

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ

УДК 629.4.027.2.

В. И. СЕНЬКО, доктор технических наук; И. Ф. ПАСТУХОВ, кандидат технических наук; М. И. ПАСТУХОВ, научный сотрудник; Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ИТОГИ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Приведены результаты комплексных исследований по оценке остаточного ресурса литых деталей тележек модели 18-100 (ЦНИИ-ХЗ) грузовых вагонов. Собран и систематизирован материал об эксплуатационных повреждениях боковых рам и наддрессорных балок тележек и найдена вероятность появления в них усталостных трещин. Произведена оценка напряженного состояния боковых рам на нормируемые и экстремальные нагрузки и установлены причины повреждения рам в эксплуатации. Исследованы изменения механических и усталостных характеристик материала литых деталей после длительной эксплуатации. Дана оценка существующей методики определения остаточного ресурса литых деталей и предложена более эффективная методика по результатам усталостных испытаний образцов, изготовленных из деталей, выработавших назначенный срок службы. Произведена апробация существующей и новой методик, показана хорошая их сходимость, а также простота и экономичность предложенной методики. Показано, что литые детали, изготовленные из стали 20Л, обладают дополнительным ресурсом от назначенного – не менее 6 лет, а из стали 20Г1ФЛ – 15 лет.

Вследствие финансовых трудностей, сложившихся на Белорусской железной дороге, последние 13 лет (1990 – 2003 гг.) закупка новых грузовых вагонов практически не велась и износ основных фондов вагонов инвентарного парка за это время достиг 70 %. В результате дефицит отдельных типов вагонов в перевозочном процессе год от года нарастал и возникла серьезная проблема с обеспечением перевозочного процесса собственным вагонным парком. Как выход из создавшегося положения начался процесс (на всем пространстве стран СНГ и Балтии) индивидуальной оценки технического состояния вагонов с продлением назначенного срока службы. Критерием для продления срока службы вагона являлось техническое состояние его рамы и кузова. Срок службы ходовых частей (тележек) вагона не определялся. Они рассматривались как съемные элементы и заменялись под вагоном по своему назначенному сроку службы, определяемому сроком службы литых деталей тележек: 30 лет – изготовленных из стали 20Л ГОСТ 977 (1956 – 1973 гг.), 32 года – из сталей 20ГЛ, 20Г1ФЛ, 20ФЛ, 20ГТЛ ГОСТ 977 (1974 – 2000 гг.) и 35 лет – из стали 20ХГНФТЛ (с 2001 г.).

При продлении срока службы вагона, без продления срока службы литых деталей, возникла проблема в подборе тележек, срок службы которых соответствовал бы вновь назначенному сроку службы вагона. Вместе с тем, изъятие из эксплуатации литых деталей тележек (боковых рам и наддрессорных балок) через 30 лет работы в технически исправном состоянии без обоснования их остаточного ресурса и оценки потенциала по несущей способности не могло не вызвать вопросов о

целесообразности такого подхода в решении проблемы срока службы вагонов. Таким образом, проблема продления срока службы вагонов вызвала другую проблему – проблему оценки остаточного ресурса литых деталей тележек с необходимостью продления их срока службы.

По инициативе Белорусской железной дороги решением этой проблемы занялся БелГУТ. Работа была включена в программу фундаментальных и прикладных исследований ГПОФИ «Надежность и безопасность» ИМИНМАШ НАН Беларуси на 2001 – 2005 гг. и предполагала решение следующих задач:

- оценку поведения литых деталей (боковых рам и наддрессорных балок) в эксплуатации;
- оценку несущей способности литых деталей на эксплуатационные нагрузки с учетом физического состояния;
- исследование механических и усталостных характеристик материала литых деталей после их длительной эксплуатации;
- оценку остаточного ресурса литых деталей после длительной эксплуатации по коэффициенту запаса сопротивления усталости;
- разработку новой методики оценки остаточного ресурса литых деталей по усталостным испытаниям образцов из литых деталей, проработавших назначенный срок службы;
- апробацию разработанной методики и оценку ее эффективности.

Оценка поведения боковых рам и наддрессорных балок в эксплуатации. Для выполнения первой задачи программы был собран материал по эксплуатационным повреждениям литых деталей,

накопленный на железных дорогах стран СНГ за последние 20 лет. Всего были собраны данные по обследованию 3,77 млн боковых рам и 1,84 млн надрессорных балок, выполненных различными организациями [1] за период с 1968 по 1988 гг. во время плановых ремонтов вагонов в депо. Полученный материал позволил выявить закон распределения трещин по рамам (зоны 1 – 9) и надрессорным балкам (зоны 1 – 11, рисунок 1) и вероятность их появления.

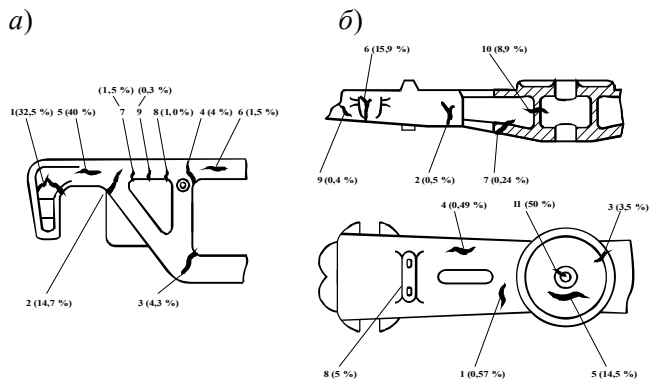


Рисунок 1 – Зоны появления усталостных трещин и процент их распределения по а – боковым рамам; б – надрессорным балкам

В рамках трещины возникают с вероятностью 0,0027, а в надрессорных балках по нижнему поясу – с вероятностью 0,000373, в целом по всей балке, включая верхний пояс и подпятниковую зону, – с вероятностью 0,034. Поскольку в период до 1990 г. контроль за литыми деталями в депо был только визуальный (смачиванием опасных зон керосином и обмеливанием), то в ходе исследований в 2001 – 2004 гг. аналогичный материал собран на предприятиях Белорусской железной дороги с использованием физического метода контроля (феррозондового). Собран и обработан материал по 19465 боковым рамам и 9613 надрессорным

балкам, который показал, что вероятность выбраковки деталей в депо при использовании физического метода контроля выше и составляет для рам и надрессорных балок 0,0047, что увеличивает вероятность безотказной работы деталей в эксплуатации и безопасность движения поездов.

Учитывая, что за период выпуска тележек типа ЦНИИ-ХЗ (модели 18-100) прошло три поколения литых деталей, представляло большую ценность получение информации о распределении повреждений деталей по годам постройки. На рисунке 2 приведено распределение выбракованных деталей по годам постройки, выявленных при диагностировании. Из представленной диаграммы видно, что повреждения деталей первого поколения (из стали 20Л) приходятся на возраст 30 лет и более, ибо в эксплуатации деталей моложе 30 лет нет из-за прекращения их выпуска с 1973 г.

Детали второго поколения (из стали 20Г1ФЛ и др.) повреждаются в любом возрасте (от 7 до 29 лет), и причиной их раннего повреждения является не недостаточная их прочность, а неблагоприятное сочетание экстремальных нагрузок и низкого качества литья в разрушившейся детали.

Тот факт, что более «слабые» детали первого поколения через 30 лет эксплуатации повреждаются с равной вероятностью, что и детали второго поколения (по 0,5 от выбракованных при диагностировании), и что вероятность их повреждений ($P = 0,0027 \dots 0,000373$) значительно ниже допускаемой [$P = 0,01$, свидетельствует о высоком потенциале рам и надрессорных балок по несущей способности и наличию в них достаточного ресурса для их работы после назначенного срока службы. Об этом же свидетельствует и статистика разрушений литых деталей в эксплуатации, вероятность которой $P = 0,00000059$ (таблица 1) [2].

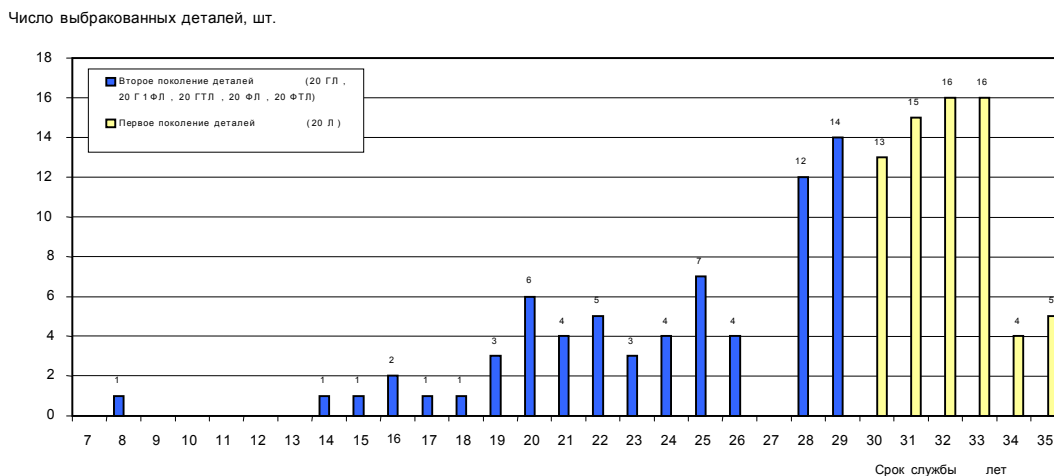


Рисунок 2 – Зависимость числа выбракованных боковых рам и надрессорных балок от срока службы

Таблица 1 – Динамика крушений, аварий и случаев брака в работе из-за излома боковых рам и надресорных балок в эксплуатации

Показатель	Годы								
	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Количество случаев на эксплуатационный парк грузовых вагонов ОАО РЖД	7	2	1	3	4	2	1	0	0
Вероятность излома на инвентарный парк (620 тыс. вагонов)	0,00000188	0,00000053	0,00000026	0,00000008	0,0000001	0,00000053	0,00000026	0	0
Средняя вероятность излома за 9 лет работы парка	0,00000059								

Оценка несущей способности литых деталей на эксплуатационные нагрузки с учетом физического состояния. Несмотря на низкую вероятность появления трещин в литых деталях, они все же в процессе их работы появляются. Для выявления причин их возникновения произведен расчет на статическую прочность боковой рамы при I и III режимах нагружения при номинальных зазорах в сопрягаемых деталях и при предельно допустимых зазорах с перекосом рамы в корпусе букс. Расчет выполнен методом конечных элементов в соответствии с требованиями «Норм для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» [3]. Осевая нагрузка на вагон принята $P_0 = 230,5$ кН (23,5 тс). Расчетные силы на боковую раму составляют: для I режима нагружения вертикальная сила $P_I = 328$ кН и продольная $T_I = 27$ кН, для III режима нагружения – соответственно $P_{III} = 329$ кН и $T_{III} = 5,5$ кН.

Расчетная схема рамы приведена на рисунке 3, а результаты расчета – в таблице 2.

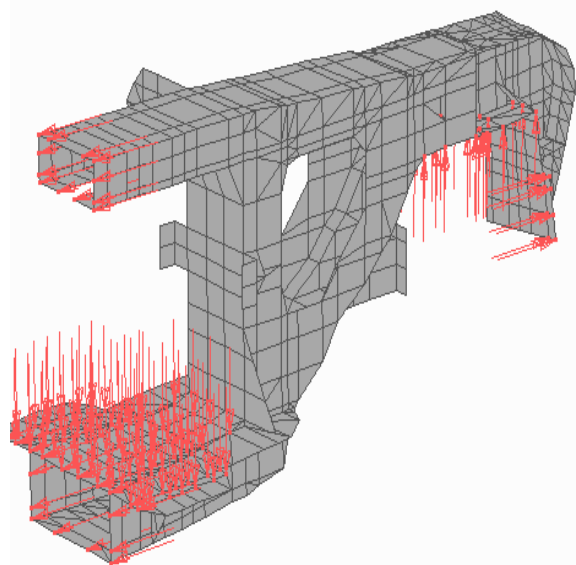


Рисунок 3 – Расчетная схема боковой рамы тележки ЦНИИ-ХЗ

Таблица 2 – Зависимость напряжений в боковой раме от режима нагружения при движении по магистральным путям при действии вертикальной, продольной и поперечной сил

Наименование зоны	Код зоны	Номер КЭ	Величина напряжений, МПа, при	
			I режиме	III режиме
Наружный угол буксового проема	1	576	77,4	13,4
Внутренний угол буксового проема	2	958	123,4	108,3
Внутренний угол буксового проема	2	715	116,1	102,7
Нижний угол ресорного проема	3	485	83,6	83,9
Нижний угол ресорного проема	3	487	76,8	76,2
Опоры рамы на буксу	5	584	88,3	43,9
Опоры рамы на буксу	5	585	61,3	53,9
Верхний пояс ресорного проема	6	892	38,3	39,7
Верхний наклонный пояс в правом технологическом углу	9	872	48,2	47,9
Верхний наклонный пояс в правом технологическом углу	9	874	47,9	50,0
Нижний наклонный пояс	10	771	49,0	47,0
Нижний наклонный пояс	10	1011	52,4	50,1
Нижний пояс ресорного проема	11	1053	78,9	78,6
Нижний пояс ресорного проема	11	1090	76,9	76,6

Из таблицы 2 следует, что напряжения в раме от эксплуатационных нагрузок и при номинальных зазорах между корпусами букс и челюстями рам не превышают допустимых напряжений для I режима $[\sigma_I] = 183$ МПа и III режима $[\sigma_{III}] = 130$ МПа (сталь 20Л). Следовательно, при нормальном режиме эксплуатации вагона в боковых рамах трещин не должно возникать.

Однако в эксплуатации при роспуске вагонов через сортировочную горку, во время торможения их вагонными замедлителями, при нарушении режима торможения возникают продольные силы, превышающие расчетную силу $T = 27$ кН в 3–4 раза. Для моделирования этого силового режима выполнен расчет боковой рамы на вертикальную нагрузку $P = 328$ кН и изменяющуюся продольную силу от 27 до 120 кН, которая может возникнуть на сортировочной горке. Результаты расчета показывают (рисунок 4), что даже при номинальных зазорах в раме-буксе при возникновении продольной силы $T = 60$ кН (6 тс) напряжения в наружном углу буксового проема (кривая 1) составляют 198 МПа и превышают для стали 20Л допустимые 183 МПа на 8 %. Это хорошо согласуется с повреждаемостью рам в эксплуатации. Именно в этой зоне процент повреждения рам имеет одно из

качестве норматива принят коэффициент запаса сопротивления усталости, значение которого для вновь поступающих в эксплуатацию деталей не должно быть меньше нормируемой величины (1,35–1,6). Поэтому за величину предельного остаточного ресурса детали, от которой требуется высокая надежность в эксплуатации, принимается такое значение срока ее работы, при котором коэффициент запаса сопротивления усталости не выйдет за пределы нормируемого.

Коэффициент запаса сопротивления усталости деталей, отработавших установленный срок T_t службы, определяется по формуле

$$n = \frac{(P_{aN})_{0,95} + \Psi(P_m - P_{cp}K_{и})}{P_{cp}K_{и}K_{дэ}}, \quad (1)$$

где $(P_{aN})_{0,95}$ – предел выносливости деталей, отработавших назначенный срок службы при вероятности неразрушения $P = 0,95$; Ψ – коэффициент чувствительности детали к асимметрии цикла; P_m – постоянная средняя нагрузка цикла нагружения при испытании; P_{cp} – расчетная вертикальная статическая нагрузка брутто на деталь, соответствующая для заданной осевой нагрузки P_o ; $K_{и}$ – коэффициент использования грузоподъемности вагона; $K_{дэ}$ – коэффициент вертикальной динамики, приведенный к базовому циклу нагружения $N_o = 10^7$ и эквивалентный повреждающему действию вертикальных динамических нагрузок за назначенный срок службы.

Остаточный срок службы по коэффициенту запаса сопротивления усталости детали, отработавшей назначенный срок T_t , может быть найден по зависимости

$$T_0 = T_t \left(\frac{n}{[n]} \right)^m, \quad (2)$$

где $[n]$ – допускаемый коэффициент запаса сопротивления усталости, $[n] = 1,4$; m – показатель степени кривой выносливости.

Иными словами, для определения коэффициента сопротивления усталости деталей, отработавших назначенный срок службы, по зависимости (1) или остаточного ресурса по зависимости (2) требуются длительные и дорогостоящие натурные испытания деталей (по 12 деталей одного наименования) для получения предела выносливости $(P_{aN})_{0,95}$.

Разработка эффективной методики оценки остаточного ресурса литых деталей. Остаточный срок службы литых деталей может быть найден со значительно меньшими трудовыми и финансовыми затратами по результатам усталостных испытаний образцов, изготовленных из деталей, отработавших назначенный срок службы. Для этого

достаточно отобрать из эксплуатации по одной детали одного наименования, изготовить из них образцы и испытать на выносливость по ГОСТ 25.502-79 при симметричном цикле нагружения, а затем по пределу выносливости образца найти предел выносливости детали. Предел выносливости детали, соответствующий 50%-ной вероятности неразрушения, определяется по зависимости

$$\bar{\sigma}_{aNt} = \frac{\bar{\sigma}_{-1t}}{[K_{\sigma}]}, \quad (3)$$

где $\bar{\sigma}_{-1t}$ – среднее (медианное) значение предела выносливости гладкого стандартного образца из материала детали после отработки ею назначенного срока службы (по ГОСТ 25.502-79) при симметричном цикле изгиба на базе $N_o = 10^7$; $[K_{\sigma}]$ – среднее значение общего коэффициента снижения предела выносливости к пределу выносливости гладкого стандартного образца, $[K_{\sigma}] = 4,0 \dots 4,5$ – для боковых рам и $[K_{\sigma}] = 4,3 \dots 4,8$ – для наддресорных балок [3].

Предел выносливости натурной детали, соответствующий 95%-ной вероятности неразрушения,

$$\sigma_{aNt} = \bar{\sigma}_{aNt} (1 - z_p v_v), \quad (4)$$

где z_p – квантиль распределения, соответствующий односторонней вероятности $P = 0,95$, $z_p = 1,645$; v_v – коэффициент вариации предела выносливости детали, $v_v = 0,1$.

Остаточный срок службы (ресурс) литых деталей после выработки назначенного срока службы

$$T_0 = \frac{\left(\frac{\sigma_{aN}}{[n]} \right)^m N_0}{B f_{\text{э}} \sum \sigma_{ai}^m P_{ai}}, \quad (5)$$

где $[n]$ – допускаемый коэффициент сопротивления усталости, $[n] = 1,4$; m – показатель степени кривой выносливости; $m = \frac{A}{[K_{\sigma}]}$, $A = 16$ – для ма-

лоуглеродистых сталей и $A = 18$ – для низколегированных сталей [3]; N_o – базовое число циклов; $N_o = 10^7$; B – коэффициент перевода календарного расчетного срока службы детали в годах во время непрерывного движения в секундах;

$$B = 365 \frac{10^3 L}{v},$$

L – среднесуточный пробег вагона, км/сут; v – средняя техническая скорость движения вагона, м/с; $f_{\text{э}}$ – центральная (эффективная) частота процесса изменения динамических напряжений, Гц;

$$f_{\text{э}} = \frac{a}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{f_{\text{ст}}}},$$

a – коэффициент, принимаемый: для боковой рамы – 2,0; для наддресорной балки – 1,6; $f_{ст}$ – статический прогиб рессорного подвешивания, $f_{ст} = 0,05$ м; σ_{ai} – уровень амплитуды динамических напряжений; P_{ai} – частота (вероятность) появления амплитуд напряжений с уровнем σ_{ai} в i -м интервале скоростей движения.

Метод определения остаточного ресурса по результатам усталостных испытаний образцов из деталей, отработавших назначенный срок службы, прост и не требует больших финансовых и трудовых затрат. Финансовые затраты его в 10 раз меньше, а трудоемкость меньше в 5 раз по сравнению с оценкой по результатам испытаний натуральных деталей на выносливость.

Апробация методики. Для проверки изложенной методики определения остаточного срока службы боковых рам и наддресорных балок тележек типа ЦНИИ-ХЗ (модели 18-100) проведены натурные испытания на выносливость литых деталей после 30 лет эксплуатации, изготовленных из стали 20Л по ГОСТ 977, и испытания на выносливость образцов из деталей, отслуживших назначенный срок службы, двух марок сталей 20Л и 20Г1ФЛ. По результатам испытаний деталей и образцов определены остаточные сроки службы боковых рам и наддресорных балок как по коэффициенту запаса сопротивления усталости, так и по усталостным испытаниям образцов. Результаты испытаний сведены в таблицу 3. Из таблицы 3 следует, что остаточный срок службы боковых рам и наддресорных балок, определенный по результатам усталостных испытаний как натуральных деталей, так и образцов, – практически одинаков. Однако для получения кривых выносливости боковой рамы и наддресорной балки при натурных испытаниях было затрачено 15 тыс. долларов США и по продолжительности заняло 1,5 года, а при испытании образцов – 1,5 тыс. долларов США и 3 месяца. Для практического решения поставленной задачи Белорусская железная дорога по результатам проводимых БелГУТом исследований вышла с ходатайством перед Комиссией Совета по железнодорожному транспорту полномочных специалистов вагонного хозяйства железнодорожных

Получено 23.12.2005

V. I. Senko, I. F. Pastuhov, M. I. Pastuhov. Results of a complex estimation of a residual resource of cast details of carriages of freight cars.

Results of complex researches are resulted according to a residual resource of cast details of carriages of model 18-100 (CNII-H3) freight cars. The material about operational damages of lateral frames and above spring beams of carriages is collected and systematized and the probability of occurrence in them of fatigue cracks is found. The estimation of an intense condition of lateral frames on normalized and extreme loadings is made and the reasons of damage of frames in operation are established. Changes of mechanical and fatigue characteristics of a material of cast details after long operation are investigated. The estimation of an existing technique of definition of a residual resource of cast details is given and more effective technique by results of fatigue tests of the samples made of details developing appointed service life is offered. Approbation of existing and new techniques is made, their good convergence, and also simplicity and profitability of the suggested technique is shown. It is shown, that the cast details made of steel 20L possess an additional resource from appointed, not less than 6 years, and from steel 20G1FL - 15 years.

администраций стран СНГ и Балтии о продлении срока службы боковых рам и наддресорных балок тележек типа ЦНИИ-ХЗ (модели 18-100) на 10 лет сверх установленного, т. е. с 30 до 40 лет. Получено разрешение о продлении срока службы этих деталей на 6 лет (с 30 до 36 лет, протокол № 18-06-02-01/4486 от 17.04.2002 г.). В результате только за последние два года от сокращения закупок литых деталей Белорусская железная дорога получила экономии свыше 6 млн долларов США.

Таблица 3 – Характеристики усталости и остаточного срока службы литых деталей после 30 лет эксплуатации

Наименование детали	Марка стали	Характеристики сопротивления усталости			Остаточный срок службы детали после 30 лет эксплуатации T_0 , лет, установленный по результатам испытаний	
		натурных деталей		образцов	натурных деталей	образцов
		предел выносливости по амплитудным нагрузкам $(P_{ан})_{0,95}$ при вероятности неразрушения $P = 0,95$ кН	коэффициент запаса сопротивления усталости n	предел выносливости по амплитудным напряжениям $\sigma_{ан}$ при вероятности неразрушения $P = 0,5$ МПа		
Боковая рама	20Л	128,1	1,37	175	27	25,9
	20Г1ФЛ	—	—	181,5	—	39,4
Надресорная балка	20Л	162,2	1,25	165	12,9	12,5
	20Г1ФЛ	—	—	181,5	—	21,8

Список литературы

- 1 Сендеров, Г.К. Повышение надежности несущих деталей / Г. К. Сендеров, А. П. Ступин, Н. Н. Власова // Серия: "Вагоны и вагонное хозяйство. Ремонт вагонов": Экспресс информация ЦНИИТЭИ МПС. – М., 1990. – Вып. 2. – С. 1 – 8.
- 2 Кондрашов, С. П. Безопасности движения – пристальное внимание / С.П.Кондрашов // Вагоны и вагонное хозяйство. Пилотный выпуск. – М., 2004. – С. 14 – 23.
- 3 Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: ГосНИИВ – ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.