



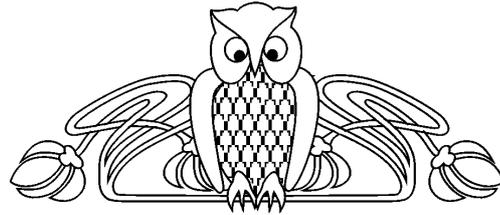
УДК 533.6.0116:532.529

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РЕФРАКЦИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ОБРАЗОВАНИЕМ ВОЛНЫ РАЗРЕЖЕНИЯ ИЛИ ОТРАЖЕННОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Г.П. Шиндяпин, А.А. Матутин

Саратовский государственный университет,
кафедра вычислительного эксперимента в механике
E-mail: matutinaa@mail.ru

Рассматриваются режимы рефракции ударной волны, при взаимодействии плоской ударной волны со свободной поверхностью, разделяющей газовую и газожидкостную (пузырьковую) среды. Анализ течений с помощью асимптотической теории коротких волн, использующих локально равновесную термодинамическую модель газожидкостной среды, приводит к установлению областей существования режимов рефракции: нерегулярного, регулярного с волной разрежения; регулярного, образованием ударной волны, замыкающей зону разрежения; регулярного с отраженной ударной волной. Для параметра, характеризующего эффективность рефракции, построены поверхности в пространстве параметров подобия ($\alpha^V, c_\gamma, \bar{L}$), характеризующие границы областей существования режимов рефракции с волной разрежения и область существования для рефракции с отраженной ударной волной.



The Analysis of Conditions of a Refraction of a Shock Wave with Education of a Wave of Underpressure or the Reflected Shock Wave

G.P. Shindyapin, A.A. Matutin

Conditions of a refraction of a shock wave are considered, at interaction of a flat shock wave with a free surface dividing gas and Gas-liquid (bubble) medium. The analysis of fluxions with the help of the asymptotic theory of the short waves using locally fixed-ratio thermodynamic model газожидкостной of a medium, reduces in an establishment of fields of existence of conditions of a refraction: non-regular, the regular with a suction wave; the regular, education of the shock wave closing a zone of underpressure; the regular with the reflected shock wave. For the parameter describing efficiency of a refraction, surfaces in space of parameters of a similarity ($\alpha^V, c_\gamma, \bar{L}$), describing boundaries of fields of existence of conditions of a refraction with a suction wave and field of existence for a refraction with the reflected shock wave built.

Интерес к задачам рефракции ударных волн обусловлен широким классом задач возникающих в приложениях, к которым относятся взаимодействия ударных волн с поверхностью океана, гидроудар, подводные взрывы, возникновение цунами и др; а также сложностью и противоречивостью исследуемых явлений [1]–[5].

В задачах рефракции ударных волн (УВ) на свободной поверхности, разделяющей газовую и газожидкостные среды (ГЖС), при падении УВ со стороны ГЖС обычно лишь малая часть энергии передается в область газа, что соответствует относительно малой интенсивности преломленной волны ($q^+ = \varepsilon_{20}/\varepsilon_{10}(\varepsilon_{ji} = (p_j - p_i)/p_i)$), по сравнению с интенсивностью падающей УВ ε_{10} . Найдена область существования нелинейной рефракции УВ с волной разрежения или отраженной УВ, когда интенсивность преломленной волны сравнима с интенсивностью падающей УВ ($q^+ \cong O(1)$) и значительная часть энергии передается из газожидкостной среды в газовую.

Установлено, что отмеченный феномен возникает при различных режимах рефракции, соответствующих перестройке потока от течения с волной разрежения: (NR-нерегулярной (рис. 1, a), RR-регулярной (рис. 1, b), RRV-регулярной рефракции с УВ, замыкающей зону разрежения, в том числе, RV-регулярной рефракции с вырождением волны разрежения $q^+ = 1$ (рис. 1, c) к течению с отраженной ударной волной (рис. 1, d). Перестройка зависит от свойств газовой и газожидкостной сред (случай fast-slow ($c_\gamma \geq 0$) или случай slow-fast ($c_\gamma < 0$)) выражающихся в величине скоростей звука в покоящихся средах.

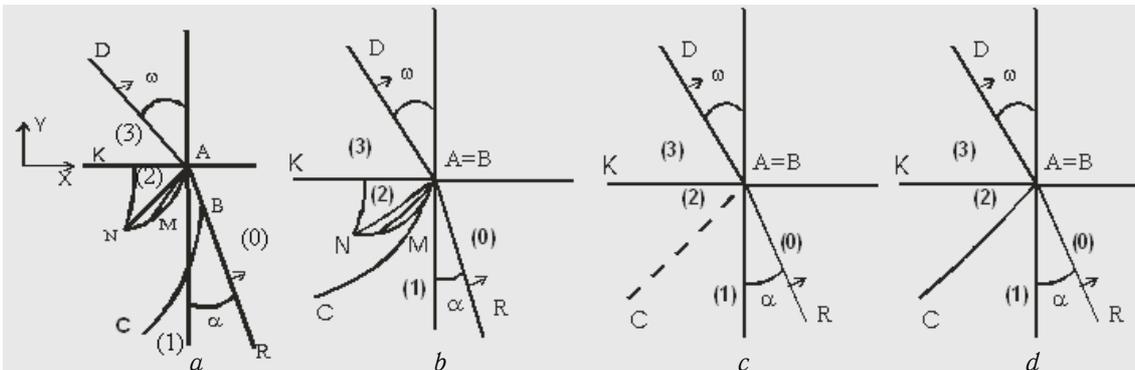


Рис. 1



При падении ударной волны AR(BR) относительной интенсивности $\Delta p/\rho_0 c_0^2$, под углом α к вертикали на свободную поверхность КА, разделяющую газ и ГЖС, с газосодержаниями γ^+, γ^- возникают различные режимы рефракции, характеризующиеся фронтом преломленной волны AD и разрежением AMN или отраженной УВ AC. Параметр q^+ характеризующий интенсивность преломленной волны одновременно характеризует интенсивность волны разрежения или отраженной УВ ($\varepsilon_{20} = \varepsilon_{30}$). Исследования проводятся с использованием локально равновесной термодинамической модели ГЖС [1] для описания непрерывных и разрывных процессов, связанных с распространением и взаимодействием УВ относительно малой и умеренной интенсивности $\Delta p/\rho_0 c_0^2$ в газожидкостных пузырьковых средах, характеризующихся массовым $\gamma = m_{II}/m_I$ и объемным $\varphi = V_{II}/(V_I + V_{II})$ газосодержаниями (индекс I — соответствует жидкости, II — газу). Уравнение термодинамического и калорического состояния смеси, в которой жидкая и газообразная фазы сжимаемы и описываются уравнениями состояния: $\rho_1 = f(p)$, $p = R\rho_{II}T$ (т.е. жидкость — баротропная, газ — термически и калорически совершенный) имеют вид [1]:

$$p \left[\frac{a}{\rho} - \frac{b}{f(p)} \right] = c_V T, \quad c_V = \frac{c_{VI} + c_{VII}\gamma}{1 + \gamma}, \quad U = c_V T, \quad a = (1 + \gamma)b, \quad b = \frac{c_V}{\gamma R}. \quad (1)$$

Одними из основных термодинамических параметров, характеризующих свойства сжимаемой смеси, является адиабатическая скорость звука c ($c^2 = (dP/d\rho)_S$), скорость D распространения УВ и энтропия S ($R_0(\gamma)$ — характеризует влияние газосодержания среды)

$$c^2 = \frac{a + 1}{a - b\rho \frac{d}{dp} \frac{p}{f(p)}} \frac{p}{\rho}, \quad (D_0/c_0)^2 = 1 + \bar{\varepsilon}_{10}, \quad (2)$$

$$\bar{\varepsilon}_{10} = R_0(\gamma)P_{10} = L_0(\gamma)\varepsilon_{10}, \quad S - S_0 = c_V \frac{a + 1}{a} \ln \frac{T}{p^{1/(a+1)}}.$$

Анализ задач рефракции УВ при относительно малой интенсивности падающей УВ ($P_{10} = \Delta p/\rho_0 c_0^2$) характерных для ГЖС пузырькового типа, как и других случаев взаимодействия УВ может быть проведен с помощью асимптотической теории коротких волн (для областей больших градиентов параметров) [1], [5]. Интерес к приближенным и асимптотическим методам в настоящее время объясняется с одной стороны достижениями в этой области, значение которых выходит за рамки рассматриваемых проблем, и, с другой стороны, необходимостью дальнейшего развития исследований [1], [4]–[5]. Вводя асимптотическое разложение $\xi = x/c_0 t$, $\eta = y/c_0 t$

$$r/c_0 t = 1 + \bar{\varepsilon}\delta, \quad \Theta = \bar{\varepsilon}^{1/2} Y, \quad \delta = X + (1/2)Y^2, \quad (3)$$

$$u/c_0 = \bar{\varepsilon}\mu/R_0, \quad v/c_0 = \bar{\varepsilon}^{3/2}\nu/R_0, \quad P = (p - p_0)/\rho_0 c_0^2, \quad P = P_{10}\mu,$$

получим решение для волны разрежения в виде

$$\mu = -\frac{1}{2}z^2 + \delta_A, \quad \nu = \frac{1}{3}z^3 - \mu Y + d, \quad z = (X - X_A)/Y, \quad (4)$$

а условие на свободной поверхности (N — скорость фронта ударной волны; $\varepsilon^+ = (p_3 - p_0)/p_0$, $\varepsilon^- = (p_1 - p_0)/p_0$) в виде

$$N^- \cos(\alpha) = N^+ \cos(\omega), \quad N^\pm = 1 + \frac{1}{2}L_0^\pm \varepsilon^\pm. \quad (5)$$

Используя решение (4) с параметрами для регулярной (RR) и регулярной с УВ, замыкающей волну разрежения (RRV): $X_A = (\alpha^{\nu^2} + 1)/2$, $d = \alpha^{\nu^2} - \frac{1}{3}(\alpha^{\nu^2} - 1)^{3/2}$, $\omega^{\nu^2} = \tan(\omega)/\bar{\varepsilon}^{1/2}$ получим

$$\beta_k^\nu = \sqrt{2(X_A - q^+)}, \quad \omega^{\nu^2} q^{+2} = \left[\frac{1}{3}(2X_A - 2q^2)^{3/2} + d \right]. \quad (6)$$

Условие (5) в принятых обозначениях примет вид

$$2c_\gamma = (\omega^{\nu^2} - \alpha^{\nu^2}) + \frac{L_0^+}{L_0^-} q^+ - 1. \quad (7)$$

Исключая ω^ν из (6) и (7) получим окончательно выражение ($\bar{L} = \frac{L_0^-}{L_0^+}$)

$$2c_\gamma = \frac{1}{q^{+2}} \left\{ \frac{1}{3} [2(X_A - q^+)]^{3/2} + d \right\}^2 - \alpha^{\nu^2} - 1 + \frac{q^+}{\bar{L}}. \quad (8)$$



Здесь $\alpha^\nu = \tan(\alpha)/\bar{\varepsilon}^{1/2}$, $c_\gamma = (c_0^- - c_0^+)/c_0^- \bar{\varepsilon}$, $\bar{L} = L_0^-/L_0^+$ - параметры подобия, характеризующие в общем случае процессы рефракции. При нерегулярной рефракции, (рис. 1, а) [5] используется частное решение для уравнений коротких волн для области NABC, получим аналогичный (8) результат при

$$d = q^-(\alpha^{\nu 2} + 1 - q^-)^{1/2} - \frac{1}{3}(\alpha^{\nu 2} + 1 - 2q^-)^{3/2}. \quad (9)$$

В случае возникновения отраженной УВ (рис. 1, d) выражению (8) будет соответствовать

$$2c_\gamma = (1 - q^+) - 1 + \frac{q^+}{\bar{L}}. \quad (10)$$

На рис. 2, а, b приведены результаты расчетов для параметра $q^+ = \varepsilon_{20}/\varepsilon_{10}$, характеризующего эффективность рефракции на поверхности, разделяющей газ и ГЖС, при различных режимах, в зависимости от параметров подобия: $\alpha^\nu = \alpha^\nu(\varepsilon_{10}, \alpha, \gamma^-)$, $c_\gamma = c_\gamma(\gamma^+, \gamma^-, \varepsilon_{10})$, $\bar{L} = \bar{L}(\gamma^+, \gamma^-, \varepsilon_{10})$. Фиксированным значениям α^ν соответствует: $\alpha^\nu = 0.0 - E$ - граница области существования нерегулярной рефракции NR; $\alpha^\nu = 1.0 - A$ - граница между областями NR и RR; $\alpha^\nu = 2.1 - A^1$ - граница между областями RR и RRV. Поверхность К соответствует режиму рефракции с отраженной УВ (RV).

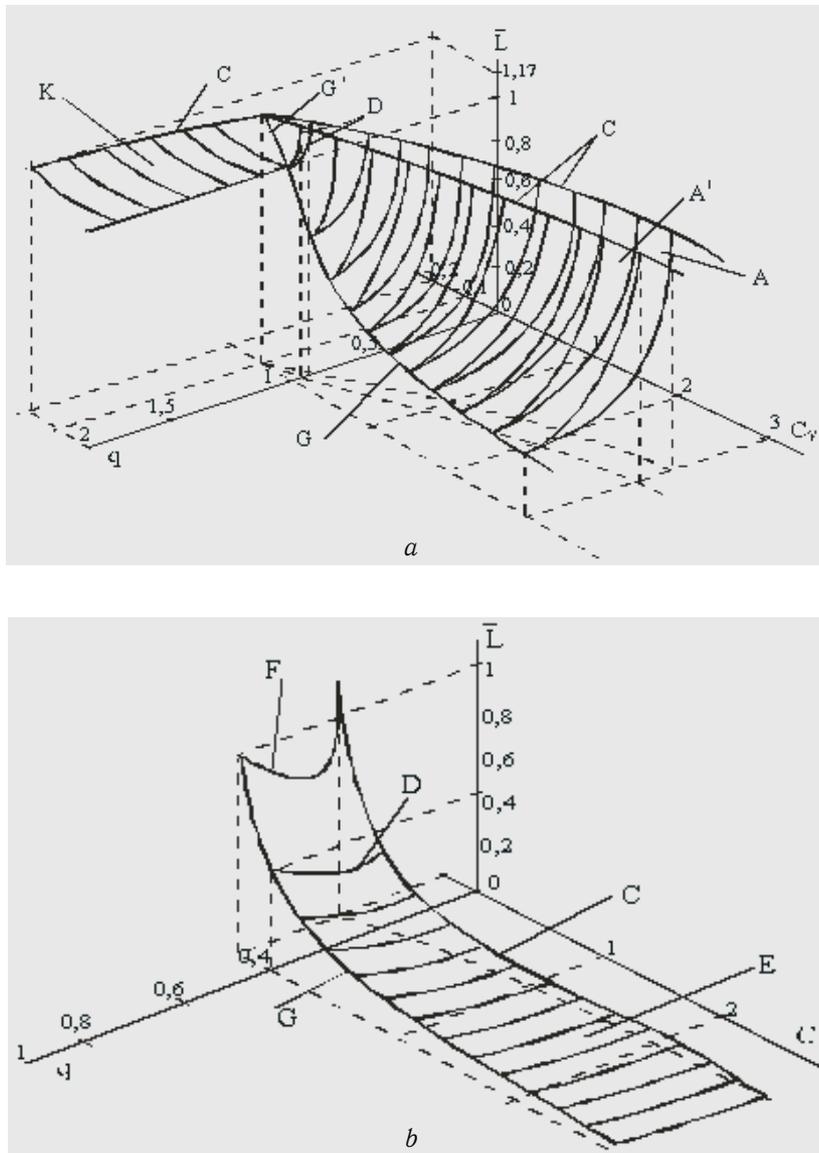


Рис. 2



Кривая G в плоскости $q^+ = 1.0$ является для режимов RR и RRV при $c_\gamma \geq 0$ и всех α^ν универсальной кривой, соответствующей вырождению волны разрежения.

Кривая G^1 ($q^+ = 1.0$) при $c_\gamma < 0$ представляет универсальную границу между режимами RR, RRV, RV или границей перехода от режима с волной разрежения к режиму с отраженной УВ.

Для режима нерегулярной рефракции (NR) кривая G соответствует q_{max}^+ (минимально возможное разрежение) при соответствующих фиксированных α^ν и c_γ .

Границы F c_γ ($c_\gamma < 0$) при режиме (NR) соответствуют предельным значениям c_γ ($c_\gamma = c_{\gamma min}$) в случае slow-fast.

Границы C — при различных α^ν в режимах RR, RRV и RV соответствуют предельно допустимым значениям \bar{L} для рассматриваемых сред газ-ГЖС. В нашем случае для газовых многоатомных сред

($\chi = c_{pII}/c_{vII} = 1.4$) и водовоздушных пузырьковых сред $\bar{L} = 1.17$. Однако это предельное значение может не достигаться, как в случае RR и RRV, при $c_\gamma \gg 1$, а также в случае NR.

В плоскости $c_\gamma = 0$ (рис. 3) сечения D при различных α^ν соответствуют переходу от случая fast-slow ($c_\gamma \geq 0$) к случаю slow-fast ($c_\gamma < 0$).

Как видно из рис. 3 эффективность рефракции в целом возрастает до своего предельного значения ($q^+ = 1$) по мере увеличения α^ν , достигая предельных значений на границе G.

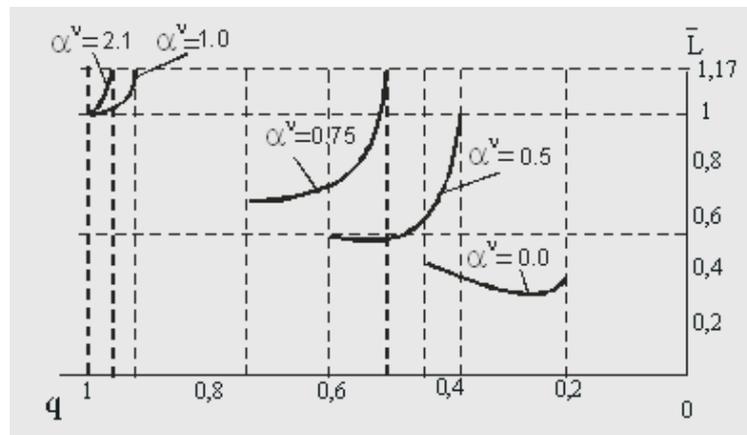


Рис. 3

Настоящие результаты имеют важное практическое приложение для построения границ существования режимов в исходных физических переменных.

Библиографический список

1. Шиндяпин Г.П. Нелинейные взаимодействия ударных волн в газах и газожидкостных средах. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1997. 104 с.
2. Кедринский В.К. Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 435 с.
3. Шиндяпин Г.П., Маркушин А.Г. Рефракция ударной волны на свободной поверхности в газожидкостной среде с образованием волны разрежения // Аэродинамика: Сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1991. Вып. 12 (15). С. 24–39.
4. Шиндяпин Г.П., Матутин А.А. Аналитическое исследование нелинейной рефракции ударной волны на поверхности, разделяющей газовую и газожидкостную среды // Механика и процессы управления: Сб. науч. тр. Екатеринбург: Изд-во УРО РАН, 2004. С. 190-197.
5. Шиндяпин Г.П. Об особенности «сверхзвукового» взаимодействия слабых ударных волн и задаче преломления слабой ударной волны в воде на свободной поверхности // Аэродинамика: Межвуз. сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1974. Вып. 3(6).