

Таблица 1

| Номер кривой | Амплитуда импульса | Длительность импульса | Минимальная пористость | Конечная пористость |
|--------------|--------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|
| 1 | 1 | ∞ | 1,491 | 1,491 |
| 2 | 1 | 1 | 1,262 | 1,262 |
| 3 | 2 | 0,5 | 1,023 | 1,023 |
| 4 | 2,33 | 0,429 | 1,002 | 1,002 |
| 5 | 3,33 | 0,3 | 1 0000002 | 1,042 |

Таблица 2

| Номер кривой | Амплитуда импульса | Длительность импульса | Минимальная пористость | Конечная пористость |
|--------------|--------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|
| 7 | 1 | ∞ | 1,239 | 1,239 |
| 2 | 1 | 1 | 1,291 | 1,291 |
| 3 | 2 | 0,5 | 1,048 | 1,048 |
| 4 | 2,33 | 0,429 | 1,028 | 1,028 |
| 5 | 2,67 | 0,375 | 1,017 | 1,018 |
| 6 | 3 | 0,33 | 1,010 | 1,028 |
| 7 | 10 | 0,1 | 1,001 | 1,181 |

Рассмотренная выше немонотонность конечной пористости при прохождении интенсивной волны нагрузки может привести к немонотонной зависимости пористости грунта вблизи источника ударной волны от расстояния до источника. Пористость вблизи и вдали от источника может быть больше, чем в промежуточной области, но количественные данные могут быть получены только при конкретном расчете такой задачи.

Поступила 4 I 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., «Наука», 1966.
2. Hermann W. Constitutive equation for the dynamic of ductile porous materials.— «J. Appl. Phys.», 1969, vol. 40, N 6.
3. Carroll M. M., Holt A. C. Static and dynamic pore-collapse relation for ductile porous materials.— «J. Appl. Phys.», 1972, vol. 43, N 4.
4. Carroll M. M., Holt A. C. Spherical model calculation for ductile porous material.— In: Proc. of the Internat. Symp. «Pore structure and properties of materials». Vol. 2. P. 2. Prague, Academia, 1973, p. D21—D31.

УДК 622.215.

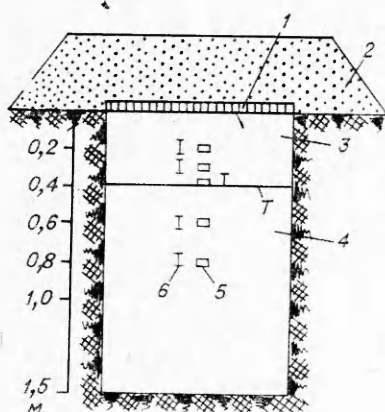
ВОЛНЫ В СЛОИСТЫХ ГРУНТАХ

Н. Я. Барлас, В. Г. Кравец, Г. М. Ляхов

(Киев, Москва)

На основе обобщения опытных данных по сжатию образцов грунта и измерению напряжений при распространении взрывных волн показано, что модель упругопластической среды недостаточно точно отражает свойства грунтов, кроме пластичности, необходимо учитывать объемную вязкость. В соответствии с этим предложена модель грунта как вязкопластической среды [1]. Одновременные измерения напряжений и деформаций при распространении волн в однородных грунтах подтвердили существенное влияние вязкости и пластичности на процесс деформирования грунтов [2—4].

1. В условиях естественного залегания грунты представляют собой сложную систему напластований, отличающихся физико-механическими



Ф и г. 1

кую границу между слоями и неизменность их влажности во времени. Схема опытов приведена на фиг. 1 (1 — заряд ВВ, 2 — грунтовая забойка, 3 — верхний, а 4 — нижний слой грунта, 5 — датчики напряжения, 6 — датчики деформаций). Граница слоев T во всех опытах на глубине 0,4 м. Исследовались случаи, когда верхний слой имел большую, а нижний малую влажность и наоборот. Большая влажность достигалась заливкой грунта водой с перемешиванием. Характеристики грунтов: малой влажности плотность скелета $\gamma = (1,48-1,56) 10^3 \text{ кг/м}^3$, влажность $w = 4-8\%$, большой влажности $\gamma = (1,48-1,56) 10^3 \text{ кг/м}^3$, $w = 18-22\%$. В дальнейшем грунт малой влажности называется сухим, большой влажности — влажным. Кроме того, проведены опыты при заполнении всего котлована грунтом одной влажности (однородный грунт).

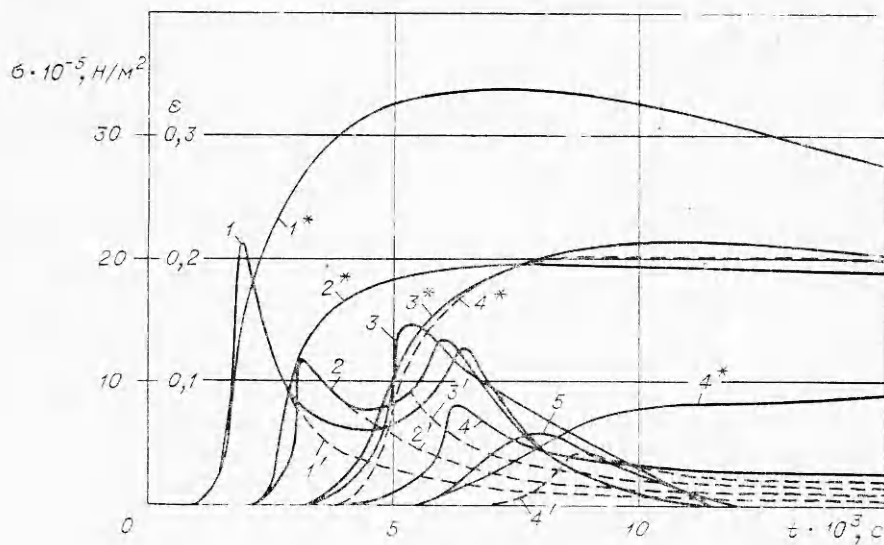
Заряд ВВ, перекрывавший все поперечное сечение котлована, состоял из параллельно уложенных и соединенных между собою по краям нитей детонирующего шнура. Применялись заряды массой на единицу площади S , равной 0,3 и 0,6 кг/м^2 . Забойка над зарядом состояла из сухого грунта толщиной 0,4 м.

Датчики для измерения напряжений и деформаций устанавливались в обоих слоях при заполнении котлована. Напряжение измерялось высокочастотными тензометрическими датчиками, деформации — датчиками, основанными на записи во времени взаимного смещения двух тонких алюминиевых дисков диаметром 5 см, расположенных на расстоянии 5 см друг от друга. Пространство между дисками заполняется грунтом, за исключением трубки диаметром 0,6 см, соединяющей диски. В ней находится тензометрическое устройство, позволяющее регистрировать во времени взаимное сближение или удаление дисков и определить отсюда объемную деформацию. Показания датчиков фиксировались на шлейфных осциллографах. Подобная методика применялась в однородных грунтах [2—4]. Для обеспечения одинаковых условий котлован после каждого взрыва очищался от грунта и заполнялся вновь. Повторность одинаковых опытов трехкратная. Стенки котлована вследствие большой плотности и малой сжимаемости суглинка не допускали смещения грунта в направлении, перпендикулярном распространению волны, что обеспечивало однородность процесса. Это подтверждается одинаковыми значениями параметров, записываемых на одной глубине у стенок котлована и в центре.

2. Рассмотрим переход волны из сухого во влажный грунт. На фиг. 2 представлены записи напряжения (компонента в направлении распространения волны) $\sigma(t)$, приведенные к одному масштабу. Кривые 1—5 отно-

свойствами. Эти свойства могут меняться непрерывно или скачком на границе слоев. Их различия обуславливаются значениями плотности скелета, гранулометрического состава, влажности и других характеристик грунта. Ниже исследуется случай слоев различной влажности с четко выраженными границами.

Опыты проводились в среднезернистых песчаных грунтах в котловане глубиной 1,5 м, шириной и длиной по 1 м, отрытом в плотном суглинке. Слой создавался по мере заполнения котлована и отделялись друг от друга и от стенок водонепроницаемой полиэтиленовой пленкой, что обеспечивало чет-



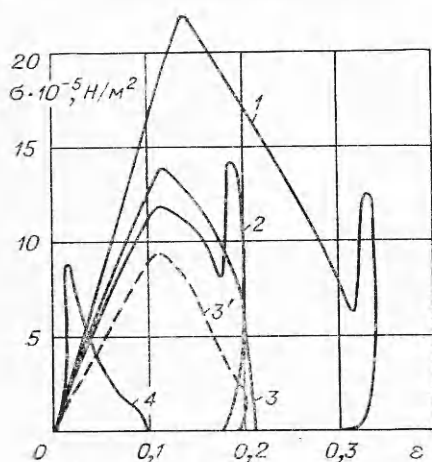
Фиг. 2

сятся к массе заряда $C = 0,3 \text{ кг/м}^2$ и к расстояниям r от плоскости взрыва, равным 0,2; 0,3; 0,4 (сухой грунт); 0,6 и 0,8 м (влажный грунт) соответственно. Кривые $1'—4'$ получены в однородном сухом грунте при том же значении C . Они относятся к расстояниям 0,2; 0,3; 0,4 и 0,6 м соответственно. Кривые 1 и 2 имеют по два максимума, относящихся к падающей и отраженной волнам. Кривые $1'$ и $2'$ совпадают с 1 и 2 до момента прихода отраженной от границы волны.

На фиг. 2 даны также записи деформации $\epsilon(t)$, приведенные к одному масштабу. Кривые $1^*—4^*$ относятся к расстояниям r , равным 0,2; 0,3; 0,4 и 0,6 м соответственно в слоистом грунте. Кривая $3'$ получена в однородном сухом грунте при $r = 0,4$ м.

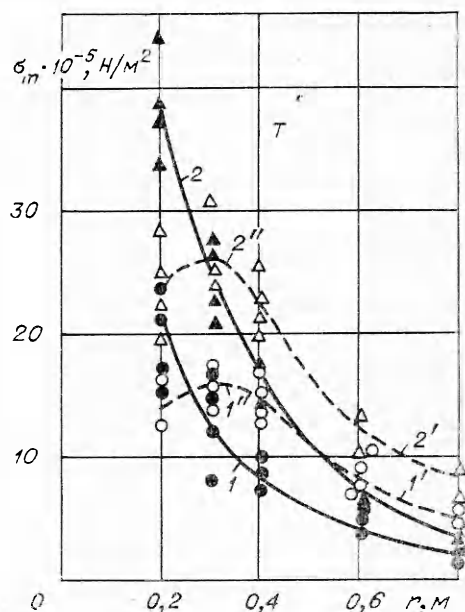
Экспериментальные значения деформации достигаются существенно позже, чем напряжения. В отличие от напряжения приход отраженной волны практически не меняет характера изменения деформации, обусловленного действием падающей волны, резкое возрастание деформации не наблюдается. На расстоянии $r = 0,4$ м максимальные напряжения в слоистом грунте примерно в 1,5 раза выше, чем в сухом однородном, а деформация лишь на 8%. На расстояниях 0,2 и 0,3 м максимальные деформации в слоистом и сухом однородном грунте практически одинаковы. Уменьшение со временем деформации на всех расстояниях продолжается $60—100 \cdot 10^{-3}$ с, т. е. в период, когда напряжение равно нулю. Остаточные деформации составляют 50—80% максимальных.

По графикам $\sigma(t)$ и $\epsilon(t)$ фиг. 2 построены на фиг. 3 зависимости $\sigma(\epsilon)$, реализуемые в слоистом грунте при прохождении падающей, отраженной и проходящей волн на расстояниях 0,2 и 0,3 м (кривые 1 и 2), на границе сред $r = 0,4$ м (кривая 3), во втором грунте при $r = 0,6$ м (кривая 4). Для сопоставления приведена кривая $3'$, относящаяся к $r = 0,4$ м и к сухому однородному грунту. Угол наклона кривой 4 к оси деформаций на участке нарастания напряжения существенно больше, чем у кривых 1 и 2 в слое сухого грунта. Вторичное нагружение и последующая разгрузка происходят по линии с большим наклоном к оси деформаций, чем линия первичного нагружения. Участок диаграммы $\sigma(\epsilon)$ при разуплотнении грунта ($\sigma = 0$) совпадает с осью $O\epsilon$ (на фиг. 3 не представлен).



Ф и г. 3

На фиг. 4 показаны зависимости максимального напряжения от расстояния $\sigma_m(r)$ при C , равных 0,3 и 0,6 кг/м², T — граница слоев. Кривые 1 и 2 относятся к волне в однородном сухом грунте (при $r \leq 0,3$ м они соответствуют также падающей волне в слое сухого грунта над влажным), 1' и 2' — к проходящей волне во влажном грунте, 1'' и 2'' — к отраженной волне в сухом грунте. Кривые 1, 1' и 1'' получены при $C = 0,3$ кг/м², а 2, 2' и 2'' при $C = 0,6$ кг/м². Отклонение отдельных экспериментальных точек от средних значений достигает 20—30%.



Ф и г. 4

Это связано, в частности, с невозможностью добиться при каждой переукладке и увлажнении совершенно одинаковых свойств грунта. Помимо разброса экстремальных значений, наблюдается разброс во времени их достижения. Разбросом объясняется прохождение кривой 3 выше, чем 2 (см. фиг. 2). Угасание волны (максимум напряжения), перешедшей во влажный грунт, происходит заметно медленнее, чем совершающей весь путь по сухому грунту. Среднее значение коэффициента отражения на границе 1,5 при $C = 0,3$ кг/м² и 1,4 при $C = 0,6$ кг/м². Максимальное напряжение на границе достигается на $(1-2)10^{-3}$ с позже, чем на том же расстоянии в однородном сухом грунте.

Значения скорости (м/с) распространения максимума напряжения падающей, отраженной и проходящей волн приведены в таблице. Строки относятся к грунтам: 1 — сухой однородный, $C = 0,3$ кг/м², 2 — сухой однородный, $C = 0,6$ кг/м², 3 — слоистый, $C = 0,3$ кг/м², 4 — слоистый, $C = 0,6$ кг/м², расстояния 0,4—0,2 м относятся к отраженной волне. При переходе из сухого во влажный грунт скорость возрастает. Скорость максимума отраженной волны в 4—5 раз больше, чем падающей. Значительное возрастание скорости максимума при отражении волны в лессовых и песчаных грунтах от бетонной стенки наблюдалось в работах [4, 5].

3. Рассмотрим переход волны из влажного в сухой грунт. На фиг. 5 кривые 1—5 относятся к напряжениям $\sigma(t)$, приведенным к одному масштабу, на расстояниях r , равных 0,2; 0,3; 0,4; 0,6 и 0,8 м соответственно, а кривые 2*—5* — к деформациям, также приведенным к одному масштабу при r , равных 0,3; 0,4; 0,6 и 0,8 м соответственно. Масса заряда $C = 0,3$ кг/м². На всех расстояниях наблюдается запаздывание максимума

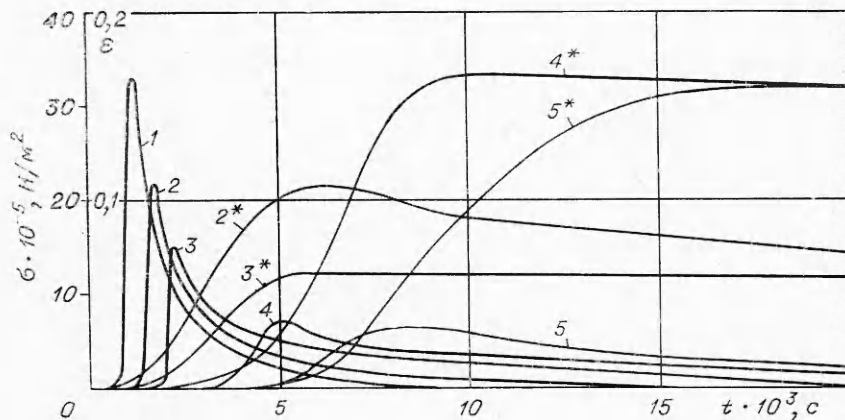
деформаций относительно максимума напряжений. При переходе волны в сухой грунт напряжение уменьшается, деформация возрастает, время нарастания напряжения и деформации увеличивается. В сухом грунте при отражении волны от границы с менее сжимаемым грунтом виден приход отраженной волны сжатия, вызывающий повторное возрастание напряжения (см. фиг. 2). Во влажном грунте приход волны разрежения от границы с сухим грунтом не приводит к резкому падению напряжения, как это имеет место в средах без вязкости (например, в воде). На характере изменения деформации влияние волны разрежения также заметно не сказывается.

На фиг. 6 приведены диаграммы $\sigma(\epsilon)$, построенные по записям $\sigma(t)$ и $\epsilon(t)$ при переходе волны из влажного в сухой грунт. Кривая 1' относится к расстоянию 0,2 м (влажный грунт), кривая 3' — к $r = 0,4$ м (граница) при расположении датчика в сухом грунте. Масса заряда в обоих случаях 0,6 кг/м². Кривые 2 и 3 относятся к расстояниям 0,3 и 0,4 м при $C = 0,3$ кг/м². Оба датчика расположены во влажном грунте. Кривые 4, 5 соответствуют слою сухого грунта, расстояниям 0,6 и 0,8 м при $C = 0,3$ кг/м².

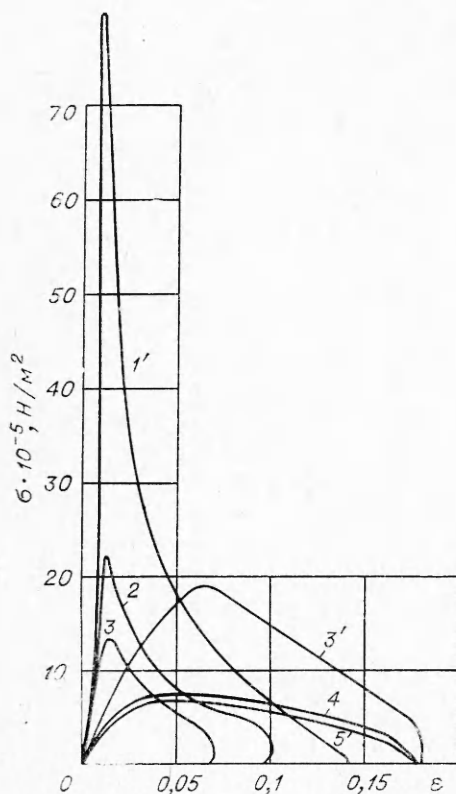
В отличие от сухого грунта (см. фиг. 3) диаграммы $\sigma(\epsilon)$ во влажном грунте при разгрузке по напряжению на некотором участке вогнуты к началу координат. Максимальные деформации существенно меньше, а угол наклона диаграмм к оси $O\epsilon$ при нарастании напряжения существенно больше, чем в сухом грунте.

В таблице строки 5, 6 соответствуют значениям скорости распространения максимума напряжения, когда верхний слой грунта влажный, а нижний — сухой. Строка 5 относится к $C = 0,3$ кг/м², а строка 6 к $C = 0,6$ кг/м². Значения скорости на расстоянии 0,4—0,6 м в однородном сухом грунте (строки 1, 2) и после перехода волны из влажного в сухой грунт практически одинаковы. На этих расстояниях устанавливается режим нагружения, близкий к предельному (равновесному), когда скорость максимума имеет минимальное значение.

| № п/п | 0,2—0,3 м | 0,3—0,4 м | 0,4—0,6 м | 0,6—0,8 м | 0,4—0,2 м |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 80 | 70 | 70 | 65 | — |
| 2 | 85 | 70 | 70 | 70 | — |
| 3 | 80 | 60 | 210 | 150 | 270 |
| 4 | 85 | 60 | 220 | 150 | 260 |
| 5 | 220 | 210 | 70 | 60 | — |
| 6 | 240 | 210 | 75 | 70 | — |



Фиг. 5



Фиг. 6

Результаты проведенных опытов показывают, что при возрастании влажности от 4—8 до 18—22% свойства грунта существенно меняются: интенсивность угасания с расстоянием максимального напряжения уменьшается, максимальные и остаточные деформации убывают, скорость распространения максимума напряжения растет, размывание волны и время запаздывания деформаций относительно напряжения уменьшаются.

В слоистом грунте, когда первый слой сухой, а второй влажный, наблюдаются закономерности, соответствующие переходу волны в менее сжимаемую среду: на границе напряжение и деформации возрастают, в обратном направлении движется отраженная волна сжатия, приводящая ко вторичному возрастанию напряжения. Вторичное возрастание деформации практически не наблюдается. Скорость распространения максимума напряжения существенно больше, чем в падающей волне.

В слоистом грунте, когда первый слой влажный, а второй сухой, закономерности соответствуют переходу волны в менее сжимаемую среду—в первой среде на границе напряжение и деформация убывают, во второй среде скорость распространения максимума напряжения, а также величина деформации и интенсивность размывания волны возрастают. Отраженная волна на удалении от границы не вызывает заметного изменения деформации в первой среде.

Уплотнение слоистых грунтов взрывом в первую очередь определяется действием падающей волны. Отраженная волна заметно влияет на деформацию только в области, где еще не закончилась первичная нагрузка по напряжению. На большем удалении от границы, где до прихода отраженной волны началась разгрузка, ее влияние незначительно. Это объясняется большим углом наклона диаграммы $\sigma(\epsilon)$ к оси $O\epsilon$ при вторичной нагрузке и разгрузке, чем при первичной нагрузке.

Поступила 15 XII 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Ляхов Г. М. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах. М., «Недра», 1974.
2. Григорян С. С., Ляхов Г. М., Паршуков П. А. Сферические взрывные волны в грунтах по измерениям напряжений и деформаций. — ПМТФ, 1977, № 1.

3. Вовк А. А., Кравец В. Г., Ляхов Г. М., Плаксий В. А., Салицкая В. И., Султанов К. С. Экспериментальное определение параметров взрывных волн и вязкопластических характеристик грунта. — ПМ, 1977, № 7.
4. Ляхов Г. М., Плаксий В. А., Султанов К. С. Исследование взаимодействия волны в грунте с преградой по записям напряжений и деформаций. — ПМТФ, 1976, № 3.
5. Нарожная З. В. Об экспериментальном определении скорости разгрузки в грунте при динамических процессах. — ФГВ, 1965, № 1.

УДК 534.222.2

СТРУКТУРА УДАРНЫХ ВОЛН В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ РЕЛАКСИРУЮЩИХ СРЕДАХ

В. Г. Григорьев, А. С. Немиров, В. К. Сироткин
(Москва)

В настоящее время ударные и взрывные нагрузки находят все более широкое применение в различных технических процессах. Важное значение при этом имеет адекватное описание как процесса распространения ударной волны, так и изменения среды в результате ударного воздействия.

Упругопластические волны с учетом поведения дислокаций на фронте ударной волны рассматривались ранее в ряде работ [1—3]. В работе [1] развивается модель для описания неупругого поведения железа и малоуглеродистых сталей в широком диапазоне изменения скоростей деформации. Численно решена задача о плоском соударении пластин. В работе [2] наряду с численным решением задачи о распространении упругопластической волны рассматривается стационарная волна. Показано, что фронт ударной волны имеет многоволновую структуру. Однако в качестве выражения для скорости дислокаций авторы [2] использовали только экспоненциальную зависимость от интенсивности касательных напряжений и не рассматривали важный случай степенной зависимости. В [3] на основе динамики дислокаций рассматривается теория установившегося волнового профиля, численно рассчитанные профили сравниваются с экспериментальными, полученными методами лазерной интерферометрии. Показано, что скорость дислокаций при ударно-волновом сжатии алюминия хорошо описывается степенной зависимостью. Кроме того, показано, что для алюминия плотность подвижных дислокаций линейно увеличивается с возрастанием величины пластического сдвига γ_p .

В данной работе рассматривается вопрос о структуре волн нагрузки в упругопластических средах, при этом используется дислокационная модель динамической пластичности [4—6]. В рамках этой модели удастся не только описать динамику пластического деформирования, но и рассмотреть те структурные изменения, которые происходят в материале под действием динамических нагрузок.

Аналогичная задача о структуре ударной волны с использованием феноменологического подхода к описанию релаксации касательных напряжений рассматривалась в работе [7], однако в ней детально не рассматривалась роль нелинейности процесса релаксации напряжений, а также не учитывались эффекты, связанные с изменением плотности дислокаций.

Рассмотрим ударную волну, ширина фронта Δ которой мала по сравнению с кривизной фронта и расстоянием, на котором происходит заметное затухание ударной волны. В этом случае структура волны будет определяться решением стационарной плоской задачи [8].

Переходя к сопровождающей системе координат, в которой фронт волны неподвижен, уравнения движения можно записать в виде [7]

$$(1) \quad \rho u = \rho_0 u_0, \quad \sigma_1 - \sigma_{10} = (\rho_0 u_0)^2 (1/\rho - 1/\rho_0),$$

где ρ — плотность; u — скорость; σ_1 — напряжение вдоль оси распространения; ρ_0 , u_0 , σ_{10} — соответствующие величины перед фронтом.