

Рис. 1

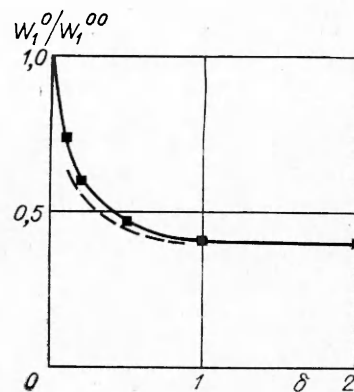


Рис. 2

Следовательно, интегральное соотношение (4) можно применять для качественного изучения поведения ДВ в рассматриваемой системе и для оценок интегральных энергетических характеристик потока ПВ при сравнительно крутом уменьшении  $\rho_0$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лин Э. Э., Пащенко Э. П., Тихомиров Б. П. Неавтомодельное рассмотрение детонационной волны в конденсированном взрывчатом веществе с уменьшающейся плотностью // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теоретическая и прикладная физика. — М.: ЦНИИАтоминформ, 1991. — Вып. 2.
2. Станюкович К. П. Неустойчивые движения сплошной среды. — М.: Наука, 1971.
3. Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П. и др. Физика взрыва. — М.: Наука, 1975.
4. Забабахин Е. И., Забабахин И. Е. Явления неограниченной кумуляции. — М.: Наука, 1988.

г. Арзамас

Поступила 3/IX 1991 г.,  
в окончательном варианте — 17/I 1992 г.

УДК 532.593

С. М. Фролов

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОСЛАБЛЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН В КАНАЛАХ РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ

Для ослабления ударных волн (УВ) используют расширение сечения канала [1—7], перфорацию боковых стенок [2, 8—13] и установку пронизываемых экранов в виде препятствий или каскадов препятствий [14—31], засыпок [32—34], пористых преград [35—37], газовзвесей [38—45] и т. д. В данной работе проведено сравнение эффективности ослабления воздушных УВ различными методами. При анализе ослабления воздушных УВ использован единый подход [1, 4], дающий удовлетворительное согласие с экспериментальными наблюдениями.

1. **Ослабление УВ в расширяющемся канале.** В [1, 4] предложен простой метод расчета распространения плоской УВ ступенчатого профиля в канале с изменяющимся сечением. Суть метода заключается в предположении, что на фронте УВ выполняется соотношение, справедливое для  $C_+$ -характеристики. Фактически предполагается, что скорость распространения акустических возмущений в области за УВ равна скорости фронта. Точность предположения обсуждается в [4, 30]. Показано,

© С. М. Фролов, 1993

что при  $1 < M < \infty$  относительное отличие скоростей ограничено и не превышает 30 %, что для многих приложений вполне допустимо. При сравнении приближенного решения с численным расчетом оказывается, что обсуждаемое предположение дает хорошую точность [4, 30, 17]. Математической аргументации этого факта до сих пор нет.

Квазиодномерное уравнение для  $C_+$ -характеристики в случае расширения УВ в расширяющемся канале имеет вид [4]

$$(1.1) \quad \frac{u + a}{\rho u a^2} \frac{dp}{dx} + \frac{u + a}{u a} \frac{du}{dx} = - \frac{1}{A} \frac{dA}{dx},$$

где  $u$  — скорость газа;  $a$  — скорость звука;  $\rho$  — плотность;  $p$  — давление;  $A$  — площадь поперечного сечения;  $x$  — расстояние, пройденное УВ. Подстановка условий на разрыве в (1.1) дает зависимость числа Маха УВ  $M$  от  $x$ :

$$(1.2) \quad \frac{M}{M^2 - 1} \lambda(M) dM/dx = - A^{-1} dA/dx.$$

Здесь

$$\lambda(M) = [1 + 2(1 - \mu^2)/\mu(\gamma + 1)](1 + 2\mu + M^{-2});$$

$$\mu^2 = [(\gamma - 1)M^2 + 2][2\gamma M^2 - (\gamma - 1)];$$

$\gamma$  — отношение теплоемкостей газа. Полагая  $dA/dx = \text{const}$ ,  $M(0) = M_0$ ,  $A(0) = A_0$ , получим решение (1.2):

$$(1.3) \quad G_e(M)/G_e(M_0) - 1 = X_e$$

( $X_e \equiv A_0^{-1} (dA/dx) x$  — безразмерное расстояние, пройденное УВ). Здесь и далее предполагается, что на участке  $x < 0$  УВ распространялась с постоянной скоростью  $M = M_0$ . Функция  $G_e(M)$  дается соотношением

$$G_e(M) = \exp \left\{ - \int \frac{M \lambda(M)}{M^2 - 1} dM \right\}$$

и табулирована в [4]. Для практических расчетов в [7] предложена аппроксимация  $G_e(M) \approx 1,58 [(M^2 - 1)^2 (M^2 + 1/4)^{1/2}]^{-1}$ , дающая отклонение от точного решения (1.3) не более чем на 12 % в диапазоне  $1,01 \leq M \leq 4$ .

Сравнение экспериментальных данных с зависимостью (1.3) проведено в [5, 6]. Показано, что при  $M < 4$  соотношение (1.3) дает удовлетворительные результаты, по крайней мере при угле раствора призматического насадка  $\leq 15^\circ$ .

**2. Ослабление УВ в канале с проницаемыми стенками.** Квазиодномерное уравнение для  $C_+$ -характеристики в случае распространения УВ ступенчатого профиля в канале с проницаемыми стенками имеет вид [8, 9, 13]

$$(2.1) \quad \frac{u + a}{a^2} \frac{dp}{dx} + \frac{\rho(u + a)}{a} \frac{du}{dx} = - \varepsilon (\omega \Pi / A) \dot{m},$$

где  $\varepsilon$  — проницаемость стенки (отношение площади отверстий к площади поверхности стенки);  $\omega$  — доля периметра канала, занятая проницаемой стенкой;  $\Pi$  — периметр поперечного сечения канала;  $\dot{m}$  — удельный расход газа через отверстие. Подстановка в (2.1) формул пзоэнтropicического истечения газа с эмпирическим коэффициентом расхода и условий на разрыве для числа Маха УВ [13] дает уравнение

$$g_m dM/dx = - (\omega \Pi / 2A) \varepsilon,$$

решением которого при  $M(0) = M_0$  будет

$$(2.2) \quad G_m(M_0) - G_m(M) = X_m.$$

Здесь  $X_m \equiv (\omega \Pi / 2A) \varepsilon x$  — безразмерное расстояние, пройденное УВ в проницаемом канале;  $G_m(M) = \int g_m(M) dM$ . Для функции  $G_m(M)$ , табу-

лированной в [13], предлагаем аппроксимацию  $G_m(M) \approx 4,3(M^{1,2} - 1,012)^{0,8}$ , дающую отклонение от табличных значений не более чем на 5% при  $1,01 \leq M \leq 4$ .

Сравнение экспериментальных данных [8, 9—11] с расчетом по (2.2) проведено в [13]. Показано, что при  $1,1 \leq M \leq 4$  есть удовлетворительное согласие результатов в широком диапазоне проницаемостей ( $4,5 \cdot 10^{-3} \leq \varepsilon \leq 0,53$ ), размеров канала и параметра  $\omega = 0,5-0,1$ .

**3. Ослабление УВ в канале с преградами и завесами.** Уравнение для  $C_+$ -характеристики в случае распространения УВ ступенчатого профиля в канале с плохообтекаемыми препятствиями имеет вид [18, 29, 30]

$$\frac{u+a}{\rho u^2 [(\gamma-1)u-a]} \left[ \frac{dp}{dx} + \rho a \frac{du}{dx} \right] = -\frac{f}{2},$$

где  $f$  — параметр (постоянный при больших числах Рейнольдса), характеризующий аэродинамическое сопротивление единицы длины защитного экрана. Подстановка условий на разрыве дает уравнение

$$g_d(M)dM/dx = -f/2,$$

решением которого при  $M(0) = M_0$  является

$$(3.1) \quad G_d(M_0) - G_d(M) = X_d$$

( $X_d \equiv fx/2$  — безразмерное расстояние, пройденное УВ после входа в экран). Функция  $G_d(M) = \int g_d(M) dM$  табулирована в [30, 45]. Для практических расчетов удобна аппроксимация

$$G_d(M) \approx 4 \frac{0,4M-1}{M^2-1} + 4 \ln(M^2-1) + 0,8 \ln \frac{M+1}{M-1},$$

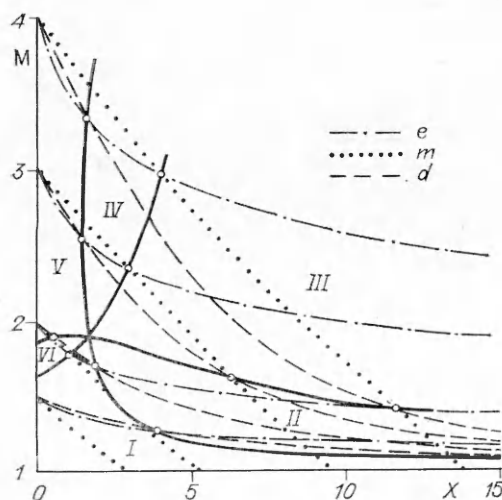
дающая отклонение от точного решения (3.1) не более чем на 5% при  $1,01 \leq M \leq 4$ .

В таблице по [18, 30] представлены величины, которые следует использовать в качестве безразмерного расстояния  $X = X_d$  в экранах с препятствиями разной конфигурации. Например, при установке регулярных препятствий в виде выступов на стенке канала в [17, 30] рекомендуют использовать  $X_d = (\Pi/2A)\xi x$ , где  $\xi$  — гидравлическое сопротивление, полученное в условиях квадратичного закона сопротивления. В таблице приведены также выражения для  $X = X_e$  и  $X_m$ .

Проверка достоверности прогнозов, даваемых (3.1), для всех указанных конфигураций препятствий проведена в [17, 18, 29—31, 34, 45] путем сопоставления с имеющимися экспериментальными результатами. Ссылки на соответствующие источники представлены в таблице. Несмотря

на разнообразие конфигураций, соотношение (3.1) показывает хорошую точность.

**4. Сравнение методов ослабления УВ.** Единый подход к исследованию методов ослабления УВ, приводящий к единообразию конечных соотношений (1.3), (2.2), (3.1), позволяет провести прямое сравнение эффективности защитных средств. Под эффективностью защитного средства будем понимать отношение  $(M_0 - M)/M_0$ , достигаемое на заданном безразмерном расстоянии  $X$ . На рисунке показана расчетная номограмма в виде зависимости числа Маха воздушной УВ от безразмерного



№ п/п	Средство ослабления УВ	X	Источник
1	Расширение сечения	$A_0^{-1}(dA/dx)x$	[4—7]
2	Перфорация стенок	$(\omega\Pi/2A)\epsilon x$	[8, 9—11, 13]
3	Регулярные препятствия	$(\Pi/2A)\zeta x$	[14, 17, 18, 30]
4	Засыпка <sup>1)</sup>	$1,75(1 - \epsilon)(\epsilon d_p)^{-1}x$	[18, 31, 32, 34]
5	Газовзвесь <sup>2)</sup>	$0,75C_D\rho_p(\rho_p^0 d_p)^{-1}x$	[18, 31, 42, 45]
6	Решетки <sup>3)</sup>	$(\pi/8)C_D d_p^2 h^{-3}x$	[18, 31]
7	Пористые забойки <sup>4)</sup>	$0,5\sigma(\rho_p^0 s)^{-1}x$	[18, 31]
8	Перфорированная перегородка <sup>5)</sup>	$X_1 = 26(\epsilon^{-0,1} - 1)$	[18, 29, 31]
9	Каскад из n одинаковых перегородок <sup>6)</sup>	$nX_1$	[18, 29, 31]

П р и м е ч а н и я: <sup>1)</sup>  $d_p$  — размер частиц,  $\epsilon$  — пористость засыпки; <sup>2)</sup>  $C_D$  — коэффициент аэродинамического сопротивления частицы при числе Рейнольдса  $\rightarrow \infty$ ,  $\rho_p$  — массовая концентрация частиц,  $\rho_p^0$  — плотность материала частиц; <sup>3)</sup>  $d_p$  — размер узлов решетки,  $h$  — расстояние между узлами решетки; <sup>4)</sup>  $\sigma$  — плотность пористого образца,  $s$  — характерный размер ячеек,  $\rho_p^0$  — плотность материала перемычек; <sup>5)</sup>  $\epsilon$  — проницаемость перегородки; <sup>6)</sup> в отсутствие взаимного влияния перегородок.

расстояния  $X$ , пройденного волной в защитном экране. В расчетах использованы решения (1.3), (2.2), (3.1) и таблицы функций  $G_e(M)$ ,  $G_n(M)$ ,  $G_d(M)$  в [4, 13, 45]. На номограмме имеется три семейства кривых: штрихпунктирные линии — кривые ослабления УВ в расширяющихся каналах, пунктирные — в каналах с проницаемыми стенками, штриховые — в каналах с препятствиями или завесами. Указанные кривые построены для фиксированных значений  $M_0 = M(X=0) = 1,5; 2; 3; 4$ . Точки пересечения кривых различных семейств ( $e$  и  $m$ ,  $e$  и  $d$ ,  $m$  и  $d$ ) при одинаковом  $M_0$  — точки равной эффективности защитных средств. Последнее означает, что соответствующие защитные средства обеспечивают одинаковую интенсивность УВ на одинаковом безразмерном расстоянии.

Геометрическое место точек равной эффективности назовем линией равной эффективности. Сплошные кривые на номограмме — линии равной эффективности — делят плоскость  $M - X$  на шесть областей. В области I перфорация стенок канала эффективнее, чем расширение сечения; которое, в свою очередь, эффективнее, чем установка препятствий или завес, такое соотношение эффективностей защитных средств удобно записать в виде  $m > e > d$ ; для областей II—VI  $m > d > e$ ,  $d > m > e$ ,  $d > e > m$ ,  $e > d > m$ ,  $e > m > d$ . Номограмму можно использовать в практических расчетах.

При проектировании защитных средств целесообразно исходить из того, чтобы ослабление УВ достигалось на минимальном безразмерном расстоянии. Если регламентируется физическое расстояние  $(x\Pi/2A)_*$ , то воздействие защитного средства на систему в этом случае минимально.

Пусть требуется ослабить воздушную УВ с  $2,5 < M < 4$  до  $M < 1,3$ . Согласно номограмме, лучше применять перфорацию стенок канала. При  $(x\Pi/2A)_* = 100$  требуемая проницаемость стенок трубы  $\epsilon \approx 0,12$ . Если вариант с проницаемыми стенками неприемлем по каким-либо соображениям, тогда надо использовать экраны в виде препятствий или завес. В рассматриваемом примере можно применять каскад регулярных препятствий протяженностью  $(x\Pi/2A)_* = 100$ , создающих гидравлическое сопротивление  $\zeta \approx 0,135$ , или каскад препятствий с протяженностью  $x\Pi/2A < 100$ , но соответственно с большим значением гидравлического

сопротивления [17, 30]. Для достижения того же результата можно установить в канале одну перфорированную перегородку с проницаемостью  $\varepsilon \approx 0,04$  или, например, пять далеко отстоящих перегородок с  $\varepsilon \approx 0,2$  каждая [18, 29, 31]. Если и загромождение сечения канала нежелательно, то следует предусмотреть расширение канала. В рассматриваемом случае площадь сечения надо увеличить в 1424 раза!

**З а м е ч а н и я.** Поскольку УВ, генерируемые взрывами зарядов ВВ, газовых и пылевых облаков, как правило, характеризуются спадом давления за фронтом, анализ ослабления УВ ступенчатого профиля дает консервативные оценки их разрушительного действия.

При практических расчетах надо иметь в виду, что метод [1, 4] не позволяет прогнозировать профили параметров за фронтом УВ. Для анализа действия ослабленной УВ необходима дополнительная информация об импульсе давления [26].

Применение метода [1, 4] для расчета защитных средств имеет ряд физических ограничений. Опыты [5] показали, что при выходе УВ из расширяющейся секции канала в секцию постоянного сечения наблюдается аномально высокое давление. Последнее связано с дифракцией УВ и может быть учтено соответствующей поправкой [5–7]. При расчете ослабления УВ газозвесью необходимо учитывать возможность установления равновесного течения двухфазной среды [38, 45]. Более полная информация о пределах применимости используемого метода дана в [4–6, 13, 17, 18, 29–31, 34, 45].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Chisnel R. F. The motion of a shock wave in a channel with applications to cylindrical and spherical shock waves // *J. Fluid Mech.*— 1957.— V. 2.— P. 286.
2. Rosciszewski J. Calculations of the motion of non-uniform shock waves // *J. Fluid Mech.*— 1960.— V. 8.— P. 337.
3. Rosciszewski J. Propagation of waves of finite amplitude along a duct of non-uniform cross-section // *J. Fluid Mech.*— 1960.— V. 8.— P. 625.
4. Whitham G. B. *Linear and nonlinear waves.*— N. Y.: Wiley and Sons, 1974.
5. Nettleton M. A. Shock attenuation in a gradual area expansion // *J. Fluid Mech.*— 1973.— V. 60, pt 2.
6. Sloam S. A., Nettleton M. A. A model for the axial decay of shock wave in a large abrupt area change // *J. Fluid Mech.*— 1975.— V. 71, pt 4.
7. Баженова Т. В., Гвоздева Л. Г. *Нестационарные взаимодействия ударных волн.*— М.: Наука, 1977.
8. Szumowski A. P. Attenuation of a shock wave along a perforated tube // *Shock Tube Research: Proc. 8th Symp. (Intern.) on Shock Tube.*— London: Chapman and Hall, 1971.— P. 14/1.
9. Wu J. H. T., Ostrowski P. P. Shock attenuation in a perforated duct // *Shock Tube Research: Proc. 8th Symp. (Intern.) on Shock Tube.*— London: Chapman and Hall, 1971.— P. 15/1.
10. Honda M., Takayama K., Onodera O. Study on the motion of shock waves propagating along perforated ducts // *Rep. Inst. High Speed Mech., Tohoku Univ.*— 1974.— N 30.
11. Deckker B. E. L., Koyama H. Motion of a weak shock in a porous tube // *Shock Tubes and Waves: Proc. 14th Intern. Symp. on Shock Tubes and Shock Waves.*— Sydney: New South Wales Univ. Press, 1983.
12. Deckker B. E. L. 'Sink' effect in a shock induced boundary layer on attenuation // *J. Fluid. Mech.*— 1984.— V. 146.— P. 169.
13. Frolov S. M., Gelfand B. E. Shock wave attenuation in channels with perforated walls // *Shock Tube Research: Proc. 18th Symp. (Intern.) on Shock Waves.*— Berlin: Springer, 1992.
14. Merzkirch W., Erdman W. Measurement and calculation of shock attenuation in a channel with perforated walls.— S. l., 1982.— (AFOSR—TR—82—1084).
15. Graig J. E., Heines K. A. Shock propagation in a tube with transverse ribs // *Shock Tubes and Waves: Proc. 12th Symp. (Intern.)*— Jerusalem, 1980.
16. Treblinski R., Wlodarczyk E. Theoretical analysis of the shape of pressure pulse generated by gas mixture explosion in a tunnel with rough walls // *J. Techn. Phys.*— 1986.— V. 27, N 4.
17. Гельфанд Б. Е., Фролов С. М., Медведев С. П. Измерения и расчет затухания УВ в шероховатой трубе // *ФГВ.*— 1990.— № 3.
18. Frolov S. M., Gelfand B. E., Medvedev S. P., Tsyganov S. A. Quenching of shock waves by barriers and screens // *Current topics in shock waves.*— Bethlehem: Amer. Phys. Soc., 1989.

19. Гельфанд Б. Е., Медведев С. П., Фролов С. М. Взаимодействие воздушных ударных волн с преградой, защищенной протяженным экраном // Изв. АН СССР. МЖГ.— 1991.— № 1.
20. Бондаренко А. В., Ибрагим М. А. Измерение скорости ударной волны, установившейся после взаимодействия с препятствием в виде каналов-диафрагм // Изв. АН СССР. МЖГ.— 1967.— № 3.
21. Косточко Ю. П. Взаимодействие ударных волн с проницаемой поверхностью // Тр. НИИ ПММ.— Томск, 1974.— № 5.
22. Dain C. G., Hodson J. P. Generation of weak shock waves in a shock tube // *Aeronaut. Quart.*— 1974.— V. 25, N 2.
23. Mori Y., Hijikata K., Shimizu T. Attenuation of shock wave by multi-orifice // 10th Symp. (Intern.) on Shock Tubes and Waves, Kyoto, 1975: Proc.— Kyoto, 1975.
24. Минеев В. Н., Клаповский В. Е., Мацевич Б. В. и др. Ослабление действия воздушной ударной волны перфорированными перегородками // Explosive working of metals: Proc. 5th Intern. Symp., Gottwaldow, 1982.— Pardubice, 1982.
25. Шевцов В. Д. Взаимодействие ударных волн с проницаемыми преградами.— М., 1982.— Деп. в ВИНТИ 16.03.82, № 1192—82.
26. Baker W. E., Cox P. A., Westine P. S. et al. Explosion hazards and evaluation.— Amsterdam e. a.: Elsevier, 1983.
27. Tong K. O., Knight C. J., Srivastava V. N. Interaction of weak shock waves with screens and honeycombs // *AIAA J.*— 1980.— V. 18, N 11.
28. Gelfand V. E., Medvedev S. P., Polenov A. N., Tsyganov S. A. Interaction of non-stationary pressure waves with perforated partitions // *Arch. Combust.*— 1987.— V. 7, N 1—2.
29. Гельфанд Б. Е., Фролов С. М. Приближенный расчет ослабления ударных волн проницаемыми преградами // ПМТФ.— 1990.— № 4.
30. Гельфанд Б. Е., Фролов С. М., Медведев С. П., Цыганов С. А. Гашение ударных волн в каналах. Шероховатые трубы.— Черногоровка, 1990.— (Препр./АН СССР, ОИХФ).
31. Гельфанд Б. Е., Фролов С. М., Цыганов С. А. Гашение ударных волн в каналах. Преграды и завесы.— Черногоровка, 1990.— (Препр./АН СССР, ОИХФ).
32. Zloch N. Shock attenuation in beds of granular solids // *Arch. mech. stosowanej.*— 1976.— V. 28, N 5—6.
33. Rogg V., Hermann D., Adomeit G. Shock induced flow in regular arrays of cylinder and packed beds // *Int. J. Heat Mass Transfer.*— 1985.— V. 28, N 12.
34. Медведев С. П., Фролов С. М., Гельфанд Б. Е. Ослабление ударных волн насадками из гранулированных материалов // ИФЖ.— 1990.— Т. 58, № 6.
35. Кудинов В. М., Паламарчук Б. И., Гельфанд Б. Е., Губин С. А. Параметры ударных волн при взрыве зарядов ВВ в пене // ДАН СССР.— 1976.— Т. 228, № 3.
36. Wienfield F. N., Hill D. A. Preliminary results on the physical properties of a gaseous foam and their attenuating characteristics.— S. l., 1977.— (DRES, TN—389).
37. Гельфанд Б. Е., Губанов А. В., Тимофеев Е. И. Взаимодействие воздушных ударных волн с пористым экраном // Изв. АН СССР. МЖГ.— 1983.— № 4.
38. Rudinger G. Some properties of shock relaxation in gas flow carrying small particles // *Phys. Fluids.*— 1964.— V. 7, N 5.
39. Нигматулин Р. И. Некоторые вопросы гидромеханики полидисперсных систем // Изв. АН СССР. МЖГ.— 1968.— № 3.
40. Oota E., Tajima K., Morii H. Experiments and analysis on shock waves propagating through a gas-particle mixture // *Bull. JSME.*— 1976.— V. 19, N 130.
41. Гавриленко Т. П., Григорьев В. В. Распространение ударной волны в аэрозвеси твердых частиц // ФГВ.— 1984.— № 1.
42. Sommerfeld M. The unsteadiness of shock waves propagating through gas-particle mixtures // *Experiments in Fluids.*— 1985.— V. 3, N 4.
43. Olim M., Igra O., Mond M., Ben-Dor G. A general attenuation law of planar shock waves propagating into dusty gases // *Shock Tubes and Waves: Proc. 16th Symp. (Intern.)*— Aachen, 1987.
44. Кругликов Б. С., Кутушев А. Г. Ослабление ударных волн экранирующими решетками // ФГВ.— 1988.— № 1.
45. Фролов С. М., Гельфанд Б. Е. Ослабление ударных волн в газовзвесах // ФГВ.— 1991.— № 1.

г. Москва

Поступила 27/XII 1991 г.,  
в окончательном варианте — 5/II 1992 г.