

DOI: 10.53078/20778481\_2021\_3\_14

УДК 621.95.01

*О. Н. Кляус, А. А. Жолобов, А. М. Федоренко*

## К ВОПРОСУ СМЕЩЕНИЯ ОСЕЙ СПИРАЛЬНЫХ СВЕРЛ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ОТНОСИТЕЛЬНО ДЛИННЫХ ОТВЕРСТИЙ

*O. N. Kliaus, A. A. Zholobov, A. M. Fedorenko*

## ON THE DISPLACEMENT OF SPIRAL DRILL AXES IN THE FORMATION OF RELATIVELY LONG HOLES

### Аннотация

Представлена методика теоретических исследований на основе разработки математического аппарата, позволяющего рассчитывать смещение оси отверстия за счет увода инструмента и визуализировать его. На основании предложенной методики создана программа для расчета отклонений осей относительно длинных отверстий в зависимости от определенных параметров, влияющих на процесс сверления.

### Ключевые слова:

смещение оси отверстия, увод инструмента, относительно длинные отверстия, сверление, сверление относительно длинных отверстий.

### Для цитирования:

Кляус, О. Н. К вопросу смещения осей спиральных сверл при формировании относительно длинных отверстий / О. Н. Кляус, А. А. Жолобов, А. М. Федоренко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2021. – № 3(72). – С. 14–23.

### Abstract

The article presents methods of theoretical research which are based on the development of a mathematical apparatus which allows calculating the displacement of a hole axis due to the tool withdrawal and visualizing it. Based on the proposed methods, a program has been developed to calculate deviations of axes of relatively long holes in accordance with certain parameters that affect the drilling process.

### Keywords:

displacement of hole axis, tool withdrawal, relatively long holes, drilling, drilling of relatively long holes.

### For citation:

Kliaus, O. N. On the displacement of spiral drill axes in the formation of relatively long holes / O. N. Kliaus, A. A. Zholobov, A. M. Fedorenko // The Belarusian-Russian university herald. – 2021. – № 3(72). – P. 14–23.

### Введение

Одной из проблем, возникающих при обработке относительно длинных отверстий (к относительно длинным отверстиям в данной работе принято сочетание длины отверстия к его диаметру в пределах  $4 < l/d < 10...15$ , т. е. при рекомендуемых для сверления в сплошном металле  $d_{св.макс} = 20$  мм,  $l_{отв} = 80...300$  мм), является

смещение осей формируемых отверстий. Это смещение неразрывно связано с упругим смещением оси инструмента. Упругое смещение оси инструмента зависит от его геометрической точности, жесткости, способа базирования при обработке, физико-механических свойств обрабатываемого материала, режимов резания, точности и жесткости используемого оборудования, особенностей

конструкции и изготовления технологической оснастки. В ходе изучения научно-технических публикаций, посвященных обработке глубоких отверстий различными способами, были выявлены преимущества использования для этих целей спиральных сверл: процесс осуществляется на универсальном оборудовании, что является экономически выгодным в серийном производстве; разработаны специализированные конструкции спиральных сверл, которые лишены недостатков стандартной конструкции (внутренний подвод СОТС; на главных режущих кромках делаются стружкоразделительные канавки, которые способствуют раздроблению стружки и лучшему вымыванию ее охлаждающей жидкостью; специализированные спиральные сверла для сверления отверстий глубиной  $4 < l/d < 10...15$  и более имеют утолщенную сердцевину  $k = (0,3...0,4)d$  и увеличенный до  $40^\circ$  угол наклона винтовой канавки). Технология изготовления спиральных сверл является наиболее простой и отработанной по сравнению с другими типами сверл для сверления длинных отверстий [1, 2].

Таким образом, для современного машиностроения созданы все предпосылки использования спиральных сверл для формирования относительно длинных отверстий  $4 < l/d < 10...15$ . Однако анализ результатов исследований в области технологий формирования таких отверстий спиральными сверлами показывает, что исследований в этой области крайне мало и в основном они направлены на изучение производительности и работоспособности процессов, геометрии инструмента. Настоящая работа нацелена на теоретические исследования с возможностью прогнозирования погрешностей, связанных с упругим смещением осей сверл и, соответственно, осей формируемых отверстий.

Настоящие исследования имеют практическое использование, т. к. на

этапе проектирования технологического процесса можно иметь определенные данные по точностным параметрам формируемых поверхностей и направлениям их улучшения.

### ***Последовательность моделирования процессов сверления относительно длинных отверстий спиральными сверлами***

Для моделирования процессов сверления относительно длинных отверстий спиральными сверлами предполагались следующие шаги:

1) осуществить отбор наиболее значимых параметров, влияющих на упругое смещение сверла и, соответственно, смещение оси отверстия от теоретической прямой линии с целью определения их взаимосвязи;

2) разработать алгоритм расчета смещения оси отверстий;

3) разработать программу для автоматизации расчета и представления полученных результатов в качестве графических зависимостей.

### ***Отбор наиболее значимых параметров, влияющих на смещения оси отверстия от теоретической прямой линии***

Величина смещения оси отверстия от теоретической прямой линии была образована под влиянием трех основных слагаемых: геометрического  $\Delta_{\Gamma}$ , упругого  $\Delta_{\text{У}}$  смещений оси инструмента и упругого смещения узла направления (кондукторной плиты)  $\Delta_{\text{УК}}$  [2, 4, 5].

$$\Delta_{\text{СМ}} = \Delta_{\Gamma} + \Delta_{\text{У}} + \Delta_{\text{УК}}. \quad (1)$$

Все зависимости для расчета и параметры, влияющие на геометрическое смещение оси сверла при формировании им отверстия в целевой заготовке, приведены в табл. 1 [2, 5].

Табл. 1. Зависимости для расчета и параметры, влияющие на геометрическое смещение оси сверла

Формула для расчета	Параметры
$\Delta_r = (h + \Delta_H + \delta S_1) \left( 0,5 \frac{l_{xв}}{l_{ем}} \right) - 0,5 S_2 - e$	$\Delta_r$ – погрешность обработки, обусловленная геометрическим смещением оси сверла, мм; $h$ – износ сменной втулки, мм; $\Delta_H$ – погрешность обработки, обусловленная износом сверла, мм; $\delta S_1$ – поле рассеивания суммарного зазора в сопряжении «сменная втулка – инструмент», мм; $l_{xв}$ – вылет сверла за торец втулки, мм; $l_{ем}$ – длина кондукторной втулки, мм; $S_2$ – зазор между сменной и постоянной втулками, мм; $e$ – несоосность наружной и внутренней поверхностей сменной втулки, мм
$\delta S_1 = \sqrt{TA^2 + TB^2 + \delta B_{ок}^2} - S_1$	$\delta S_1$ – поле рассеивания суммарного зазора в сопряжении «сменная втулка – инструмент», мм; $TA$ – допуск на размер отверстия сменной втулки, мм; $TB$ – допуск на размер направляющей части сверла, мм; $\delta B_{ок}$ – поле рассеивания зазора в сопряжении «сменная втулка – инструмент» от обратной конусности сверла, мм; $S_1$ – диаметральный зазор между сменной втулкой и сверлом, мм
$\delta B_{ок} = \frac{T_k (l_{xв} - l_n)}{100}$	$\delta B_{ок}$ – поле рассеивания зазора в сопряжении «сменная втулка – инструмент» от обратной конусности сверла, мм; $T_k$ – допуск на величину обратной конусности сверла, мм; $l_{xв}$ – вылет сверла за торец втулки, мм; $l_n$ – длина перетачиваемой части инструмента за период его службы, мм

Таким образом, в качестве управляемых параметров выбраны: диаметральный зазор между сменной втулкой и сверлом  $S_1$ , вылет сверла за нижний торец втулки  $l_{xв}$ ; длина сменной кондукторной втулки  $l_{ем}$ ; зазор между сменной и постоянной втулками  $S_2$ ; несоосность наружной и внутренней поверхностей сменной втулки  $e$ ; допуск на размер отверстия сменной втулки  $TA$ ; допуск на размер направляющей части

сверла  $TB$ ; допуск на величину обратной конусности  $T_k$ .

Все зависимости для расчета и параметры, влияющие на упругое смещение оси сверла, приведены в табл. 2 [1, 5].

Из них в качестве управляемых следует выбрать длину сверла, подачу сверла  $s$ , главные углы в плане  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ .

Табл. 2. Зависимости для расчета и параметры, влияющие на упругое смещение оси сверла

Формула для расчета	Параметры
$\Delta_y = n_3 \cdot \Delta_{y.и.}$	$\Delta_y$ – погрешность обработки, обусловленная упругим смещением оси сверла, мм; $n_3$ – коэффициент, зависящий от жесткости инструментальной наладки; $\Delta_{y.и.}$ – величина упругого отжатия сверла, мм
$\Delta_{y.и.} = \frac{n_2 \cdot \Delta P_k \cdot l^2}{3E \cdot c \cdot D^4}$	$n_2$ – коэффициент, учитывающий влияние силы осевой подачи сверла $P_o$ и неуравновешенной осевой силы резания $\Delta P_k$ ; $l$ – длина сверла; $E$ – модуль упругости первого рода, $E = 2 \cdot 10^7$ МПа; $c$ – коэффициент, учитывающий тип инструмента; $D$ – диаметр сверла, мм

Окончание табл. 2

Формула для расчета	Параметры
$\Delta P_k = 0,25k \cdot \Delta Z \cdot C_R$	$\Delta P_k$ – равнодействующая неуравновешенных сил, Н; $k$ – число режущих кромок инструмента; $C_R$ – коэффициент, учитывающий режимы обработки и материал обрабатываемой заготовки, Н/мм; $\Delta Z$ – величина неравномерности напуска на обработку, мм
$\Delta Z = \Delta_{in}$	$\Delta_{in}$ – погрешность обработки, обусловленная диссимметрией режущей части сверла, мм
$\Delta_{in} = D \left( \frac{2 \operatorname{tg} \varphi_1 - \tau \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 - 1}{\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi_2} \right)$	$D$ – диаметр сверла, мм; $\varphi_1, \varphi_2$ – главные углы в плане; $\tau$ – осевой сдвиг вершин, мм
$\tau = L_2 - L_1$	$L_1, L_2$ – проекции длин режущих частей лезвий на ось сверла, мм
$L_1 = \frac{R_1}{\operatorname{tg} \varphi_1}; L_2 = \frac{R_2}{\operatorname{tg} \varphi_2}$	$R_1, R_2$ – величины радиусов при формировании отверстия
$C_R = \left( \left( C_1 \cdot t^{x_1} \cdot s^{y_1} \cdot HB^{n_1} \right)^2 - \left( C_2 \cdot t^{x_2} \cdot s^{y_2} \cdot HB^{n_2} \right)^2 \right)^{0,5}$	$C_R$ – коэффициент, учитывающий режимы обработки и материал обрабатываемой заготовки; $HB$ – твердость обрабатываемого материала, $HB = 197$ ; $C_1, C_2, x_1, x_2, y_1, y_2, n_1, n_2$ – эмпирические коэффициенты и показатели степени

Упругое смещение узла направления (кондукторной плиты) связано с направлением сверла посредством кондукторной втулки и подробно рассмотрено в [3], где показано, что эта составляющая сама является суммирующей ряда единичных факторов, которые связаны между собой размерными цепями.

Следующим этапом настоящих исследований являлось создание программы на основании отобранных параметров для прогнозирования величины смещения оси отверстия от теоретической прямой линии при формировании относительно длинных отверстий спиральными сверлами. Для уточнения логики программы разработан алгоритм расчета, представленный в виде блок-схемы (рис. 1).

В качестве языка программирования был использован высокоуровневый язык и интерактивная среда для программирования VBA (Visual Basic for Applications). Сама компьютерная программа зарегистрирована в Националь-

ном центре интеллектуальной собственности [6].

### **Результаты тестирования разработанной программы при исследовании конкретных условий формирования отверстий спиральными сверлами**

В настоящей части исследований осуществлялось тестирование работы модели для оценки смещения оси отверстия в зависимости от упругого и геометрического смещения оси сверла. Поскольку графические зависимости имеют схожий вид, то в работе приведены результаты, отражающие смещение оси отверстий при таких значениях параметров, которые оказывают наибольшее влияние на смещение оси относительно длинного отверстия.

Оценка смещения оси отверстия, обусловленного упругим смещением оси сверла осуществлялась при изменении длины сверла  $l$ , подачи  $S$ , главных углов в плане  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ .

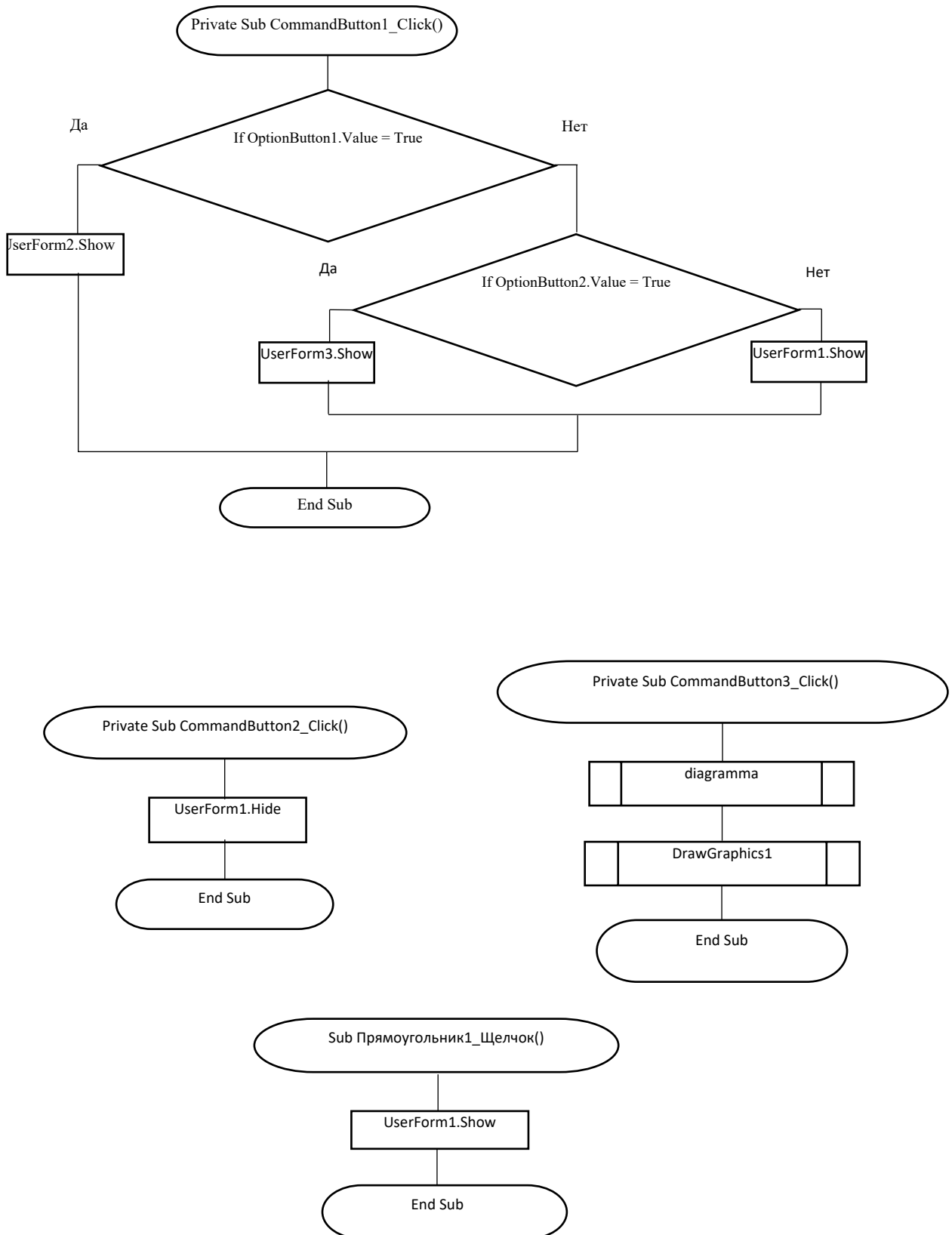
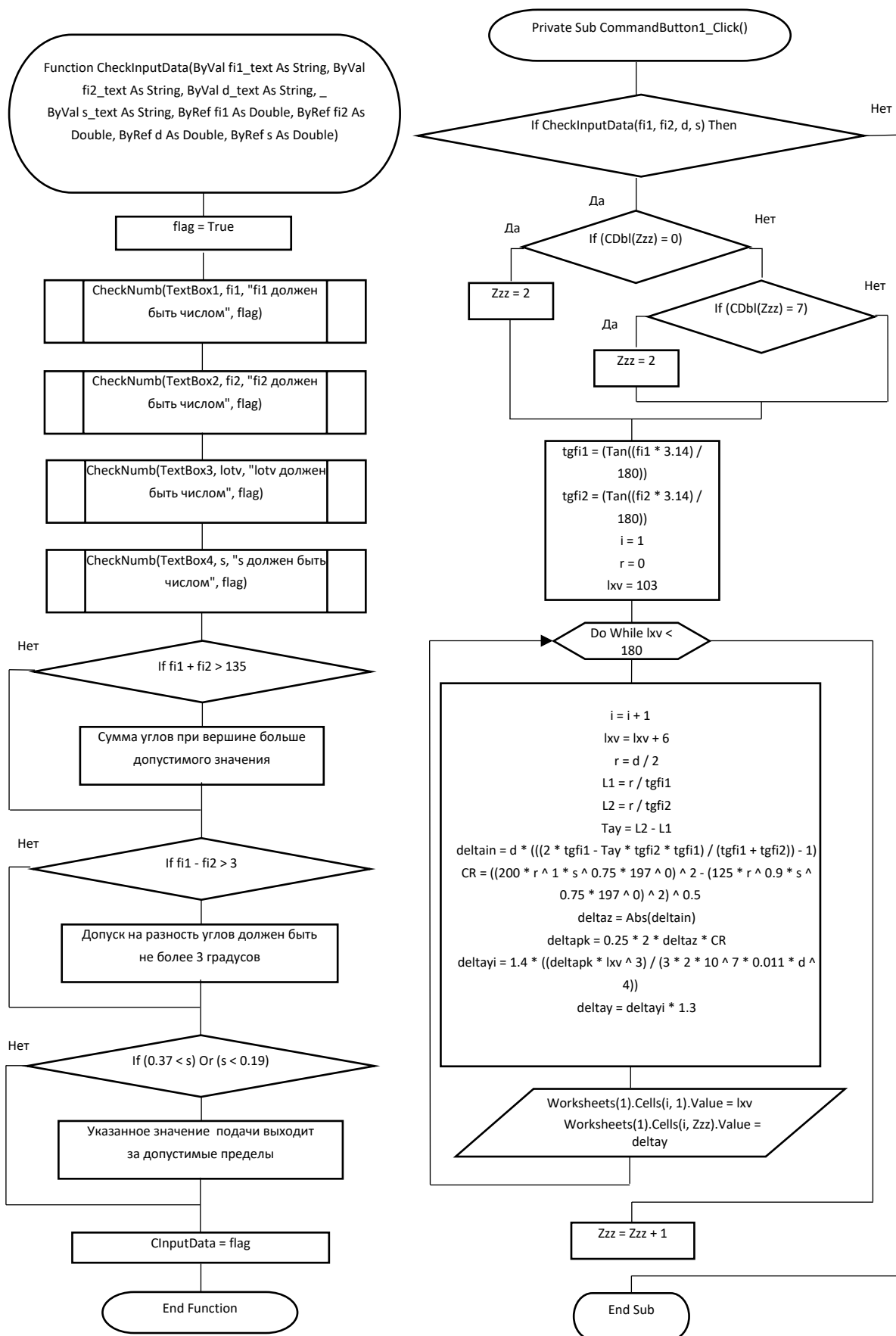
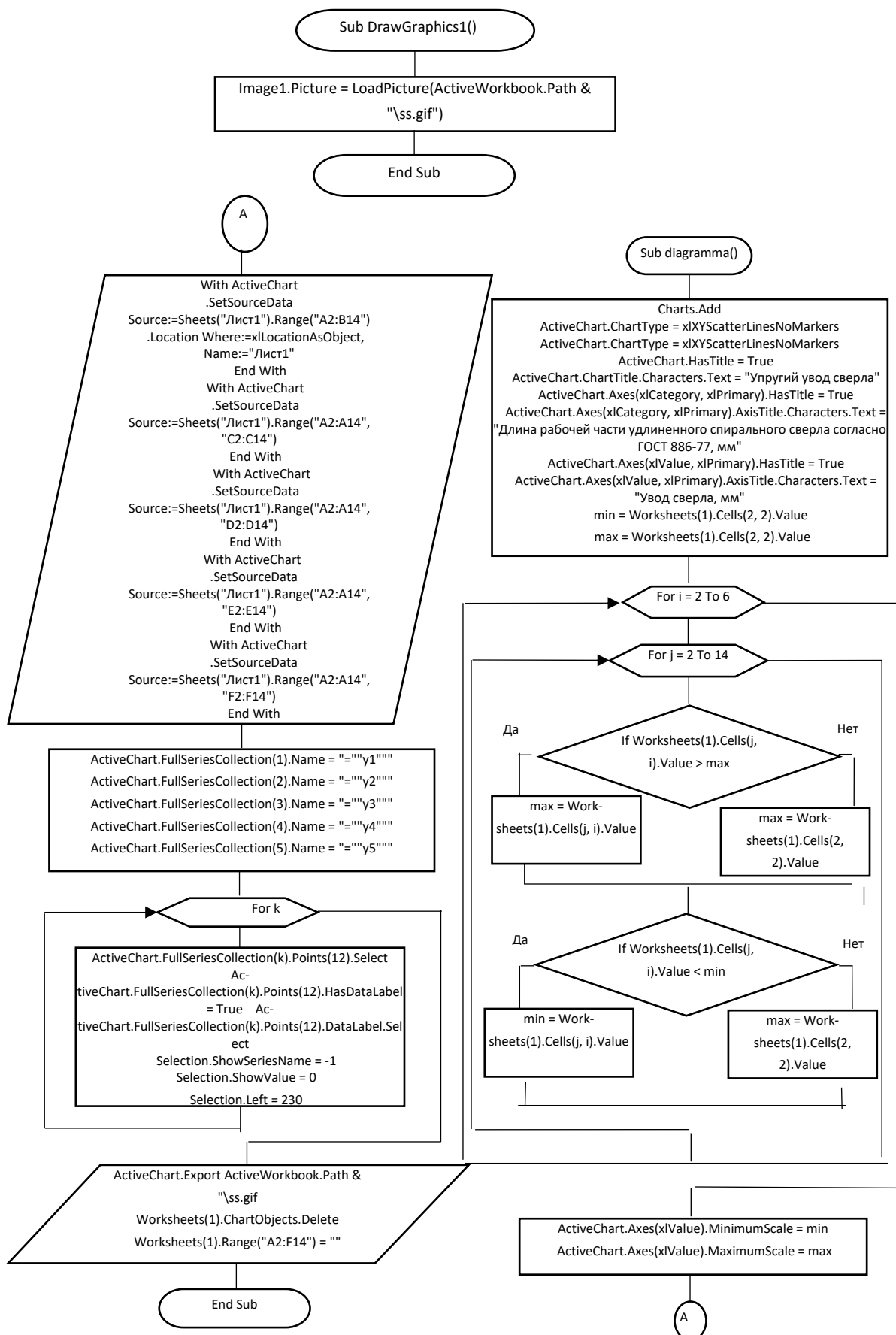


Рис. 1. Общий алгоритм работы программы



Продолжение рис. 1



Окончание рис. 1

В качестве исходных параметров процесса сверления отверстий были приняты следующие условия:  $d = 10$  мм;  $\varphi_1 = 67,6^\circ$  и  $\varphi_2 = 66,8^\circ$  с возможностью пошагового изменения на  $0,2^\circ$  и  $S = 0,24$  мм/об с возможностью увеличения до  $0,36$  мм/об с шагом  $0,03$  мм/об [1, 4]. Результаты представлены на рис. 2 в виде графиков.

Как видно из рис. 2, при увеличении длины сверла, а также расхождения главных углов в плане увеличивается упругое смещение оси сверла и, соответственно, смещение оси отверстия.

На рис. 3 приведено графическое прогнозирование увода оси сверла при зафиксированных углах в плане

$\varphi_1 = 67,6^\circ$  и  $\varphi_2 = 67,4^\circ$  с увеличением осевой подачи инструмента  $S$  от  $0,24$  до  $0,36$  мм/об и шаге  $0,03$  мм/об; установлено, что при увеличении подачи  $S$  увеличивается упругое смещение оси сверла и, соответственно, смещение оси отверстий. При выборе значений углов в плане должны были соблюдаться условия:  $\varphi_1 + \varphi_2 = 135^\circ$ ;  $\varphi_1 > \varphi_2$ ;  $\varphi_1 - \varphi_2 \leq 3^\circ$  [2, 3]. Исходя из приведенных условий и учитывая то, что эти углы при идеальной заточке сверла равны, необходимо стремиться к тому случаю, когда разность между углами в плане будет наименьшей. Все вышеуказанные условия выполняются при значениях  $\varphi_1 = 67,6^\circ$  и  $\varphi_2 = 67,4^\circ$ .

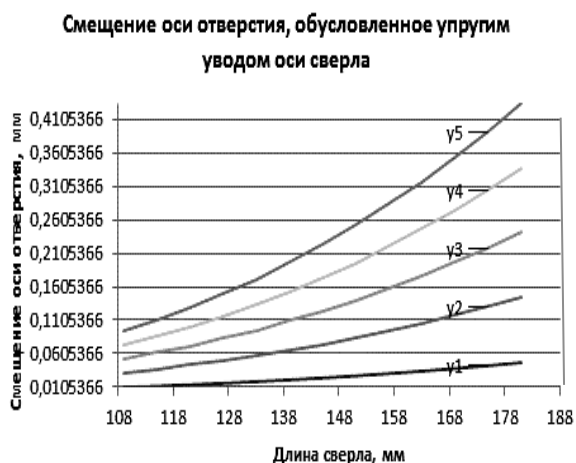


Рис. 2. Смещение оси отверстий при заданных значениях главных углов в плане:  $y_1 - \varphi_1 = 67,6^\circ, \varphi_2 = 67,4^\circ$ ;  $y_2 - \varphi_1 = 67,8^\circ, \varphi_2 = 67,2^\circ$ ;  $y_3 - \varphi_1 = 68^\circ, \varphi_2 = 67^\circ$ ;  $y_4 - \varphi_1 = 68,2^\circ, \varphi_2 = 66,8^\circ$ ;  $y_5 - \varphi_1 = 68,4^\circ, \varphi_2 = 66,6^\circ$

Как было описано ранее, при идеальной заточке сверла углы при вершине в плане будут равны, следовательно, можно принять, что смещение оси отверстий будет равно 0. Поэтому при вводе значений углов при вершине в плане  $\varphi_1 = \varphi_2 = 67,5^\circ$  в программу графики в окне программы не представлены.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что модель для оценки смещения оси отверстия, обусловленно-

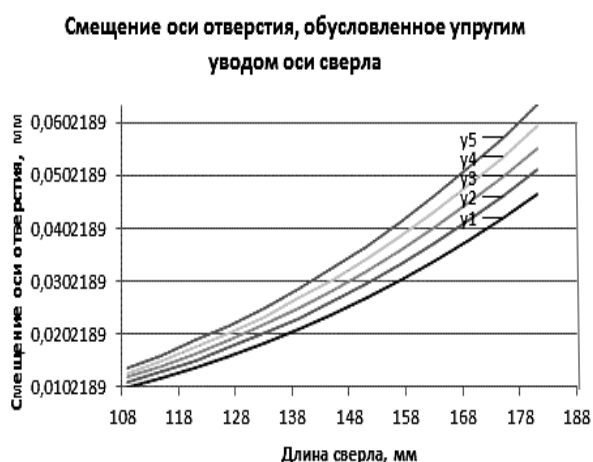


Рис. 3. Смещение оси отверстий при заданных значениях подачи  $S$ :  $y_1 - S = 0,24$  мм/об;  $y_2 - S = 0,27$  мм/об;  $y_3 - S = 0,3$  мм/об;  $y_4 - S = 0,33$  мм/об;  $y_5 - S = 0,36$  мм/об

го упругим уводом сверла при изменении длины  $l$ , подачи  $S$ , главных углов в плане  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  верна.

Следующим этапом теоретических исследований было тестирование работы модели для оценки смещения оси отверстия, обусловленного геометрическим уводом сверла при изменении диаметрального зазора между сменной втулкой и сверлом  $S_1$ , длины сменной кондукторной втулки  $l_{вт}$ , зазора между



сменной и постоянной втулками  $S_2$ , несоосности наружной и внутренней поверхностей сменной втулки  $e$ , допуска на размер отверстия сменной втулки  $TA$ , допуска на размер направляющей части сверла  $TB$ , допуска на величину обратной конусности  $T_k$ .

В соответствии с [4] заданы исходные данные:  $d = 10$  мм;  $l_{em} = 35$  мм;  $S_2 = 0,01533$  мм;  $e = 0,0058$  мм;  $TA = 0,0238$  мм;  $TB = 0,039$  мм;  $T_k = 0,05$  мм;  $\Delta l = 2,22 \cdot 10^{-5}$  мм. Соответственно, изменяется диаметральный

зазор в отверстии между сменной втулкой и сверлом  $S_1$ . Так как при уменьшении диаметрального зазора между сменной втулкой и сверлом увод сверла уменьшается, уменьшается и смещение оси отверстия (рис. 4).

На рис. 5 представлены графические зависимости смещения оси сверла от длины кондукторной втулки и длины рабочей части сверла. При увеличении длины сменной кондукторной втулки увод сверла уменьшается, уменьшается и смещение оси отверстия.

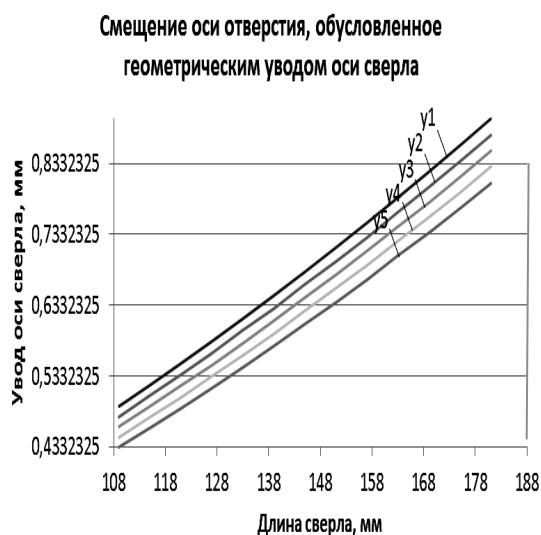


Рис. 4. Смещение оси отверстия, обусловленное геометрическим смещением оси сверла при заданном значении диаметрального зазора между сменной втулкой и сверлом  $S_1$ :  $y_1 - S_1 = 0,052$  мм;  $y_2 - S_1 = 0,048$  мм;  $y_3 - S_1 = 0,044$  мм;  $y_4 - S_1 = 0,040$  мм;  $y_5 - S_1 = 0,036$  мм

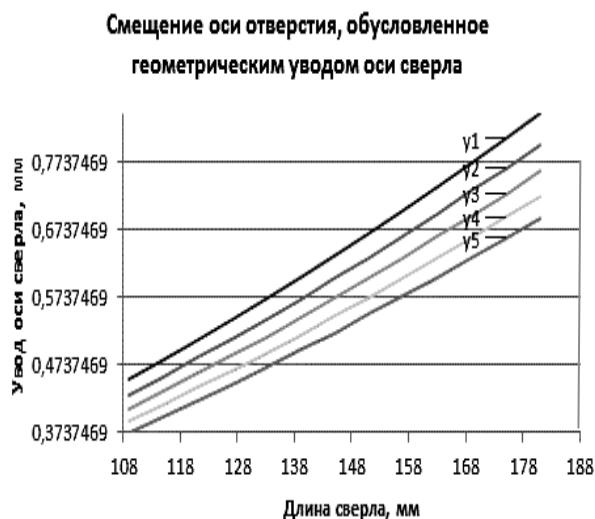


Рис. 5. Смещение оси отверстия, обусловленное геометрическим смещением оси сверла при заданном значении длины сменной кондукторной втулки  $l_{em}$ :  $y_1 - l_{em} = 33$  мм;  $y_2 - l_{em} = 35$  мм;  $y_3 - l_{em} = 37$  мм;  $y_4 - l_{em} = 39$  мм;  $y_5 - l_{em} = 41$  мм

### Выводы

1. Установлены основные параметры, оказывающие наибольшее влияние на смещение оси отверстия, формируемого сверлением: диаметральный зазор между сменной втулкой и сверлом  $S_1$ , вылет сверла за нижний торец втулки  $l_{xв}$ ; длина сменной кондукторной втулки  $l_{em}$ ; зазор между сменной и постоянной втулками  $S_2$ ; несоосность наружной и внутренней поверхностей сменной втулки  $e$ ; допуск

на размер отверстия сменной втулки  $TA$ ; допуск на размер направляющей части сверла  $TB$ ; допуск на величину обратной конусности  $T_k$ ; подача сверла  $S$ ; главные углы в плане  $\phi_1$  и  $\phi_2$ .

2. Для уточнения логики программы разработан алгоритм расчета, представленный в виде блок-схемы.

3. На основании разработанного алгоритма создана программа [6], которая позволяет исследовать смещение осей отверстий от теоретической пря-

мой линии и программировать эту погрешность на этапе проектирования технологического процесса механиче-

ской обработки деталей.

4. Осуществлено тестирование разработанной программы на примерах.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Звонцов, И. Ф.** Технологии сверления глубоких отверстий: учебное пособие / И. Ф. Звонцов, П. П. Серебrenицкий, А. Г. Схиртладзе. – Санкт-Петербург: Лань, 2013. – 496 с.: ил.
2. **Косилова, А. Г.** Точность обработки, заготовки и припуски в машиностроении: справочник технолога / А. Г. Косилова, Р. К. Мещеряков, М. А. Калинин. – Москва: Машиностроение, 1976. – 288 с.: ил.
3. **Жолобов, А. А.** Прогнозирование и обеспечение качества технологических систем на этапах их проектирования и изготовления / А. А. Жолобов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2005. – 303 с.: ил.
4. **ГОСТ 2034–80.** Сверла спиральные. Технические условия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200015714>. – Дата доступа: 10.06.2021.
5. **Миронова, М. Н.** Функциональные семантические сети для обеспечения точности механической обработки: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / М. Н. Миронова. – Могилев, 2015. – 300 л.: ил.
6. Компьютерная программа для исследования смещения оси глубоких отверстий: а. с. ВУ 1351 / А. А. Жолобов, О. Н. Кляус. – Оpubл. 21.10.2020.

*Статья сдана в редакцию 29 июня 2021 года*

**Ольга Николаевна Кляус**, аспирант, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-29-845-19-00. E-mail: [klyaus.olya@yandex.by](mailto:klyaus.olya@yandex.by).

**Александр Алексеевич Жолобов**, канд. техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.

**Алексей Михайлович Федоренко**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

**Olga Nikolayevna Klyaus**, PhD student, Belarusian-Russian University. Tel.: +375-29-845-19-00. E-mail: [klyaus.olya@yandex.by](mailto:klyaus.olya@yandex.by).

**Aliaksandr Alekseyevich Zholobov**, PhD (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.

**Alexey Mikhailovich Fedorenko**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.