

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

**Новиков Ф.В.**, докт. техн. наук, проф., **Дитиненко С.А.**, канд. техн. наук, доц.  
(Харьковский национальный экономический университет),  
**Бережной Р.А.** (ОАО Харьковский машиностроительный завод "Свет шахтера")

*Grounded conditions to reduce the basic processing time for internal grinding,  
taking into account limitations on the accuracy of the size of the manufacturing sur-  
face*

При финишной обработке внутренних цилиндрических поверхностей деталей машин возникают проблемы, связанные с высокой трудоемкостью обеспечения требуемых параметров точности обработки [1,2,3]. В особой мере это относится к операциям шлифования внутренних цилиндрических поверхностей зубчатых колес для приводов шахтных конвейеров, точность изготовления которых должна соответствовать 6–7 качеству, радиальное биение – до 0,01 мм, шероховатость поверхности –  $R_a=0,63$  мкм и менее. Как показывает практика, длительность операции внутреннего шлифования зубчатого колеса составляет до трех часов и более. Основной причиной низкой эффективности обработки являются возникающие (из-за низкой жесткости элементов технологической системы) упругие перемещения, которые вызывают значительные погрешности обработки и требуют длительного времени для их устранения. В связи с этим целью работы является обоснование условий уменьшения продолжительности обработки при обеспечении заданной точности обрабатываемых поверхностей.

Для решения поставленной задачи воспользуемся аналитическими зависимостями для определения упругого перемещения  $y$ , полученными применительно к круглому наружному (внутреннему) шлифованию по жесткой схеме (врезное шлифование со скоростью  $V_0$ ) и по схеме выхаживания [4,5]:

$$y = y_{уст} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{B}} \right), \quad (1)$$

$$y = y_0 \cdot e^{-\frac{\tau}{B}}, \quad (2)$$

где  $y_{уст} = B \cdot V_0$  – величина упругого перемещения, возникающего в технологической системе в установившемся во времени  $\tau$  процессе шлифования, м;

$B = \frac{\sigma}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$  – постоянная времени образования упругого перемещения в

технологической системе, с;  $c$  – приведенная жесткость технологической системы в радиальном направлении, Н/м;  $K_{ш} = P_z / P_y$  – коэффициент шлифова-

ния;  $P_z, P_y$  – соответственно тангенциальная и радиальная составляющие силы резания при шлифовании, Н;  $\sigma$  – условное напряжение резания при шлифовании, Н/м<sup>2</sup>;  $F$  – площадь поперечного сечения обрабатываемого образца, м<sup>2</sup>;  $V_{кр}$  – скорость круга, м/с;  $y_0$  – начальный натяг в технологической системе, м.

При плоском (внутреннем продольном) многопроходном шлифовании по жесткой схеме и по схеме выхаживания величина  $y$  определяется

$$y = y_{уст} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{n}{B_1}} \right), \quad (3)$$

$$y = y_0 \cdot e^{-\frac{n}{B_1}}, \quad (4)$$

где  $y_{уст} = B_1 \cdot t$ ;  $t$  – глубина шлифования, м;  $B_1 = \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$  – безразмерный параметр;  $H$  – ширина шлифования, м;  $V_{дет}$  – скорость детали, м/с.

Между параметрами  $B$  и  $B_1$  существует связь

$$B_1 = \frac{B}{\tau_0}, \quad (5)$$

где  $\tau_0 = L / S_{прод}$  – время одного продольного хода круга, с;  $L$  – длина хода круга, м;  $S_{прод}$  – скорость продольной подачи, м/с.

Первоначально определим параметр  $B$  применительно к круглому внутреннему шлифованию по схеме продольного выхаживания отверстия (диаметром 100 мм и высотой 150 мм) зубчатого колеса, изготовленного из стали 18ХГН2МФБ твердостью  $HRC 57 \dots 63$ . Обработка производилась на внутришлифовальном станке мод. 3К229В абразивным кругом 100x20x63 25А 25 СМ1 8 с режимом шлифования:  $V_{кр} = 35$  м/с;  $V_{дет} = 30$  м/мин;  $S_{прод} = 1,5$  м/мин. Перебег круга составлял 1/3 его высоты. Время одного продольного хода круга равно  $\tau_0 = 7$  с.

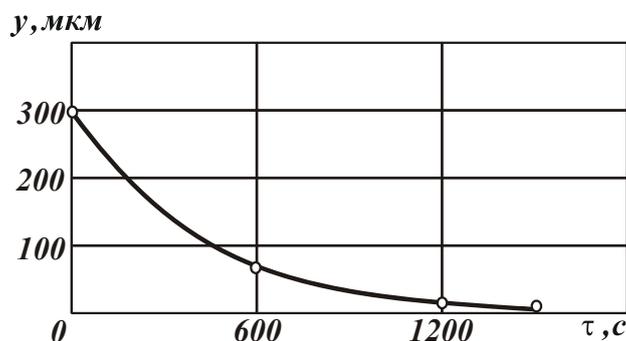


Рис. 1. Зависимость величины  $y$  от времени обработки  $\tau$ .

На рис. 1 приведены экспериментально установленные значения  $y$  с течением времени обработки  $\tau$  при шлифовании по схеме выхаживания с начальным натягом, равным  $y_0 = 0,3$  мм. Как видно, величина  $y$  во времени  $\tau$

непрерывно уменьшается. Подчиним данную закономерность аналитической зависимости (2), для чего разрешим ее относительно параметра  $B = \frac{\tau}{\ln(y_0 / y)}$ .

Расчетами установлено, что параметр  $B$  изменяется в небольших пределах (420...441 с). Это свидетельствует о том, что величина  $y$  изменяется во времени по экспоненциальному закону, описываемому зависимостью (2).

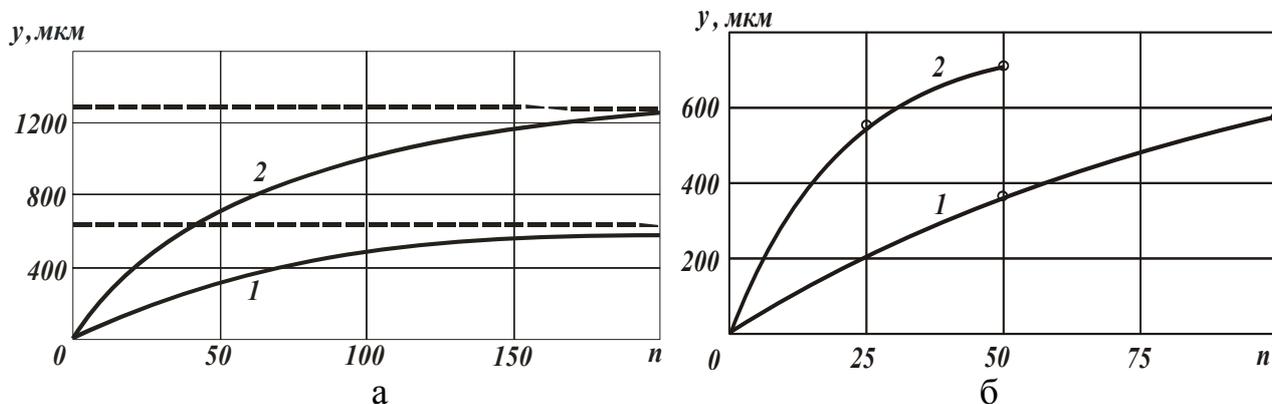


Рис. 2. Зависимость величины  $y$  от количества проходов круга  $n$ : 1 –  $t=0,01$  мм; 2 –  $t=0,02$  мм; а – расчетные значения; б – экспериментальные значения.

Зная параметр  $B$ , на основе зависимости (5) определим безразмерный параметр  $B_1$  для  $\tau_0=7$  с. Принимая  $B=420...441$  с, установлено  $B_1=60...63$ . Такие большие значения  $B_1$  свидетельствуют о том, что величина упругого перемещения  $y$  существенно превышает значения фактической глубины шлифования  $t_\phi$ . Следовательно, при многопроходном внутреннем шлифовании по жесткой схеме (в соответствии с зависимостью (3)) будут образовываться в технологической системе значительные упругие перемещения. Величина  $y_{уст} = B_1 \cdot t = 63 \cdot t$ , входящая в зависимость (3), будет многократно превышать номинальную глубину шлифования  $t$  и даже величину снимаемого припуска, рис. 2,а. Выполнение условия  $t_\phi \rightarrow t$  возможно при весьма большом количестве проходов круга  $n > 3 \cdot B_1 = 190$ . Практически весь процесс съема припуска будет протекать в неустановившемся режиме. Поэтому с целью сокращения трудоемкости обработки целесообразно шлифование вести не по жесткой схеме, которая на заключительном этапе требует продолжительного выхаживания, а по упругой схеме с начальным натягом в системе, кратным величине снимаемого припуска (т.е. весь припуск необходимо снимать по схеме выхаживания).

Для оценки достоверности сделанного вывода были проведены экспериментальные исследования величины упругого перемещения  $y$  в зависимости от количества проходов круга  $n$  при внутреннем шлифовании по жесткой схеме. Как следует из рис. 2,б, имеет место значительное увеличение упругого перемещения  $y$  с увеличением количества проходов круга  $n$ . При  $t=0,02$  мм через 50 проходов круга величина  $y$  достигала значения 0,7 мм, т.е. при врезании

круга в обрабатываемую деталь на глубину 1 мм было удалено всего 0,3 мм припуска. При дальнейшей обработке наблюдалось существенное увеличение упругого перемещения в технологической системе, что не позволило продолжать процесс шлифования. Следовательно, удалить весь припуск (1 мм) в данных условиях не представляется возможным. В связи с этим были проведены опыты с меньшей глубиной шлифования  $t=0,01$  мм. Через 50 проходов круга упругое перемещение равно  $y=370$  мкм, а через 100 проходов –  $y=550$  мкм. Как видно, и в этом случае имеют место значительные упругие перемещения в технологической системе, что не позволяет удалить весь снимаемый припуск.

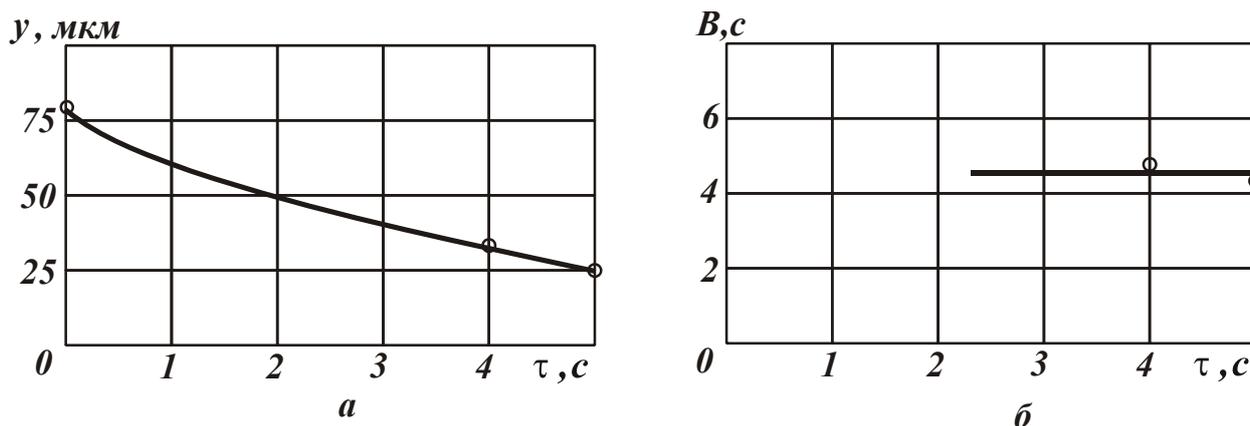


Рис. 3. Зависимости величины  $y$  (а) и параметра  $B$  (б) от времени обработки  $\tau$ .

Очевидно, для того чтобы уменьшить величину упругого перемещения в технологической системе, необходимо значительно уменьшить глубину шлифования  $t$ . Однако, это ведет к снижению производительности обработки, что не эффективно. Таким образом, экспериментально показано, что ведение процесса внутреннего шлифования по жесткой схеме в данных условиях не целесообразно. Такие большие значения  $y$  и безразмерного параметра  $B_1$  обусловлены низкой жесткостью технологической системы, равной  $c=260$  кГс/мм.

Для сравнения были определены параметры  $B$  и  $B_1$  при круглом наружном и плоском шлифовании. В первом случае измерения величины упругого перемещения  $y$  производились при круглом наружном шлифовании по схеме выхаживания на круглошлифовальном станке мод. 3У143МВ. Обработывалась цилиндрическая деталь из стали 45 абразивным кругом 1А1 400х80х203 24А 40 СМ1 К6, скорость круга –  $V_{кр}=35$  м/с, скорость детали –  $V_{дет}=13,2$  м/мин, начальный натяг в технологической системе –  $y_0=80$  мкм. Как следует из рис. 3,а, через 4 с шлифования величина упругого перемещения уменьшилась с 80 мкм до 35 мкм, а через 5 с шлифования – до 25 мкм.

Используя расчетную зависимость и экспериментальные значения упругого перемещения  $y=35$  мкм и 25 мкм соответственно для  $\tau=4$ с и 5с, определен параметр  $B$ . В первом случае он равен 4,88с, во втором случае – 4,27с, рис. 3,б. По сравнению с внутренним шлифованием (рис. 2,б), при круглом наружном шлифовании параметр  $B$  значительно меньше. Это связано с более высокой жесткостью технологической системы при круглом наружном шлифовании.

Были также проведены экспериментальные исследования упругих перемещений при плоском шлифовании по жесткой схеме на плоскошлифовальном станке мод. 3Л722В с использованием абразивного круга 1А1 400x80x203 24А 40 СМ1 К6. Съем припуска осуществлялся за один проход круга с глубиной шлифования  $t=0,05$  мм;  $V_{кр}=35$  м/с;  $V_{дем}=24$  м/мин. В результате установлено, что фактическая глубина шлифования при этом составила  $t_{\phi}=30$  мкм, а  $y=20$  мкм. Для определения безразмерного параметра  $B_1$  была использована аналитическая зависимость (4). Подставляя в нее исходные данные:  $n=1$ ;  $y=20$  мкм;  $t=50$  мкм, получено уравнение относительно неизвестной величины  $B_1$ :

$$B_1 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{1}{B_1}} \right) = 0,4 . \quad (6)$$

Решая уравнение, установлено  $B_1=0,45$ . Как видно, данное значение  $B_1$  значительно меньше аналогичных значений  $B_1=60\dots63$ , полученных при круглом внутреннем продольном шлифовании. Это связано с более высокой жесткостью технологической системы при плоском шлифовании.

Как показывает практика шлифования внутренних цилиндрических поверхностей зубчатых колес приводов шахтных конвейеров, на точность обработки значительное влияние оказывают термоупругие деформации детали, возникающие в процессе шлифования. Особенно опасен неравномерный нагрев обрабатываемой детали. Поэтому с целью обеспечения равномерного охлаждения после шлифования обрабатываемая деталь не снимается со станка до ее полного охлаждения. Это приводит к повышению трудоемкости операции шлифования. Чтобы оценить возможности уменьшения степени нагрева детали при шлифовании, определим работу резания, которая практически полностью превращается в теплоту. Количество тепла, выделяющегося при резании, равно

$$Q = \int_0^{\tau} N(\tau) \cdot d\tau , \quad (7)$$

где  $N(\tau) = P_z(\tau) \cdot V_{кр}$  – мощность шлифования, Вт.

При врезном шлифовании  $P_z(\tau)$  с учетом зависимости (1) выражается

$$P_z(\tau) = K_{ш} \cdot P_y(\tau) = K_{ш} \cdot c \cdot y = K_{ш} \cdot c \cdot y_{уст} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{B}} \right) . \quad (8)$$

Подставляя зависимость (8) в (7), имеем

$$Q_{врез} = K_{ш} \cdot c \cdot B \cdot y_{уст} \cdot \left( \frac{\tau}{B} + e^{-\frac{\tau}{B}} - 1 \right) . \quad (9)$$

При шлифовании этого же образца по схеме выхаживания (с начальным натягом  $y_0$ ) величина упругого перемещения  $y$  определится зависимостью (2). Соответственно, тангенциальная составляющая силы резания  $P_z(\tau)$  равна

$$P_z(\tau) = K_{ш} \cdot P_y(\tau) = K_{ш} \cdot c \cdot y = K_{ш} \cdot c \cdot y_0 \cdot e^{-\frac{\tau}{B}}. \quad (10)$$

Подставляя зависимость (10) в (7), имеем

$$Q_{вых} = K_{ш} \cdot c \cdot B \cdot y_0 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{B}} \right). \quad (11)$$

На рис. 4,а заштрихованным показаны площади, соответствующие значениям  $Q_{врез}$  и  $Q_{вых}$ . Как видно, с увеличением времени обработки  $\tau$  величины  $Q_{врез}$  и  $Q_{вых}$  увеличиваются, однако с разной интенсивностью. Так  $Q_{врез}$  увеличивается более интенсивно. Поэтому оценим соотношение  $Q_{врез}/Q_{вых}$  для  $y_{уст} = y_0$  и  $B=440$  с, рис. 4. Как видно, с увеличением  $\tau$  соотношение  $Q_{врез}/Q_{вых}$  увеличивается. При  $\tau/B=4$  соотношение  $Q_{врез}/Q_{вых}=3,075$ . Следовательно, съем всего припуска по схеме выхаживания при внутреннем шлифовании зубчатого колеса позволяет в 3 раза уменьшить тепловыделения по сравнению с врезным шлифованием (по жесткой схеме). Несомненно, это приведет к снижению температуры шлифования и времени охлаждения обрабатываемой детали, что в конечном итоге позволит снизить термоупругие деформации обрабатываемой детали и трудоемкость операции шлифования.

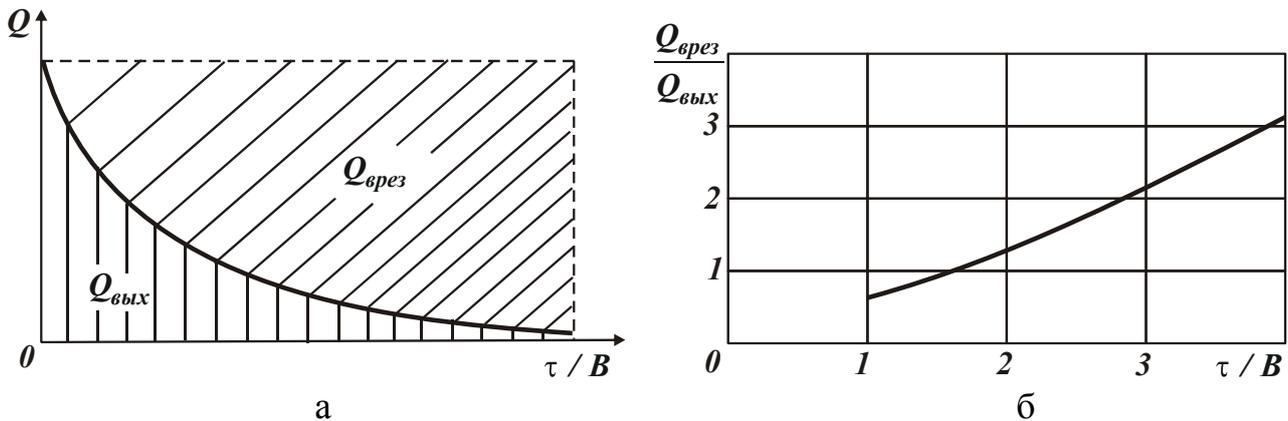


Рис. 4. Характер изменения величин  $Q_{врез}$  и  $Q_{вых}$  при изменении  $\tau/B$  (а) и зависимость  $Q_{врез}/Q_{вых}$  от  $\tau/B$  (б).

На финишных операциях обработки внутренних цилиндрических поверхностей зубчатых колес приводов шахтных конвейеров традиционно используется внутреннее продольное шлифование по жесткой схеме с периодическим выхаживанием. Операция обработки весьма трудоемка, длится более трех часов при съеме припуска 0,5 мм на сторону. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что в условиях шлифования с низкой жесткостью в технологической системе целесообразно съем всего припуска производить по схеме выхаживания, т.е. с отключенной радиальной подачей, создавая в системе начальный натяг, равный или кратный величине снимаемого припуска. При этом эффективность обработки возрастает с увеличением снимаемого

го припуска. В связи с этим, данная схема обработки положена в основу совершенствования операции внутреннего шлифования зубчатых колес.

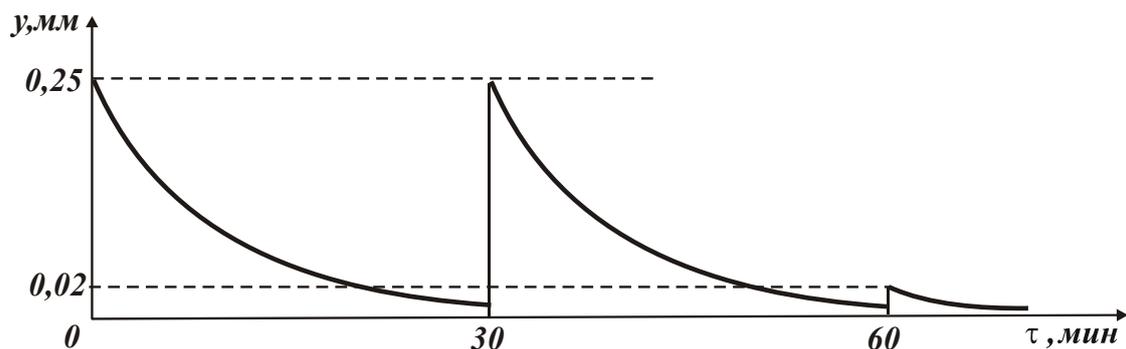


Рис. 5. Характер изменения величины  $y$  с течением времени обработки  $\tau$ .

Опытами установлено, что съем припуска величиной 0,5 мм на сторону может быть произведен за три перехода. На первом переходе в технологической системе создается начальный натяг величиной 0,25 мм, и обработка осуществляется фактически до момента прекращения искрения в зоне резания. При этом обеспечивается точность размера обрабатываемой поверхности на уровне 10–20 мкм. На втором переходе в технологической системе повторно создается натяг величиной 0,25 мм и обработка опять же производится до момента прекращения искрения в зоне резания. Затем оставшийся припуск величиной до 20 мкм удаляется на третьем переходе так же по схеме выхаживания, рис. 5. В результате реализации данной структуры операции внутреннего шлифования производительность обработки увеличилась почти в 2 раза. Продолжительность операции уменьшилась до 2 часов. При этом обеспечиваются требуемые параметры точности и шероховатости обработки. Существенно (с 60 до 30 минут) уменьшилось также время охлаждения обрабатываемой детали после шлифования, которое осуществляется без съема нагретой детали со станка с целью устранения ее термоупругих деформаций и повышения таким образом точности обработки. Это свидетельствует об уменьшении выделяемого при резании тепла, что согласуется с приведенными выше теоретическими решениями.

**Список литературы:** 1. Управление процессом шлифования / А.В. Якимов, А.Н. Паршаков, В.И. Сверщев, В.П. Ларшин. – К.: Техніка, 1983. – 182 с. 2. Тверской М.М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках / М.М. Тверской. – М.: Машиностроение, 1982. – 208 с. 3. Рябенков И.А. Повышение эффективности финишной обработки деталей гидроаппаратуры на основе выбора рациональной структуры и параметров операций: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения” / И.А. Рябенков. – Одесса, 2009. – 21 с. 4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. ”Механика резания материалов” – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с. 5. Новиков Ф.В. Повышение точности и производительности механической обработки / Ф.В. Новиков, Р.А. Бережной // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – 2009. – Вип. 81. – С. 29-38.