

УДК 539.389.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА БАУШИНГЕРА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ*

С. А. Новиков, В. А. Пушков, В. А. Сеницын, П. А. Цой

ВНИИ экспериментальной физики,
607200 Арзамас-16

При определении несущей способности элементов конструкций, работающих в условиях малоцикловых нагрузок, необходимо знать меру эффекта Баушингера (ЭБ), который как одно из проявлений деформационной анизотропии материалов учитывается также в ряде современных моделей их механического поведения, в частности в модели [1], основанной на теории малых упругопластических деформаций Ильюшина, и в модели термовязкопластичности [2]. В моделях мера ЭБ служит одной из основных скалярных функций, определяющих конфигурацию и положение центра мгновенной поверхности текучести.

В качестве меры ЭБ для процессов растяжение — сжатие ($\chi_\sigma = -1 \rightarrow +1$) или сжатие — растяжение ($\chi_\sigma = +1 \rightarrow -1$) часто принимается величина

$$\delta = \begin{cases} \sigma'_{-T}/\sigma_{+T}, & \chi_\sigma = -1 \rightarrow +1, \\ \sigma'_{+T}/\sigma_{-T}, & \chi_\sigma = +1 \rightarrow -1. \end{cases}$$

Здесь σ_{+T}, σ_{-T} — «мгновенные» пределы текучести при начальном нагружении, соответствующие остаточной деформации ϵ_p (рис. 1); $\sigma'_{-T}, \sigma'_{+T}$ — «мгновенные» пределы текучести при последующем знакопеременном нагружении (определяются при заданном допуске на остаточную деформацию); χ_σ — параметр Лоде, характеризующий вид напряженного состояния.

Определено [1, 3], что ЭБ для сплавов и металлов с примесями существенно зависит от предварительной пластической деформации в предшествующей фазе нагружения. При этом значение δ с ростом ϵ_p уменьшается и остается практически неизменным при $\epsilon_p \approx 2 \div 4 \%$. В общем же случае мера ЭБ является функцией скорости деформации $\dot{\epsilon}$, температуры T , а также ϵ_p и χ_σ : $\delta = \delta(\dot{\epsilon}, T, \epsilon_p, \chi_\sigma)$.

В расчетах при отсутствии данных об ЭБ полагают, что выполняется классический принцип Мазинга (например, для процесса растяжение — сжатие) $\sigma_{+T} + |\sigma'_{-T}| = 2\sigma_{+T}^0$ (σ_{+T}^0 — предел текучести при начальном растяжении). Однако для большинства материалов это равенство не соблюдается, и тогда используют обобщенный принцип Мазинга $\sigma_{+T} + |\sigma'_{-T}| = k_\sigma \sigma_{+T}^0$, где k_σ определяют через меру ЭБ: $k_\sigma = (\sigma_{+T} + |\sigma'_{-T}|) / \sigma_{+T}^0 = (1 + \delta) \sigma_{+T} / \sigma_{+T}^0$.

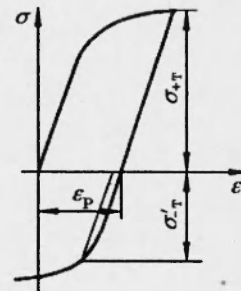


Рис. 1

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 93-01-16504).

В [1, 4, 5] показано, что принцип Мазинга в сравнении с другими известными способами построения повторных диаграмм деформирования по исходной (например, способы [3, 6]) наиболее полно отражает физическую сущность процесса повторного деформирования.

Хотя первые исследования были начаты еще в конце прошлого века [7], ЭБ в материалах изучен пока недостаточно и только при статическом нагружении. В то же время знакопеременные малоцикловые нагрузки имеют преимущественно динамический характер. Такое состояние вопроса главным образом связано со сложностью реализации знакопеременного динамического нагружения образца в одном опыте.

В [8], очевидно, впервые сделана удачная попытка экспериментально определения ЭБ при динамическом нагружении.

Настоящая работа посвящена методике исследования динамического ЭБ в конструкционных материалах, разработанной на основе метода [8], а также первым результатам, полученным на стали Ст.3.

1. Основные теоретические положения методики. Для осуществления динамического малоциклового знакопеременного нагружения образца в [8] предлагается использовать трехступенчатый стержень, в котором при ударе бойка об одну из ступеней происходит процесс распространения, отражения и трансформации волн напряжений.

Согласно теории распространения упругих волн напряжений, волна напряжений $\sigma_1(x - c_1t)$ при падении на границу раздела сред с разными акустическими жесткостями $A_i\rho_i c_i$ ($i = 1, 2$) распадается на проходящую $\sigma_T(x - c_2t)$ и отраженную $\sigma_R(x - c_1t)$ волны. При этом верны соотношения

$$\begin{aligned} \sigma_T/\sigma_1 &= 2A_1\rho_2c_2/(A_1\rho_1c_1 + A_2\rho_2c_2), \\ \sigma_R/\sigma_1 &= (A_2\rho_2c_2 - A_1\rho_1c_1)/(A_1\rho_1c_1 + A_2\rho_2c_2), \end{aligned} \quad (1.1)$$

где A_i, ρ_i, c_i ($i = 1, 2$) — площадь поперечного сечения, плотность, скорость звука сред 1 и 2 ($c_i = \sqrt{E_i/\rho_i}$, E_i — модули упругости сред).

На рис. 2 представлена картина распространения и взаимодействия волн напряжений в трехступенчатом стержне в лагранжевых координатах (x, t) при ударе трубчатым бойком со скоростью V_0 по малому уступу Б-Б стержня. Здесь A_0, A_1, A_2, A_3 — площади поперечных сечений бойка участков 1-3 стержня. Предполагается, что длина трубчатого бойка и длины участков 2 и 3 стержня одинаковы и что при ударе бойка по уступу Б-Б на участках 1 и 2 стержня возникают прямоугольные импульсы напряжений. На рис. 2 показаны также импульсы напряжений, которые

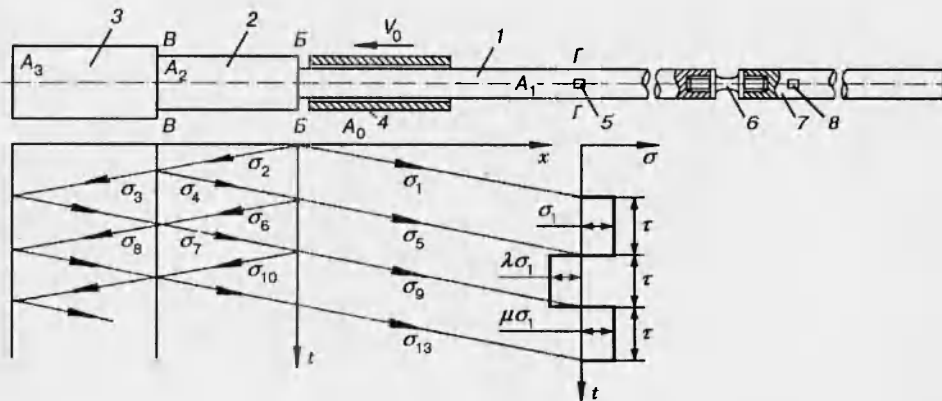


Рис. 2

возникают в сечении $\Gamma-\Gamma$ участка 1 стержня с течением времени. Проходящие и отраженные волны напряжений, образующиеся на границах участков, подчиняются соотношениям (1.1).

Пусть $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2$ — волны напряжений, возникающие при ударе в бойке и на участках 1 и 2 стержня соответственно. Покажем, что на участке 1 после прохождения первичной волны напряжения σ_1 далее следуют знакопеременные волны напряжений σ_5 и σ_9 , которые можно выразить через σ_1 .

Из условий непрерывности силы и массовой скорости на границе $B-B$ получаем соотношение [8]

$$A_0\sigma_0 + A_1\sigma_1 = A_2\sigma_2, \quad V_0 - \sigma_0/\rho c = -\sigma_1/\rho c = \sigma_2/\rho c. \quad (1.2)$$

Здесь ρ, c — плотность и скорость звука в бойке и стержне (предполагается, что последние изготовлены из одного материала).

Аналогично для границы $B-B$ участков 2 и 3 будем иметь уравнения

$$A_2(\sigma_2 + \sigma_4) = A_3\sigma_3, \quad (\sigma_2 - \sigma_4)/\rho c = \sigma_3/\rho c, \quad (1.3)$$

где σ_3, σ_4 — проходящая и отраженная волны напряжений, возникающие при падении волны напряжения σ_2 на границу $B-B$.

Из (1.2) и (1.3) можно определить амплитуды $\sigma_0, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ через $V_0, A_0, A_1, A_2, A_3, \rho c, \sigma_1$ причем $\sigma_1 = \rho c V_0 A_0 / (A_0 + A_1 + A_2)$, а $\sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ можно выразить через σ_1, A_1, A_2, A_3 .

Используя (1.1), а также (1.2), (1.3) и аналогичные соотношения для описания процесса прохождения волн напряжений σ_4 и σ_7 через границу $B-B$ (см. рис. 1), после некоторых преобразований получим выражения для σ_5 и σ_9 :

$$\sigma_5 = \lambda\sigma_1, \quad \sigma_9 = \mu\sigma_1. \quad (1.4)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \lambda &= 2(\beta - 1)/(\alpha + 1)(\beta + 1); \\ \mu &= 2[4\beta(\alpha + 1) - (\alpha - 1)(\beta - 1)^2]/(\alpha + 1)^2(\beta + 1)^2; \\ \alpha &= A_1/A_2; \quad \beta = A_2/A_3; \quad \alpha > 0; \quad \beta > 0. \end{aligned}$$

Поскольку $A_1 < A_2 < A_3$, то нетрудно видеть, что $\lambda < 0, \mu > 0$.

Таким образом, на участке 1 стержня вправо бегут волны знакопеременных напряжений $\sigma_1, \sigma_5, \sigma_9$.

Аналогично определяются амплитуды последующих циклических волн напряжений, бегущих вправо через сечение $\Gamma-\Gamma$ стержня. Этими знакопеременяющимися волнами напряжений можно нагрузить образец, подвергнув его циклическому упругопластическому деформированию, если поместить этот образец на некотором расстоянии от уступа $B-B$ (см. рис. 2).

Описанный способ получения знакопеременных нагрузок заложен в разработанную методику исследования динамического ЭБ.

Если испытуемый образец одним концом закрепить в таком трехступенчатом стержне (нагружающий стержень), а другим концом — в одномерном стержне (опорный стержень), то получится схема, аналогичная схеме динамических испытаний Кольского с использованием составных стержней Гопкинсона [9].

Напряжение $\sigma(t)$ и деформация $\varepsilon(t)$ образца, необходимые для построения диаграмм $\sigma - \varepsilon$, находятся по методу Кольского [9], согласно которому

$$\sigma = E\varepsilon_I(t)A_1/A, \quad \varepsilon = (2c/l) \int_0^t [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_T(t)] dt, \quad (1.5)$$

где A, l — площадь поперечного сечения и длина рабочего участка образца; E, c — модуль упругости и скорость звука в мерных стержнях; $\varepsilon_I(t)$ — упругая деформация в падающей на образец волне напряжений, возникающей в сечении $\Gamma-\Gamma$; $\varepsilon_T(t)$ — упругая деформация в проходящей в опорный стержень волне напряжений.

Скорость деформации $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt$ определяется по закону деформации $\varepsilon = \varepsilon(t)$, т. е. из (1.5):

$$\dot{\varepsilon} = (2c/l)[\varepsilon_I(t) - \varepsilon_T(t)].$$

2. Техника эксперимента. На основании вышеописанной теоретической схемы было разработано испытательное устройство для исследования динамического ЭБ в материалах. Основной узел этого устройства выглядит так же, как на рис. 2. Трехступенчатый нагружающий стержень выполнен из стали 30ХГСА с диаметрами участков 1–3 $d = 12; 22; 45$ мм соответственно. Опорный стержень 7 (см. рис. 2) также сделан из стали 30ХГСА с диаметром 12 мм. Трубочатый боек 4 (сталь 30ХГСА, $d = 21 \times 16$ мм) имеет длину, одинаковую с длинами участков 2 и 3 нагружающего стержня. Боек в опытах разгоняется с помощью энергии взрыва заряда ВВ. Упругие импульсы деформаций $\varepsilon_I(t), \varepsilon_T(t)$ на стержнях регистрируются тензорезисторами 5 и 8 соответственно. Образец 6 корсетного типа с рабочим участком $d = 5 \times 8$ мм имеет с двух торцов резьбы для закрепления в стержнях. Отметим, что между торцами образца и дном резьбовых углублений стержней для исключения зазоров устанавливались контактные пластины из алюминиевого сплава АМЦ.

Вся описанная конструкция размещается с помощью деталей центрования в трубе-корпусе и устанавливается на станину-швеллер с углом, являющимся опорой для свободного торца ступени 3 нагружающего стержня.

Кроме того, испытательное устройство содержит ряд деталей, защищающих конструкцию и измерительные линии от нежелательных последствий взрывного нагружения.

В опытах при подрыве заряда боек разгоняется и соударяется с малым уступом нагружающего стержня. При этом вправо от уступа бежит волна растягивающего напряжения σ_1 (см. рис. 2), а влево — волна сжимающего напряжения σ_2 , которая затем трансформируется в волну сжимающего напряжения $\sigma_5 = \lambda\sigma_1$, бегущую вправо от уступа. Происходит процесс динамического растяжения — сжатия образца. Согласно изложенной теории метода, за волной σ_5 следуют знакопеременные волны $\sigma_9, \sigma_{13}, \dots$, вызывающие дальнейшее растяжение — сжатие и т. д. образца.

При фиксированной скорости ε и температуре T остаточная деформация ε_p зависит только от длительности τ (см. рис. 2) импульсов $\sigma_1, \sigma_5, \dots$. Поэтому для нахождения зависимости $\delta = \delta(\varepsilon_p)$ необходимо варьировать длины участков 2 и 3 нагружающего стержня и бойка. Для этого в устройстве применяются сменные нагружающие стержни и бойки четырех типоразмеров.

Варьирование скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ в первой фазе растяжения с целью получения зависимости $\delta = \delta(\dot{\varepsilon})$ при $\varepsilon_p = \text{const}$ и $T = \text{const}$ производится путем изменения скорости удара V_0 , а значит, изменения навески заряда ВВ. Регулирование скорости деформации во второй фазе сжатия может быть выполнено посредством изменения коэффициента λ (см. (1.4)), т. е. изменения соотношения площадей сечений A_1, A_2, A_3 нагружающего стержня.

Для проведения исследований при повышенных температурах в устройстве предусмотрена малогабаритная цилиндрическая электропечь.

Она устанавливается в области размещения образца и разогревает образец и торцевые части обеих стержней. Учитывая, что при нагреве упругие свойства материала стержней изменяются, для сохранения корректности метода нагрев в такой редакции можно осуществлять до ~ 300 °С. В интервале $20 \div 300$ °С изменение упругих свойств стали 30ХГСА несущественно.

3. Результаты первых экспериментов. Проведено исследование динамического ЭБ в стали Ст.3 (в состоянии поставки) при температуре окружающей среды 20 °С (± 5 °С). Скорость деформации в опытах составляла $410 \div 700$ с⁻¹ (скорость бояка $20 \div 25$ м/с).

Типичные импульсы деформаций $\varepsilon_I(t)$ и $\varepsilon_T(t)$ одного из опытов показаны на рис. 3 только для первых двух фаз нагружения. Полные же импульсы деформаций циклического нагружения представляют собой синусоиды, уменьшающиеся по амплитуде в ~ 5 раз за $4 \cdot 10^{-3}$ с.

Математическая обработка результатов опытов проводилась на ЭВМ по методике, разработанной специально для этой цели. На рис. 4 приведена диаграмма малоциклового растяжения — сжатия $\sigma - \varepsilon$, полученная в одном из опытов при средней скорости деформации в опыте $\dot{\varepsilon}_p = 680$ с⁻¹ и остаточной деформации $\varepsilon_p = 0,95$ %. Отметим, что на этом рисунке участки диаграммы $\sigma - \varepsilon$ в фазе растяжения (выше оси абсцисс)

и в фазе сжатия (ниже оси абсцисс) построены отдельно как результаты двух независимых опытов, а затем совмещены в предположении, что динамическая разгрузка образца после растяжения линейна и прямая разгрузки (штриховая линия) параллельна начальной прямой растягивающей нагрузки.

Результаты опытов представлены в таблице, где $\dot{\varepsilon}_p = (\dot{\varepsilon}_{1p} + \dot{\varepsilon}_{2p})/2$ — средняя скорость пластической деформации ($\dot{\varepsilon}_{1p}$ и $\dot{\varepsilon}_{2p}$ — скорости деформации на пластических участках диаграммы $\sigma - \varepsilon$ в фазах растяжения и сжатия, отличие значений $\dot{\varepsilon}_{1p}, \dot{\varepsilon}_{2p}$ не превышает 15 %), ε_p — остаточная деформация образца в фазе растяжения, $\sigma_{+0,1}^d$ — динамический предел текучести в фазе растяжения, σ_{+T}^d — «мгновенный» динамический предел текучести в фазе растяжения, соответствующий остаточной деформации ε_p , $\sigma_{-0,1}^d$ — «мгновенный» динамический предел текучести (по модулю) в фазе сжатия, отвечающий той же остаточной деформации растяжения ε_p , $\delta^d = \sigma_{-0,1}^d / \sigma_{+T}^d$ — мера динамического ЭБ.

Отметим, что в исследованном интервале скоростей деформации не выявлено какой-либо зависимости δ^d от $\dot{\varepsilon}_p$. Не проведено также сравнение полученных данных по δ^d с результатами при статическом нагружении в связи с отсутствием последних для Ст.3. По этой стали имеются данные в основном по малоцикловой прочности элементов различных конструкций, например, в [10]. Некоторое условное сравнение можно провести с результатами работ [11, 12], где для различных сталей приведены данные об ЭБ, полученные в опытах на статическое растяжение — сжатие при $\varepsilon_p = 0,2$ %. В этих работах для сталей 20 и 25 (из испытанных наиболее близки к стали Ст.3 по химическому составу) получено, что ЭБ составляет 39,4 и 29,6 % соответственно. Следует отметить, что в [11] мера ЭБ

$\dot{\varepsilon}_p, \text{с}^{-1}$	$\varepsilon_p, \%$	$\sigma_{+0,1}^d$	σ_{+T}^d	$\sigma_{-0,1}^d$	δ^d
		МПа			
680	0,95	540	580	315	0,54
700	0,92	580	635	310	0,49
680	0,46	560	585	415	0,71
540	0,96	525	590	220	0,37
450	1,05	530	585	270	0,46
510	1,20	530	600	200	0,33
520	1,40	535	605	195	0,32
410	0,66	560	590	335	0,57

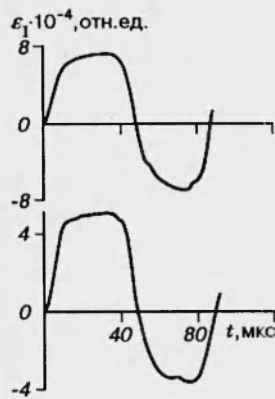


Рис. 3

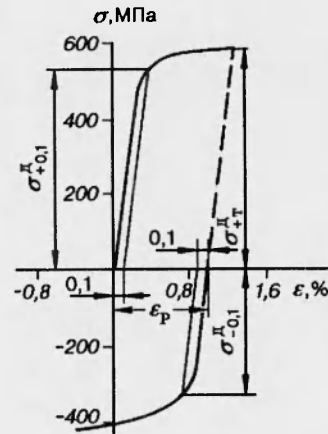


Рис. 4

определялась как изменение предела текучести $\sigma_{-0,1}$ при сжатии после предварительного растяжения в процентах к его исходному значению при обычной сжатии. В [12] она находилась как разница пределов текучести при растяжении и последующем сжатии по формуле

$$[(\sigma_{+0,1} - |\sigma_{-0,1}|) / \sigma_{+0,1}] \cdot 100 \%. \quad (3.1)$$

По настоящим данным для стали Ст.3 при динамическом нагружении и $\epsilon_p = 0,46 \%$ ЭБ, подсчитанный по формуле (3.1), составляет 25,9% (см. таблицу).

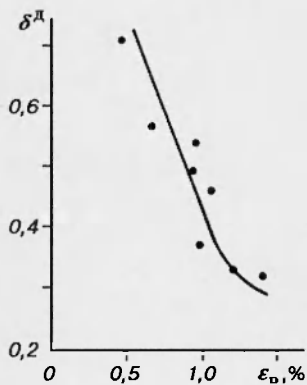


Рис. 5

По результатам, приведенным в таблице, построена графическая зависимость $\delta^d = \delta^d(\epsilon_p)$, показанная на рис. 5. Из этих данных следует, что ЭБ в стали Ст.3 значителен и его нельзя не учитывать в прочностных расчетах. Указанная зависимость в целом убывает (ЭБ возрастает) с увеличением ϵ_p . При этом интенсивность изменения ЭБ велика при $\epsilon_p \approx 1,1 \%$ и быстро убывает при $\epsilon_p \geq 1,2 \%$. При $\epsilon_p > 1,4 \%$, очевидно, следует ожидать приближения δ^d к предельному значению. Полученный результат согласуется с данными, приведенными в [1], где отмечается, что для сталей при статическом нагружении ЭБ (определен по формуле (3.1)) увеличивается с ростом предшествующей деформации и достигает максимума при предшествующей деформации 1,5 %.

Для выявления картины изменения динамического ЭБ в стали Ст.3 при $\epsilon_p \lesssim 0,5 \%$ и $\epsilon_p > 1,4 \%$ нужны дальнейшие исследования. При этом поведение δ^d при $\epsilon_p > 1,4 \%$ представляется более интересным с точки зрения определения предельного значения δ^d и проявления ЭБ при значительных деформациях. Так, в [1] указывается, что для стали 20 при предварительном растяжении до 7,9 % предел пропорциональности при повторном сжатии уменьшился на 71 %.

Итак, на основании метода [8] разработана методика исследования динамического ЭБ в конструкционных материалах. В испытательном устройстве методики для малоциклового знакопеременного нагружения

образца используется энергия взрыва ВВ. Устройство позволяет проводить динамическое растяжение — сжатие материала образца до разных пластических деформаций при различных скоростях деформации и температурах. Получены первые данные о динамическом ЭБ в стали Ст.3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Москвитин В. В. Пластичность при переменных нагружениях. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1965.
2. Коротких Ю. Г., Угодчиков А. Г. Уравнение теории термовязкопластичности с комбинированным упрочнением // Уравнения состояния при малоцикловом нагружении: Сб. ст. М., 1981. Гл. 6. С. 129–167.
3. Шнейдерович Р. М. Прочность при переменных напряжениях. М.: Машиностроение, 1968.
4. Гусенков А. П., Котов П. И. Длительная и неизотермическая малоцикловая прочность элементов конструкций. М.: Машиностроение, 1988.
5. Moreen H. A. Strain cycling effects in 1100 Aluminum // Trans. ASME. Ser. D. J. Basic Eng. 1990. N 1.
6. Woolley R. L. The Bauschinger effect in some face-centred and body-centred cubic metals // Philos. Mag. 1953. V. 44, N 353. P. 597–618.
7. Bauschinger I. Über die Veränderung der Elastizitätsgrenze und des Elastizitätsmoduls verschiedener Metall // Civil Ingenieur. N. F. 1881.
8. Ogawa K. Impact-tension compression test by using a split-Hopkinson bar // Exp. mech. 1984. V. 24, N 2. P. 122–128.
9. Музыченко В. П., Кашенко С. И., Гуськов В. А. Применение метода составного стержня Гопкинсона при исследовании динамических свойств материалов // Завод. лаб. 1986. № 1. С. 58–66.
10. Гусенков А. П., Москвитин Г. В., Хорошилов В. Н. Малоцикловая прочность оболочечных конструкций. М.: Наука, 1989.
11. Ратнер С. И., Данилов Ю. С. Изменение пределов пропорциональности и текучести при повторном нагружении // Завод. лаб. 1950. № 4. С. 468–475.
12. Шульц К. Я. Некоторые сведения по рентгенографическому изучению эффекта Баушингера. Таллинн, 1960. (Тр. Таллин. политехн. ин-та; № 172).

Поступила в редакцию 12/VIII 1994 г.
