

УДК 533.6.011.72

© 1999 г. Т.В. БАЖЕНОВА, Т.А. БОРМОТОВА, В.В. ГОЛУБ,
Н.В. ОСМИНИНА, А.М. ШУЛЬМЕЙСТЕР, С.Б. ЩЕРБАК**ДИФРАКЦИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ИЗ КАНАЛА
КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ НА ВЫПУКЛОМ
ПРЯМОМ УГЛЕ**

Представлены результаты экспериментального и численного исследования влияния формы поперечного сечения канала на форму и интенсивность выходящей из него ударной волны. В отличие от двухмерного случая дифракции на плоском клине в полубесконечном пространстве картина течения в осесимметричном и трехмерном случаях неавтономна. Получено распределение интенсивности ударной волны во времени и пространстве при дифракции из ударной трубы квадратного сечения на угле 90° (на прямоугольном срезе). Приведены аппроксимационные формулы зависимости от времени числа Маха пристенной части дифрагированной волны при $M_0 = 3$ в различных направлениях. Интенсивность ударной волны и ее форма в различные моменты времени сравниваются для плоского автомоделного, осесимметричного и трехмерного случаев.

Теоретически и экспериментально установлено, что процесс дифракции ударной волны на двугранном угле в неограниченном пространстве в широком диапазоне чисел Маха и времени подобен себе во времени, т.е. псевдостационарен [1–3]. Координаты поверхностей разрыва: фронта первичной ударной волны, контактной поверхности, вторичной ударной волны, веера волн разрежения и вихря, в различные моменты времени связаны между собой одинаковым коэффициентом пропорциональности.

Численный анализ дифракции ударной волны на плоском выпуклом угле, также показал наличие автомоделности этого процесса [4]. При пренебрежении силами вязкости в задаче отсутствует характерный размер. Вся структура течения остается подобной себе в системе координат $x' = x/at$ и $y' = y/at$, где a – скорость звука в невозмущенном газе. Это позволяет анализировать процесс взаимодействия ударной волны с плоским выпуклым углом в зависимости только от координат. Дифракция ударной волны на угле 90° использовалась для апробирования численных расчетов. В [5] приведены результаты расчетов поля параметров при дифракции ударной волны с числом $M_0 = 1,5$ на угле 90° для плоского автомоделного случая, выполненных 16 авторами из разных стран. Для сравнения там же приведены фотографии процесса дифракции в этих же условиях, полученные теньевым, интерферометрическим и цветным теньевым методами. Расчеты достаточно хорошо воспроизводят структуру картины дифракции и форму ударной волны, полученные в экспериментах [4].

Автомоделный режим дифракции является частным случаем. При дифракции из канала ограниченного сечения в задаче возникает характерный размер. В неавтомоделных случаях форма и интенсивность дифрагированной ударной волны меняются во времени и в пространстве.

Процесс выхода плоской ударной волны из среза ударной трубы с круглым сечением неавтомоделен, форма ударной волны достаточно быстро трансформируется из плоской в сферическую [6, 7]. Скорость движения фронта дифрагированной

волны по оси симметрии и ее амплитуда затухают быстрее, чем в плоском случае [8]. Форма дифрагированной ударной волны зависит от времени. При достаточной длительности процесса истечения ударно-нагретого газа через некоторое время может сформироваться стационарная струя, распределение параметров в которой зависит только от безразмерных координат и числа Маха потока на срезе трубы.

Если сечение трубы не круглое, а, например, квадратное или прямоугольное, дифрагированная ударная волна имеет сложную трехмерную форму [9], изменяющуюся во времени и пространстве. При исследовании дифракции ударной волны на угле 180° (выдвинутая из фланца на 40 мм трубка квадратного сечения) было обнаружено, что на поздних стадиях происходит поворот плоскостей симметрии в направлении стороны и диагонали квадрата. Максимальное расстояние от фронта ударной волны до оси в диагональном направлении на 30% меньше, чем в направлении стороны квадрата [10].

При дифракции ударной волны из осесимметричного канала затухание происходит медленнее, если на выходе трубы устанавливается коаксиальная цилиндрическая вставка [11], что может быть использовано для усиления воздействия ударной волны на обрабатываемые поверхности.

В данной работе проведено сравнение формы фронта дифрагированной ударной волны и ее интенсивности вблизи стенки, расположенной под углом 90° к направлению невозмущенного потока для автомоделного и неавтомоделных случаев.

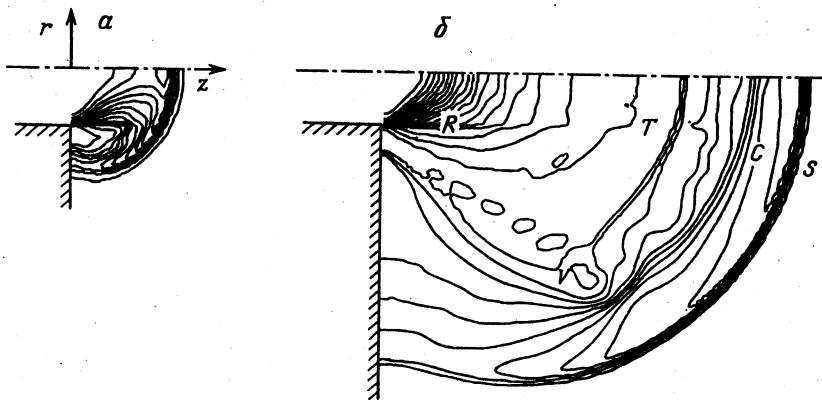
1. Экспериментальная установка и методика проведения опытов. Для исследования трехмерной дифракции ударных волн использовалась установка, состоящая из ударной трубы, соединенной с цилиндрической вакуумной камерой диаметром 80 и длиной 120 см. На торце ударной трубы устанавливался фланец с каналом, располагающимся внутри трубы. Сечение ударной трубы составляло 40×40 мм, вставляемый канал имел длину 100 мм и квадратное сечение 20×20 мм. Торцевой ударной трубы с фланцем, поверхность которого образовывала со стенкой ударной трубы угол 90° , размещался между плоскопараллельными оптическими окнами барокамеры. Путем поворота фланца относительно оси трубы достигалась возможность просвечивания потока за срезом трубы в различных направлениях.

Визуализация картины течения производилась с помощью теневого прибора ИАБ-451 с импульсным источником света длительностью 1 мкс. Теневая картина фиксировалась на высокочувствительную пленку с размером кадра 60×60 мм. Этот размер кадра обеспечивал возможность исследования деталей теневой картины. Включение источника света в нужный момент производилось с помощью блока синхронизации с регулируемой задержкой. Блок включался сигналом с пьезоэлектрического датчика давления, расположенного в стенке ударной трубы вблизи торца. Точность измерения времени составляла 1 мкс. Скорость падающей ударной волны измерялась базовым методом по сигналам двух датчиков давления с точностью 1–2%.

Камера низкого давления ударной трубы и барокамера заполнялись азотом до давления 4 кПа. Давление воздуха или азота в камере высокого давления и глубина нарезки медных диафрагм подбирались таким образом, чтобы в ударной трубе возникла падающая ударная волна с заданным числом Маха M_0 . В каждом эксперименте получался единичный снимок процесса дифракции с выдержкой 1 мкс в заданный момент времени от начала процесса. Путем повторения экспериментов с постоянным числом Маха ударной волны были получены серии фотографий с интервалом 5–10 мкс. Разброс режимов по числам Маха составлял 5%.

В опытах с дифракцией из канала квадратного сечения теневые картины получались для двух направлений просвечивания – вдоль стороны квадрата и вдоль диагонали. Для этого вставленный в ударную трубу фланец с каналом поворачивался относительно оси трубы на угол 45° . Время существования невозмущенного состояния потока во вставленном канале составляло 300 мкс. Размер окна позволял исследовать развитие дифракции во времени до 150 мкс.

Более подробно исследовалась дифракция из канала квадратного сечения при числе Маха падающей ударной волны $M_0 = 2,8\text{--}3,2$. Этот режим был выбран в связи с тем, что при исследовании дифракции ударной волны в плоском случае было найдено, что только при M_0 , близком к трем, форма ударной волны совпадает с рассчитанной по теории Уизема [12] и что



Фиг. 1. Результаты расчета поля плотности в азоте при выходе ударной волны ($M_0 = 4$) из канала круглого сечения для моментов времени $t = 0,2$ (а) и $1,2$ (б) от начала процесса дифракции. Ось z направлена вдоль стенки канала, ось r – под углом 90° к ней. S – фронт дифрагированной ударной волны, C – контактная поверхность, T – фронт волны торможения, R – волна разрежения, V – вихрь

граница изменения типа отражения дифрагированной волны от стенки при угле дифракции 90° проходит вблизи $M_0 = 3$ [12, 13].

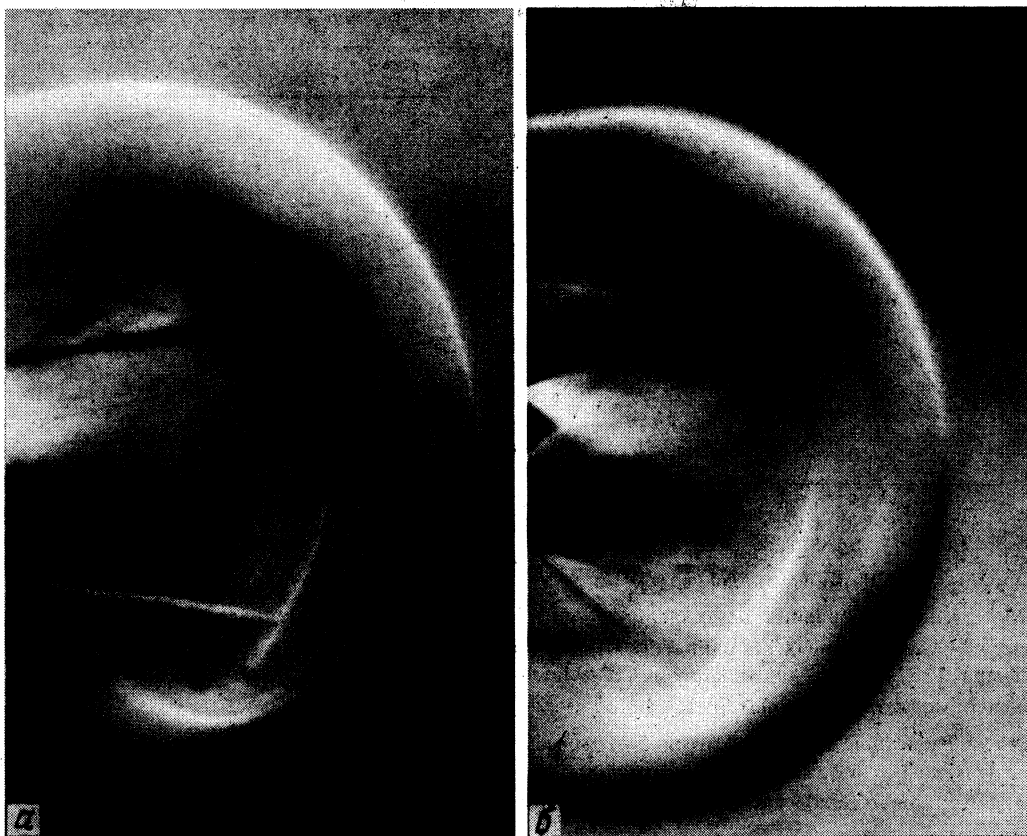
2. Численное моделирование. Численное моделирование задачи о неавтономной дифракции проводилось путем решения уравнений Эйлера методом Годунова второго порядка точности.

На выходе из торца ударной трубы задавались параметры потока, вычисленные для заданного числа Маха падающей ударной волны. Проводился расчет поля течения для идеального газа в пространстве и во времени в зависимости от числа Маха падающей волны и показателя адиабаты истекающего газа. Расчет трехмерной задачи проводился на сетке из прямоугольных ячеек общим числом 36 000. Такая грубая сетка позволяла провести расчет развития во времени поля течения на персональном компьютере "Pentium 60" не более чем за 30 мин.

Результаты расчета представлялись в безразмерных координатах относительно параметров невозмущенного газа в барокамере: плотности ρ_0 и давления p_0 . Расстояния отнесены к диаметру трубы или стороне квадрата d . Безразмерное время t связано с размерным τ соотношением $t = (\tau/d)\sqrt{p_0/\rho_0}$.

На фиг. 1 приведены результаты расчета поля плотности в азоте при выходе ударной волны ($M_0 = 4$) из канала круглого сечения для двух моментов времени $t = 0,2$ и $1,2$ от начала процесса дифракции. Ось z направлена вдоль стенки канала, ось r – под углом 90° к ней. Выведены изоэнтальпии в сечении, проходящем через ось симметрии потока. Видны все основные элементы структуры, исследованные в автономном случае. Из фиг. 1 видно, что процесс неавтономный. Например, отношение координаты фронта дифрагированной ударной волны в момент времени $t = 1,2$ к координате в момент времени $t = 0,2$ по оси z составляет 3,8, тогда как это же отношение для координат по оси r равно 4,77.

Аналогичные результаты получены при расчете трехмерной задачи для дифракции ударной волны на угле 90° из канала квадратного сечения. В расчете фронт волны размыт на несколько ячеек. Максимальная амплитуда давления на фронте уменьшается со временем. В направлении диагонали квадрата профиль давления на стенке аналогичен, но амплитуда максимума в 1,5–2 раза меньше и не меняется со временем по мере продвижения волны.



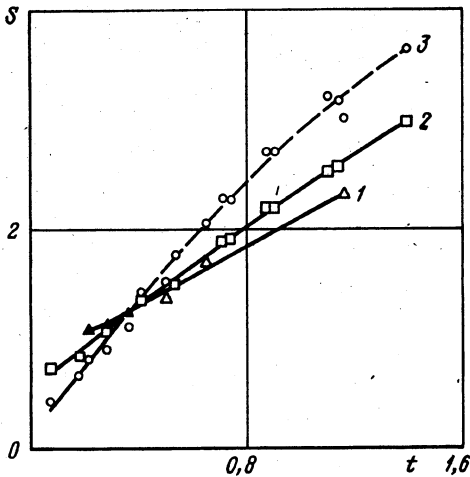
Фиг. 2. Теневые фотографии структуры ударной волны ($M_0 = 3$) при дифракции из канала квадратного сечения. *a, б* – проекции в направлении диагонали и стороны квадрата

3. Результаты экспериментов и сравнение с расчетом. На фиг. 2 приведены теневые фотографии картины течения при дифракции ударной волны из канала квадратного сечения для $M_0 = 3$. Фотографии получены при просвечивании по диагонали и по стороне квадрата. На основе экспериментальных теневых фотографий дифракции ударной волны с числом $M_0 = 3,0$ из канала квадратного сечения были получены графики траекторий фронта ударной волны S по направлению стенки канала и по направлению 90° к ней (пристенная часть дифрагированной волны). Просвечивание производилось в направлении стороны квадрата и в направлении его диагонали. Результаты экспериментов приведены на фиг. 3. Аппроксимационные кривые построены по методу наименьших квадратов. Разброс точек относительно кривых составляет 5%, что лежит в пределах точности эксперимента. Основной вклад в ошибку вносит неточная воспроизводимость режимов по числу Маха падающей ударной волны.

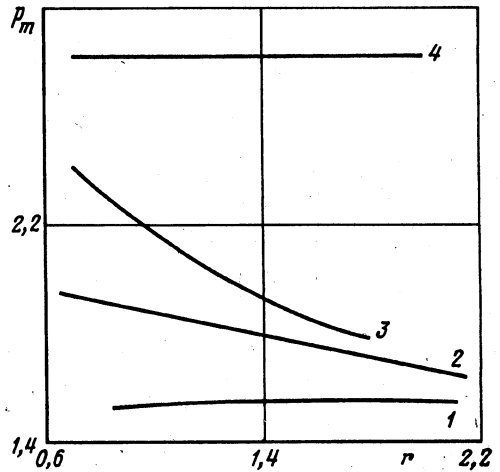
Сравнение траекторий показывает, что отношение координат фронта в различных направлениях по-разному меняется со временем, автомодельность отсутствует.

Для сравнения результатов численного расчета с экспериментом строились расчетные траектории фронта в различных направлениях. Для этого из числового массива, соответствовавшего распределению параметров потока, в заданном сечении в заданный момент времени выбирались координаты фронта волны уплотнения на кривой давления по осям y, z и $x = y$.

Результаты расчета траектории фронта дифрагированной волны вдоль стенки и в направлении оси канала совпадают с экспериментальной кривой, если за фронт волны



Фиг. 3



Фиг. 4

Фиг. 3. Экспериментальные траектории $S(t)$ фронта дифрагированной ударной волны ($M_0 = 3$) по направлению оси канала квадратного сечения (3) и по направлению 90° к ней по стенке в безразмерных координатах. Просвечивание производилось в направлении стороны квадрата (2) и вдоль диагонали (1). Сплошные линии – расчет, штриховая – аппроксимация экспериментальных данных, отмеченных точками на кривой

Фиг. 4. Расчетные значения относительного максимального увеличения давления на стенке p_m в зависимости от безразмерного расстояния r от среза канала в направлении диагонали квадрата (1) и стороны (3). 2, 4 – расчет для осесимметричного и автомодельного случаев

принять место расположения участка кривой с наибольшим градиентом давления. Амплитуда давления в этой точке составляет 0,9 максимального значения. Численные значения координат фронта по оси канала получены только для $t < 0,4$ и совпадают с экспериментом. При $t > 0,4$ фронт ударной волны выходит за рамки расчетного поля.

Числа Маха дифрагированной ударной волны в направлениях стороны канала, его диагонали и оси канала могут быть аппроксимированы формулами

$$M_y = 1,72 - 0,31t; \quad M_{xy} = 1,32; \quad M_z = 2,92 - 1,085t$$

Число Маха пристенной части дифрагированной ударной волны на угле 90° для $M_0 = 3$ в автомодельном случае, полученное экспериментально [3], равно 1,6.

4. Анализ полученных результатов. Ослабление ударной волны по мере продвижения по стенке, расположенной под прямым углом к стенке канала, в осесимметричном случае больше, чем в плоском, и меняется со временем, а в трехмерном случае зависит еще и от направления относительно сторон квадратного сечения. На фиг. 4 приведены расчетные значения относительного максимального увеличения давления p_m на стенке в зависимости от безразмерного расстояния r от среза канала.

В осесимметричном случае давление за пристенной частью дифрагированной волны меняется со временем и остается меньшим, чем в автомодельном случае и чем в направлении стороны квадрата в трехмерном случае. В направлении диагонали квадрата ослабление дифрагированной ударной волны больше, чем в направлении стороны. Расчетная скорость потока в этой области также меньше, чем в направлении стороны квадрата. Как отмечалось ранее [10], дифрагированная ударная волна быстрее продвигается по направлению сторон квадрата, чем по направлению его диагоналей, при дифракции на угле 180° при $M_0 = 4,7$.

Это явление аналогично тому, которое наблюдается при действии взрыва кубического заряда твердого ВВ [14]. Разлет продуктов взрыва происходит перпен-

дикулярно поверхностям заряда, так как расширение их в стороны диагоналей идет с гораздо меньшей скоростью, чем направленное движение за фронтом детонационной волны. Как следствие, в пространстве, примыкающем к углам и ребрам заряда, действие взрыва практически не сказывается и там образуется "защитная зона".

В случае дифракции ударной волны из канала квадратного сечения ослабление ударной волны по диагоналям происходит в результате пересечения волн разрежения, исходящих из углов квадрата. В направлении сторон квадрата дифрагированная волна ослабляется меньше, чем при истечении из трубы круглого сечения, так как на начальном участке расширение потока за ней происходит только по одной оси.

В [13] приведена систематизация имеющихся экспериментальных и численных данных о зависимости типа отражения пристенной части дифрагированной ударной волны от угла поворота стенки и числа Маха падающей ударной волны для автомодельного случая. Результаты расчетов [4] также укладываются в предложенную схему систематизации. В плоском автомодельном случае форма ударной волны не зависит от времени и тип отражения не меняется по мере продвижения волны по стенке.

В осесимметричном случае форма ударной волны меняется со временем, а в трехмерном еще и с направлением в пространстве. Например, при дифракции ударной волны с $M_0 = 4$ на угле 90° в плоском случае возникает тип отражения с изломом (тип K – *kink*) [4], а расчет для осесимметричного случая (фиг. 1) показывает, что переход к этому типу отражения происходит при $M_0 = 4$ только через некоторое время после начала дифракции, на более ранних стадиях осуществляется отражение нормального типа – типа N .

Результаты экспериментов по дифракции ударной волны с числом Маха $M_0 = 3,0$ из канала квадратного сечения показали, что тип отражения меняется во времени и пространстве. На фиг. 3 представлены экспериментальные точки, в которых наблюдались различные типы отражения дифрагированной волны от стенки на угле 90° . При $M_0 = 3$ в направлении диагонали квадрата вначале наблюдается нормальное отражение (тип N), которое затем переходит в отражение с изломом на волне (тип K). В направлении стороны квадрата отражение с изломом наблюдается с самого начала процесса дифракции.

Заключение. Эксперименты и расчеты показали следующие особенности дифракции сильных ударных волн на выпуклом прямом угле при выходе из канала квадратного сечения: в направлении стороны квадрата давление за пристенной частью дифрагированной волны меняется со временем и остается меньшим, чем в автомодельном случае, и большим, чем в осесимметричном случае; в направлении диагонали квадрата имеется область большего ослабления ударной волны. При дифракции ударной волны с числом Маха $M_0 = 3,0$ тип отражения меняется во времени и пространстве. В направлении диагонали квадрата вначале наблюдается нормальное отражение (тип N), которое затем переходит в отражение с изломом на волне (тип K). В направлении стороны квадрата отражение с изломом наблюдается с самого начала процесса дифракции.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 96-02-16170а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jones D.M., Martin P.M.E., Thornhill C.K. A note of the pseudo-stationary flow behind a strong shock diffracted or reflected at a corner // Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. 1951. V. 209. № 1097. P. 238–248.
2. Skews B.W. The shape of a diffracting shock wave // J. Fluid Mech. 1967. V. 29. Pt 2. P. 297–304.
3. Баженова Т.В., Гвоздева Л.Г., Комаров В.С., Сухов Б.Г. Исследование дифракции сильных ударных волн на выпуклых углах // Изв. АН СССР. МЖГ. 1973. № 4. С. 122–134.

4. Hillier R. Computation of shock wave diffraction at a ninety degrees convex edge // Shock Waves. 1991. V. 1. № 2. P. 2. P. 89–98.
5. Takayama K., Inoue O. Shock wave diffraction over a 90 degree sharp corner // Shock Waves. 1991. V. 1. № 4. P. 301–312.
6. Abe A., Takayama K. Shock wave discharged from the open end of a shock tube // Proc. Nat. Symp. on Shock Wave Phenomena, Japan, Sendai, 1989. P. 41–47.
7. Phan K., Stollery J. The effect of suppressors and muzzle brakes on shock wave strength // Proc. 14th Intern. Symp. on Shock Tubes and Shock Waves. Sydney: Shock Tube Symp. Publ., 1983. P. 519–525.
8. Баженова Т.В., Базаров С.Б., Булат О.В., Голуб В.В., Шульмейстер А.М. Экспериментальное и численное исследование ослабления ударных волн при выходе из плоского и осесимметричного каналов // Изв. РАН. МЖГ. 1993. № 4. С. 204–207.
9. Abe A., Watanabe M., Suzuki K. Three dimensional flow structure behind a shock wave discharged from a rectangular cross section shock tube // Shock Waves: Ed. K. Takayama. Proc. 18th Intern. Symp. Shock Waves, Sendai, 1991. Berlin: Springer, 1992. V. 1. P. 209–212.
10. Баженова Т.В., Булат О.В., Голуб В.В., Шульмейстер А.М. Трехмерная дифракция ударной волны // Изв. РАН. МЖГ. 1993. № 1. С. 200–201.
11. Yu Q., Gronig H. Shock waves from an open-ended shock tube with different shapes // Shock Waves. 1996. V. 6. № 5. P. 249–258.
12. Баженова Т.В., Гвоздева Л.Г. Нестационарные взаимодействия ударных волн. М.: Наука, 1977. 274 с.
13. Matsuo K., Aoki T., Kashimura H. Diffraction of a shock wave around a convex corner // Ed. Y.M. Kim. Proc. 17th Intern. Symp. on Shock Waves and Shock Tubes. AIP, 1990. P. 252–257.
14. Покровский Г.И. Взрыв. М.: Недра, 1980. 190 с.

Москва

Поступила в редакцию
10.X.1997