

УДК 621.923.9

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОГРАНИЧЕНИЙ ПО ТОЧНОСТИ ВНУТРИШЛИФОВАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ

П.П. Переверзев, А.В. Акинцева

Предложена модель влияния чертежных требования по точности обработки отверстий на производительность операции внутреннего шлифования, через изменение режимных параметров автоматического цикла обработки на станках с ЧПУ. Разработаны расчетные модели, позволяющие определять (для заданного цикла шлифования и технологических условий) величины всех основных видов погрешностей, возникающих из-за наличия исходного радиального биения отверстия заготовки и упругих деформаций технологической системы: погрешность диаметра, отклонение от круглости, радиальное биение, отклонение от цилиндричности, отклонение профиля продольного сечения и полное радиальное биение. В основе методики моделирования ограничений по точности находится на модель съема металла, позволяющей рассчитать фактическое значение b -го радиуса g -го сечения на i -м ходе z -й ступени, учитывая при этом колебание припуска и исходной точности обрабатываемой поверхности в партии заготовок. Данная методика предназначена для использования в качестве ограничения режимных параметров в методике проектирования оптимальных циклов внутреннего шлифования с целью выбора оптимального распределения значений программных подач и снимаемой части припуска по ступеням цикла, который обеспечивает выполнение требований чертежа при максимальной производительности операции.

Ключевые слова: погрешность, точность обработки, внутреннее шлифование, оптимизация процесса, цикл.

Одной из тенденций развития современного машиностроения является появление шлифовальных станков нового поколения, позволяющих производить обработку на более высоких скоростях и по заданным циклам ступенчатого изменения программных подач в зависимости от оставшейся части припуска. Циклы внутреннего шлифования должны обеспечить обработку отверстий партии заготовок за минимальное время при условии обеспечения заданных требований чертежа. Важнейшим и обязательным чертежным требованием является заданная точность обработки поверхности. Для обеспечения точности обработки на внутришлифовальных операциях необходимо учитывать влияние следующих факторов:

– разброс значений исходного радиального биения и припуска в партии заготовок;

– точность обработки обеспечивается комплексом различных допусков на обрабатываемую поверхность отверстия: погрешность диаметра, отклонение от круглости, радиальное биение (для контроля отдельных сечений заготовки), отклонение от цилиндричности, отклонение профиля продольного сечения и полное радиальное биение (для контроля поверхности отверстия заготовки);

– изменение силы резания и упругих деформаций технологической системы в процессе обработки отверстия из-за нестабильных условий шлифования, связанных с переменными значениями припуска и исходного радиального биения, затуплением зерен круга, размерным износом круга, непостоянной зоной контакта круга с заготовкой не только в течение оборота заготовки, но и в разных сечениях по длине отверстия;

– параметры цикла шлифования являются постоянными при обработке всей партии заготовок и должны обеспечить заданную точность обработки отверстий при вышеперечисленных переменных условиях шлифования.

При проектировании цикла шлифования для обеспечения максимальной производительности операции необходимо стремиться к тому, чтобы на протяжении всего цикла текущее значение фактически снятого припуска было максимально допустимым. Для этого следует использовать ближайшее к области ограничений значение фактически снятого припуска. В этом случае величина фактически снятого припуска будет наибольшей, а цикл производительней. Такое приближение осуществляется ступенчатым переключением подач. Область допустимых значений подач определяется границами нескольких ограничений. Множество факторов оказывают влияния на границы областей ограничений, придавая им разнообразные очертания и самое разное взаиморасположение. Ограничение по требуемой точности обработки работает на протяжении всех ступеней цикла, снижает значение фактически снятого припуска до значений, удовлетворяющих требованиям чертежа по точности детали.

Для проектирования высокопроизводительного цикла шлифования отверстий, стабильно обеспечивающего точность обработки для всей партии заготовок, разработана математическая модель процесса съема металла при шлифовании некруглого отверстия. Данная модель учитывает особенности кинематики процесса внутреннего шлифования и изменения площади контакта круга с заготовкой на каждом ходе инструмента, которые возникают из-за сложной функциональной связи упругих деформаций с режимами резания и технологических параметрами. Модель процесса съема металла позволяет рассчитывать величины фактически снятого припуска, изменений текущих значений радиусов, силы резания, времени съема припуска и др. Более подробно с моделью процесса съема металла для внутреннего шлифования можно ознакомиться в следующих статьях [1–3].

Ниже представлены формула для расчета величины фактически снятого припуска в среднем сечении отверстия заготовки (шлифование на проход).

$$P_{\phi z, i, g, b} = \left[\frac{-A_4 M_2 W_q}{2(1 + A_4 M_1)} + \sqrt{\left(\frac{A_4 M_2 W_q}{2(1 + A_4 M_1)} \right)^2 + \frac{S_{\text{сум.рад.}z,i} - R_{z,i-1,g,b} + R_{\text{min}}}{1 + A_4 M_1}} \right]^2, \quad (1)$$

где W_q – активная часть высоты круга для q -м пересчета, мм [2]; $S_{\text{сум.рад.}z,i}$ – сумма радиальных подач, мм; R_{min} – минимальное значение радиуса заготовки, мм; $R_{z,i-1,g,b}$ – значение b -го радиуса g -го сечения на предшествующем ($i-1$) ходе z -ой ступени, мм; M_1 , M_2 , A_4 – коэффициенты, определяемые по формулам:

$$M_1 = \frac{1,86\sigma_i \pi d_{\text{заз}} V_{\text{Soc}}}{\sqrt{(V_{\text{кр}} + V_{\text{заз}})^2 + V_{\text{Soc}}^2}} \quad \text{и} \quad M_2 = \frac{\sigma_i \eta W_q}{3} \sqrt{\frac{d_{\text{заз}} D_{\text{кр}}}{d_{\text{заз}} - D_{\text{кр}}}},$$

где $V_{\text{кр}}$ – окружная скорость круга, м/с; $V_{\text{заз}}$ – скорость вращения заготовки, м/мин; V_{Soc} – скорость осевой подачи, мм/мин; σ – среднее значение интенсивности напряжений, Н/мм²; $d_{\text{заз}}$ – диаметр заготовки, мм; $D_{\text{крuga}}$ – диаметр круга, мм; η – степень затупления шлифовального круга.

$$A_4 = \frac{W_q^3 - 12A_1 W_q - 12A_3}{12EJ_{x1}},$$

где E – модуль упругости, МПа; J_{x_n} – момент инерции n -ого сечения шлифовальной оправки, м⁴; L – длина вылета шлифовальной оправки, мм; A_1 , A_2 – коэффициенты, определяющие по формулам:

$$A_1 = \frac{4J_{x1} L^2 + 4J_{x1} W_q L + W_q^2 J_{x2}}{4J_{x2}} \quad \text{и} \quad A_3 = \frac{4J_{x1} L^3 + 9J_{x1} L^2 W_q + 6J_{x1} W_q^2 L + 2J_{x2} W_q^3}{12J_{x2}}.$$

Обработка начального и конечного сечений является сложным процессом, так как включает в себя различные этапы (выхаживание, врезание, шлифование на проход и др.). Например, обработка начального сечения при условии, что четный и нечетный ходы являются рабочими, включают в себя следующие этапы: 1) четный ход – выхаживание и врезание (внутреннее врезное шлифование), шлифование на проход; 2) нечетный ход – шлифование на проход. Поэтому отдельно разработана модель съема металла для внутреннего врезного шлифования:

$$S_{\text{рад.сп.}z,j,b}^{\phi} = \left[\frac{-A_4 K_2}{2(1 + A_4 K_1)} + \sqrt{\left(\frac{A_4 K_2}{2(1 + A_4 K_1)} \right)^2 + \frac{R_{\text{min}} + S_{\text{рад.сп.}z,i}^{\text{II}} - R_{z,j-1,g,b}}{1 + A_4 K_1}} \right]^2, \quad (2)$$

где K_1 , K_2 – коэффициенты, определяемые по формулам:

$$K_1 = \frac{1,9\sigma_i V_{заз} W_q}{V_{кр}} \text{ и } K_2 = \frac{\eta W_q \sigma_i}{3} \sqrt{\frac{d_{заз} D_{кр}}{d_{заз} - D_{кр}}}.$$

Моделирование съема металла начинается с минимального радиуса начального сечения на первом ходе первой ступени. Вследствие того, что круг и заготовка не находятся в постоянном взаимодействии из-за осевого движения круга, требуется пересчет номера радиуса g -го сечения, с которого начинается обработка на i -м ходе z -й ступени. Рассмотрим более подробно порядок пересчета номера радиуса. Радиусы нумеруются против хода часовой стрелки, начиная с минимального радиуса (рис. 1). Во всех сечениях параллельные друг другу радиусы имеют один и тот же номер. Обработка отверстия на первом ходе первой ступени начинается с минимального радиуса начального сечения. В дальнейшем осуществляется пересчет номера радиуса g -го сечения, с которого начинается обработка на i -м ходе.

$$n_{сдвиг} = \frac{n_{заз} l_x}{V_{Сок}} * \text{ и } R_{сдвиг} = n_{сдвиг} R_b,$$

где l_x – расстояние, который прошел круг от предшествующего сечения $g - 1$ до текущего (обрабатываемого) сечения g ; R_b – общее количество рассматриваемых радиусов. *В дальнейшем в расчетах используется только дробная часть $n_{сдвиг}$.

Например (рис. 1), моделирование съема металла на первом ходе ($i = 1$) начинается с минимального радиуса начального сечения. В среднем и конечном сечениях моделирование начинается со 2-го радиуса, так как заготовка совершит 8 целых оборотов и четверть оборота за время прохождения круга от начального до среднего (конечного) сечения. Съем металла со 2-го радиуса не осуществляется, так как разница между минимальным и рассматриваемым радиусом превышает радиальную подачу (процесс прерывистого резания).

На основании данных о значениях радиусов, полученных при помощи модели съема металла, производится расчет погрешностей, возникающих в процессе внутреннего шлифования [2, 3]. Погрешность диаметров находится как разность предельных значений фактического диаметра:

$$\delta = D_{z,i,g}^{\max} - D_{z,i,g}^{\min}, \quad (3)$$

где $D_{z,i,g}^{\max}$ – максимальное значение диаметра $D_{z,i,g}$ g -го сечения на i -м ходе z -й ступени; $D_{z,i,g}^{\min}$ – минимальное значение диаметра $D_{z,i,g}$ g -го сечения на i -м ходе z -й ступени.

$$D_{z,i,g} = R_{z,i,g,b} + R'_{z,i,g,b},$$

где $R_{z,i,g,b}$ – значение b -ого радиуса g -го сечения на i -м ходе z -й ступени;
 $R'_{z,i,g,b}$ – значение радиуса, противолежащего b -му радиусу g -го сечения на
 i -м ходе z -й ступени.

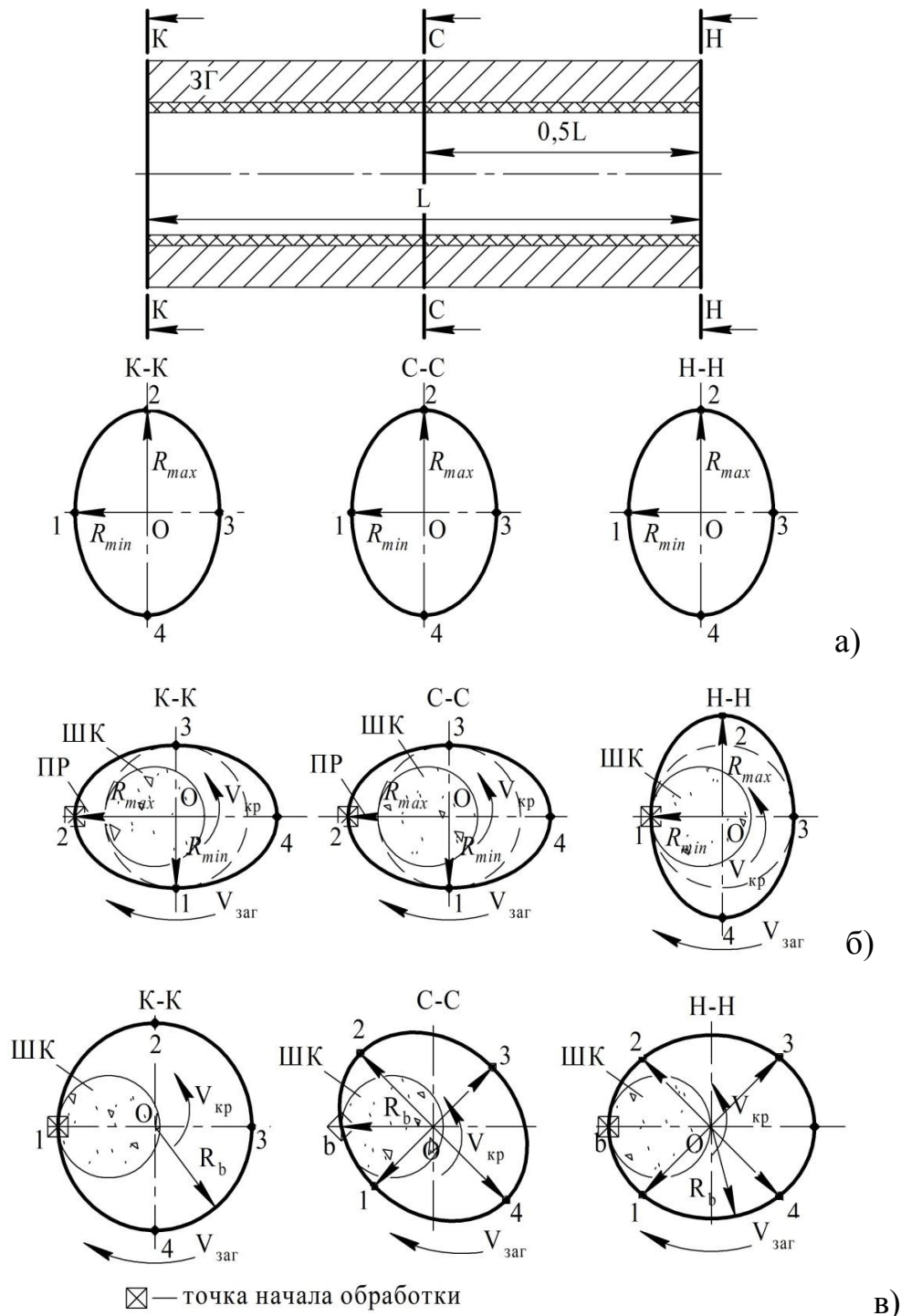


Рис. 1. Пересчет номера радиуса g -ого сечения, с которого начинается обработка: а – заготовка; б, в – моделирование съема металла на $i = 1$ ходе (б) и на $i = I_{max}$ ходе (в); I_{max} – максимально возможное количество ходов; ШК – шлифовальный круг; ПР – зона прерывистого резания; 3Γ – заготовка

Радиальное биение рассчитывается как наибольшая разность радиусов в сечении:

$$\delta_p = R_{z,i,g,b}^{\max} - R_{z,i,g,b}^{\min}, \quad (4)$$

где $R_{z,i,g,b}^{\max}$ – максимальное значение b -го радиуса g -го сечения на i -м ходе z -й ступени; $R_{z,i,g,b}^{\min}$ – минимальное значение b -го радиуса g -го сечения на i -м ходе z -й ступени.

Отклонение от круглости рассчитывается относительно среднего элемента профиля (правильного круга), расположенного относительно реального профиля обрабатываемой поверхности при условии, что среднеквадратичное отклонение точек реального профиля от среднего элемента профиля имело минимальное значение в пределах рассматриваемого участка [4]. Рассмотрим расчетную схему отклонения от круглости относительного среднего элемента профиля (рис. 2). Реальный профиль имеет центр в точке O_g и описывается массивом радиусов $R_{z,i,g,b}$. Средний элемент профиля имеет форму правильного круга, центр которого находится в точке O_0 с координатами n и m .

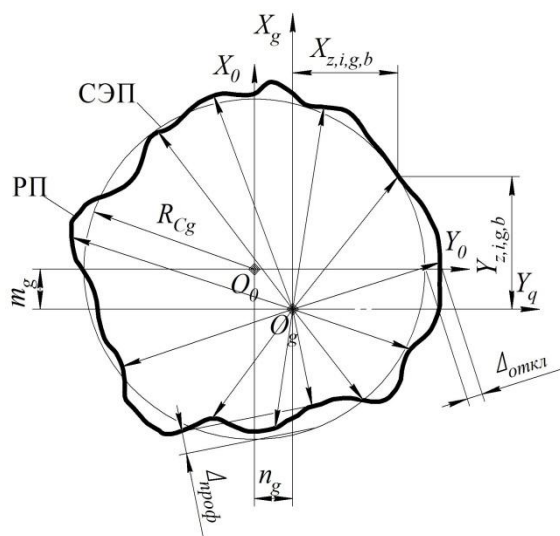


Рис. 2. Схема расчета отклонения от круглости:
РП – реальный профиль; СЭП – средний элемент профиля;

Радиус среднего элемента профиля для g -го сечения рассчитывается по следующей формуле [5]:

$$R_{Cg} = \frac{\sum_{i=1}^b R_{z,i,g,b}}{b_{\max}}.$$

Координаты центра среднего элемента профиля:

$$n_g = \frac{2 \sum_1^b X_{z,i,g,b}}{b_{\max}} \text{ и } m_g = \frac{2 \sum_1^b Y_{z,i,g,b}}{b_{\max}},$$

где b_{\max} – максимальное количество рассматриваемых радиусов; β – угол наклона радиуса относительно оси абсцисс. $X_{z,i,g,b}$, $Y_{z,i,g,b}$ – координаты конца радиус-векторов, описывающих реальный профиль, определяются по формулам: $X_{z,i,g,b} = R_{z,i,g,b} \cos \beta$ и $Y_{z,i,g,b} = R_{z,i,g,b} \sin \beta$.

Найдем координаты радиус-векторов реального профиля заготовки в системе координат $Y_0 O_0 X_0$: $X_{z,i,g,b}^* = X_{z,i,g,b} - n_g$ и $Y_{z,i,g,b}^* = Y_{z,i,g,b} - m_g$.

Определим значения радиус-векторов реального профиля в системе координат среднего элемента профиля $Y_0 O_0 X_0$:

$$R_{z,i,g,b}^* = \sqrt{(X_{z,i,g,b}^*)^2 + (Y_{z,i,g,b}^*)^2}.$$

Отклонение от круглости можно найти по следующей формуле

$$\delta_k = \Delta_{\text{откл}} + \Delta_{\text{проф}}, \quad (5)$$

где $\Delta_{\text{откл}}$ – абсолютное значение наибольших отклонений; $\Delta_{\text{проф}}$ – абсолютные значения точек реального профиля по обе стороны от среднего элемента.

$$\Delta_{\text{откл}} = R_{z,i,g,b}^{*\max} - R_{Cg} \text{ и } \Delta_{\text{проф}} = R_{Cg} - R_{z,i,g,b}^{*\min},$$

где $R_{z,i,g,b}^{*\max}$ – максимальное расчетное значение b -го радиуса в g -м сечении на i -м ходе z -й ступени; $R_{z,i,g,b}^{*\min}$ – минимальное расчетное значение b -го радиуса в g -м сечении на i -м ходе z -й ступени.

Под отклонением от цилиндричности понимается наибольшее расстояние от точек реальной поверхности до прилегающего цилиндра в пределах нормируемого участка [4] и находится по формуле:

$$\delta_{\text{ц}} = \Delta_{\text{откл}}^* + \Delta_{\text{проф}}^*, \quad (6)$$

где $\Delta_{\text{откл}}^*$ – абсолютное значение наибольших отклонений; $\Delta_{\text{проф}}^*$ – абсолютные значения точек реального профиля по обе стороны от среднего элемента.

$$\Delta_{\text{откл}}^* = R_{z,i,b}^{\max} - R_C^{\max} \text{ и } \Delta_{\text{проф}}^* = R_C^{\max} - R_{z,i,b}^{\min},$$

где $R_{z,i,b}^{\max}$ – максимальное расчетное значение радиуса на i -м ходе z -й ступени; $R_{z,i,b}^{\min}$ – минимальное расчетное значение радиуса на i -м ходе z -й ступени; R_C^{\max} – максимальное значение радиуса среднего элемента профиля из g -х сечений.

Полное радиальное биение рассчитывается как наибольшая разность радиусов в трех рассматриваемых сечениях:

$$\delta_{npб} = R_{z,i,b}^{\max} - R_{z,i,b}^{\min}. \quad (7)$$

Отклонение профиля продольного сечения (ОППС) – это наибольшее расстояние от точек реальной поверхности, которые лежат в плоскости, проходящей через ее ось до соответствующей стороны прилегающего профиля в пределах нормируемого участка [4].

Формулы для расчета отклонений профиля продольного сечения

$$\begin{aligned} \text{конусообразность } (R_{z,i,\kappa,b} < R_{z,i,c,b} < R_{z,i,\eta,b}): \delta_{onnc} &= R_{z,i,\eta,b} - R_{z,i,\kappa,b}; \\ \text{конусообразность } (R_{z,i,\eta,b} < R_{z,i,c,b} < R_{z,i,\kappa,b}): \delta_{onnc} &= R_{z,i,\kappa,b} - R_{z,i,\eta,b}; \\ \text{седлообразность } (R_{z,i,c,b} < R_{z,i,\eta,b}, R_{z,i,c,b} < R_{z,i,\kappa,b}): \delta_{onnc} &= R_{z,i,\kappa(\eta),b}^{\max} - R_{z,i,c,b}; \\ \text{бочкообразность } (R_{z,i,c,b} > R_{z,i,\eta,b}, R_{z,i,c,b} > R_{z,i,\kappa,b}): \delta_{onnc} &= R_{z,i,c,b} - R_{z,i,\kappa(\eta),b}^{\max}. \end{aligned} \quad (8)$$

Полученные значения показателей погрешности обработки, рассчитанные по формулам (3–8), сравниваются с соответствующими допустимыми значениями, указанными на чертеже детали.

Представленная в данной статье методика проектирования ограничений по точности внутришлифовальной обработки:

- основывается на модели съема металла, позволяющей рассчитать фактическое значение b -го радиуса g -го сечения на i -м ходе z -й ступени [1, 2];

- учитывает переменные условия обработки (затупление зерен круга, колебание припуска в партии заготовок и др.) и различные технологические факторы (диапазоны подач, упругие деформаций технологической системы, геометрические размеры круга и др.);

- позволяет рассчитывать допустимые значения погрешностей, связанных с допусками диаметральных размеров, а также с допусками формы и расположения внутренних цилиндрических поверхностей;

- предназначена для использования в качестве ограничения режимных параметров в методике расчета оптимальных циклов внутреннего шлифования с целью выбора оптимального распределения значений программных подач и снимаемой части припуска по ступеням цикла [3].

Библиографический список

1. Переверзев, П.П. Аналитическое моделирование взаимосвязи силы резания при внутреннем шлифовании с основными технологическими параметрами / П.П. Переверзев, А.В. Попова // *Металлообработка*. – 2013. – № 3. – С. 24–30.
2. Переверзев, П.П., Аналитическое моделирование взаимосвязи силы резания при внутреннем шлифовании с упругими деформациями технологической системы / П.П. Переверзев, А.В. Попова, Пименов Д.Ю. // *СТИН*. – 2014. – Вып. 9. – С.23–27.
3. Pereverzev, P.P. Automatic cycles' multiparametric optimization of internal grinding / P.P. Pereverzev, A.V. Akintseva // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 129. – Pp. 121–126.
4. ГОСТ Р 53442–2009. Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Допуски формы, ориентации, месторасположения и биения. – М.: Стандартиформ, 2010. – 45 с.
5. Дунин-Барковский, И.В. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И.В. Дунин-Барковский, А.Н. Карташева. – М.: Машиностроение, 1978. – 232 с.

[К содержанию](#)