

- ные соотношения). — В кн.: Теоретические исследования и практическое применение плазменных износостойких покрытий. Свердловск, 1983.
3. Бабушкин Г. А. Диффузия из тонкого слоя в два полубесконечных образца с разными характеристиками. — ИФЖ, 1984, т. 47, вып. 2.
 4. Рыжик И. М., Градштейн И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. 3-е изд., перераб. М.—Л.: Гостехиздат, 1951.
 5. Степанов В. В. Курс дифференциальных уравнений. 6-е изд. М.: Гостехиздат, 1953.
 6. Губанов А. И. Теория стыковки двух кристаллов в композите. — МГМ, 1979, № 1.
 7. Бабушкин Г. А. Флуктуационный метод расчета абсолютной величины энергии сцепления в контакте различных сред. — ПМТФ, 1985, № 1.
 8. Кудинов В. В. Плазменные покрытия. М.: Наука, 1977.
 9. Бокштейн Б. С. Диффузия в металлах. М.: Металлургия, 1978.
 10. Журков С. И. Кинетическая концепция прочности твердых тел. — Вестн. АН СССР, 1968, № 3.
 11. Красулин Ю. Л. Взаимодействие металла с полупроводником в твердой фазе. М.: Наука, 1971.
 12. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972.
 13. Янке Е., Эмде Ф. Таблицы функций с формулами и кривыми. 3-е изд. М.: Физматгиз, 1959.

Поступила 16/X 1984 г.

УДК 534.222.2+532.529+536.468

САМОПОДДЕРЖИВАЮЩАЯСЯ ДЕТОНАЦИЯ В ЖИДКОСТЯХ С ПУЗЫРЬКАМИ ВЗРЫВЧАТОГО ГАЗА

А. И. Сычев, А. В. Пинаев

(Новосибирск)

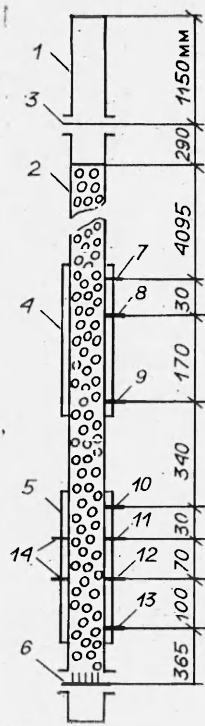
Под воздействием волны сжатия в жидкости с пузырьками газа наиболее существенно изменяются такие основные параметры среды, как размер пузырьков и объемное газосодержание β_0 . При сжатии пузырька ударной волной температура газа в нем повышается и может оказаться достаточной для воспламенения реагирующих веществ. Очаговое воспламенение жидких ВВ при схлопывании образующихся вблизи стенок трубы кавитационных пузырьков широко исследовано и описано, например, в [1, 2]. В [3, 4] экспериментально подтверждена возможность ударного воспламенения одиночного пузырька взрывчатого газа в реагирующей жидкости. Воспламенение систем типа пузырьки окислителя — жидкое горючее обнаружено в [5, 6].

В [7] процесс воспламенения ударной волной цепочки вертикально расположенных пузырьков взрывчатого газа в жидкости на длине 0,7 м определен как «пузырьковая детонация». Введение такого термина представляется преждевременным, так как не было показано, что волна воспламенения может самостоятельно распространяться по пузырькам на большой длине без дополнительного воздействия инициирующей ударной волны. Более того, из [8] следует, что наблюдаемый процесс не был самоподдерживающимся — по мере распространения волны наблюдалось ее затухание (уменьшались давление и скорость). До настоящего времени практически не изучены ударно-волновые явления и условия воспламенения в реагирующих газожидкостных системах с равномерно распределенными в объеме пузырьками газа (типа реагирующая жидкость — взрывчатый газ, жидкое горючее — газообразный окислитель). В таких системах лишь недавно выяснены особенности протекания процессов, сопутствующих движению ударных волн [5, 6], и экспериментально обнаружена самоподдерживающаяся волна детонации [5, 9].

Наиболее примечательно то, что выделяющееся в результате реакции количество тепла на единицу массы в этих системах на несколько порядков меньше, чем, например, в жидких и газообразных ВВ, т. е. ударная и детонационная адиабаты здесь практически совпадают. С учетом этого факт существования волны детонации в пузырьковой системе [5, 9] является нетривиальным.

В данной работе ставится цель выяснить условия возбуждения и свойства детонации в зависимости от величины β_0 и физико-химического состава пузырьковой среды.

Эксперименты выполнены на установке, принципиальная схема которой изображена на рис. 1. Вертикально расположенная ударная труба диаметром 35 мм состоит из секции инициирования 1, отделенной от рабочей секции 2 разрывной диафрагмой 3, двух оптических секций 4 и 5 с окнами из оргстекла 8×240 мм, генератора пузырьков 6. Заподлицо с внутренней поверхностью трубы устанавливали пьезодатчики 7—13 с собственной частотой около 300 кГц и диаметром пьезокерамики 2 мм.



Р и с. 1

Оптический ввод 14 фотоумножителя (ФЭУ-31) расположен напротив датчика 12 либо 11.

Секцию 2 заполняли жидкостью на высоту h , β_0 определяли по подъему столба жидкости на Δh до контрольного уровня $L_0 - h + \Delta h = 5,2$ м, так что $\beta_0 = \Delta h/L_0$. Опыты проводили в постановке с диафрагмой (серия А) и без ее наличия (серия В). Ударную волну в системе возбуждали сжиганием в секции 1 смеси $C_2H_2 + 2,5 O_2$ при начальном давлении $p_{0в}$. Интенсивность ударных волн варьировали изменением $p_{0в}$ ($p_{0в} \leq 0,4$ МПа). В опытах серии А начальное давление под диафрагмой p_0 обычно было равно атмосферному, в серии В — $p_0 = p_{0в}$.

В экспериментах регистрировали профили давления и скорость волн с помощью четырех пьезодатчиков, а свечение — фотоумножителем. Съёмку волнового процесса самосвечения вели барабанным фотосигнализатором. Сигналы датчиков давления и фотоумножителя записывали двумя осциллографами ОК-33, датчики подключали к входам осциллографов через истоковый повторитель, обеспечивающий величину постоянной времени больше, чем 1 с.

Исследованы системы жидкость — пузырьки взрывчатого газа:

- 1) $L_{\alpha\gamma} - (C_2H_2 + 2,5 O_2)$, $\gamma = 0; 0,15; 0,25; 0,5$;
- 2) $L_{\alpha\gamma} - (2H_2 + O_2)$, $\gamma = 0; 0,15; 0,5$;
- 3) $L_{\alpha\gamma} - (C_3H_8 + C_4H_{10} + nO_2)$, $n = 6; 12$; $\gamma = 0; 0,5; 0,75$, а также не реагирующие пузырьковые системы:

$L_{\alpha\gamma} - N_2$, $L_{\alpha\gamma} - (2H_2 + N_2)$, $L_{\alpha\gamma} - (C_3H_8 + C_4H_{10} + nN_2)$ при $n = 6; 12$, $\gamma = 0$, где $L_{\alpha\gamma} \rightarrow \alpha H_2O + \gamma (CH_2OH)_2 CHOH$ — жидкость; $\alpha + \gamma = 1$ (α и γ — объемные концентрации воды и глицерина). Опыты проведены с пузырьками размером $d = 2,5-4$ мм, зависящим от p_0 , при $0,5\% \leq \beta_0 \leq 10\%$ (в определении β_0 относительная ошибка $\Delta\beta_0/\beta_0 \leq \pm 10\%$).

Характерные осциллограммы, иллюстрирующие распространение в пузырьковых системах ударных волн V_2 и формирующихся при этом коротких уединенных волн с реакцией V_1 , приведены на рис. 2 (V_3 — отраженная от торца волна), где верхние лучи — давление, нижние — свечение (a, b) и давление (c) в волнах, период синусоиды 100 мкс. При интенсивности ударной волны, близкой к критической с давлением p_1^* , непосредственно во фронте ударной волны происходит воспламенение пузырьков (рис. 2, a , где $\beta_0 = 2\%$, $d \approx 3,5-4$ мм, $p_0 = 0,1$ МПа, $p_{0в} = 0,25$ МПа, опыт серии А, система 1, $\gamma = 0$). Величина p_1^* зависит от β_0 и физико-химических свойств пузырьковой среды и оказывается близкой к давлению сгорания в замкнутом объеме горючей смеси с начальным давлением $p_{0в}^*$. Например, для системы 1 ($\gamma = 0$) при $\beta_0 \approx 2\%$ $p_{0в}^* \approx 0,25$ МПа ($p_1^* \approx 2-3$ МПа), с увеличением β_0 до 6% $p_{0в}^* \approx 0,35$ МПа ($p_1^* \approx 4-5$ МПа).

Ударные волны с интенсивностью, меньшей критической, не вызывают свечения реагирующих сред. Свечение не наблюдалось также ($p_{0в} \leq 0,4$ МПа) во всех перечисленных выше не реагирующих пузырьковых системах и в системах $L_{\alpha\gamma} - O_2$ ($\gamma = 0,25$ и $0,75$). Эти факты свидетельствуют о том, что свечение пузырьков происходит не из-за повышения температуры при их сжатии ударной волной или реакции жидкости $L_{\alpha\gamma}$ с кислородом, а является результатом химической реакции взрывчатого газа. В условиях наших опытов жидкости $L_{\alpha\gamma}$ ($\gamma \leq 0,75$) можно считать не реагирующими, т. е. не оказывающими химического влияния на начальный этап воспламенения пузырьков.

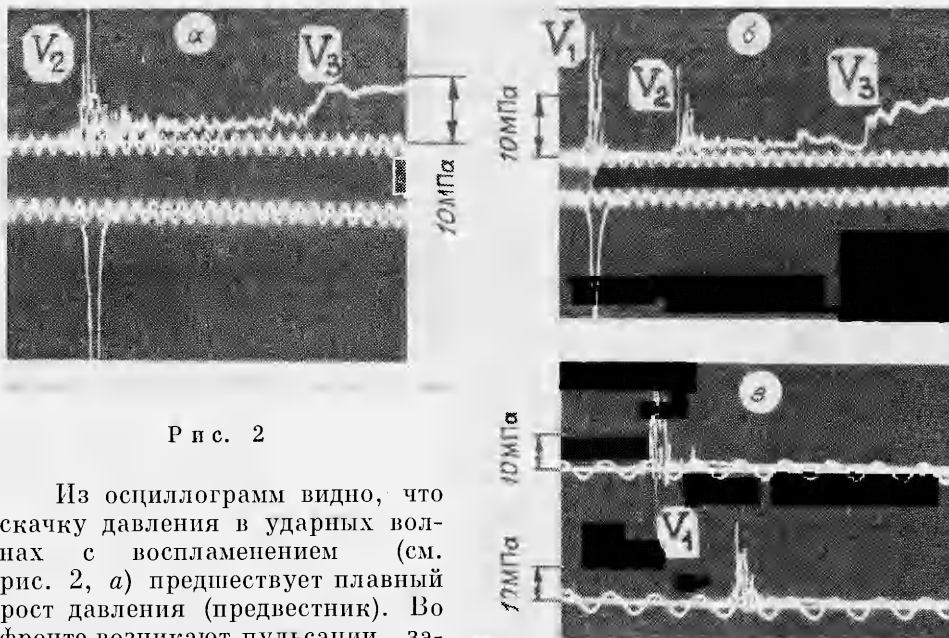


Рис. 2

Из осциллограмм видно, что скачку давления в ударных волнах с воспламенением (см. рис. 2, а) предшествует плавный рост давления (предвестник). Во фронте возникают пульсации, заканчивающиеся через 150—300 мкс, и давление выходит на почти постоянный уровень. Пульсации давления — следствие осцилляций пузырьков газа; если происходит воспламенение пузырьков, то возрастают амплитуды пульсаций.

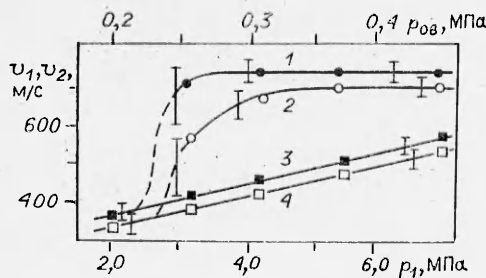
Более поздние этапы эволюции ударной волны, воспламеняющей пузырьки, показаны на рис. 2, б, в. При различных условиях для систем 1—3 в опытах серии А и В происходит формирование короткой уединенной волны V_1 длительностью 50—150 мкс. Размещение секций 4 и 5 с датчиками 7—13 в верхних участках трубы показывает, что отход волны V_1 от ударной волны V_2 происходит на расстоянии $L \approx 1—3,5$ м от контрольного уровня пузырьковой среды; с ростом $p_{0в}$ L уменьшается. Например, при $\beta_0 = 2\%$, $p_{0в} = 0,3$ МПа, $p_0 = 0,1$ МПа в системе 1 ($\gamma = 0$) $L \approx 3$ м, скорость волны перед моментом отделения ~ 400 м/с; после отделения волны V_1 происходит ее ускорение до скорости $v_1 \approx 700—800$ м/с, и она удаляется от движущейся за ней более медленно со скоростью $v_2 \approx 400—450$ м/с ударной волны V_2 .

Свечение пузырьков имеет место лишь в волне V_1 , в ударной волне V_2 свечение (химическая реакция) отсутствует. Характерные осциллограммы давления и свечения представлены на рис. 2, б, где процесс распространяется в системе 1 ($\gamma = 0$) при $\beta_0 = 2\%$, $d \approx 3,5—4$ мм, $p_0 = 0,1$ МПа и $p_{0в} = 0,35$ МПа ($v_1 \approx 750$ м/с, $v_2 \approx 500$ м/с). В нереагирующих системах в аналогичной постановке опытов такой двухволновой процесс отсутствует, т. е. возникновение уединенной волны V_1 обусловлено энерговыделением в реагирующей пузырьковой среде.

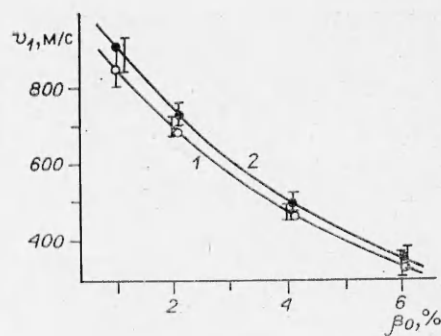
На рис. 2, в приведен пример, когда волна V_1 удаляется на значительное расстояние от ударной волны V_2 (здесь волна распространяется в системе 2 ($\gamma = 0,5$), $\beta_0 = 2\%$, $d \approx 2,5—3,0$ мм, опыт серии В, $p_0 = p_{0в} = 0,25$ МПа).

В волнах V_1 регистрируются пульсации давления, обусловленные процессами схлопывания и воспламенения пузырьков; пики давления на стенке трубы достигают 15—25 МПа. За волной V_1 давление падает и близко к p_0 . На фоторазвертках самосвечения видно воспламенение первоначальных пузырьков, продолжительность свечения каждого из них в волне V_1 2—3 мкс.

Результаты измерения скоростей v_1 (кривые 1, 2) и v_2 (кривые 3, 4) в зависимости от $p_{0в}$ (серия А, $p_0 = 0,1$ МПа) для системы 1 ($\gamma = 0$) при $\beta_0 = 2\%$ приведены на рис. 3. Кривые 2, 4 получены по измерениям в



Р и с. 3



Р и с. 4

секции 4, а 1, 3 — в секции 5. Видно, что v_1 достигает на фиксированном расстоянии практически постоянного значения и перестает зависеть от давления инициирования, т. е. скорости ударной волны. Следовательно, процесс распространения волны V_1 самоподдерживающийся. Небольшое отличие в величине скорости в секциях 4 и 5 объясняется естественной зависимостью скорости волн от β_0 . Уменьшение β_0 сверху вниз из-за влияния гидростатического давления приводит к росту скорости волны сжатия (для ударной волны $v_2 = (p/\beta_0\rho_0)^{0,5}$, где p — давление в волне, ρ_0 — плотность газожидкостной среды [10]). Волна V_1 распространяется по среде со сверхзвуковой скоростью — v_1 в несколько раз превышает скорость звука $c_0 = (p_0/\beta_0\rho_0)^{0,5}$.

Отметим, что в отличие от уединенных волн, возникающих в не реагирующих пузырьковых системах благодаря их дисперсионным и нелинейным свойствам (см., например, [11, 12]), уединенная волна V_1 формируется лишь при наличии в системе энерговыделения, является самоподдерживающейся и обладает более сложной внутренней структурой; распространение волны V_1 по пузырьковой среде приводит к необратимым ее изменениям.

В силу того что в волне V_1 происходит выделение химической энергии и ее установившаяся сверхзвуковая скорость не зависит от условий инициирования, такой процесс можно считать детонационным. В дальнейшем уединенную волну V_1 (как и в [5, 9]) будем называть детонационной волной.

Наблюдаемый в наших опытах двухволновой процесс (наличие кроме V_1 волны V_2) обусловлен использованием для инициирования пузырьковой детонации ударной волны. Такой характер осциллограмм имеется в серии опытов А и В, т. е. не вызван использованием диафрагмы. Естественно, что на больших длинах пробега будет регистрироваться лишь детонационная волна V_1 , поскольку с расстоянием давление в волне V_2 падает, и она затухает. Если увеличивать $p_{0в}$, то v_2 может оказаться равной или большей v_1 , возникнет пересжатая детонация — протяженная волна с профилем давления, близким к прямоугольному, и свечением во фронте. Однако такая детонационная волна несамоподдерживающаяся, и для ее существования необходимо поршневое воздействие среды за фронтом.

Зависимость скорости установившейся детонации от β_0 в системе 1 ($\gamma = 0$) при $p_0 = 0,4$ МПа (серия А) приведена на рис. 4, где кривые 1 и 2 — скорости v_1 в секциях 4, 5 соответственно. При $\beta_0 \geq 8\%$ и $p_0 = 0,4$ МПа пузырьковая среда не воспламеняется, если $p_{0в} \leq 0,4$ МПа, т. е. с ростом концентрации газовой фазы увеличиваются потери, и для инициирования детонации требуется усилить интенсивность падающей ударной волны. С уменьшением β_0 до 0,5% детонационная волна становится неустойчивой, процесс легко срывается и детонация затухает (волна V_1 расплывается).

Система	γ	Серия опытов	$p_{0в}^*$, МПа	v_1 , м/с
1	0	A, $p_0 = 0,1$ МПа	0,25	750
	0	B	—	—
	0,15	B	0,13	850
	0,25	B	0,1	940
	0,5	B	0,05	1050
2	0	A, $p_0 = 0,1$ МПа	0,4	500*
	0	B	—	—
	0,15	B	—	—
	0,5	B	0,23	940
3($n = 6$)	0	A, $p_0 = 0,1$ МПа	—	—
	0	B	—	—
	0,5	A, $p_0 = 0,1$ МПа	—	—
	0,5	B	—	—
	0,75	A, $p_0 = 0,04$ МПа	<0,3	940
	0,75	B	<0,37	1200
3($n=12$)	0	A, $p_0 = 0,1$ МПа	—	—
	0	B	—	—
	0,5	A, $p_0 = 0,1$ МПа	—	—
	0,5	B	—	—
	0,5	A, $p_0 = 0,075$ МПа	0,34	450 *
	0,75	B	<0,26	1050

* В секции 5 регистрируется воспламенение, но детонационная волна при данных условиях не сформировалась. В опытах серии В в системе 2 ударную волну возбуждали сжиганием в трубе смеси $2H_2 + O_2$, в системах 3 секцию 1 предварительно заполняли смесью $C_2H_2 + 2,5O_2$ до давления $p_{0в} \sim p_{0в}^*$.

Критические давления $p_{0в}^*$, когда в пузырьковых системах 1—3 при $\beta_0 = 2\%$ возбуждается детонация или ее не удается возбудить при $p_{0в} \leq 0,4$ МПа, и значения v_1 приведены в таблице, где видно, что лучшей способностью к воспламенению и возбуждению детонации обладают системы 1, газовая взрывчатая смесь в которых ($C_2H_2 + 2,5 O_2$) имеет наименьшие задержки воспламенения $\tau_в$. Во всех случаях для систем 1—3 увеличение вязкости жидкости при добавлении глицерина приводит к уменьшению $p_{0в}^*$, т. е. облегчает условия воспламенения пузырьковых систем. В пропано-кислородных газовых смесях ($\tau_в$ в них максимально) для воспламенения необходимо более длительное поддержание повышенных температур, которые достигаются на последних стадиях сжатия пузырька. Это условие обеспечивается увеличением вязкости жидкости (в системах 3 воспламенение и детонация возбуждаются лишь при $\gamma = 0,75$). Повышение концентрации глицерина приводит также к возрастанию скорости звука в жидкости, что объясняет наблюдаемое при этом увеличение v_1 (см. таблицу).

По мнению авторов, волна детонации в рассмотренных выше пузырьковых системах распространяется по механизму микровзрывов: пузырьки, сжимаясь в поле давления, взрываются и излучают в окружающую жидкость ударные волны, которые в свою очередь сжимают и воспламеняют пузырьки, находящиеся вверх по потоку. Подобный механизм рассмотрен в [2] для описания возбуждения низкоскоростной детонации в жидких ВВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боуден Ф. П., Иоффе А. Д. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах. М.: ИЛ, 1955.
2. Дубовик А. В., Боболев В. К. Чувствительность жидких взрывчатых систем к удару. М.: Наука, 1978.

3. Кедринский В. К. Ударные волны в жидкости с пузырьками газа.— ФГВ, 1980, т. 16, № 5.
4. Солоухин Р. И. О пузырьковом механизме ударного воспламенения в жидкости.— ДАН СССР, 1961, т. 136, № 2.
5. Сычев А. И., Пинаев А. В. Волна детонации в системах жидкость — пузырьки газа.— В кн.: I Всесоюз. симпоз. по макроскопической кинетике и химической газодинамике. Алма-Ата, 1984, т. 1, ч. 1, № 65.
6. Сычев А. И. Воспламенение систем жидкость — пузырьки газа ударной волной.— ФГВ, 1985, т. 21, № 2.
7. Hasegawa T., Fujiwara T. Detonation in oxihydrogen bubbled liquids.— In: 19th Symp. (In). Comb., Haifa, 1982, Pittsburgh.
8. Hasegawa T., Fujiwara T., Yasuhara M. Propagation velocity and mechanism of bubble detonation.— In: 9th Colloquium (Int.) on Dynamics of Explosions and Reactive Systems: Book of Abstracts, Poitiers, 1983.
9. Сычев А. И. Волна детонации в системе жидкость — пузырьки газа.— ФГВ, 1985, т. 21, № 3.
10. Бэтчелор Г. К. Волны сжатия в суспензии газовых пузырьков в жидкости.— Сб. пер. Механика, 1968, № 3.
11. Огородников И. А. Резонансное формирование удлинённых волн в среде со структурой. Препринт 90—83. Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1983.
12. Кутателадзе С. С., Накоряков В. Е. Теплообмен и волны в газожидкостных системах. Новосибирск: Наука, 1984.

Поступила 28/IX 1984 г.

УДК 550.344.43

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН В СЛАБО ДИСПЕРГИРУЮЩИХ СРЕДАХ

С. З. ДУНИН

(Москва)

Информация о характере процесса, происходящего на некотором расстоянии от приемника, переносится благодаря волнам, возбуждающимся в среде источником. При распространении волновой сигнал ослабляется и искажается. Анализ факторов, приводящих к заметной трансформации сигнала, — предмет исследований ряда работ [1—3].

Последовательный подход к решению проблемы — учет не только диссипативных, но и дисперсионных свойств среды. Действительно, при частичном поглощении волны средой последние получают импульс и приходят в движение, меняя локальную скорость сигнала, что эквивалентно дисперсии. В общем виде связь волновых параметров среды нелокальна: процессам разных временных и пространственных масштабов соответствуют свои временные и пространственные параметры, что определяет зависимость волнового числа k от частоты p , причем действительная и мнимая части волнового числа $k(p) = k'(p) + ik''(p)$ связаны фундаментальным соотношением, вытекающим из принципа причинности [4].

Для нахождения явного вида функциональной связи волновых параметров необходимо учитывать внутреннюю структуру среды, используя тот математический аппарат, который адекватно описывает масштабные явления, определяющие характер поведения среды в исследуемом диапазоне параметров.

Ряд важных положений о характере распространения возмущений в релаксирующей среде получен Мандельштамом и Леонтовичем [2, 3]: под воздействием возмущения волнового характера в среде нарушается термодинамическое равновесие и среда стремится вернуться к равновесному состоянию с измененными параметрами. При таком характере возмущения, которое протекает значительно быстрее, чем среда может подстроиться к новому состоянию, возмущение в среде распространяется со скоростью c_∞ ; при медленных по сравнению с релаксационным временем изменениях внешних параметров скорость распространения возмущений c_0 .

В работе учтено, что в геологических средах многочисленные данные [4] свидетельствуют о слабой дисперсии волн в широком диапазоне их длин. Это обстоятельство позволяет получить выражение для массовой скорости в волне возмущения в удобном для анализа виде.

Дается решение одномерного волнового уравнения в однородной изотропной среде, в которой связь между напряжением σ_{ij} и скоростью деформации v_{ij} определяется уравнениями наследственного типа

$$(1) \quad \sigma_{ij}(x, t) = \delta_{ij} \int_0^t K(t-t') v_{kk}(x, t') dt' + \\ + 2 \int_0^t dt' \mu(t-t') \left[v_{ij}(x, t') - \frac{\delta_{ij}}{3} v_{kk}(x, t') \right],$$