

7. Владимиров В. А., Тарасов В. Ф. Об упругости закрученных потоков.— ДАН СССР, 1980, т. 253, № 3.
8. Prandtl L. Einfluss stabilisierender Kräfte auf die Turbulenz.—In: Ludwig Prandtl Gesammelte Abhandlungen, Teil 2. Berlin: Springer-Verlag, 1961.
9. Bradshaw P. The analogy between streamline curvature and buoyancy in turbulent shear flow.— J. Fluid Mech., 1969, vol. 36, N 1.
10. Владимиров В. А., Луговцов Б. А., Тарасов В. Ф. Подавление турбулентности в течениях с концентрированными вихрями.— ПМТФ, 1980, № 5.
11. Zeldovich Y. B. On the fraction of fluids between rotating cylinders.— Proc. Roy. Soc. Lond., 1981, A., vol. 374, p. 299.
12. Новожилков В. В. О расчете турбулентного течения между двумя соосными вращающимися цилиндрами.— ДАН СССР, 1981, т. 258, № 6.
13. Гледзер Е. Б., Должанский Ф. В. и др. Экспериментальное и теоретическое исследование устойчивости движения жидкости внутри эллиптического цилиндра.— Изв. АН СССР. ФАО, 1975, т. 11, № 10.
14. Гледзер Е. Б., Обухов А. М., Пономарев В. М. Об устойчивости движения жидкости в сосудах эллиптического сечения.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1977, № 1.
15. Tsai Chon-Yin, Widnall S. E. The stability of short waves on a straight vortex filament in a weak externally imposed strain field.— J. Fluid Mech., 1976, vol. 73, N 4.
16. Widnall S. E., Tsai Chon-Yin. The instability of the thin vortex ring of constant vorticity.— Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., 1977, vol. 287, N 1344.
17. Филлипс О. М. Динамика верхнего слоя океана. М.: Мир, 1980.
18. Hasselman K. A criterion for nonlinear wave stability.— J. Fluid Mech., 1967, vol. 30, N 4.
19. Соболев С. Л. Об одной новой задаче математической физики.— Изв. АН СССР. Сер. матем., 1954, т. 18, № 1.

УДК 532.5.031

ПОДВОДНЫЙ ВЗРЫВ КОЛЬЦЕВОГО ЗАРЯДА ВБЛИЗИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

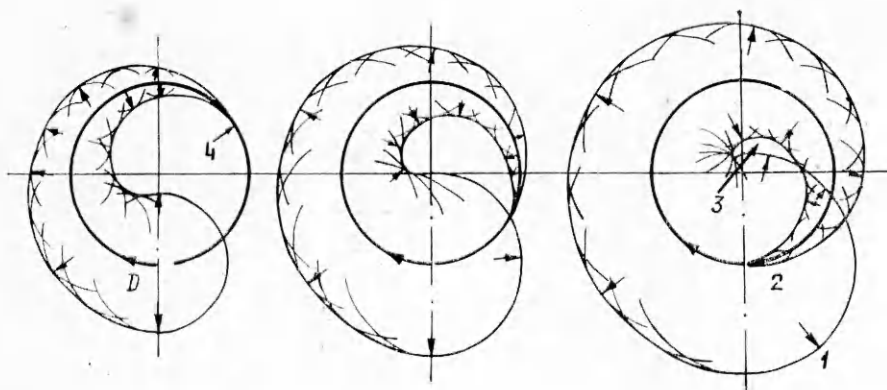
В. К. Кедринский, В. Т. Кузавов

(Новосибирск)

Изучению эффектов, сопровождающих подводные взрывы сосредоточенных зарядов вблизи свободной поверхности, посвящен ряд работ, в которых исследованы процесс образования направленных выбросов — султанов [1—4], развитие кавитации и структура волнового поля [5, 6]. В [4] показано, что в зависимости от глубины взрыва имеют место различные типы султанов: полный цилиндрический вертикальный выброс — стенки открытой каверны, образовавшейся при разгерметизации взрывной полости (последующее замыкание ее приводит к развитию осевого струйного течения), несколько сплошных вертикальных и радиальных султанов. В результате анализа процесса формирования одного из видов вертикальных выбросов при подводных взрывах крупных зарядов весом около 100 кг и более на глубинах в несколько десятков метров в [4] высказано предположение, что механика их развития связана с особенностями течения, возникающего при пульсации тороидальной полости с продуктами детонации.

Тор образуется при всплывании в тяжелой жидкости и деформации первоначально сферической взрывной полости с максимальным радиусом порядка 10 м. Последовательность такой трансформации определяется развитием вертикально вверх кумулятивного течения в нижней части схлопывающейся полости в процессе ее первой пульсации и нарушением односвязности области при замыкании вершины кумулятивной струи на верхнюю часть полости.

Процесс формирования вертикальных султанов указанного типа был экспериментально промоделирован на взрывах кольцевых зарядов (в основном из детонационного шнура (ДШ)) для широкого диапазона значений их радиусов a_0 (от нескольких сантиметров до нескольких метров), энергий и глубин взрыва. Естественно, при этом возникают дополнительные эффекты, связанные с излучением ударной волны, которая имеет форму, близкую к тороидальной, распространяется во внешнюю относительно кольца область и фокусируется в зоне его оси. Так как скорость детонационной волны D во взрывчатом веществе ДШ примерно в 5 раз превосходит скорость фронта I слабой ударной волны в воде, последняя сходится в области Z , несколько смещенной относительно оси кольца Z ; форма этой



Ф и г. 1

области имеет сложный пространственный характер (фиг. 1). На фиг. 1 представлено три последовательных положения фронта волны во внешней области кольцевого заряда вплоть до момента завершения фронтом детонации полного оборота по кольцу.

Взаимодействие ударной волны со свободной поверхностью и с расширяющейся полостью с продуктами детонации приводит к интенсивному развитию пузырьковой кавитации. На фиг. 2 показаны кадры скоростной кинограммы процесса при взрыве полукольца 1 из ДШ (радиус заряда ВВ $a_* = 0,0325$ см) диаметром 18 см на глубине 9 см от свободной поверхности 2. Плоскость полукольца располагалась параллельно поверхности жидкости, концы заряда — на прозрачной вертикальной стенке. Такая постановка, в частности, дает возможность наблюдать за развитием течения в центральной области кольца. Кадры кинограммы приведены с интервалом в 0,5 мс. Они позволяют отметить две особенности процесса: цилиндрический след 3 в зоне кавитации (область оси симметрии) и тонкий вертикальный выброс 4 на поверхности в центре купола. Начало формирования последнего практически совпадает с возникновением интенсивной кавитации, фронт которой распространяется вниз от поверхности, и, следовательно, связано с результатом взаимодействия ударной волны со свободной поверхностью, т. е. с развитием купола. Как показано в [4], купол состоит из откольных кавитирующих слоев жидкости. Очевидно, структура откола (с образованием выброса «фонтанного» характера 4) в экспериментах с кольцевыми зарядами определяется формой фронта волны и его фокусировкой.

Для проверки этого эффекта был поставлен эксперимент, позволивший исключить из процесса динамику полости с продуктами детонации. Детонационный шнур с радиусом ВВ $a_* = 0,0825$ см помещался внутри заглушенного контейнера — кольца из металлической трубки, заполненной водой. Плоскость кольца располагалась в жидкости на соответствующей глубине под свободной поверхностью. Параметры трубки подбирались таким образом, чтобы герметичность контейнера и его размеры в процессе эксперимента сохранялись.

В результате взрыва трубка оказывалась источником квазиторoidalной акустической волны, взаимодействие которой со свободной поверхностью качественно полностью повторяло картину формирования интенсивной зоны кавитации и «фонтанного» выброса, представленную на фиг. 2. Однако отмеченный выше цилиндрический след в экспериментах с контейнером не развивался. Эта особенность процесса, с нашей точки зрения, является подтверждением струйного характера течения, развивающегося в области оси симметрии кольцевого заряда при расширении тороидальной полости с продуктами детонации.

Ясно, что в этой стадии подводного взрыва динамика полости приведет к кумуляции потока жидкости в зоне оси кольца. Конечность ско-

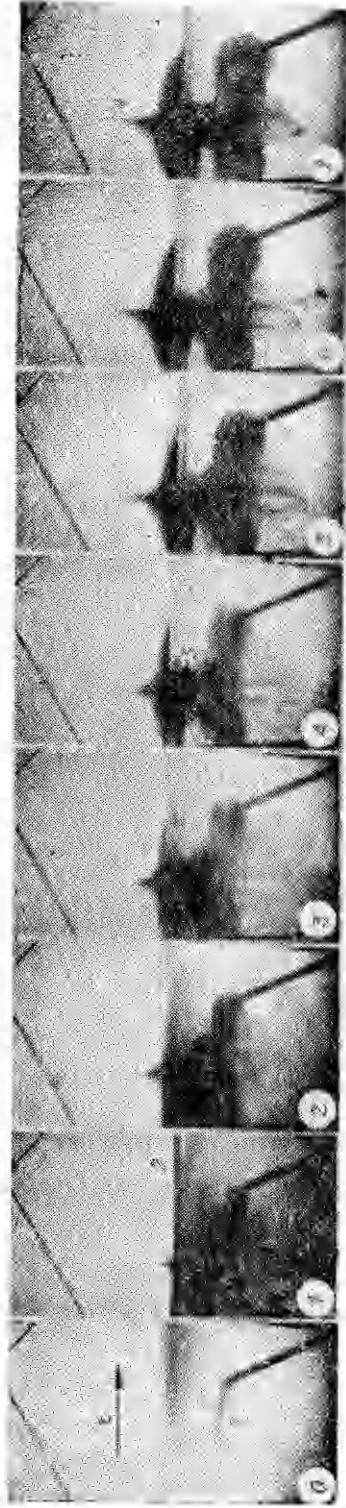
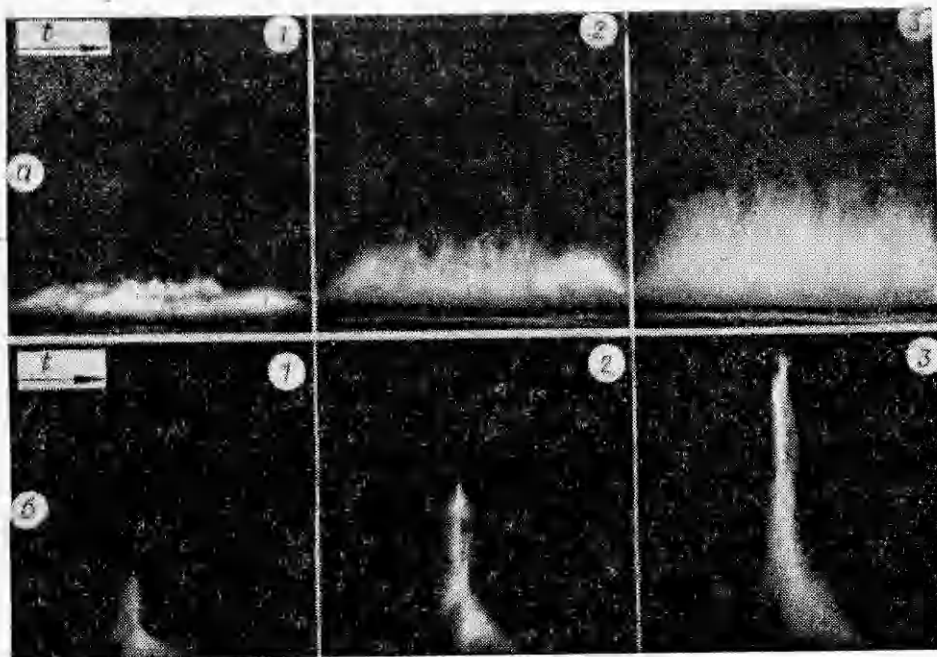


FIG. 2



FIG. 3

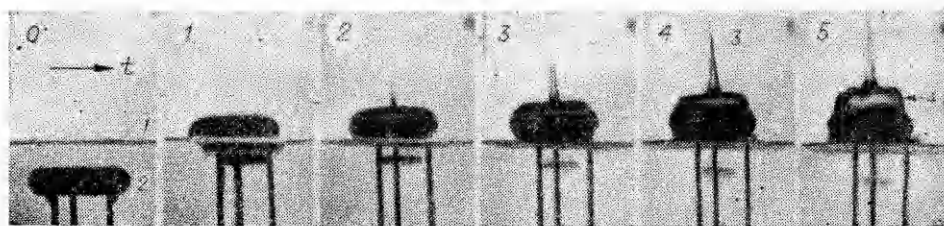


Ф и г. 4

рости детонации ВВ здесь, очевидно, заметной роли не играет: в [7] показано, что продукты взрыва в этом случае образуют кольцевую полость, которая имеет форму правильного тора и сохраняет ее на протяжении, по крайней мере, первой пульсации (интервал времени расширения — схлопывание), если радиус кольца $a_0 \gtrsim 150 a_*$. Можно ожидать, что в безграничной жидкости струйное течение в области оси должно быть симметричным относительно плоскости заряда. Но в условиях обсуждаемых экспериментов течение в зоне между зарядом и свободной поверхностью значительно искажается из-за существенного нарушения сплошности жидкости: под куполом различается плотная темная область 5, соединенная кавитационной зоной с центральной областью кольца (см. фиг. 2).

С целью анализа структуры течения в области оси кольца в постановке, аналогичной вышеизложенной, были проведены эксперименты на взрывающихся проволочках. Этот метод позволяет сосредоточить энергию батареи в основном в продуктах взрыва, ослабить ударную волну и, таким образом, разрешить влияние динамики тороидальной полости на характер течения.

На фиг. 3 представлена последовательность развития течения на свободной поверхности 2 и динамика полости 1 при подводном взрыве полукольца никромовой проволочки диаметром 5 см на глубине 4 см. Время между кадрами, начиная с первого, $4/3$ мс. Видно, что для условий этого эксперимента энергия взрыва на единицу длины проводника довольно велика: форма полости отличается от правильной тороидальной, ее максимальный размер порядка глубины взрыва, и поэтому полость сильно деформирована в центре. Интенсивное расширение полости с продуктами взрыва приводит к развитию на свободной поверхности вертикального султана. Кинограмма, фиксирующая процесс в разрезе, позволяет рассмотреть его основу. Это — полая кольцевая струя 3, природа которой, однако, определяется не разгерметизацией взрывной полости, как в случае взрыва сосредоточенного заряда на глубине в несколько его радиусов, а исходной формой заряда. Геометрия течения, представленного на кадрах 5—7, напоминает случай с полостью от взрыва сферического или цилиндрического заряда, схлопывание которой вблизи свободной поверх-



Ф и г. 5

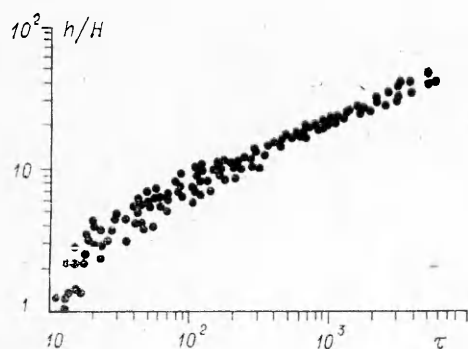
ности сопровождается развитием кумулятивного струйного течения, направленного в глубь жидкости.

Эксперименты, проведенные в естественном бассейне в натуральных условиях на кольцевых зарядах диаметром до 2 м из стандартных ДШ, подтвердили, что при малых относительно диаметра глубинах погружения взрыв кольцевого заряда, плоскость которого параллельна свободной поверхности, приводит к развитию кольцевого султана (фиг 4, а). Механика его формирования и структура выброса полностью соответствуют султанам от взрыва сферических или линейных зарядов [4]. На фиг. 4, а приведены три последовательных момента из скоростной кинограммы развития кольцевого выброса при взрыве заряда из ДШ диаметром 2 м на глубине 30 см. Следует заметить, что максимальный радиус полости с продуктами детонации для линейного заряда из того же ДШ (начальный радиус 0,15 см) составляет примерно 20 см. По мере уменьшения размера кольца и при сохранении глубины взрыва характер поверхностного выброса меняется: фиг. 4, б демонстрирует развитие центрального султана в эксперименте с кольцевым зарядом диаметром 0,4 м.

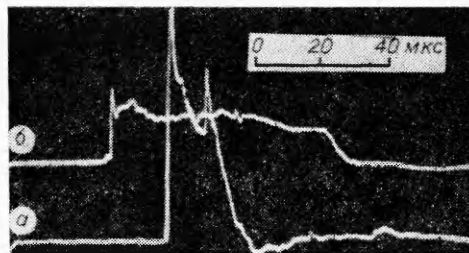
Естественно, данных такой постановки недостаточно, чтобы утверждать, что внутренняя структура этого султана (фиг. 4, б) аналогична данным фиг. 3 или что это сплошная струя. Поэтому возможность развития сплошной вертикальной струи наряду с кольцевым султаном была исследована на модельных экспериментах по формированию струйных течений на свободной поверхности при импульсном движении твердого тела, предварительно погруженного в жидкость. Как известно [4], эта модель была создана для описания струйного характера течения при взрыве сферических и цилиндрических зарядов вблизи первоначально плоской свободной поверхности. При этом было показано, что если, например, твердая сфера, помещенная в жидкость вблизи свободной поверхности, получает импульс вертикально вверх, то тем самым в жидкости моделируются поле скоростей и основной характер течения со свободной поверхностью, как при пульсации взрывной полости.

Естественно, смоделировать таким же образом осесимметричное течение жидкости, ограниченной свободной поверхностью и кольцевой пульсирующей полостью, значительно труднее. Однако оказалось, что если твердому тору придать размеры порядка максимальных размеров полости с продуктами детонации, то ожидаемый эффект может быть получен. На фиг. 5 представлены кадры скоростной киносъемки развития кольцевой 4 и центральной 3 струй при движении твердого тора 2, получившего импульс в сторону свободной поверхности 1. Импульс сообщается в результате взрыва вспомогательного заряда под специальным устройством, жестко связанным с тором и расположенным на глубине в несколько его диаметров. Интервал времени между кадрами 0 и 1—4 мс, между остальными — по $4/3$ мс.

Видно, что кольцевая струя формируется из слоя жидкости, сохранившегося на торе, который останавливается над поверхностью жидкости в результате естественного торможения. Очевидно, что этот слой на неподвижном торе обладает определенным импульсом. В силу инерциальных свойств он стремится оторваться от поверхности, что приводит к появлению растягивающих напряжений, наиболее интенсивных в зоне мак-



Фиг. 6



Фиг. 7

симальных массовых скоростей. Ясно, что жидкости в этих условиях «легче» изменить направление массовых скоростей в сторону возникшей зоны разрежения и стягиваться в кольцо с периферии вдоль радиального направления по поверхности тора, чем оторваться от этой поверхности по всей большой площади контакта. Процесс формирования кольцевой струи, которая вдоль вертикального направления будет иметь определенный градиент скоростей, продолжается до тех пор, пока поверхность контакта жидкость — твердое тело не превратится в тонкое кольцо. И если струя обладает достаточным импульсом, она может оторваться от тора. Этот эффект и разрушение струи на части из-за градиента скоростей наблюдались в случае метания из жидкости твердой сферы в экспериментах по моделированию султанов при взрывах сферических зарядов.

Как видно из фиг. 5, исследуемый процесс формирования центральной струи в определенной степени моделируется движением твердого тора вертикально вверх, при котором жидкости в центральной части тора сообщаются радиальные массовые скорости; выше отмечалось, что во взрывном эксперименте это течение развивается в результате обжатия жидкости расширяющимися продуктами детонации.

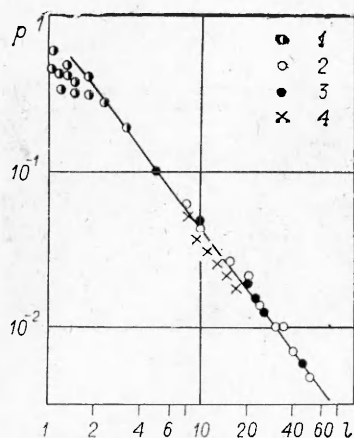
На фиг. 6 приведены результаты экспериментальных исследований зависимости $h(\tau)$ — высоты подъема центральной струи — при подводном взрыве кольцевых зарядов диаметром 40—80 см на глубинах H от 20 до 80 см относительно свободной поверхности. Радиус заряда ВВ 0,15 см. Здесь $\tau = (EQ\rho_*^{-1}H^{-5})^{1/2}t$ — безразмерное время, E — энергия взрыва на единицу массы ВВ, Q — масса ВВ, ρ_* — его плотность, t — время. Несмотря на заметный разброс экспериментальных данных в начальной стадии подъема султана, который может быть связан с наложением «фонтанного» выброса откольного купола, можно сделать вывод о подобии в целом процессов развития центральных струйных течений для различных линейных параметров заряда и глубин взрыва. В основном интервале времени зависимость $h(\tau)$ носит степенной характер и определяется выражением

$$h/H \approx \tau^{1/2}$$

или

$$h \approx (EQ\rho_*^{-1}H^{-1})^{1/4}t^{1/2}.$$

Для ряда задач гидроакустики представляют интерес данные по параметрам ближнего волнового поля для зарядов кольцевого типа. Частично эти материалы приведены в [7], где отмечается существенная зависимость формы волны и амплитуды давления во фронте от положения датчика относительно точки инициирования детонации. На фиг. 7 представлены две осциллограммы, записанные в центре кольца (а) и в точке фокусировки (б). Осциллограмма в точке фокусировки (см. фиг. 1, центр области Z — определяется по данным оптической регистрации) имеет вид «полочки» и указывает на определенную «стационарность» процесса в данном интервале времен; в центре кольца датчик записывает двойную волну: пер-



Ф и г. 8

вый фронт принадлежит сходящейся ударной волне, второй — волне давления, отраженной после фокусировки в зоне Z (см. фиг. 1). Эта волна достигает центра быстрее, чем фронт волны 2, которая генерируется в жидкости детонационной волной, бегущей по заключительному участку кольцевого заряда.

На фиг. 8 приведено распределение экспериментальных данных по давлению во фронте сходящихся ударных волн на оси кольцевых зарядов с радиусами $a_0 = 10$ см (радиусы ДШ $a_* = 0,0825$ см и $0,15$ см — точки 1, 2), 20 см и 30 см (точки 3, 4) при $a_* = 0,15$ см. Оказалось, что в диапазоне значений относительного расстояния $l = [(z/a_0)^2 + 1]^{1/2}$ от 5 до 50 эти данные удовлетворяют зависимости

$$p_{\max} = Al^{-0,65},$$

где z — расстояние вдоль оси от плоскости заряда, в см, а коэффициент

$$A \approx \frac{2}{5} a_* \left(\frac{a_*}{a_0} \right)^{1,4} 10^7$$

зависит от параметров заряда и приведен к атмосферному давлению. Заметный разброс экспериментальных данных по давлению в области центра кольца связан с неоднородностью медной облицовки специальных тонких ДШ, которые применялись для исследований в лабораторных условиях.

Поступила 27 VII 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Коул Р. Подводные взрывы. М.: ИЛ, 1950.
2. Kolsky H., Lewis J. P. et al. Splashes from underwater explosion. — Proceedings of the Royal Society, ser. A, 1949, vol. 196, N 1046.
3. Заопегин В. Л., Козаченко Л. С., Костюченко В. Л. Экспериментальное исследование развития газового пузыря и султана при подводном взрыве. — ПМТФ, 1960, № 2.
4. Кедринский В. К. Поверхностные эффекты при подводном взрыве (обзор). — ПМТФ, 1978, № 4.
5. Dubesset M., Laverge M. Calcul de la cavitation due aux explosions sous-marines a faible profondeur. — Acustica, 1968, vol. 20, N 5.
6. Христофоров Б. Д. Взаимодействие ударной волны в воде со свободной поверхностью. — ПМТФ, 1961, № 1.
7. Кедринский В. К. Особенности структуры ударных волн при подводных взрывах спиральных зарядов. — ПМТФ, 1980, № 5.

УДК 539.4

ЗАТУХАНИЕ СИЛЬНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН В СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ

В. Ф. Нестеренко, В. М. Фомин, П. А. Ческидов

(Новосибирск)

Исследование процессов распространения сильных ударных волн в слоистых средах имеет два аспекта. К первому следует отнести явление ослабления или усиления давления, массовой скорости на фронте волны в зависимости от набора слоистой системы. В работе [1] было предсказано, что для систем чередующихся плоских слоев из легкого и тяжелого материалов при увеличении толщин слоев можно получить явление неограниченной кумуляции. В дальнейшем это явление изучалось численно и экспериментально в [1—4]. В [5—6] в линейном приближении получены формулы, позволяющие определять давление и массовую скорость за фронтом головной ударной волны при ее движении по слоистому материалу. Здесь впервые показано, что увеличение или уменьшение давления и массовой скорости однозначно связано с изменением акустических импедансов слоев. В дальнейшем этот факт был подтвержден и для нелинейного взаимодействия только для сред, состоящих из двух и трех различных слоев [5—8]. Однако в [9] отмечено, что возрастание амплитуды давления голов-