

УДК 533.6.011.72

## АВТОКОЛЕБАНИЯ В СВЕРХЗВУКОВЫХ РАЗРЕЖЕННЫХ ИМПАКТНЫХ СТРУЯХ

Г. Ф. Горшков, В. Н. Усков

Балтийский государственный технический университет, 198005 Санкт-Петербург

Исследовано влияние разреженности среды на автоколебания в сверхзвуковых импульсных струях (недорасширенных струях, взаимодействующих с нормально расположенной плоской ограниченной преградой). Получены амплитудно-частотные характеристики пульсаций давления на преграде.

Известно, что в сверхзвуковых импульсных струях при определенных сочетаниях режимных параметров происходят резкие переходы стационарного течения к нестационарному [1–4] и возникают интенсивные автоколебания.

Следует отметить, что большинство результатов, за исключением работы [5], получено для плотных струй при давлениях торможения  $p_0 \gg 10^5$  Па. Однако во многих практических задачах истечение струи из сопла в разреженную среду происходит при существенно меньших значениях  $p_0$ . В этих условиях на течение газа в струе большое влияние оказывают эффекты вязкости и разреженности [6, 7], которые могут быть оценены комплексом  $Re_L = Re_* N^{-0,5}$ , где  $N = p_0/p_\infty$  — степень расширения,  $p_\infty$  — давление окружающей среды;  $Re_*$  — числа Рейнольдса, вычисленные по параметрам газа в критическом сечении сопла.

Уменьшение плотности в свободной затопленной струе конечной нерасчетности  $n$  с числом Маха  $Ma = 2$  (в отличие от  $Ma = 1$ ), как показано в [8], приводит к уменьшению диаметра диска Маха, оттеснению его от сопла и формированию регулярной структуры ударных волн (X-образной конфигурации). При таком переходе расстояние до точки отражения увеличивается на 10–15% [7] по сравнению с расчетом, а радиальные размеры струи не зависят от  $Re_L$ .

При фиксированных расстоянии от среза сопла до преграды  $h$  и нерасчетности  $n$  (обтекание безграничной преграды [8]) увеличение разреженности приводит к удалению центрального скачка уплотнения (ЦСУ), возникающего перед преградой, от сопла и в некоторых случаях к появлению X-образной конфигурации ударно-волновой картины (УВК). Наиболее сильное влияние разреженности на УВК зафиксировано для чисел  $Re_L < 100$ . Преграда смещает границу перехода к X-образной структуре в область меньших  $Re_L$ .

Таким образом, переход к течению с невозмущенной первой бочкой происходит не монотонно: вначале оттеснение ЦСУ от сопла сдвигает этот переход в сторону больших значений  $h$ , а уменьшение диаметра висячего скачка уплотнения — в сторону меньших  $h$  [8].

Эффекты вязкости и разреженности наиболее сильно проявляются в области дозвукового течения ударного слоя — между ЦСУ и преградой [9, 10]. Однако для струй с  $Ma = 2$  при  $Re_L > 150$  тип течения в импульсной струе, как и в случае плотных струй, определяется только геометрическим параметром подобия  $H = h/x_*$  [10], где  $x_* = 2r_a Ma (\gamma n)^{0,5}$ . Отмеченные особенности взаимодействия должны проявляться и в режиме нестационарного обтекания преграды. В этой связи сформулируем задачу исследования следующим

образом: изучить влияние разреженности на качественные и количественные характеристики автоколебаний путем изменения  $Re_L$ .

Эксперименты проводились на вакуумном стенде ГУРС-1, основой которого является вакуумная камера объемом  $10 \text{ м}^3$  с двумя форвакуумными насосами ВН-6 и бустерным насосом БН-15000. Барокамера снабжена дистанционно управляемым трехступенным координатником, на котором крепилась преграда, представляющая собой цилиндр с плоским торцом диаметром 16 мм с размещенным в центре пьезоэлектрическим датчиком давления ИС-2156. На расстоянии 2 мм от центра предусмотрено отверстие для измерения статического давления на преграде, которое фиксировалось датчиком ДМИ.

Струи создавались коническим соплом Лаваля с геометрическим числом Маха  $Ma = 2$ , диаметром критического сечения  $d_* = 4 \text{ мм}$  и углом полураствора  $15^\circ$ , ввернутым в ресивер, куда поступал рабочий газ (воздух) из помещения стенда. В эксперименте измерялись полные  $p_0$  и статические  $p$  давления в ресиве и на преграде, наружное давление в барокамере  $p_\infty$ , пульсации давления  $p(\tau)$  на преграде.

Вариация критических чисел Рейнольдса  $Re_*$  осуществлялась путем изменения  $p_0$  при постоянном  $p_\infty$ , что обеспечивалось напуском воздуха в барокамеру через откачивающие насосы при неизменном объемном расходе газа.

Давление  $p_\infty$  измерялось дифференциальным датчиком ДМИ относительно некоторого базового давления  $p_b = 10 \text{ Па}$ , задаваемого откачкой одной из полостей датчика вакуумным насосом НВЗ-20, которое при безрасходном режиме насоса поддерживалось постоянным. Давление в этой полости измерялось термпарным преобразователем ПМТ-2 с вакуумметром ВТ-3, градуированным по манометру Мак-Леода. Для измерения давлений больше 200 Па также применялись U-образные дибутилфталатные манометры. Ошибка в определении давления в диапазоне  $10 \div 3 \cdot 10^4 \text{ Па}$  составила 5%.

Мгновенная величина пульсаций  $p(\tau)$  с датчика ИС-2156, усиленная микрофонным усилителем 00011 шумомера 01021 фирмы RFT (полоса пропускания 200 кГц), записывалась на ленту магнитографа НО-67 (диапазон воспроизводимых частот 40 кГц). В процессе эксперимента определялся интегральный уровень пульсаций давления (на выходе блока индикации 02022)  $\Delta L^0 = 20 \lg(\sigma/p_w) - L_n$ , где  $\sigma$  — эффективное значение  $p(\tau)$ ;  $p_w = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$  — звуковое давление порога слышимости;  $L_n$  — уровень широкополосных шумов. Частотный диапазон динамического тракта датчик — шумомер — магнитограф составляет не менее 40 кГц при неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) для указанного диапазона частот  $\pm 3 \text{ дБ}$ .

Качественная картина обтекания преграды недорасширенной разреженной струей получена с помощью подсветки тлеющим разрядом с последующим фотографированием ее на пленку. Для анализа АЧХ автоколебаний использовался комплект аппаратуры и методика обработки данных, аналогичные описанным в [1, 5]. Исследование выполнено в следующих диапазонах параметров:  $\gamma = 1,4$ ;  $T_0 = 293 \text{ К}$ ;  $p_0 = (0,86 \div 6,5) \cdot 10^3 \text{ Па}$ ;  $n = p_a/p_\infty = 2 \div 13,5$ ;  $Re_* = (0,59 \div 3,84) \cdot 10^3$ ;  $Re_L = 114 \div 371$ ;  $h = 2 \div 30$ ;  $R = 3,08$  — радиус преграды (здесь и далее все линейные размеры отнесены к радиусу среза сопла  $r_a$ ).

Согласно оценке разреженности аналогично [9] диапазон изменения чисел Кнудсена  $Kn = (0,67 \div 5,1) \cdot 10^{-3}$  таков, что течение около преграды континуальное, а эффекты вязкости и разреженности сосредоточены в пристеночном пограничном слое. ЦСУ можно считать изолированным (неразмытым), т. е. газодинамическим разрывом, на котором выполняются соотношения Рэнкина — Гюгио.

Рис. 1 иллюстрирует смену УВК в импактной разреженной струе, полученной на основе визуализации течения тлеющим разрядом, при непрерывном удалении преграды от среза сопла  $h$  (кривая на рис. 1,а соответствует параметрам  $Re_L = 371$ ,  $n = 13,5$ ; на рис. 1,б —  $Re_L = 162$ ,  $n = 2,6$ ). Здесь же представлены кривые изменения интегрально-

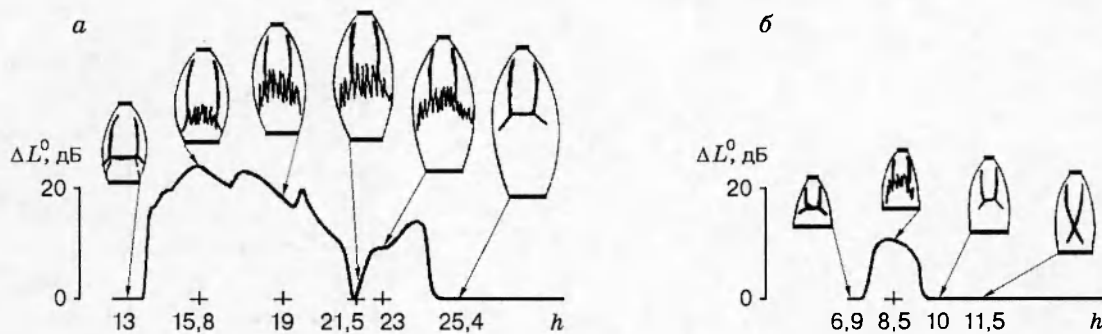


Рис. 1

го уровня  $\Delta L^0$  в центре преграды в зависимости от  $h$ . Из анализа рис. 1 следует, что плавное увеличение  $h$  приводит к скачкообразному разрушению стационарного течения: в импактной системе струя — преграда возникают автоколебания, сопровождающиеся значительным увеличением интегрального уровня  $\Delta L^0$  (кривая на рис. 1, *a* соответствует максимальному значению  $\Delta L^0 = 24$  дБ; на рис. 1, *б* —  $\Delta L^0 = 10$  дБ). Однако, в отличие от обтекания преграды плотными струями [1–4], при определенных сочетаниях параметров  $Re_L$  и  $n$  обнаружен второй нестационарный режим.

Анализ зависимостей интегрального уровня  $\Delta L^0$  (кривые на рис. 2, *a, б*) и частоты (точки на рис. 2, *в, г*) пульсаций давления (основного тона) в центре преграды от расстояния  $h(H)$  позволил установить два типа обтекания ограниченной преграды: тип А, когда существуют первый (I) и второй (II) режимы автоколебаний (рис. 2, *б, г*;  $Re_L = 184$ ,  $n = 7,5$ ); тип Б, когда присутствует только первый режим (рис. 2, *a, в*;  $Re_L = 165$ ,  $n = 5,1$ ). Реализация любого из них зависит от сочетания параметров  $M_a$ ,  $H$  и  $Re_L$  (см. рис. 1).

Так, для типа А первый режим характеризуется наличием нескольких дискретных составляющих (дискретного тона: наряду с основным тоном присутствуют обертоны) в частотном спектре (рис. 3, *a*, кривые 1–6), мощными колебаниями УВК (см. рис. 1, *a*) и давления (рис. 3, *б*) на преграде большой амплитуды и сравнительно низкой частоты  $f$ . Колебания давления имеют ярко выраженную периодическую структуру (кривые 1–9 на рис. 3, *б* соответствуют расстояниям  $h$  и параметрам рис. 2, *б, г*). Режим характеризуется существенной протяженностью  $H$ .

Второй режим, значительно меньший по уровню  $\Delta L^0$  и протяженности  $H$  (в три раза по отношению к первому), характеризуется единственной дискретной составляющей частотного спектра (рис. 3, *a*, кривые 7–9), умеренным колебанием УВК и давления на преграде. Режим чувствителен к изменению параметра  $Re_L$ .

Участки изменения интегрального уровня  $\Delta L^0 = \Delta L^0(H)$  (см. рис. 2, *a, б*) имеют резкие границы (штриховые линии на рис. 2, *в, г* соответствуют началу и концу автоколебаний  $H_{ин,к}$ ). Эксперимент показал, что переход от первого режима ко второму может происходить как через небольшой промежуток  $H$  (порядка  $0,1H$ ) (рис. 2, *б*), так и непосредственно один за другим (см. рис. 1, *a*).

В рамках указанного диапазона параметров второй режим реализуется при относительно больших  $n$ , таких, когда диаметр ЦСУ соизмерим (равен) с диаметром преграды: ( $n = 13,5 \div 5,8$ ;  $Re_L = 371 \div 169$ ), (5,24; 231), (4,5; 214). Конец второго режима всегда соответствует появлению течения с невозмущенной первой бочкой ( $H_{2к} = H_\delta$  — штрихпунктирная линия на рис. 2, *г*). Об этом свидетельствуют как результаты измерения осредненного давления в центре преграды, так и визуализация УВК (см. рис. 1, *a*).

Для типа Б (см. рис. 2, *a, в*) первый режим также характеризуется наличием дискрет-

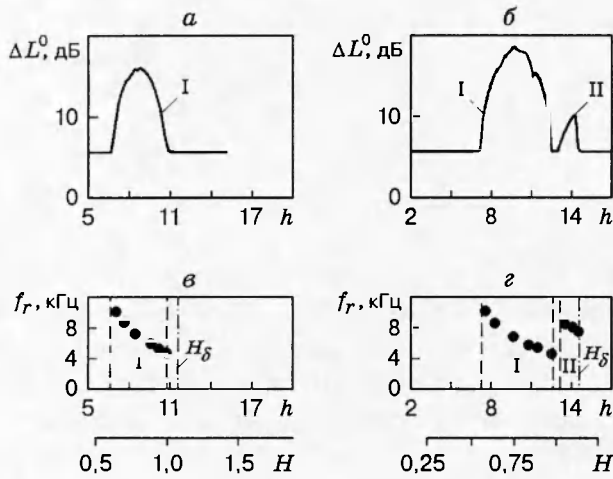


Рис. 2

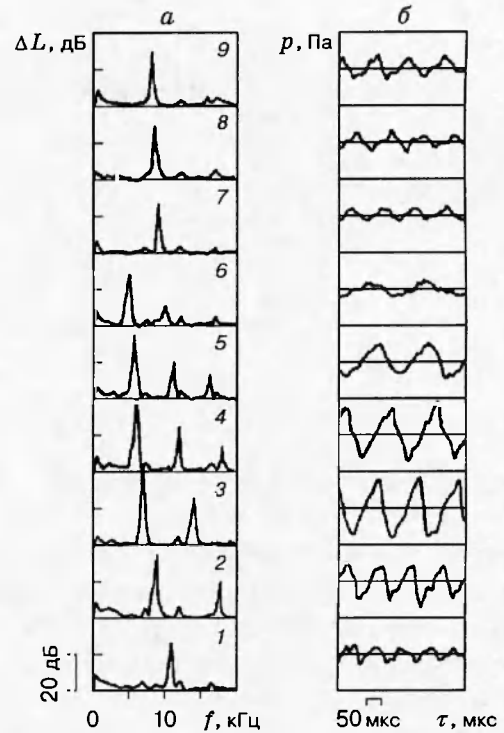


Рис. 3

ного тона в частотном спектре, мощным колебанием УВК и давления на преграде большой амплитуды и сравнительно низкой частоты. Колебания имеют ярко выраженную периодическую структуру. Режим характеризуется достаточной протяженностью по  $H$ , как и в случае плотных импактных струй.

При движении преграды от сопла окончание режима происходит всегда раньше перехода к радиальному течению с невозмущенной первой бочкой:  $H_{1к} < H_{\delta}$  (рис. 1, б и штриховая и штрихпунктирная линии на рис. 2, в). При движении преграды к срезу сопла из-за обнаруженного в эксперименте гистерезиса осредненного давления на преграде ( $H_{\delta}$  сдвигается в сторону сопла) начало нестационарного режима (его конец при движении от сопла) совпадает с моментом «развала» течения с невозмущенной первой бочкой.

Возникновение единственного автоколебательного режима происходит при таких значениях  $n$ , когда диаметр ЦСУ существенно меньше диаметра преграды или когда они соизмеримы, но параметр разреженности  $Re_L$  мал и влияет на второй режим («съедает» его): ( $n = 6,6$ ;  $Re_L = 147$ ), (4,8; 126), (4,3; 172), (3,5; 189), (3,3; 189), (2,6; 163).

Возникновение автоколебаний для двух типов нестационарного обтекания может сопровождаться как относительно плавным повышением интегрального уровня  $\Delta L^0$ , так и резким его возрастанием. Переход от второго режима к течению с невозмущенной первой бочкой происходит скачкообразно (см. рис. 2, б). Увеличение  $H$  в пределах существования каждого из режимов приводит к монотонному уменьшению основной частоты колебаний давления на преграде  $f_r$  (первой дискретной составляющей частотного спектра), а при переходе от первого ко второму происходит скачкообразное увеличение  $f_r$  (рис. 2, в, г). пилообразное изменение  $f_r$  соответствует изменению  $f_r$  для плотных струй, натекающих на безграничную преграду [1].

На рис. 4 приводятся границы областей существования автоколебаний в обобщенных

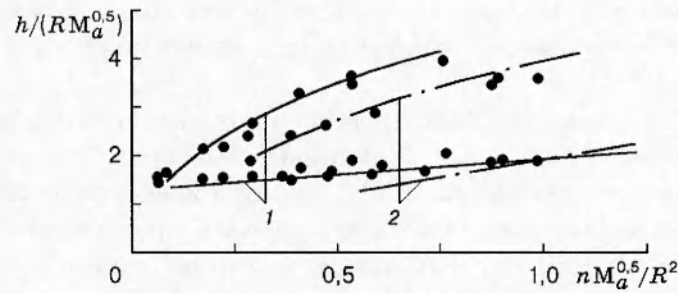


Рис. 4

координатах, использованных в [4] для плотных струй. Граничные значения  $H_{ин.к}$  определялись по возрастанию и затуханию кривых  $\Delta L^0 = \Delta L^0(H)$  (см. рис. 2, а, б), что отвечало появлению мощной дискретной составляющей в спектрах пульсаций давления на преграде.

Анализ данных показал, что несмотря на некоторые количественные отличия в протяженности зон нестационарного обтекания, полученные результаты (точки на рис. 4 соответствуют расстояниям  $h$ , при которых происходят автоколебания; нижняя кривая 1 является усредненной границей начала автоколебаний, верхняя — границей конца) находятся в соответствии с представлениями об автоколебаниях для плотных сверхзвуковых импактных струй [1–4] (кривые 2), причем зоны первого и второго режимов расположены внутри характерных границ.

Важную особенность струйного взаимодействия составляют гистерезисные явления, возникающие в ударном слое при квазистационарном перемещении преграды относительно среза сопла (движение ее от сопла или к нему). При фиксированных начальных параметрах  $M_a$ ,  $\gamma$ ,  $n$ ,  $Re_L$  экспериментально установлено, что для разреженных импактных струй гистерезис по уровню  $\Delta L^0$  (в отличие от осредненного давления на преграде) не существует для всех типов обтекания преграды.

Влияние разреженности среды на автоколебания проявляется следующим образом. При больших значениях  $Re_L$  границы существования автоколебаний не зависят от  $Re_L$  и определяются параметрами, полученными для плотных импактных струй [1, 2]. Уменьшение значений  $Re_L < 371$  (увеличение разреженности) наряду с количественным изменением протяженности областей существования автоколебаний может привести к исчезновению сначала второго, а затем и первого режимов. Это связано как с переходом к X-образной структуре ударных волн в разреженной струе (см. рис. 1, б), так и с размыванием УВК первой бочки струи [7]. Уменьшение плотности в свободной затопленной струе с  $M_a = 2$  для  $n = \text{const}$ , как отмечено выше, приводит к уменьшению диаметра диска Маха, оттеснению его от сопла и формированию в итоге регулярной структуры ударных волн [8].

При  $Re_L \leq 172$  ( $n = 6,6 \div 2,6$ ) существует единственный (первый) режим, а для  $Re_L < 121$  автоколебания не обнаружены, что согласуется с [5]. Исчезновение второго режима обусловлено уменьшением поперечного размера ударного слоя (уменьшением диска Маха в струе) при переходе к регулярной структуре ударных волн для фиксированного диаметра преграды.

Следовательно, для струй конечной нерасчетности нестационарные режимы возможны, когда значения  $Re_L$  больше некоторого минимального  $Re_L^0$ . Согласно [5] для безграничной преграды при числе  $M_a = 2$  для первого режима  $Re_L^0 = 128$ , а для второго  $Re_L^0 = 150$ . Некоторое смещение предельных и иных граничных значений  $Re_L$  в сторону увеличения по сравнению с указанными связано как с различиями рассматриваемых импактных систем,

так и с меньшим диапазоном изменения  $n$ . Естественно предположить, что при меньших значениях  $n$  переход к X-образной конфигурации в струе может наступать при больших  $Re_L$ .

Частотный анализ нестационарных процессов показал, что для первого режима автоколебаний в частотном спектре (см. рис. 3, а; кривые 1–6) присутствует несколько дискретных составляющих, превышающих (до 40 дБ) общий уровень сплошного шума струи. Для второго имеется единственная составляющая, уровень превышения которой над общим широкополосным фоном  $25 \div 30$  дБ. В рамках каждого из режимов с ростом  $H$  частотные спектры смещаются в область меньших частот (кривые 1–6), а «восстановление» частоты  $f_r$  до первоначальных значений для второго режима происходит скачкообразно (кривая 7).

На участках возникновения и схода с режима автоколебаний в спектрах присутствует только одна дискретная составляющая (кривые 1, 6), уровень превышения которой над широкополосным фоном также значителен ( $22 \div 25$  дБ). Появление обертонов в частотном спектре — следствие несинусоидальности пульсаций давления, вызванных ударно-волновыми процессами в области между ЦСУ и преградой.

Параметры системы ЦСУ — преграда оказывают влияние на частоту пульсаций давления. Увеличение отхода ЦСУ от преграды  $\Delta$  с ростом расстояния  $h$  в пределах области автоколебаний сопровождается уменьшением частоты основного тона  $f_r$ . В этом же направлении действует увеличение  $n$  и  $Ma$  [1–4]. Учитывая сказанное и вводя комплекс  $d_a n^{0,5}$  в качестве поперечного размера ударного слоя, частотные характеристики автоколебаний по числам Струхала  $Sh_r$  для обоих режимов можно обобщить универсальной эмпирической зависимостью вида

$$Sh_r^{-1} = a_0 / (f_r d_a n^{0,5}) = A_i \Delta / (d_a n^{0,5}) + B_i,$$

где  $A_1 = 4,3$ ,  $B_1 = 1,2$  (первый режим);  $A_2 = 1,3$ ,  $B_2 = 1,4$  (второй);  $a_0$  — скорость звука заторможенного потока;  $\Delta$  — расстояние от преграды, около которого колеблется ЦСУ перед ней (среднее положение  $\Delta$  взято из [2]).

Эксперименты проведены при участии А. В. Савина и В. С. Фаворского.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Горшков Г. Ф., Усков В. Н., Фаворский В. С. Особенности нестационарного обтекания безграничной преграды недорасширенной струей // ПМТФ. 1993. Т. 34, № 4. С. 58–65.
2. Остапенко В. А., Солотчин А. В. Силовое воздействие сверхзвуковой недорасширенной струи на плоскую преграду // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1974. № 13, вып. 3. С. 26–32.
3. Глазнев В. Н. Автоколебания при истечении сверхзвуковых нерасчетных струй // Моделирование в механике. 1987. Т. 1, № 6. С. 29–43.
4. Набережная Г. В., Нестеров Ю. Н. Неустойчивое взаимодействие расширяющейся сверхзвуковой струи с преградой // Тр. ЦАГИ. 1976. Вып. 1765. С. 3–23.
5. Савин А. В., Соколов Е. И., Фаворский В. С., Шаталов И. В. Влияние разреженности на процессы нестационарного взаимодействия сверхзвуковой недорасширенной струи с перпендикулярной преградой // ПМТФ. 1991. № 6. С. 78–83.
6. Сверхзвуковые неизобарические струи газа / В. С. Авдуревский, Э. А. Ашратов, А. В. Иванов, У. Г. Пирумов. М.: Машиностроение, 1985.
7. Кисляков Н. И., Ребров А. К., Шарафутдинов Р. Г. О структуре высоконапорных струй низкой плотности за сверхзвуковым соплом // ПМТФ. 1975. № 2. С. 42–52.

8. Соколов Е. И., Шаталов И. В. Течение перед преградой перпендикулярной струи малой плотности, истекающей из сверхзвукового сопла // Струйные течения жидкостей и газов. Новополоцк: Новополоц. политехи. ин-т, 1982. Ч. 1. С. 129–132.
9. Шаталов И. В. Исследование течения в области взаимодействия недорасширенной разреженной струи с плоской преградой, перпендикулярной ее оси // ПМТФ. 1985. № 2. С. 115–120.
10. Соколов Е. И., Шаталов И. В. Параметры подобия течения при взаимодействии сверхзвуковой недорасширенной струи с перпендикулярной плоской преградой // Динамика неоднородных и сжимаемых сред: Межвуз. сб. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1984. Вып. 8. С. 175–183.

*Поступила в редакцию 29/IV 1997 г.,  
в окончательном варианте — 8/VII 1997 г.*

---