, приводит к значительному выполаживанию переднего фронта "медленной" волны. Здесь же приведен расчет по линейной модели Био – штриховая линия (Δp_f – амплитуда "быстрой" волны при $x = 0$). Проницаемость пористой среды для

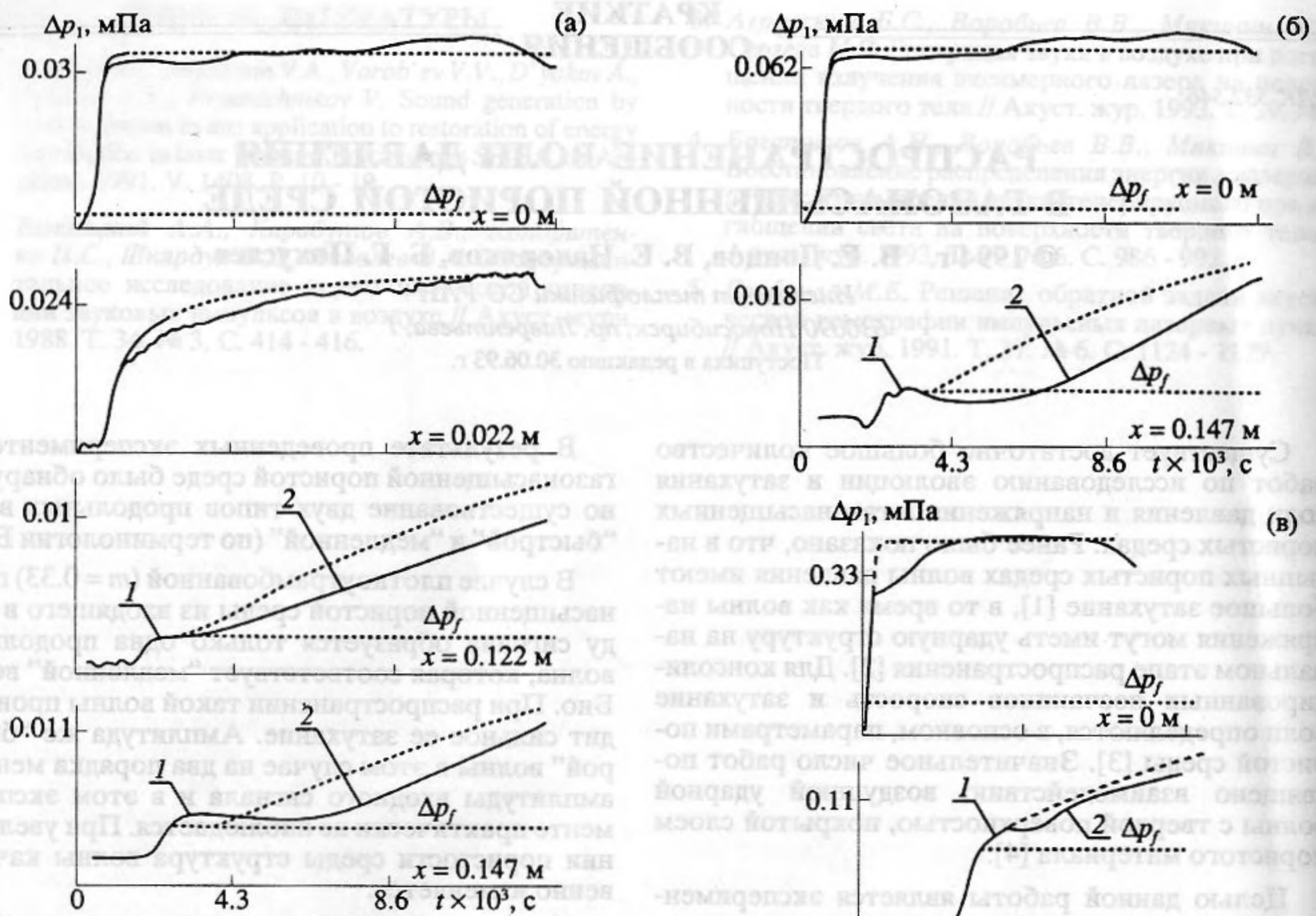

Рис. 1. Эволюция волны давления ступенчатой формы в насыпной газонасыщенной пористой среде: а, б – $m = 0.37$, в – $m = 0.46$.

различных пористостей в расчетах вычислялась с использованием формулы Козени по измеренному значению $K_0 = 20 \times 10^{-12}$ м^2 для плотноутрамбованной пористой среды с $m = 0.33$. Модуль объемной упругости пористого скелета вычислялся по скорости "быстрой" волны данной интенсивности в газонасыщенной пористой среде. Расчет хорошо описывает разделение волн на "быструю" и "медленную" моды. В то же время затухание "медленной" волны в эксперименте было более значительным. Это можно объяснить тем, что в расчете не учитывалась зависимость силы межфазного взаимодействия от относительной скорости газа за волной, т.е. отклонение течения газа в волне от закона Дарси. Кроме того, для газонасыщенных пористых сред необходимо также учитывать диссипацию вследствие теплообмена газа с пористой средой в волне.

При увеличении интенсивности входящей в пористую среду волны эволюция "медленной" волны давления в опытах еще больше отличается от расчетной (штриховая линия на рис.1б). Это объясняется тем, что в "быстрой" волне происходит существенное уменьшение пористости, что приводит к уменьшению проницаемости среды в волне. Следовательно, увеличивается затухание переднего фронта "медленной" волны, распространяющейся вслед за "быстрой" по уплотненной пористой среде. В то же время в "медленной" волне вследствие растяжения пористого скелета происходит частичное восстановление начальной пористости, что приводит к сближению экспериментальной и расчетной кривых на заднем фронте "медленной" волны. Таким образом, в расчете необходимо учитывать изменение пористости, а следовательно, и проницаемости среды в процессе прохождения волны.

При увеличении пористости модуль объемной упругости скелета уменьшается, что приводит к уменьшению скорости "быстрой" волны и увеличению нелинейных свойств пористой среды. На рис. 1в показаны профили волн в газонасыщенной высокопористой среде.

Экспериментально измеренное значение скорости "быстрой" волны составляет $U_f = 53$ м/с, а скорость малых возмущений (скорость звука) – $c_f = 24$ м/с. Численный расчет с модулем объемной упругости, вычисленным по скорости "быст-

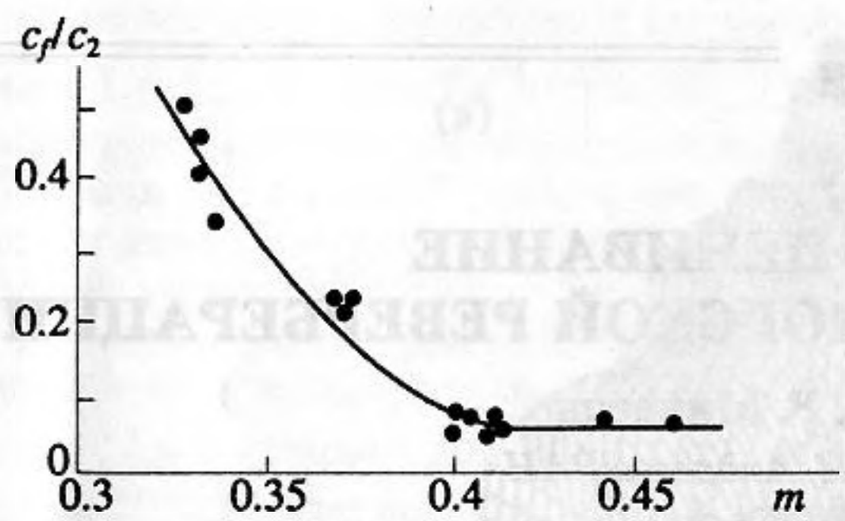

Рис. 2. Амплитуда "быстрой" волны давления на входе в пористую среду.

рой" волны (штриховая линия), хорошо описывает разделение входной волны давления на "быструю" и "медленную" моды и структуру "быстрой" волны. Для более корректного описания волн необходимо учитывать изменение пористости и модуля объемной упругости в волнах давления.

При дальнейшем увеличении пористости скорость "быстрой" волны определяется, в основном, уже не сжимаемостью пористого скелета, а сжимаемостью газа и наблюдается резкое увеличение затухания входящей в пористую среду волны.

На рис. 2 показана экспериментальная зависимость амплитуды "быстрой" волны давления на входе в пористую среду Δp_f от отношения модулей объемной упругости пористого скелета и газа – *1* (Δp_0 – амплитуда входящей в пористую среду волны). Линией *2* приведен расчет по модели Био. Видно, что рассчетная кривая хорошо описывает разделение волны на входе в пористую среду на "быструю" и "медленную" моды. Следует еще раз отметить, что в расчетах модуль объемной упругости скелета K_B вычислялся по скорости "быстрой" волны U_f, т.е. в K_B заложена зависимость упругости пористой среды от амплитуды волны. Поэтому хотя разделение волн и зависит от амплитуды входящей в пористую среду волны, но все экспериментальные точки для разных интенсивностей волн $\Delta p_0 = 0.3$ - 4 бар ложатся на одну линию.

На рис. 3 представлены опытные данные по скорости "быстрой" волны напряжения от ее амплитуды для разных пористостей среды c_2 – скорость звука в газе. Видно, что существует зависимость скорости волны напряжения от ее амплитуды, что обусловлено нелинейной деформацией пористой среды. При увеличении пористости нелинейные свойства среды возрастают, что приводит к более сильной зависимости скорости волны от ее интенсивности – рис. 3б.

Зависимость скорости волны эффективного напряжения малой интенсивности $\sigma_f/p_0 \ll 1$ от пористости показана на рис. 4, где $\sigma_f = \sigma - p$ – первая компонента тензора эффективных напряжений. При $m \leq 0.40$ скорость волны сильно зависит от пористости, так как в этом диапазоне скорость

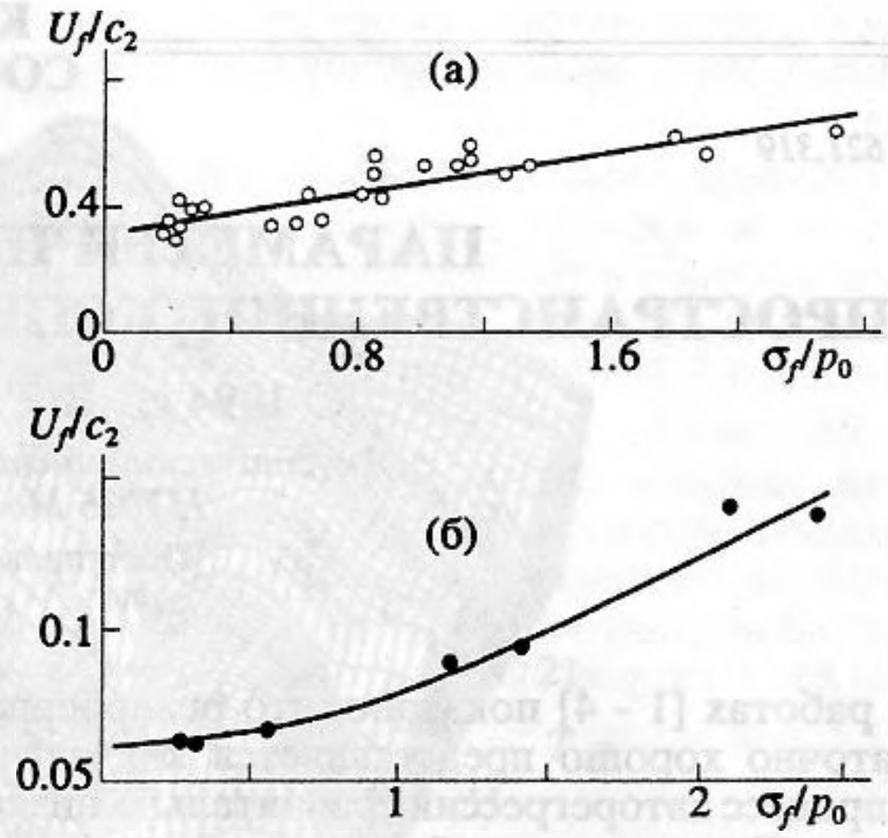

Рис. 3. Зависимость скорости "быстрой" волны напряжения от ее амплитуды. $p_0 = 0.1$ МПа, а – $m = 0.33$, б – $m = 0.41$.

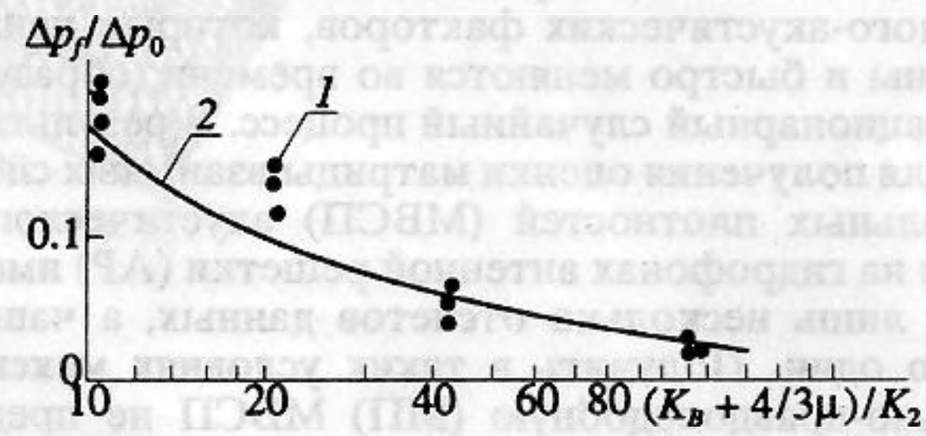

Рис. 4. Зависимость скорости звука в пористой среде от пористости.

волны определяется сжимаемостью скелета. При $m > 0.4$ скорость волн практически не зависит от пористости. Это связано с тем, что сжимаемость скелета становится больше сжимаемости воздуха и скорость волны определяется K_2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hampton D.* Pore air pressure in soil subjected to shock waves // J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE. 1965. SM6. P. 41 - 56.
2. *Stoll R.D. and Ebeido J.* Shock waves in granular soil // J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE. 1965. SM4. P. 107 - 125.
3. *Winkler K.W. and Plona T.J.* Technique for measuring ultrasonic velocity and attenuation spectra in rocks ander pressure // J. Geoph. Res. 1982. V. 87. № B13. P. 10,776 - 10,780.
4. *Гельфанд Б.Е., Медведев С.П., Поленов А.Н., Фролов С.М.* Передача ударно-волновой нагрузки насыпными средами // ПМТФ. 1988. № 2. С. 115 - 121.
5. *Донцов В.К., Кузнецов В.В., Накоряков В.Е.* Волны давления в пористой среде, насыщенной жидкостью с пузырьками газа // Изв. АН СССР. МЖГ. 1987. № 4. С. 85 - 92.