



РАСЧЕТ НА УСТАЛОСТЬ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО НАПРЯЖЕНИЯМ В ЗОНЕ КОНЦЕНТРАТОРА

А. Ф. ХОББАХЕР (Ун-т прикладных наук, г. Вильгельмсхафен, Германия)

Конструкции под воздействием переменных нагрузок подвержены усталостному разрушению. Помимо классических методик испытаний элементов на усталость, разработаны методы расчетной оценки. Наиболее часто применяется метод номинальных напряжений, который базируется на расчете средних напряжений в исследуемом сечении. Более широкие возможности для разработки универсальных методик дает метод конечных элементов. Новый метод анализа с использованием эффективного концентратора относится непосредственно к методикам инициации усталостной трещины в концентраторе. На основании теории Нойбера и результатов свыше 80 серий усталостных испытаний более 1000 образцов установлено, что вместо надреза в шве можно использовать фиктивное нагружение соответствующего радиуса. Для стали этот радиус составляет 1 мм. Данный метод включен в рекомендации МИС по расчету усталости.

Ключевые слова: сварные конструкции, конструкционные стали, сварное соединение, усталость, сталь, напряжения в концентраторе

Конструкции под воздействием переменных нагрузок подвержены усталостному разрушению. На этот процесс влияет ряд параметров, например, уровень и вид нагрузки, частота и последовательность нагружения, свойства материала, состояние поверхности, остаточные напряжения, геометрия, внутренние дефекты и пр. Из-за преобладающего влияния концентратора в шве и остаточных напряжений усталостные аспекты доминируют при расчете и анализе большинства сварных соединений. Помимо классических методик испытаний образцов, разработано несколько других методов расчета оценки на усталостные разрушения.

Наиболее часто применяется метод расчета по номинальным напряжениям, который базируется на определении средних напряжений в исследуемом сечении. Допустимые напряжения для каждого конструктивного элемента сведены в табл. 1. Однако с помощью этого метода невозможно выполнить расчетную оценку сопротивления усталости конструктивных элементов новой формы и размеров.

Другая проблема заключается в установлении самого понятия номинальное напряжение, до сих пор не имеющего четкого определения (рис. 1, 2).

Широкие возможности для разработки более универсальных методов расчетов на усталость дает метод конечных элементов. В настоящее время

важное значение приобрели два метода. Первый из них основан на исследованиях механики разрушения и требует сложных дорогостоящих расчетов. Второй — базируется на анализе напряжений конструкции и связан с некоторой произвольностью процедуры экстраполяции напряжений в критическую точку. Главным преимуществом метода конечных элементов является простота его применения.

Метод напряжения конструкции (рис. 3) позволяет рассчитать уровень напряжения по границе наружной поверхности шва, но он неприемлем для оценки влияния изменения как профиля шва, так и его корня. С помощью этого метода невозможно решить проблемы, связанные с неполным проплавлением или отклонением от заданного зазора между кромок.

Метод напряжения в эффективном концентраторе. Новый метод анализа с использованием эффективного концентратора относится к методикам инициации усталостной трещины в концентраторе, т. е. в корне шва или по границе его наружной поверхности. Непосредственное моделирование геометрии надреза методом конечных элементов невозможно из-за неправильной формы шва. Эту проблему удалось решить путем введения эффективного радиуса закругления в концентраторе, т. е. эффективного концентратора (рис. 4), который можно моделировать методом конечных элементов.

Таблица 1. Различные методы оценки усталостных напряжений

Учитываемые нагрузки	Процедура оценки
Усилия на элементы	Испытание элемента
Среднее напряжение, рассчитываемое по упрощенным формулам	Метод номинальных напряжений
Напряжения по границе наружной поверхности шва при изгибе пластин и оболочек	Метод аппроксимации поверхностных напряжений
Полное напряжение в концентраторе	Метод напряжения в эффективном концентраторе
Интенсивность напряжений в вершине трещины	Методы механики разрушения

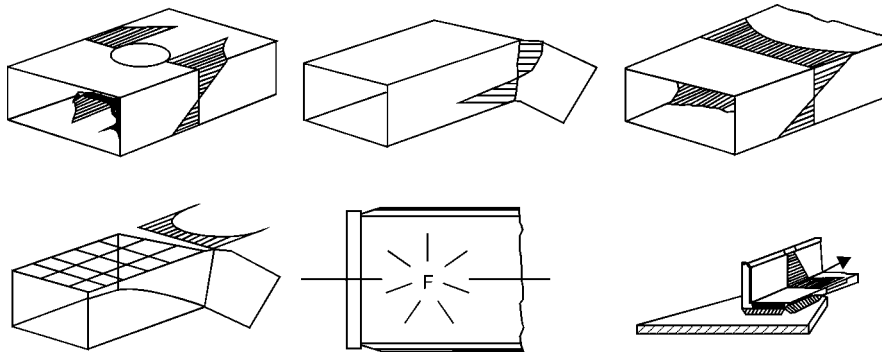


Рис. 1. Иллюстрация номинальных напряжений по Ниэми

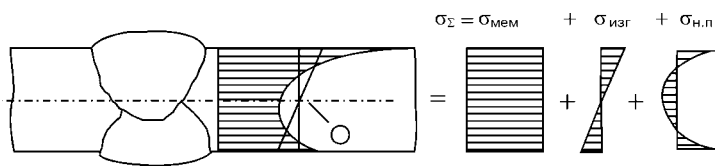


Рис. 2. Схема разложения напряжения в концентраторе на три составляющие

Определение универсального радиуса эффективного концентратора является дополнением к теории надрезов Нойбера. Помимо теоретических дискуссий, корректность этого подхода была подтверждена результатами свыше 80 серий усталостных испытаний более 1000 образцов сварных соединений различной формы и размеров. График распре-

деления вероятностей результатов показал, что можно найти совместный радиус эффективного концентратора (для стали он составляет 1 мм), когда все результаты принадлежат единой статистической совокупности [1].

Первыми нормами на расчет усталости, в которые включен этот метод, были рекомендации МИС [2, 3]. В них для оценки эффективного концентратора значение предела усталости установлено на уровне 225 МПа, т. е. при этом $2 \cdot 10^6$ циклов нагружений с 95%-й вероятностью соответствует средней 95%-й доверительной вероятности долговечности. При практической оценке оно равно среднему значению минус два стандартных отклонения. Следующими нормами, в которые включен метод, стали рекомендации Немецкой ассоциации машиностроительных компаний [4]. С помощью этого нового метода можно выводить параметрические формулы расчета на усталость с учетом вариантов размеров типа соединения, например крестообразных несущих соединений. Пример параметрических формул для расчета крестообразных соединений с разными зазорами в корне шва и для стыковых соединений приведен в работе [4].

Примеры применения. Основная несущая конструкция стальной башни, находящаяся под сильной ветровой нагрузкой, представляет собой коническую трубу высотой 60 м, диаметром 3,5 м в нижней части и 1,5 м в верхней. Внутри башня разделена несколькими перекрытиями, доступными со стороны внутренних лестниц. Для обеспечения доступа и инспекции предусмотрено несколько дверей. Проемы упрочнены дверными коробками (сечение боковых элементов) размером 20×200 мм, которые по проекту должны привариваться к листовой обшивке башни встык швами с К-образной разделкой с полным проплавлением. По такому проекту построен целый ряд башен. Через некоторое время после начала эксплуатации в нескольких башнях обнаружены трещины (рис. 5). Очевидно, разрушения вызваны уста-

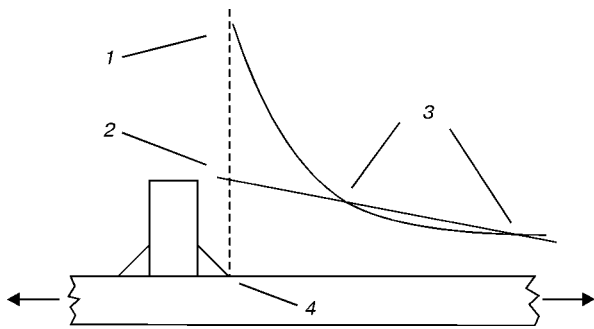


Рис. 3. Схема метода напряжения конструкции: 1 — расчетное общее; 2 — геометрическое; 3 — точки измерения; 4 — критическая точка

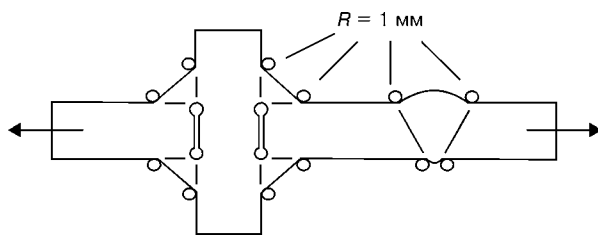


Рис. 4. Концепция радиусов эффективного концентратора

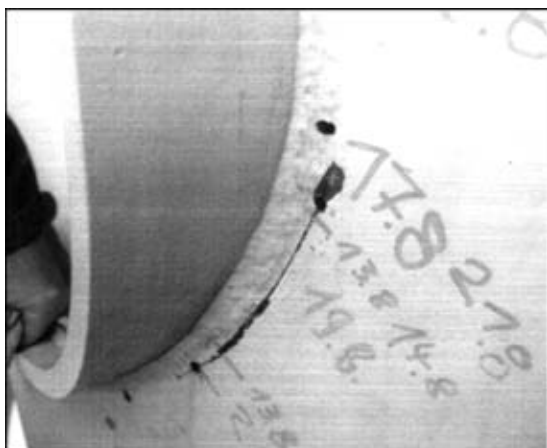


Рис. 5. Трещины в усилении дверного проема



Таблица 2. Различные способы выполнения швов и их типы по нормам (DIN 4133)

Тип 5 (стыковой шов)	Тип 6 (непровар)	Тип 8 (зазор в корне шва)
Стыковой шов со скосом кромки с двусторонними галтелями без зазора в корне	Шов со скосом и притуплением с двусторонними галтелями с незаваренным зазором глубиной 2 мм	Угловой шов с двухгалтельным зазором в корне
Шов, указанный на чертеже	Шов, выполненный в действительности	Наихудший вариант шва

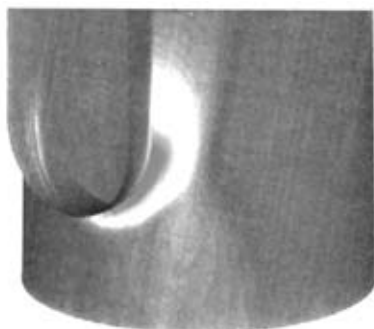


Рис. 6. Область высоких напряжений

лостью. Возникла необходимость в контроле состояния дверных коробок и башни, а также в выяснении причины разрушения. Далее следовало разработать предложения по ремонту. Работы по сварке стальной конструкции выполнял субподрядчик. Таким образом, необходимо было установить финансовую ответственность за компенсацию убытков.

После обнаружения первых трещин сварные швы зачистили строжкой для дальнейшего исследования. Однако трещина развивалась изнутри башни наружу в области высоких напряжений (рис. 6). Она начиналась от границы наружной поверхности шва, соединяющего лист обшивки с дверной коробкой, и затем распространялась по обшивке. Кроме того, ультразвуковая дефектоскопия зафиксировала наличие непроваров во всех

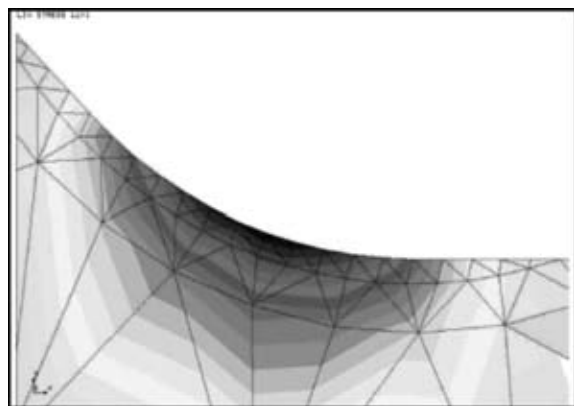


Рис. 7. Модель для построения сеток по методу конечных элементов

остальных стальных башнях, построенных из конструкций одной серийной партии. Состояние башни иллюстрируют рисунки из табл. 2. Непровар шел от линии на уровне внутренней поверхности обшивки башни наружу на глубину 2 мм (табл. 2, тип 6).

Полный анализ методом конечных элементов показал области повышенных напряжений в башне (рис. 7), расположенные под углом 45° к ее оси, что совпадало с местонахождением обнаруженной трещины.

Для данного типа сварных соединений нормами предусмотрены три варианта. Во-первых, шов типа 5 (табл. 2) — К-образный стыковый шов с полным проваром (рис. 8). Начало разрушения в этом типе соединения предполагается по границе наружной поверхности шва. Во-вторых, шов типа 6 (табл. 2) — К-образный стыковый шов с неполным проваром (максимальный непровар 2 мм). Здесь также разрушение ожидается по границе, но в этом случае допустимые напряжения ниже. В-третьих, шов типа 8 (табл. 2) — двухгалтельный угловой шов с зазором в корне по проекту. Предполагается, что разрушение начнется с корня шва.

Шов с неполным проваром можно было бы классифицировать как шов типа 6 (табл. 2), но тут зафиксировано несколько несоответствий. Нормами предусмотрен зазор в середине листа, тогда как в данном случае зазор асимметричен центральной линии листа. Более того, нормы касаются полного изменения размерных параметров. Естественно возникает вопрос: снижает ли этот дефект сопротивления усталости данного сварного соединения по сравнению со стыковым К-образным швом с полным проваром?

Единственной существующей методикой оценки сопротивления усталости, позволяющей ответить на этот вопрос, является методика с использованием эффективного концентратора. Для анализа методом конечных элементов была разработана плоская модель шва (рис. 7). Все переходные

Таблица 3. Результаты анализа

Участок анализа	ККН	FAT (МПа)
Граница наружной поверхности шва	2,55	88
Корень шва	1,6	140

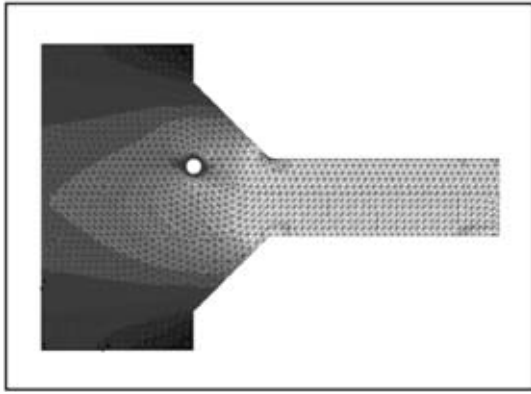


Рис. 8. Полная модель соединения

зоны шва, наружная граница или корень моделировались с эффективным радиусом 1 мм. Результаты представлены на рис. 8, 9.

Коэффициент концентрации напряжения (ККН) k в зависимости от напряжения в листе приведен в табл. 3. Здесь также рассчитаны пределы усталости FAT 225 (File Allocation Table — таблица размещения файлов) путем деления напряжения в концентраторе на ККН исследуемого концентратора: $FAT_{ном.н} = 225/k$.

Результаты показали, что разрушения от зоны корня шва не может быть. Другой анализ шва без дефектов показал, что непровар не оказывает влияния на сопротивление усталости по границе наружной поверхности шва.

На сопротивление усталости конструкции могут воздействовать многие факторы. В данном случае нужно определить причины повреждений и меру ответственности за них конструктора и субподрядчика. Как указано ранее, непредвиденный зазор, образовавшийся вследствие непровара, не влияет на сопротивление усталости соединения. Это производственный дефект, а недобросовестный контроль можно отнести на счет субподрядчика, выполнявшего сварочные работы. С другой стороны, конструктор отвечает за правильный расчет нагрузок, включая влияние динамической составляющей и такое проектирование, при котором учтено влияние всех составляющих напряжения. Таким образом, ответственным за материальные убытки, связанные с этими разрушениями, является конструктор.

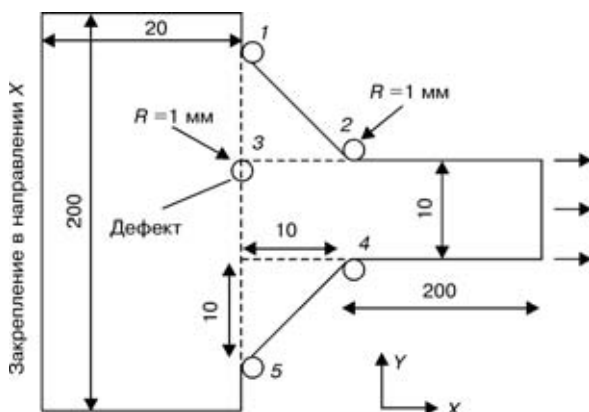


Рис. 9. Надрез на границе наружной поверхности шва

Таблица 4. Предел усталости по FAT (МПа) для метода номинальных напряжений ($t = 35$ мм)

Расстояние d , мм	FAT для надреза в корне шва
2,0	80
2,5	67
3,0	65
5,0	62
6,0	60

Ремонт путем зачистки и устранения непровара бесполезен, поскольку усталостную прочность по границе шва таким способом повысить нельзя. Для определения требуемой усталостной прочности сварного соединения нужен повторный тщательный анализ всех параметров нагрузки. Затем можно использовать метод напряжения в эффективном концентраторе для расчета соединения с необходимой прочностью. Процесс ремонта сводился к выполнению таких операций, как увеличение толщины шва, уменьшение угла в зоне перехода по границе наружной поверхности шва и традиционная зачистка швов с зашлифовкой.

Для конкретного элемента конструкции требовалось определить уровень сопротивления усталости. В данном случае это было одностороннее тавровое соединение с нагруженным односторонним швом, выполненным в узкий зазор с несъемной подкладной планкой (рис. 10). Зарождение трещины предполагалось в двух местах: в зоне концентратора в корне шва, непосредственно прилегающего к поперечной пластине, и в зоне концентратора между подкладной планкой и пластиной, находящейся под напряжением. Предварительные расчеты показали, что интерес представляет только надрез в корне шва. В модели для анализа методом конечных элементов расстояние d между двумя концентраторами было изменено. Толщина стенки оставалась постоянной — $t = 35$ мм. С учетом этого рассчитан ККН. Затем с помощью диаграммы напряжение–долговечность Веллера по таблице FAT 225 определено количество циклов долговечности. Класс элемента по FAT можно вводить в каталог элементов для метода номинального напряжения (табл. 4).

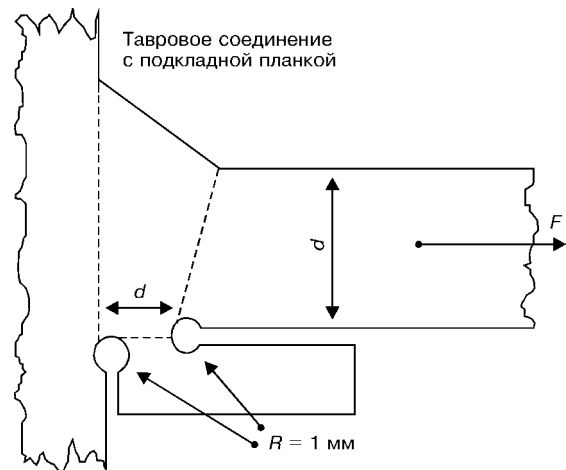


Рис. 10. Элемент с изменением параметров

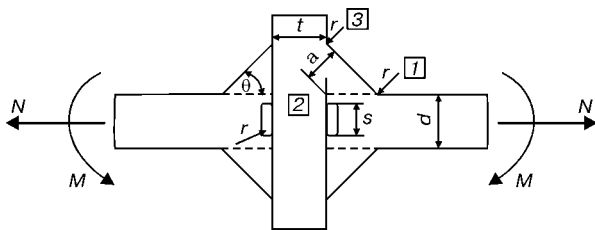


Рис. 11. Размеры крестообразного типа соединений

Эти значения не включают допуски на линейную или угловую деформацию. Их нужно учитывать дополнительно. Сравнение с пределами усталости крестообразных соединений, данным в рекомендациях МИС по расчету усталости, показывает, что результаты хорошо укладываются в эту схему.

Влияние изменений параметров сварных соединений можно анализировать с помощью метода напряжения в эффективном концентраторе. В работе [3] детально разработана полная параметризация размеров на примере крестообразного соединения. Измененные размеры показаны на рис. 11. Сложная параметрическая формула была упрощена для угловых швов с зазором в корне шва, равным толщине стенки ($s = t$), отсутствия изгибающей нагрузки и радиусов концентратора или переходной зоны шва, равных 1 ($r = 1$ мм). При таких условиях сложная параметрическая формула упрощается до следующего уравнения:

$$k = 0,947 + [1 + 0,770 \left(\frac{a}{t}\right)^{-1,054} + 1,307 t^{0,093} - 2,315 \sin^{-0,029} \theta] \sin^{0,410} \theta t^{0,370},$$

где a — толщина шва; θ — угол разделки кромок; t — толщина стенки в диапазоне следующих значений: $a/t = 0,3...1,0$; $\theta = 0,26...1,57$ рад $\equiv 15...90^\circ$; $t/r = 4...200$.

FAT предельной усталости (рис. 12), касающиеся толщины шва для метода номинальных напряжений, можно рассчитать по следующему уравнению:

$$FAT_{ном.н} = (1,22:225) / 2k(a/t).$$

В соответствии с рекомендациями МИС для коэффициента асимметрии цикла $R_\sigma = 0$ при общих низких остаточных напряжениях был применен показатель 1,2.

Structures under alternating loads were subjected to a fatigue fracture. Except the classical methods of testing elements for fatigue, the methods of a calculated evaluation are developed. The method of nominal stresses, based on calculation of average stresses in section examined, is most often used. The method of finite elements provided the wider opportunities for the development of universal procedures. The new method of analysis using an effective notch is related directly to the methods of initiating of a fatigue crack in the notch. It was established on the basis of Neuber theory and more than 80 series of fatigue tests of more than 1000 samples, that instead of a notch in weld, it is possible to use a fictitious loading of an appropriate radius. This radius for steel is 1 mm. This method was included into IIW recommendations for fatigue calculation and, thus, the feasibility of its practical application in conformity to standards has appeared.

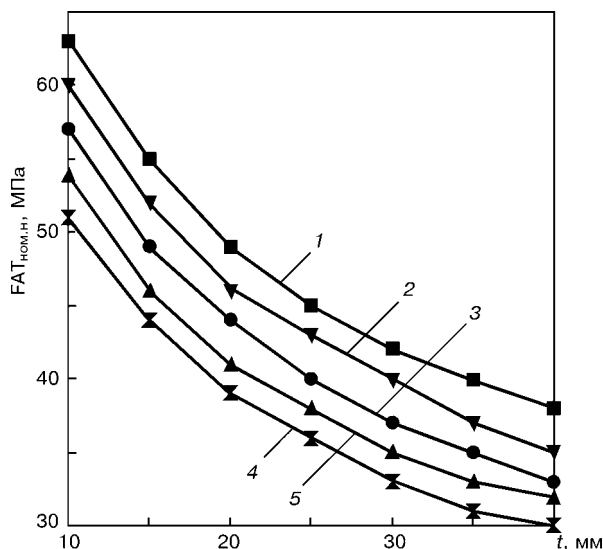


Рис. 12. Расчетные значения пределов усталости крестообразного соединения в зависимости от толщины стенки: 1 — $a/t = 0,3$; 2 — 0,4; 3 — 0,5; 4 — 0,6; 5 — 0,7

Выводы

1. Метод расчета с использованием напряжения в эффективном концентраторе является новым и универсальным способом оценки усталостной прочности сварных соединений, но требует повышенных затрат на расчетный анализ. Этот метод крайне необходим для расчета прочности в «опасных» точках конструкции.

2. Накопление опыта использования этого метода будет способствовать расширению областей его применения, в частности для алюминия. Можно также ожидать новых рекомендаций МИС по расчету усталости.

1. *Olivier R., Köttgen V. B., Seeger T.* Schweißverbindungen I — Vorhaben Nr. 105 — Schwingfestigkeitsnachweis für Schweißverbindungen auf Grundlage örtlicher Beanspruchungen. Forschungsheft, Forschungskuratorium Maschinenbau e. V., Heft 143, VDMA Frankfurt, 1989.
2. *Hobbacher A. et al.* Fatigue design of welded joints and components — International Institute of Welding. Abington publ., Cambridge UK, 1996.
3. *Haenel B., Haibach E., Seeger T., Wirthgen G., Zenner H.* Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenteile — Richtlinie des Forschungskuratoriums Maschinenbau. Frankfurt: VDMA-Verlag, 1998.
4. *Anthes R. J., Köttgen V. B., Seeger T.* Kerbformzahlen von Stumpfstoßen und Doppel-T-Stößen // Schweißen und Schneiden, 1993. — 12.

Поступила в редакцию 25.04.2003