

УДК621.735.34.001.24

**Я.Б. НЕМИРОВСКИЙ**, канд. техн. наук, Киев, Украина  
**Ю.А. ЦЕХАНОВ**, д-р техн. наук, Воронеж, Россия

### **ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ В КОНТАКТНОЙ ЗОНЕ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ДЕФОРМИРУЮЩЕМ ПРОТЯГИВАНИИ**

В статті приведені результати досліджень деформування трубної заготовки в контактній зоні осередку деформації при деформуючому протягуванні. Описані варіанти розрахунку площі контакту в залежності від рівня контактного тиску. Встановлені випадки впливу оброблюваного матеріалу на площу контакту.

В статье представлены результаты исследований деформирования трубной заготовки в контактной зоне очага деформации при деформирующем протягивании. Описаны варианты расчета площади контакта в зависимости от уровня контактных давлений. Установлены случаи влияния обрабатываемого материала на площадь контакта.

The results the investigations deforming tube blank in contact zone of deforming broaching are presented in this article. The variants of the calculation contact square depending on the level contact pressure are described. The occurens the of the influence material of details on the contact square are showed.

В статье рассмотрены особенности деформирования трубной заготовки в контактной зоне очага деформации при деформирующем протягивании.

Как известно [1], наиболее точной схемой очага деформации при деформирующем протягивании (ДПР) является схема, согласно которой весь очаг деформации состоит из участка контакта и двух внеконтактных зон, примыкающих к нему. Процесс пластического деформирования на всех трех участках определяет кинематические, геометрические и энергетические параметры процесса. Построенная с использованием энергетических методов модель такого очага деформации [2] позволила определить его: геометрические параметры – длину внеконтактных зон  $l_1$  и  $l_3$ , длину контактной зоны  $l_2$ , – а следовательно ширину контакта  $l_k$ ;

кинематические параметры – компоненты тензора скоростей деформации  $\xi_\varphi$  и  $\xi_z$  и их соотношения в каждой из зон, соответственно  $K_1, K_2, K_3$ ; энергетические параметры: силу протягивания  $Q$ , общую мощность деформирования –  $W$ , мощность, затраченную на деформирование во внеконтактных зонах  $W_1, W_3$ , мощность деформирования на участке контакта –  $W_2$  и мощность сил трения  $W_{тр}$ .

Рассмотрим более подробно явления, происходящие в зоне контакта.

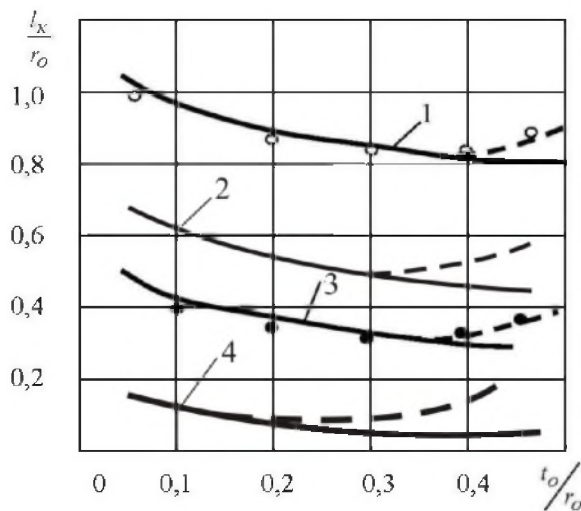


Рисунок 1 – Зависимость протяженности контакта от толщины стенки заготовки из стали 20 НВ125:

Расчет 1 –  $\alpha=2^\circ a/d_0 = 0.0375$ , 2 –  $\alpha=2^\circ a/d_0 = 0.025$ ,

3 –  $\alpha=4^\circ a/d_0=0.0375$ , 4 –  $\alpha=4^\circ a/d_0 = 0.025$ .

Эксперимент - • ◦

На рис. 1 показана расчетная и экспериментальная зависимости ширины контакта  $l_k$  от степени толстостенности заготовки при разных натягах и углах конусности инструмента. Их хорошее совпадение наблюдается до значений некоторой критической толщины стенки  $t_{кр}/r_0$ , при которой согласно работы [1] контактное давление достигает критической величины –  $q_{кр}$ , которое предложено рассматривать как физическую константу обрабатываемого материала. При этом наблюдается появление локальной зоны пластического деформирования, что приводит к появлению дополнительного «наплыва» в зоне контакта, что, естественно, вызывает увеличение  $l_k$ .

Рассмотрим влияние режимных факторов на  $l_k$  и на определяющий ее

параметр – высоту внеконтактной зоны  $h_{в.з}$  (рис. 2, а). Как показали

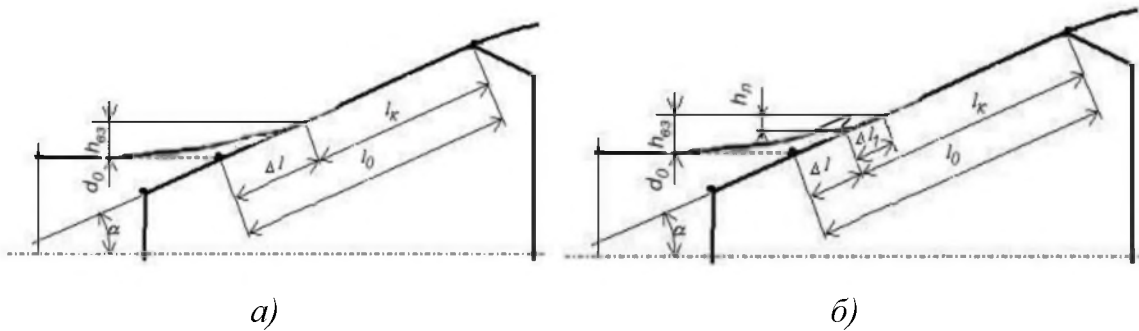


Рисунок 2 – Схема очага деформации при ДПР

расчеты по разработанной модели высота первой внеконтактной зоны  $h_{в.з}$  практически не зависит от натяга. Из выражения, которое описывает образующую этой внеконтактной зоны,

$$z = z_{cp} + \frac{3}{4} \frac{\operatorname{tg} \alpha}{l_1} z^2 - \frac{\operatorname{tg} \alpha}{8 l_1^3} z^4 \quad (1)$$

при  $Z=l$  высота  $h_{в.з}$  зависит от толстоценности заготовки и угла  $\alpha$ .

Как следует из рис. 2,а:

$$l_k = l_0 - \Delta l = \frac{a}{2 \sin \alpha} - \frac{h_{в.з}}{\sin \alpha} \quad (2)$$

где  $h_{в.з} = 5/8 l_1 \operatorname{tg} \alpha$ , а величина  $\frac{a}{2 \sin \alpha}$  есть геометрическая ширина

контакта. Согласно работе [3]  $l_1 = 0.611 t_0^{0.538} r_0^{0.462}$ ;

тогда

$$l_k = l_0 - \Delta l = \frac{a}{2 \sin \alpha} - \frac{5/8 \cdot 0.611 t_0^{0.538} r_0^{0.462}}{\cos \alpha}$$

а график зависимости (2) имеет вид прямой.

Расчетные и экспериментальные значения  $l_k=f(a)$  (рис. 3) показали хорошее совпадение только при толстостенности заготовки  $t_0 < t_{кр}$  и натягах и углах  $\forall$  не вызывающих появления критических контактных давлений.

Как известно [1], с уменьшением натяга контактные давления растут. Поэтому реальное физическое взаимодействие инструмента с изделием при малых натягах меняет схему очага деформации, представленную на рис. 2,а. Подтвердим это следующими рассуждениями. Поскольку  $h_{в.з.}$ , а значит и  $\Delta l$  не зависит от натяга, то согласно зависимости (2) при  $\frac{a}{2} \rightarrow h_{в.з.}$  протяженность контакта будет стремиться к 0.

В действительности уменьшение  $l_k$  ведет к увеличению контактного давления, которое не может для конкретного материала превысить предельного значения. Следовательно, физически при достижении  $l_k$  некоторой малой величины, ее уменьшение прекращается за счет возникновения в контактной зоне заметной локальной пластической деформации. Подобный факт приводится в работе [4]. При таких условиях деформирования величиной этой локальной пластической деформации пренебрегать нельзя, поэтому схема очага деформации при наличии в зоне контакта давления близким  $q_{кр}$  будет соответствовать рис. 2,б. В этом случае расчет  $l_k$  необходимо производить по зависимости (3).

$$l_k = l_0 - \Delta l = \frac{a}{2 \sin \alpha} - \frac{h_{в.з.}}{\sin \alpha} + \frac{h_{л.}}{\sin \alpha} \quad (3)$$

где  $h_{в.з.} = 5/8 l_1 \operatorname{tg} \alpha$ .

Тогда

$$l_k = l_0 - \Delta l = \frac{a}{2 \sin \alpha} - \frac{5/8 \cdot 0.611}{\cos \alpha} \frac{0.538}{t_0} \frac{0.462}{r_0} + \frac{h_{л.}}{\sin \alpha}$$

Теоретически определение высоты локальной пластической деформации в зоне контакта затруднено, а её экспериментальное нахождение возможно исходя из графика  $l_k=f(t_0/d_0)$ , например по рис. 1, где разница между расчетными и экспериментальными значениями ширины контакта после точки минимума обусловлена наличием составляющей

$h_{\text{д}}/\sin\alpha$ . Следует отметить, что в работе [4] на основании анализа профилограмм зоны контакта, полученных в широком диапазоне изменения толстостенности и натягов для изделий с конечной толщиной стенки, авторы делают важный вывод о наличии зоны локального пластического деформирования в деталях с конечной толщиной стенки и утверждают, что для описания механики локальных пластических деформаций корректно использовать известное решение [5] для определения этой области для изделий с бесконечной толщиной стенки.

Поэтому наличие этой зоны приводит к тому, что при малых натягах зависимость  $l_{\text{к}}=f(a)$ , описываемая выражением (2) нарушается и имеет нелинейный участок, описываемый выражением (3) и представленный на рис. 3. Здесь также учтено, что при  $a=0, l_2=0$ .

Рисунок 3 – Зависимость ширины контакта от натяга при обработке заготовок из Стали 20 размерами  $t_0/d_0=0,15$  деформирующими элементами с углом  $\alpha$ : 1 – 2°, 2 – 4°, 3 – 12°

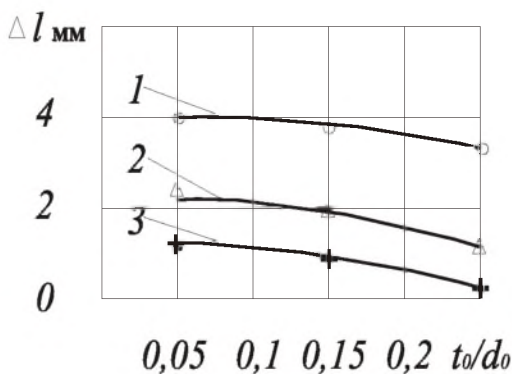
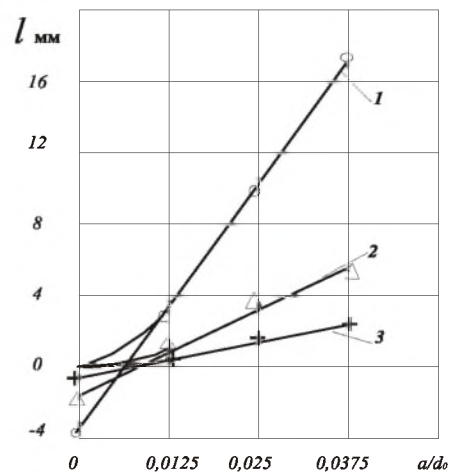


Рисунок 4 – Зависимость параметра  $\Delta l$  от толстостенности при обработке заготовок из Стали 20 деформирующими элементами с углом  $\alpha$ : 1-2°, 2-4°, 3-12°

Как следует из (2) при экстраполяции значений ширины контакта (1,2,3, рис. 3) на ось ординат можно получить значения  $\Delta l$ , которая является разностью между геометрической и фактической шириной контакта.

Как следует из экспериментов (рис. 4) значение  $\Delta l$  зависит от толстостенности заготовки и угла  $\alpha$ , причем с увеличением толстостенности значение  $\Delta l$  снижается, что указывает на рост фактической ширины контакта.

О подобном факте свидетельствуют данные, приведенные на рис. 1, где перегиб кривой  $l=f(t_0)$  зависит от факторов, влияющих на контактные давления, а именно натяга на элемент и угла  $\alpha$ .

При раздаче деформирующими элементами изменяются размеры заготовки: происходит увеличение наружного и внутреннего диаметров, изменяются толщина стенки и длина заготовки. Так как в контактной зоне осуществляется основная часть пластической деформации, то условия деформирования в ней в основном и влияют на изменения размеров обрабатываемой заготовки.

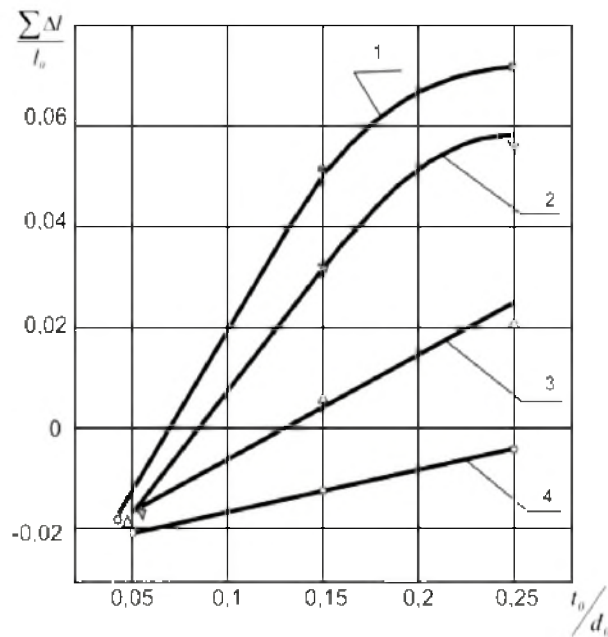


Рисунок 5 – Зависимость осевой деформации от относительной толщины стенки: материал заготовки Сталь20,  $d_0 = 40$  мм;

$$\frac{a}{d_0} = 0,025 \quad \frac{\sum a}{d_0} = 0,075, \text{ угол } \alpha: 1-12^\circ; 2-8^\circ; 3-4^\circ; 4-2^\circ.$$

Результаты исследований [6] показали, что в зависимости от геометрии режимов протягивания и толстостенности заготовки осевые деформации могут быть трех видов: осевое укорочение, отсутствие осевых деформаций, осевое удлинение (рис. 5). При раздаче тонкостенных

заготовок в нашем случае  $t_0/d_0=0,05$  имеют место низкие контактные нагрузки, сдвиговые деформации в поверхностном слое практически отсутствуют, гидростатическое давление несущественно и схема очага деформации соответствует схеме рис. 2,а. В этом случае осевые деформации укорочения  $\varepsilon_z = \Delta l/l_0$  не зависят от угла  $\alpha$ , натяга, а определяются только окружной деформацией  $\varepsilon_\varphi = \Sigma a/d_0$ .

С увеличением толщины стенки ( $t_0/d_0 \geq 0,1$ , рис. 5) увеличивается осевая сила протягивания, возрастают контактные нагрузки. В результате этого характер течения материала в контактной зоне меняется, что вызывает появление заметного осевого течения в зоне контакта. Схема очага деформации в этом случае будет соответствовать схеме рис. 2,б. На осевые деформации начинают влиять натяг на элемент, угол  $\alpha$  и обрабатываемый материал. Дальнейшее увеличение толстостенности приводит к осевому удлинению заготовки.

Появлению удлинения заготовки предшествует случай раздачи без изменения длины заготовки ( $\varepsilon_z = 0$ ). Рассмотрим данные, приведенные в табл. 1.

Таблица 1 – Значения толщин стенок при которых  $\frac{\Delta l}{l_0} = 0$

Натяг на элемент $a/d_0$	Угол $\alpha$ град.	Значения толщины стенки $t_0/d_0$ , при которых $\Delta l/l_0=0$						Значения $t_{кр}$ [1]
		сталь 45, схема		сталь АК6, схема		сталь 20, схема	сталь 12ХН3А, схема	сталь 45, схема
		растяж.	сжатия	растяж.	сжатия	растяж.	сжатия	сжатия
0,0375	4	0,20	0,29	0,20	0,26	0,21	0,28	0,24
0,025	4	0,16	0,23	0,14	0,21	0,14	0,22	0,19
0,0125	4	0,125	0,19	0,11	0,17	0,11	0,19	0,15

В ней представлены экспериментально определенные толщины стенок заготовок из различных материалов, обработанных с разными натягами по схемам растяжения и сжатия деформирующими элементами с углом  $\alpha=4^\circ$ , при которых отсутствуют осевые деформации. Для сравнения

в этой таблице для стали 45 приведены значения критической толщины стенок  $t_{кр}$ , вызывающее появление локальной пластической деформации в зоне контакта. Значение  $t_{кр}$  взяты из работы [1], где они определялись исходя из минимума зависимостей  $l_2 = f(t_0/d_0)$ . Как следует из приведенных данных значение толщины стенки, соответствующее отсутствию осевых деформаций мало зависит от обработанного материала и хорошо совпадает со значением критической толщины стенки, приводящей к появлению локальной пластической деформации (рис. 2,б).

Следует отметить, что при использовании схемы растяжения значения толщины стенки, соответствующие отсутствию осевых деформаций, несколько меньше чем при использовании схемы сжатия. Это свидетельствует о некотором влиянии осевой силы протягивания на осевые деформации обработанной заготовки. Сравнение значений толщины стенки, соответствующих нулевому изменению длины, с соответствующими значениями функций  $l_2 = f(t_0/d_0)$  для различных углов (рис. 1) также показывает хорошее совпадение этих значений.

Таким образом, рассмотренные результаты свидетельствуют, что переход к деформированию заготовок по схеме очага деформации согласно (рис. 2,б) происходит при достижении контактными давлениями критических значений, при этом укорочение заготовки переходит в удлинение.

Управление переходом одной из схем очага деформации в другую расширяет технологические возможности процесса и несомненно представляет практическую ценность. Так согласно данным работы [4] наличие стабильной зоны локального пластического деформирования в зоне контакта (рис. 2,б) позволяет при многоцикловом деформировании обеспечить требуемую шероховатость, глубину и степень наклепа за меньшее число циклов деформирования. Что касается формообразования заготовки в целом, то в этом случае появляется возможность обеспечить в зависимости от технических требований широкий диапазон значений осевых деформаций от укорочения до удлинения. Управлять переходом одной схемы очага деформации в другую при заданной толстостенности заготовки можно такими технологическими факторами как угол  $\alpha$  и натяг на элемент. Нами в работе [6] получены зависимости (4 и 5) для



определения угла  $\alpha$ , обеспечивающего отсутствие осевых деформаций, что соответствует, как было показано выше, наличию в контактной зоне критических контактных давлений.

Для схемы растяжения

$$\alpha_p = \frac{(0,48 - 0,52) + 6,93^a/d_0}{t_0/d_0} \quad (4)$$

Для схемы сжатия

$$\alpha_{сж} = \frac{(0,39 - 0,37) + 34,8^a/d_0}{t_0/d_0} \quad (5)$$

Эти зависимости можно использовать и для оптимизации процесса .

Рассмотрим влияние обрабатываемого материала на ширину контакта. Ранее в работе [1] было высказано положение о независимости ширины контакта от обрабатываемого материала. Как показали приведенные материалы это справедливо при определении  $l_k$  согласно варианту (рис. 2,а). В этом случае ширина контакта рассчитывается по зависимости (2) и исходя из нее определяется высота внеконтактной зоны. Параметры этой зоны согласно данным [2] практически не зависят от обрабатываемого материала, а деформационное упрочнение практически не влияет на нее.

В том случае, когда раздача заготовки происходит при наличии в зоне контакта критических контактных давлений (рис. 2,б) расчет ширины контакта следует вести по зависимости (3). Входящие в это выражение значение  $h_b$  зависит от пластических свойств обрабатываемого материала, а именно чем пластичнее материал, тем больше высота наплыва  $h_{л}$ , возникающего в локальной зоне пластического деформирования. Это положение подтверждают экспериментальные данные, приведенные в таблице 2. Эти данные представляют собой геометрическую и фактическую ширину контакта и их отношение при раздаче заготовок с бесконечной толщиной стенки. Значения ширины контакта для сталей взяты из работы [1].

Таблица 2 – Значения ширины контакта для различных материалов

№	Материал заготовки	Твердость МПа	Натяг на элемент $a_{\phi}$ , мм	Ширина контакта		$l_k/l_0$
				геометрическая $l_0$ , мм	фактическая $l_k$ , мм	
1	Сталь 10	1100	0,05	0,36	1,92	5,3
2	Сталь 38ХМЮА	3000	0,05	0,36	0,6	1,65
3	Сталь 40ХНМА	3100	0,1	0,48	0,87	1,8
4	Чугун СЧ20	1700	0,05	0,36	0,5	1,38

Из таблицы 2 следует, что при раздаче заготовок с бесконечной толщиной стенки ширина контакта явно зависит от обрабатываемого материала. Очевидно преобладающее влияние высоты наплыва, образованного в локальной зоне пластического деформирования на ширину контакта. Так при раздаче заготовки из пластичной стали 10 фактическая ширина контакта  $l_k$  в несколько раз превосходит геометрическую  $l_0$ . В то же время при раздаче заготовки из такого малопластичного материала как чугун  $l_k \approx l_0$ . Следовательно, при развитом пластическом течении, которое имеет место при деформировании заготовок с бесконечной толщиной стенки, ширина контакта при постоянном натяге определяется только свойствами обрабатываемого материала. Этим и объясняется известный факт [5] независимости ширины контакта от угла  $\alpha$  при деформировании заготовок с бесконечной толщиной стенки.

Следовательно, расчет ширины контакта в зависимости от уровня критических контактных давлений необходимо производить по вариантам модели очага деформации, приведенных на рис. 2.

При раздаче одиночными деформирующими элементами управлять требуемым уровнем контактных нагрузок, которые позволяют использовать необходимый вариант схемы очага деформации, при заданной толстостенности заготовки, можно только такими технологическими факторами как натяг на элемент и угол  $\alpha$ .

Таким образом, проведенный анализ деформирования в контактной зоне очага деформации позволил установить следующее:

- ширину контакта необходимо рассчитывать по двум вариантам модели очага деформации, отличающимися между собой учетом влияния высоты наплыва, возникающего в локальной зоне пластического деформирования;

- при наличии в контактной зоне давлений меньше критических используется вариант модели без влияния высоты наплыва, при этом наблюдается хорошее совпадение расчетных значений с экспериментом - при достижении контактными давлениями критических значений расчет ширины контакта необходимо выполнить по варианту, учитывающему высоту наплыва, при этом качественно изменяется формообразование заготовок переходом осевых деформаций укорочения в удлинение;

- величина критических контактных давлений определяется только свойствами обрабатываемого материала и достигается изменением: толстостенности, угла  $\alpha$  и натяга на элемент;

- предложены зависимости для выбора угла  $\alpha$ , обеспечивающего наличие в контактной зоне критических контактных давлений и отсутствие осевых деформаций;

- показано, что влияние обрабатываемого материала на ширину контакта имеет место при наличии в зоне контакта критических контактных давлений.

**Список использованных источников:** 1. Розенберг О.А. Механика взаимодействия инструмента с изделием при деформирующем протягивании. – Киев: Наук. Думка, 1981. – 288с. 2. Я.Б. Немировский, Ю.А. Цеханов. Применение вариационных принципов для анализа энергетических и кинематических параметров процесса деформирующего протягивания // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков, НТУ «ХПИ», 2001. – №60. – С.154-159. 3. К вопросу использования алмазов для изучения контактного взаимодействия инструмента с деталью при деформирующем протягивании / А.М. Розенберг, О.А. Розенберг, Ю.А. Цеханов, Я.Б. Немировский, В.В. Кривошея // Сверхтвердые материалы. – 1984. – №3. – С.39-43. 4. С.Е. Шейкин, Ю.А. Цеханов, Е.А. Балаганская. Анализ формирования поверхно-стного слоя при деформирующем протягивании // Резание и инструмент в технологических системах – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006 – №70. – С.502-509. 5. Ю.А. Цеханов, С.Е. Шейкин. Механика формообразования заготовок при деформирующем протягивании. – Воронеж: ВГТА, 2001. – 203с. 6. Цеханов Ю.А., Я.Б.Немировский, Влияние технологических параметров деформирующего протягивания на конечные деформации заготовок // Високі технології в машинобудуванні. – Харків: ХДПУ, 2000. – С.281-285.