

УДК 621.941



А.А.Оргиян,
д.т.н., професор,
Одеський
національний
політехнічний
університет
e-mail:
alexorgiyanyan@gmail.com



А.В.Баланюк,
аспірант,
Одеський
національний
політехнічний
університет
e-mail:
anna.balanyuk@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ТОНКОГО РАСТАЧИВАНИЯ ДВУХСТУПЕНЧАТЫХ ОТВЕРСТИЙ

А.А. Оргиян, А.В. Баланюк. Технологическая динамика тонкого растачивания двухступенчатых отверстий. На основе изучения факторов, определяющих положение формы поперечного сечения отверстия, получены соотношения для расчета статических и динамических погрешностей. Изучено взаимодействие возмущений от работающих резцов, установленных на двухступенчатой борштанге. Сопоставлены результаты расчетов и экспериментов по исследованию точностных показателей при растачивании двухступенчатых отверстий. Установлено, что минимальная амплитуда вынужденных колебаний при растачивании реализуется при некотором соотношении длин ступеней борштанги, не соответствующей максимальной жесткости.

A.A. Orgiyanyan, A.V. Balanyuk. Technological dynamics of two-stage fine boring holes. Based on the study of the factors that determine the position of the cross-sectional shape holes, the relations for the calculation of static and dynamic errors. Studied the mutual perturbations from working cutters mounted on two-step boring bar. Comparing the results of calculations and experiments on investigation vaniyu-precision performance with two-stage boring holes. It is established that the minimum amplitude of the forced oscillation when boring is realized at a certain ratio of the lengths of the steps of the boring bar, not corresponding to the maximum rigidity.

Введение. Точные отверстия обрабатывают обычно при большом запасе устойчивости замкнутой динамической системы станка. Поэтому, можно полагать, что автоколебания отсутствуют, а имеют место лишь вынужденные колебания, источником которых являются внешние воздействия на упругую систему. Погрешность формы поперечного сечения при тонком растачивании обусловлена действием следующих факторов: 1) переменной податливостью системы шпиндель-борштанга; 2) погрешностью формы отверстия заготовки; 3) погрешностью установки заготовки; 4) внешними воздействиями на упругую систему станка при вращении шпинделя. Указанные факторы искажают траекторию вершины резца. Следует различать статические и динамические искажения траектории, или статические и динамические погрешности. Статические погрешности имеют

частоту менше нижей собственной частоты системы и, как правило, кратную частоте вращения шпинделя. Наиболее часто статические погрешности формируют овальность отверстия.

Материалы и результаты исследований. В нашей работе изучены такие факторы, влияющие на точность:

- 1) погрешности положения и формы отверстия в заготовке, а также установки заготовки;
- 2) геометрические неточности вращения шпинделя;
- 3) переменная податливость системы шпиндель-борштанга;
- 4) погрешности от внешних воздействий на упругую систему станка при вращении шпинделя.

Таким образом, предлагается расчетное определение следующих частных погрешностей.

P_e – диаметральная погрешность формы обработанного отверстия, вызванная смещением оси отверстия в заготовке относительно оси шпинделя;

P_o – диаметральная погрешность формы обработанного отверстия, вызванная овальностью отверстия в заготовке;

P_k – диаметральная погрешность формы обработанного отверстия, вызванная неравномерностью радиальной податливости у резца по углу поворота шпинделя.

Эти погрешности, возникающие под действием возмущений, имеющих периодичность вращения шпинделя, определяются статическим расчетом. Их можно считать случайными, независимыми, а кривые их распределения близкими к нормальным. Поэтому в соответствии с [1] суммарная статическая погрешность P_c определяется выражением:

$$P_c = t \sqrt{\frac{1}{9} P_e^2 + \frac{1}{9} P_o^2 + \frac{1}{9} P_k^2},$$

где t – коэффициент, определяющий процент получения брака при обработке. Для тонкого растачивания точных отверстий следует обеспечить достаточно низкий процент риска 0,27 %, а для этого следует выбрать $t = 3$.

$$P_c = \sqrt{P_e^2 + P_o^2 + P_k^2}.$$

Определение отклонений от круглости поперечного сечения ΔR_c , вызванных статическими возмущениями, сводится к переходу от диаметальной меры погрешности к радиальной:

$$\Delta R_c = 0,5 P_c = 0,5 \sqrt{P_e^2 + P_o^2 + P_k^2}.$$

Отклонения от круглости поперечного сечения, вызванные колебаниями, определяются амплитудой колебаний "А":

$$\Delta R_{\text{д}} = 2A,$$

так как при колебаниях радиус вписанной окружности уменьшается на А, а описанной – возрастает на "А": Сумма статических и динамических составляющих круглости определяет полное отклонение от круглости:

$$\Delta R = \Delta R_e + \Delta R_{\text{д}}.$$

Рассматривая перечисленные выше частные погрешности, отметим, что расчет статических погрешностей сводится к определению разности деформаций борштанги у резца, вызванных в первых двух случаях изменением сил резания, либо вызванных разностью податливости у резца – в третьем случае.

Значения радиальной силы резания P_y , необходимые для расчета погрешностей, могут быть найдены по эмпирическим формулам, полученным для тонкого растачивания различных материалов. Сила P_y является степенной функцией глубины резания t и подачи s [2]

$$P_y = C_{py} \cdot t^{X_{py}} \cdot s^{Y_{py}}, \quad (1)$$

где коэффициенты C_{py}, X_{py}, Y_{py} – зависят от обрабатываемого материала.

Погрешность диаметрального размера обработанного отверстия, вызванную неточностью установки заготовки в виде эксцентриситета, можно рассчитать по разности между отжимами борштанги в двух диаметральных плоскостях

$$P_e = 2 \cdot K \cdot P_y(t) - K [P_y(t+e) + P_y(t-e)],$$

где k – радиальная податливость в сечении резца;

e – эксцентриситет.

После преобразования получим:

$$P_e = K \cdot P_y \left[2 - \left(1 + \frac{e}{t}\right)^{X_{py}} - \left(1 - \frac{e}{t}\right)^{X_{py}} \right]. \quad (2)$$

Погрешность диаметра обработанного отверстия, вызванная неравномерностью радиальной податливости у резца по углу поворота шпинделя, может быть рассчитана как удвоенная разность между наибольшим и наименьшим отжимами борштанги в соответствующих диаметральных плоскостях:

$$P_K = 2(K^{\max} - K^{\min}) \cdot P_y.$$

После преобразования получим

$$P_K = P_y \cdot 2 \cdot \Delta K, \quad (4)$$

где $\Delta K = K^{\max} - K^{\min}$.

Установлено, что 1/5 всех отверстий, обрабатываемых на отделочно-расточных станках ступенчатые. Для повышения производительности и точности в этих случаях применяют ступенчатые борштанги; эти борштанги при больших вылетах инструмента оснащаются виброгасителями. Прогнозирование точности обработки в этих случаях затрудняется из-за отсутствия количественных показателей взаимовлияния режущих лезвий на разных ступенях. Естественно предположить, что при многорезцовой обработке каждой j -тый из n работающих резцов вносит собственные погрешности. Полная погрешность обработки, вызванная, например, неравномерностью податливости шпинделя по углу поворота, найдется как сумма погрешностей: собственной и дополнительной от других работающих резцов. Дополнительные погрешности можно определить с помощью коэффициентов влияния путем деления собственной погрешности на собственную податливость у соответствующего резца и умножения на соответствующий коэффициент влияния: например, при 2-х резцовой обработке погрешность второго резца от неравномерности податливости шпинделя равна:

$$P_k = P_{k2} \cdot \frac{\delta_{22}}{\delta_{22}} + P_{k1} \cdot \frac{\delta_{12}}{\delta_{11}}.$$

В экспериментах исследовалось влияние параметров борштанг и режимов резания на колебания, точность формы и шероховатость обработанной поверхности. Растачивались заготовки из стали 35, стали 45 и чугуна СЧ 21-40.

Заготовки имели ступенчатые отверстия с диаметрами ступеней 45 и 85 мм, 30 и 40 мм и др.. Растачивание велось при глубине резания 0,1 и 0,3 мм. Режимы резания: $v=160 \text{ м/мин}$ (на $\varnothing 85 \text{ мм}$) и $v=80 \text{ м/мин}$ (на $\varnothing 45 \text{ мм}$), $s=0,06 \text{ мм/об}$. Использовались резцы из твердого сплава Т30К4 (для стали) и ВКЗМ (для чугуна) заточенные по следующей геометрии: для стали $\varphi = 45^\circ, \varphi_1 = 15^\circ, \gamma = 10^\circ, \lambda = +10^\circ, \alpha = \alpha_1 = 10^\circ, r = 0,2 \text{ мм}$; для чугуна – с той же геометрией, кроме $\gamma = -5^\circ, \lambda = 0^\circ$.

Расчет динамических погрешностей основан на определении уровня вынужденных колебаний резца относительно обрабатываемой детали. Упругие характеристики шпинделя и борштанги в соответствии с приня-

той расчетной схемой (рис. 1) описываются параметрами: EI_k и l_k – изгибная жесткость и длина консольной части шпинделя; C – угловая жесткость, приведенная к среднему сечению передней опоры; вылеты ступенной борштанги и жесткости сечений обозначены l_1, l_2 и EI_1, EI_2 [3].

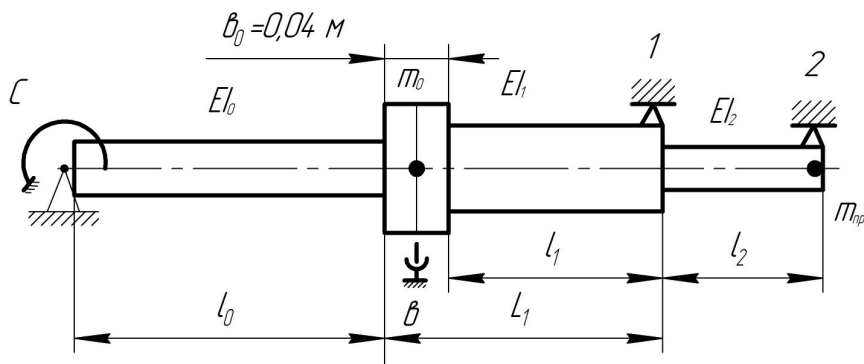


Рис. 2. Схема расчетной модели

В расчет также вводятся характеристики процесса резания и возмущения, действующие на технологическую систему. Для головок второго и третьего типоразмера параметр C изменяется в пределах $(7,5 \div 10) \cdot 10^6$ ($H \cdot m$). В соответствии с общими положениями динамики станков колебания в замкнутой динамической системе станка опишем уравнениями [3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_0 \ddot{y}_0 + b \dot{y}_0 + \frac{\delta_{22}}{\delta} y_0 - \frac{\delta_{02}}{\delta} y_2 = P_0 \sin \omega t + \frac{\delta_{01} \cdot \delta_{22} - \delta_{02} \cdot \delta_{12}}{\delta} P_{z1}; \\ m \ddot{y}_2 + \frac{\delta_{00}}{\delta} y_2 + \frac{\delta_{02}}{\delta} y_0 = P_{z2} + \frac{\delta_{00} \cdot \delta_{12} - \delta_{01} \cdot \delta_{02}}{\delta} P_{z1}; \\ T_p \dot{P}_{z1} + P_{z1} = -K_{p1} y_2 \frac{\delta_{12}}{\delta_{22}}; \\ T_p \dot{P}_{z2} + P_{z2} = -K_{p2} y_2, \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\delta = \delta_{00} \cdot \delta_{22} - \delta_{02}^2,$$

$$m = m_{np} = 0,243 \cdot \left[m_1 \frac{l_1^3}{l^3} + m_2 \right],$$

де: y_0 – колебательное перемещение массы m_0 ;

\ddot{y}, \dot{y} – вторая и первая производные радиальных колебательных перемещений по времени;

y_2 – колебательное перемещение наиболее удаленного от фланца резца;

P_{z1}, P_{z2} – силы резания на соответствующих резцах;

T_p – инерционная постоянная стружкообразования;

K_{p1}, K_{p2} – коэффициенты резания на соответствующих резцах;

δ_{iK} – коэффициенты влияния.

Для решения системы уравнений (5) была составлена программа в среде MatLab для реализации на ПК.

Для повышения качества растачивания и производительности на ступенчатых борштангах также испытывались и комбинации режущих инструментов: на ступени диаметром 40 мм – резец из твердого сплава Т30К4, работающий со скоростью резания 180 м/мин, а на ступени диаметром 80 мм – резец из эльбора – Р, работающий со скоростью резания 360 м/мин. Растачивание проводилось борштангами с разными соотношениями длин ступеней (рис. 2).

Определялись характеристики точности формы расточенного отверстия ($\Delta R, \Delta D$) (рис.3) и шероховатость R_a (рис. 4). Определялся также уровень вынужденных колебаний наиболее удаленного от фланца шпинделя резца при одновременной и последовательной работе резцов (рис. 2), а также высота кольцевого выступа h , образующегося на обработанной поверхности из-за разновременного вступления резцов в работу (рис 5). Эксперименты проводись партиями по 20 заготовок. При общей длине борштанги 200 мм на каждом из 8 этапов длина первой ступени борштанги $\varnothing 80$ мм уменьшалась на 20 мм путем обтачивания этой ступени до диаметра $\varnothing 40$ мм, равного диаметру второй ступени. Таким образом, длина второй ступени увеличивалась от 20 до 160 мм, что приводило к увеличению податливости. На каждом этапе производилось растачивание отверстий одновременно и последовательно работающими резцами. Определялась также собственная частота борштанги на каждом этапе путем обработки осциллограмм затухающих колебаний, возбуждаемых ударом в сечении второго резца. Перед каждым этапом резцы устанавливались на контрольную борштангу; если уровень колебаний находился в пределах $\pm 0,25\%$ от предыдущего уровня растачивания контрольной бор-

штангой, то резцы устанавливались на борштангу следующего этапа, иначе резцы перетачивались.

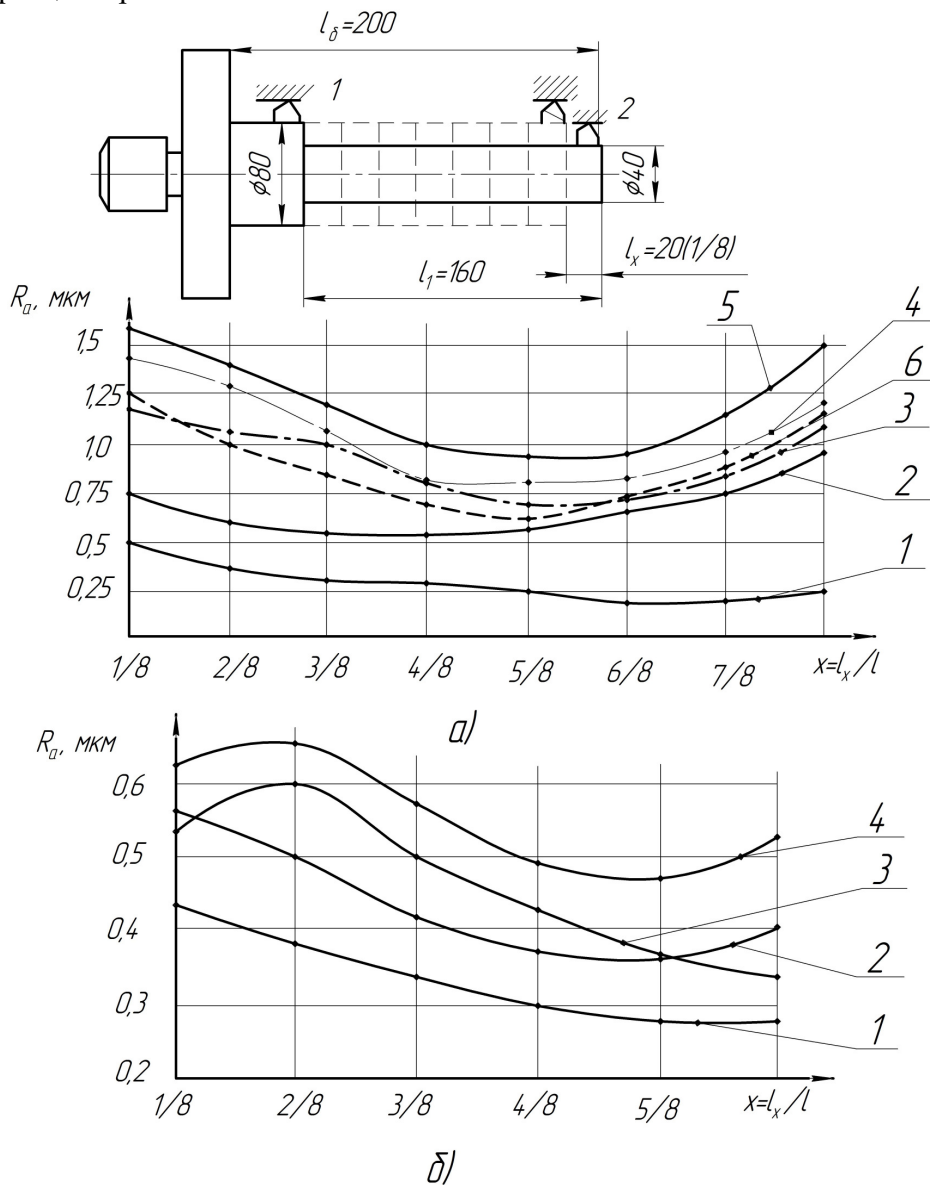


Рис.2. Зависимость амплитуд колебаний у резца шероховатости поверхности отверстия от соотношения длин ступеней борштанги: сталь 45, $s=0,06$ мм/об, $v=160$ м/мин (измерения на $d = 40$ мм), при $t=0,1$ мм: – а) 1 – работает резец 1; 2 – работает резец 2; 3 и 6 – работают

резцы одновременно (3 – эксперимент; 6 – расчет по модели);
 при $t=0,3 \text{ мм}$: 4 – работает резец 2; 5 – работают резцы 1 и 2.

б) – 1 – работает резец 1; 2 – работают резцы 1 и 2; при $t=0,3 \text{ мм}$:
 3 – работает резец 1; 4 – работают резцы 1 и 2.

Эксперименты подтверждают закономерности, обнаруженные в расчетах. На рисунках 2, 3, 4 приведены результаты экспериментов и расчетов. Приведенные результаты выявили не очевидные динамические связи между резцами, установленными на двухступенчатых борштангах. На рисунке 2 приведены зависимости амплитуд колебаний и шероховатости поверхности от соотношения длины ступеней. Видно, что эти зависимости немонотонны. Зависимость отклонений от круглости отверстий (рис. 3) также имеет экстремальный характер, аналогичной зависимости амплитуд колебаний (рис. 2).

На рисунке 4 приведены диаграммы зависимости шероховатости поверхностей и высоты кольцевого выступа (впадины) от количества и последовательности работы резцов. Видно, что такая комбинация резцов из эльбора – Р (на диаметре 85 мм) и твердого сплава Т15К6 (на диаметре 45 мм) позволяет выбрать оптимальную скорость резания на каждой ступени и получить высокое качество обработки.

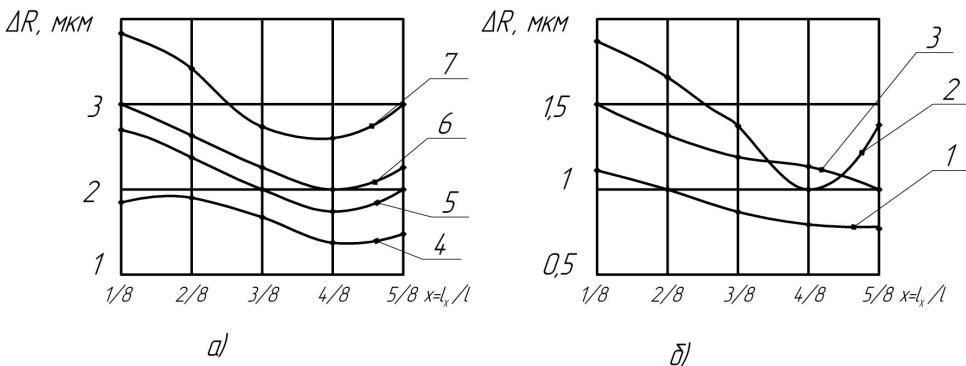


Рис. 3. Зависимость отклонений от круглости отверстия от соотношения длин ступеней борштанги: сталь 45, $s=0,06 \text{ мм/об}$,

$v=160 \text{ м/мин}$, а – измерения на диаметре $d = 45 \text{ мм}$;

б – измерения на $d = 85 \text{ мм}$, при $t=0,1 \text{ мм}$: 1 – работает резец 1; 4 – работает резец 2; 2,5 – работают резцы 1 и 2;

при $t=0,3 \text{ мм}$: 3 – работает резец 1; 6 – работает резец 2;

7 – работают резцы 1 и 2;

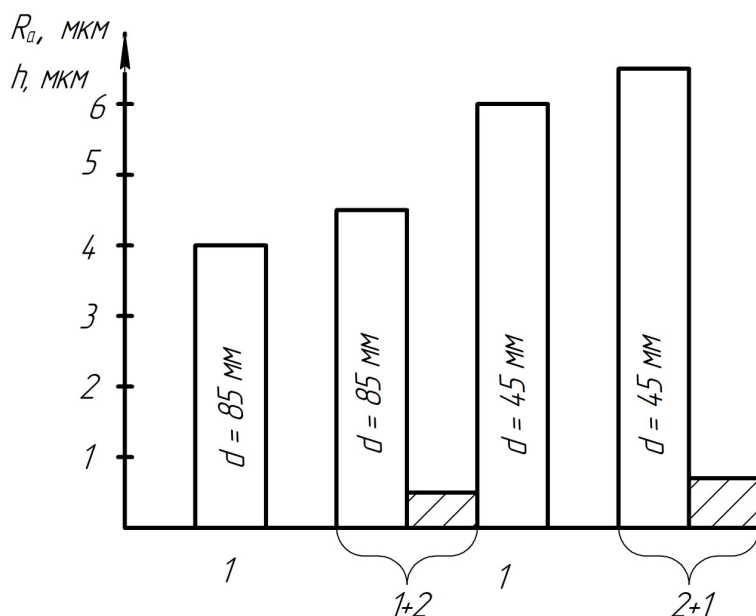


Рис.4. Диаграммы зависимостей шероховатости поверхностей отверстий и высоты кольцевого выступа (впадины) от количества и последовательности работы резцов: сталь 45, $s=0,06 \text{ мм/об}$, $v=350 \text{ м/мин}$, $t=0,4 \text{ мм}$,

1 – эльбор – Р, 2 – Т15К6, $v=170 \text{ м/мин}$

□ – R_a , мм; ▨ – h , мкм.

Выводы:

1. В экспериментах изучено влияние параметров технологической системы станка и режимов резания на колебания, точность формы продольного и поперечного сечений и шероховатость обработанной поверхности при растачивании ступенчатых отверстий. Отличительной особенностью расчетов технологической динамики при многолезвийной обработке является учет взаимного влияния возмущений, возникающих на каждой из обрабатываемых ступеней отверстия. Сопоставление амплитуд вынужденных колебаний, полученных расчетом и в экспериментах, свидетельствует об удовлетворительном соответствии между ними (наибольшее относительное расхождение между результатами не превышает 20 %).

2. Эксперименты подтверждают основные выводы расчетов: зависимости амплитуд вынужденных колебаний и отклонений от круглости от соотношения длин ступеней борштанги имеют экстремальный характер

при работе наиболее удаленного от фланца резца, а также при работе двух резцов. Изменения коэффициентов влияния, определяющих передачу возмущений от резца к резцу, приводят к тому, что минимальные значения амплитуд колебаний и отклонения от круглости отверстий возникают при некотором соотношении длин ступеней, не соответствующим максимальной жесткости.

3. Применение резцов из эльбора – Р в комбинации с твердосплавными резцами при растачивании ступенчатых отверстий с большим перепадом диаметров (от 1,5 до 2,5) позволяет назначить рациональные скорости резания на каждой ступени борштанги.

Литература

1. Маталин А.А. Технология машиностроения: Учебник для машиностроительных вузов по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты». – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд–ние, 1985. – 496 с., ил.
2. Справочник технолога-машиностроителя / под. ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – М.:Машиностроение,1985. Т. 2. – 496 с.
3. А.В. Баланюк "Колебания двухступенчатых консольных борштанг при тонком растачивании." Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво) / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. 2014р. Стр. 131 – 139.

Надійшла до редакції 26.01.2015