

## ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ТАТБ

В. А. Комрачков, А. Д. Ковтун, Ю. М. Макаров

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров

Методом импульсной рентгенографии исследовался процесс возбуждения детонации в пластифицированном ТАТБ. Определены условия постановки экспериментов, при которых исход ударно-волнового нагружения неоднозначен. Описаны эксперименты, в которых происходит десенсибилизация и сенсibilизация ТАТБ при предварительном нагружении образцов.

В настоящее время имеется много экспериментальных результатов по инициированию детонации взрывчатых веществ (ВВ) ударными волнами. В экспериментах применяются различные методики для измерения параметров, характеризующих процессы, происходящие при ударно-волновом нагружении ВВ. Метод импульсной рентгенографии позволяет регистрировать на рентгеноплёнке теневую картину характерных зон в ВВ, возникающих при ударно-волновом нагружении образцов и различающихся плотностью: невозмущенное ВВ; ударно-сжатое, но непродетонировавшее ВВ; расширяющиеся продукты взрыва; волновые фронты.

### 1. ПОСТАНОВКА ОПЫТОВ

Исследуемый образец пластифицированного ТАТБ (рис. 1,а) представлял собой полцилиндр длиной 45 мм. Он инициировался с плоской поверхности протяженным инициатором из флегматизированного гексогена с размерами 9 × 15 × 45 мм, расположенным вдоль оси образца. Между образцом и инициатором помещали прокладку из оргстекла толщиной 1,2 мм. Стрелкой (здесь и на других) показана проекция линии, по которой инициировался сам инициатор. Все элементы сборки имеют одинаковый размер вдоль направления рентгенографирования. Такая конструкция обеспечивает высокую контрастность и хорошее разрешение регистрируемых волновых фронтов и границ характерных зон в ВВ. Для рентгенографирования использовали импульсную рентгеновскую трубку, позволяющую получать импульс излучения с предельной энергией 0,7 МэВ и длительностью 0,3 мкс.

### 2. НЕОДНОЗНАЧНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ ПЛАСТИФИЦИРОВАННОГО ТАТБ

На результат ударно-волнового воздействия на ВВ определяющее влияние оказывают, с одной стороны, характеристики нагружающего импульса давления (амплитуда, длительность, форма), с другой — свойства самого ВВ (чувствительность, критический диаметр, физическое строение) [1, 2]. В зависимости от характеристик нагружающего импульса при определенных параметрах образца ВВ в результате ударно-волнового нагружения в образце возникает либо ударная волна (УВ), либо детонационная волна (ДВ). Однако, в некоторых условиях может проявиться неоднозначность результатов нагружения, в частности при отклонениях параметров нагружающего устройства (инициатора) в пределах допусков на изготовление. В рентгенографических экспериментах по ударно-волновому нагружению образцов пластифицированного ТАТБ определены некоторые характеристики экспериментальных сборок, при которых исход нагружения не ясен.

На рис. 1,б–г приведены рентгенограммы, полученные в трех экспериментах, на которых зарегистрирована одна и та же фаза процесса. Однако результат ударно-волнового нагружения ТАТБ различен. На рис. 1,б видна УВ, идущая по образцу (зона с равномерным почернением, что говорит об одинаковой плотности вещества в ней), и зона частичного выгорания ВВ. На рис. 1,в обнаруживается резкий скачок почернения в виде дуги, что соответствует фронту распространяющейся ДВ с характерными для ТАТБ участками непрореагировав-

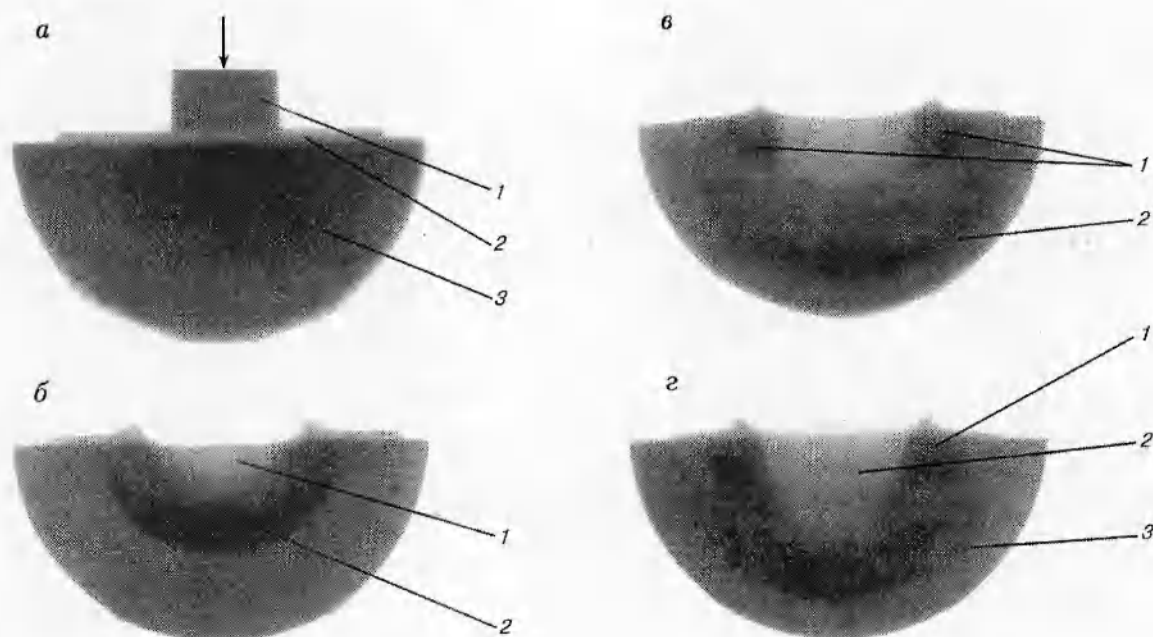


Рис. 1. Ударно-волновое нагружение образцов ТАТБ:

а — исходное состояние ( $t = 0$ ), 1 — инициатор, 2 — прокладка из оргстекла, 3 — образец; б —  $t = 3,4$  мкс, 1 — зона частичного выгорания ВВ, 2 — ударная волна; в —  $t = 3,4$  мкс, 1 — участки непрореагировавшего ВВ, 2 — фронт детонационной волны; г —  $t = 3,4$  мкс, 1 — участки непрореагировавшего ВВ, 2 — зона выгорания ВВ, 3 — формирующийся фронт детонационной волны

шего ВВ. В области перед фронтом ДВ почернение равномерное, соответствующее исходному ВВ. За фронтом ДВ ослабление почернения соответствует профилю плотности продуктов взрыва. На рис. 1,г видна начальная стадия формирования детонации в образце ТАТБ: образовалась довольно большая по сравнению с рис. 1,б зона выгорания ВВ и формируется фронт ДВ. Здесь же наблюдаются и зоны непрореагировавшего ВВ.

Различия геометрических размеров экспериментальных сборок не превышали 0,2 мм, толщины оргстекла —  $\pm 0,05$  мм, плотности образцов — не больше  $0,01$  г/см<sup>3</sup>. Моменты регистрации фаз процесса в экспериментах различаются на  $\approx 0,1$  мкс. При толщине прокладки из оргстекла заведомо большей 1,2 мм возникает УВ, при меньшей — ДВ.

В серии экспериментов определяли ширину инициатора из флегматизированного тэна, при которой исход ударно-волнового нагружения пластифицированного ТАТБ также неоднозначен. На рис. 2,а приведена рентге-

нограмма исходного изображения исследуемого образца, представлявшего собой параллелепипед толщиной 45 мм, на боковых гранях которого находятся протяженные инициаторы прямоугольного сечения  $8 \times 10$  мм из флегматизированного тэна. Из рис. 2,б видно, что в образце при одновременном подрыве инициаторов с одной стороны возникла УВ, а с другой — ДВ. При ширине инициатора больше 8 мм в образце пластифицированного ТАТБ возбуждается детонация, при меньшей ширине — ударная волна.

### 3. ИЗМЕНЕНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПЛАСТИФИЦИРОВАННОГО ТАТБ

Ударно-волновая чувствительность ВВ при двукратном нагружении может изменяться. В случае предварительного нагружения гетерогенного ВВ происходит уменьшение его чувствительности к последующему нагружению — десенсибилизация. Это может вызвать прекращение распространения детонации при

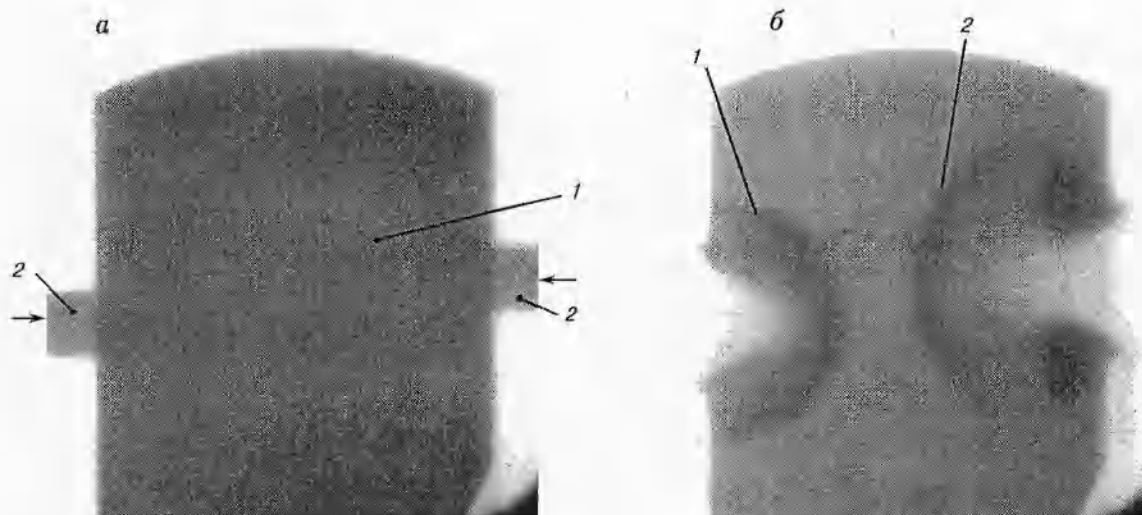


Рис. 2. Результат нагружения при критической ширине инициатора:

*a* —  $t = 0$ , 1 — образец, 2 — инициаторы; *б* —  $t = 2,9$  мкс, 1 — ударная волна, 2 — детонационная

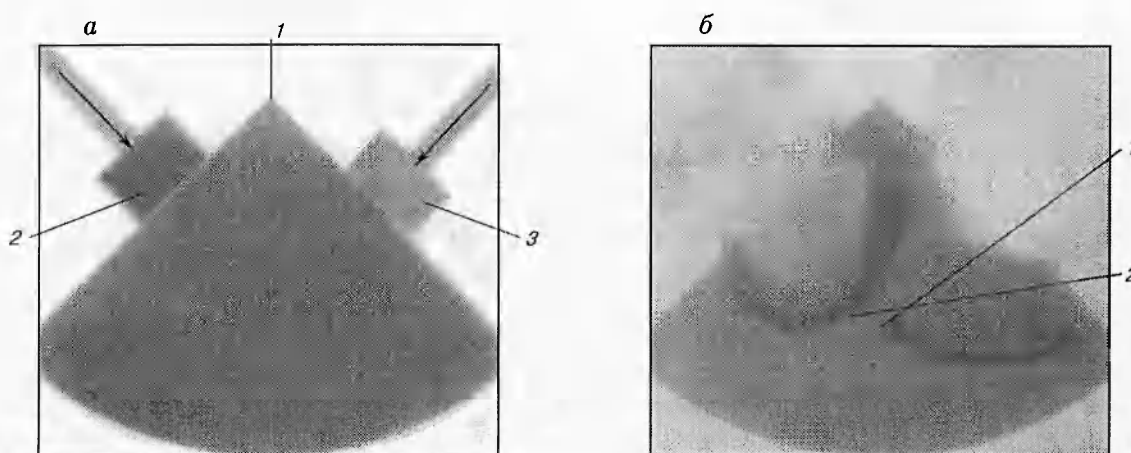


Рис. 3. Результат нагружения при различной мощности инициатора:

*a*:  $t = 0$ , 1 — образец, 2 — инициатор из флегматизированного октогена, 3 — инициатор из флегматизированного тэна; *б*: 1 — фронт ударной волны ( $t_{ув} = 6,2$  мкс), 2 — фронт детонационной волны ( $t_{дв} = 3,1$  мкс)

входе ДВ в область предварительно сжатого ВВ («гашение» детонации) либо замедление или прекращение ударно-волнового инициирования детонации [3–6]. Основные механизмы десенсибилизации ВВ: гомогенизация зарядов (закрытие пор), уменьшение энергосодержания вследствие разложения части ВВ в процессе предварительного сжатия, уменьшение температуры ударного разогрева при повторном сжатии.

В некоторых случаях чувствительность гетерогенного ВВ к повторному нагружению

может превышать чувствительность к однократному сжатию вследствие генерирования или развития имеющихся неоднородностей в ВВ, т. е. в результате его структурной перестройки. Так, отдельные зерна в ходе ударного нагружения образца испытывают сжатие и разгрузку, которая может привести к растрескиванию зерен [1, 2] и увеличению возможных очагов инициирования.

Имеется много экспериментальных результатов по влиянию начальной плотности ВВ на ударно-волновую чувствительность. Об-

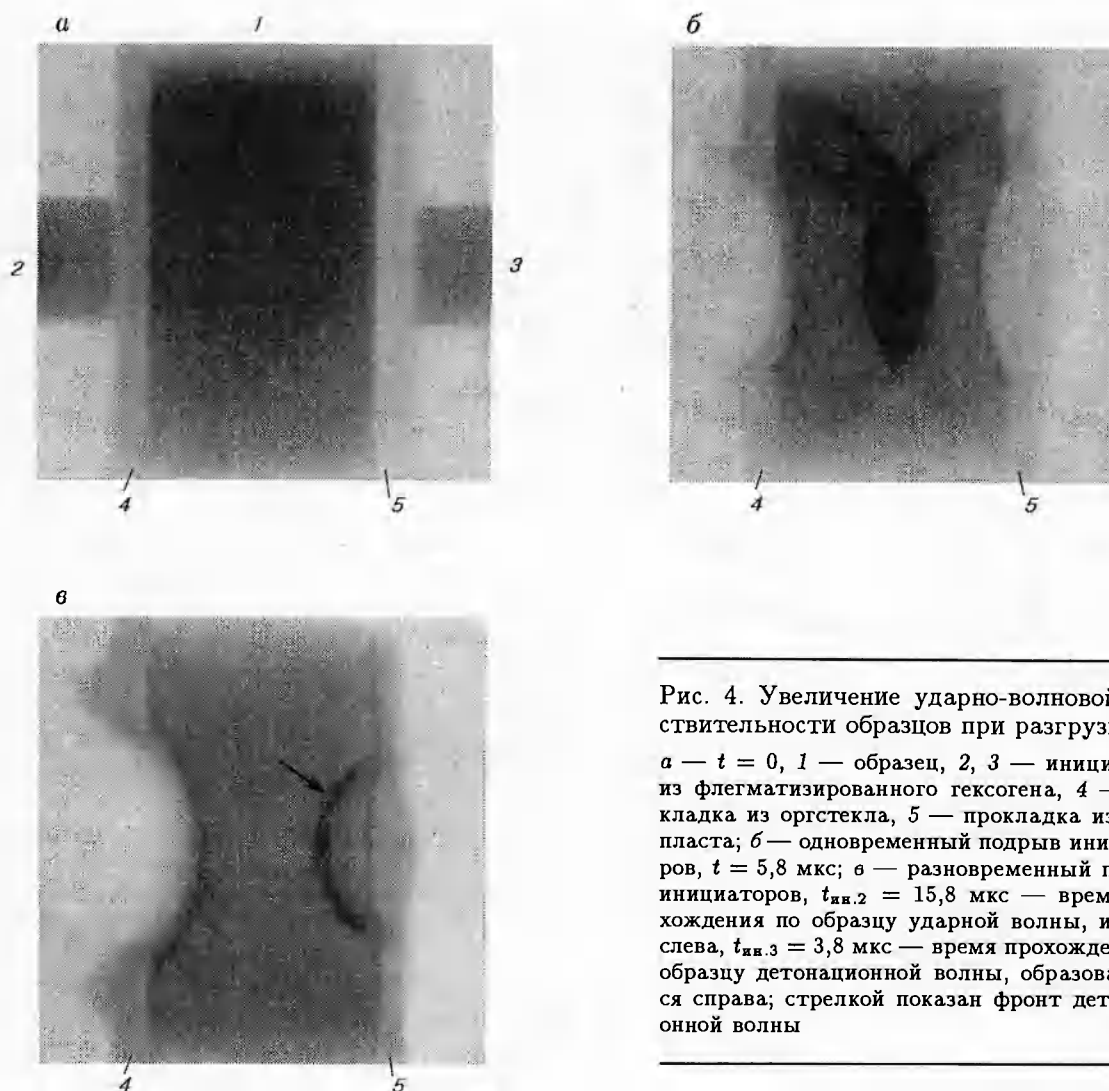


Рис. 4. Увеличение ударно-волновой чувствительности образцов при разгрузке:

а —  $t = 0$ , 1 — образец, 2, 3 — инициаторы из флегматизированного гексогена, 4 — прокладка из оргстекла, 5 — прокладка из пенопласта; б — одновременный подрыв инициаторов,  $t = 5,8$  мкс; в — разновременный подрыв инициаторов,  $t_{н.2} = 15,8$  мкс — время прохождения по образцу ударной волны, идущей слева,  $t_{н.3} = 3,8$  мкс — время прохождения по образцу детонационной волны, образовавшейся справа; стрелкой показан фронт детонационной волны

щая тенденция заключается в ее повышении с уменьшением начальной плотности (ростом пористости). Если образец ВВ подвергнуть ударно-волновому нагружению слабой, не вызывающей в нем детонации УВ, которая при выходе на свободную поверхность либо в специально размещенный разгружающий (малоплотный) слой формирует в образце волну разгрузки, то его чувствительность к повторному ударно-волновому воздействию может повыситься [7, 8]. Таким образом, при обеспечении разгрузки в образце ВВ возможна его сенсibilизация [9].

В экспериментах методом импульсной рентгенографии исследовался процесс двукратного (с промежуточной разгрузкой) ударно-волнового нагружения пластифицированного

ТАТБ. Приведем результаты некоторых экспериментов.

Исходное состояние образца ТАТБ с установленными на нем инициаторами для опыта без разгружающего слоя показано на рентгенограмме рис. 3,а. Исследуемый образец, представляющий собой 1/4 часть цилиндрического заряда толщиной 45 мм, инициировали протяженными инициаторами различной мощности, расположенными на боковых поверхностях образца. Сначала подрывали инициатор из флегматизированного тэна, а через несколько микросекунд — из флегматизированного октогена. Инициатор из флегматизированного октогена возбуждал в образце ДВ, инициатор из флегматизированного тэна — расходящуюся УВ.

На рис. 3,б зарегистрированы зоны, охваченные детонационной и ударной волнами. Видно, что участок фронта ДВ, пройдя по ударно-сжатому ВВ, заметно отстает от той части детонационного фронта, которая распространяется по невозмущенному ВВ. Таким образом, происходит десенсибилизация пластифицированного ТАТБ, и детонация гасится в зоне, охваченной встречной УВ. Результат этого эксперимента хорошо совпадает с результатами двумерного газодинамического расчета, описанного в [6].

Постановка последующих экспериментов обеспечивала образование волны разгрузки в образце пластифицированного ТАТБ после первичного нагружения с помощью размещенного на поверхности образца разгружающего слоя. На рис. 4,а приведена рентгенограмма исследуемого образца, представляющего собой параллелепипед сечением 30 × 60 мм и толщиной 45 мм. На боковых гранях образца устанавливали протяженные инициаторы сечением 15 × 10 мм из флегматизированного гексогена с прокладками из пенопласта и оргстекла. Инициаторы и прокладки выбраны такими, чтобы при подрыве инициаторов не возбуждалась детонация в образце. Это иллюстрирует рентгенограмма рис. 4,б, на которой зарегистрированы две расходящиеся УВ, образовавшиеся при одновременном подрыве инициаторов, и зона их взаимодействия. Детонация в образце не возникает.

В следующем эксперименте подрыв инициаторов проводился в разное время. УВ от инициатора, пройдя через образец, выходила в разгружающий слой. По образцу в обратном направлении начинала распространяться волна разгрузки и через 2 ÷ 3 мкс происходил подрыв инициатора, в образце формировалась детонационная волна.

Из опытов видно, что при разгрузке пластифицированного ТАТБ происходит его десенсибилизация и можно инициировать в образце детонацию ударной волной, не инициирующей неразгруженный ТАТБ.

В результате исследований, проведенных методом импульсной рентгенографии по ударно-волновому нагружению пластифицированного ТАТБ, установлено:

1. Существуют условия нагружения, при которых исход не ясен: может сформироваться ударная волна, или детонационная волна, или переходная стадия процесса.

2. Ударно-волновое нагружение ТАТБ

слабой ударной волны, не вызывающей детонации, десенсибилизирует ТАТБ, так что идущая по образцу детонационная волна гасится в зоне охваченной встречной ударной волной.

3. При разгрузке пластифицированного ТАТБ после первичного нагружения происходит его десенсибилизация, и повторное нагружение ТАТБ слабой ударной волной, не вызывающей детонации неразгруженного ТАТБ, формирует в нем детонационную волну.

В заключение заметим, что факт десенсибилизации пластифицированного ТАТБ в рентгенографических экспериментах зарегистрирован впервые. Необходимо отметить перспективность использования метода импульсной рентгенографии для исследования процессов инициирования ВВ. Возможность визуализации любой стадии процесса, особенно после ударно-волнового воздействия на ВВ, когда для других методик возникает проблема живучести регистрирующих элементов, является преимуществом метода. Двумерные изображения волновых процессов при возбуждении детонации в ВВ используются для построения модели детонации и разработки методов численного моделирования экспериментов, а также при разработке конструкций инициаторов, в частности для оптимизации их формы и габаритов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев С. Г., Бойко М. М., Соловьев В. С. Иницирование ВВ при ступенчатом нагружении // Физика горения и взрыва. 1976. Т. 12, № 1. С. 117–120.
2. Андреев С. Г., Бойко М. М., Лазарев В. В. и др. Влияние реологических свойств на избирательную чувствительность ВВ к форме импульса ударно-волнового воздействия // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 3. С. 80–87.
3. Campbell A. W., Davis W. C., et al. Shock initiation of solid explosives // Phys. Fluids. 1961. V. 4, N 4. P. 511–521.
4. Бордзиловский С. А., Караханов С. М. Десенсибилизация флегматизированного гексогена и октогена последовательными ударными волнами // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 2. С. 114–124.
5. Кобылкин И. Ф., Носенко Н. И., Соловьев В. С. Экспериментальное исследование изменения ударно-волновой чувствительности зарядов ВВ при предварительном нагружении их слабыми ударными волнами // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 6. С. 70–73.

6. Морозов В. Г., Карпенко И. И., Куратов С. Е. и др. Теоретическое обоснование феноменологической модели ударно-волновой чувствительности гетерогенного ВВ на основе ТАТБ с учетом одно- и двукратного ударно-волнового нагружения, в том числе с промежуточной разгрузкой // Хим. физика. 1995. Т. 14, № 3. С. 32-39.
7. Ежов А. В., Ковтун А. Д., Комрачков В. А. и др. Рентгенографические исследования процессов инициирования и развития детонации во взрывчатом веществе // Доклад на Симпозиуме по энергетическим материалам. Ливермор, США, 1994.
8. Плаксин И. Е., Шутов В. И., Герасимов В. М. и др. Переходные процессы взрывчатого превращения в ВВ на основе ТАТБ: развитие и затухание взрыва при воздействиях сталкивающимися волнами плоской геометрии — однократными и двукратными с промежуточной разгрузкой // Там же.
9. Патент 2090830 РФ, С1. Способ формирования детонационной волны в заряде взрывчатого вещества / Ковтун А. Д., Комрачков В. А., Макаров Ю. М. 1997.

*Поступила в редакцию 5/XI 1996 г.,  
в окончательном варианте — 6/VII 1998 г.*

---