

УДК 622.002.5

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ РАСПОЛОЖЕНИЯ СЕКТОРОВ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕЙ СЕКЦИИ ГЕОХОДА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ КООРДИНАТНОГО КОНТРОЛЯ\*

*А.В. ВАЛЬТЕР, канд. техн. наук, доцент*  
*В.В. АКСЕНОВ, доктор техн. наук, профессор*  
*В.Ю. БЕГЛЯКОВ, канд. техн. наук, доцент*  
*П.А. ЧАЗОВ, ассистент*  
(ЮТИ ТПУ, г. Юрга)

Поступила 8 сентября 2015

Рецензирование 8 октября 2015

Принята к печати 10 ноября 2015

**Вальтер А.В.** – 652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26,  
Юргинский технологический институт (филиал) федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет»,  
e-mail: avwalter@tpu.ru

Изложены результаты исследования фактической точности оболочки стабилизирующей секции опытного образца геохода. Работа содержит краткий обзор ряда подходов к моделированию механизмов формирования погрешностей кольцевых сегментных изделий и определению их фактической точности. Сформулирована задача экспериментальной проверки допущений, принимаемых при моделировании. Проведенное в статье исследование выполнено на основе экспериментальных данных, полученных путем координатного контроля оболочки опытного образца геохода. Для анализа экспериментальных данных, создания математических моделей, их исследования, визуализации данных и формирования отчетов разработано специальное программное обеспечение. Анализ данных проводился путем математического моделирования поверхности оболочки стабилизирующей секции в целом и поверхностей каждого отдельного сектора. Полученные математические модели основаны на аппроксимации наборов точек, полученных в процессе координатного контроля, цилиндрическими поверхностями. В статье показано, что, по меньшей мере, значительная часть отклонений геометрической формы оболочки секции (от 30,3 до 52,3 %) объясняется погрешностями расположения секторов и погрешностями их радиусов. На основе выполненного моделирования были определены абсолютные величины соответствующих погрешностей и действительные значения размеров и отклонений. Исследования подтвердили возможность обеспечения заданной точности поверхности оболочки при реализации технологии сборки, использованной в опытном производстве. В то же время близость фактических величин отклонений к предельно допустимым значениям может привести к проблемам в обеспечении стабильного качества корпусных изделий геохода в серийном производстве. Проведен корреляционный анализ данных координатного контроля и статистический анализ рядов остатков разработанных моделей. Корреляционный анализ подтвердил зависимость отклонений экспериментальных точек от их цилиндрических координат, что подтверждает значимость погрешности расположения секторов в отклонениях от геометрической точности оболочки. Результаты статистического анализа рядов остатков моделей показал, что погрешности расположения секторов и погрешности их радиусов не являются единственными значимыми факторами в формировании неточностей оболочки стабилизирующей секции.

**Ключевые слова:** крупногабаритные кольцевые сегментные изделия, сборка, геометрическая точность, допуск, геоход, оболочка.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-31-42

\* Полученные результаты достигнуты в ходе реализации комплексного проекта при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ. Договор №02.G25.31.0076.

## Введение

Корпус геохода [1] является важнейшей составной частью аппарата, выполняющей функцию базового изделия для установки большей части систем геохода и отделяющей внутреннее рабочее пространство аппарата от геосреды. В процессе эксплуатации корпус геохода подвергается серьезным нагрузкам как со стороны окружающего массива пород, так и со стороны механизмов, размещенных в аппарате [2]. В связи с этим к конструкции корпуса и качеству его изготовления предъявляются повышенные требования. Одним из важнейших аспектов данных требований является геометрическая точность оболочки (наружной поверхности), непосредственно влияющая на энергоэффективность машины и ресурс ее основных систем [3].

Корпусы геохода относятся к кольцевым сегментным изделиям, а один из наиболее существенных факторов, усложняющих технологию изготовления корпусов геохода – это их разъемность [4]. Каждый из корпусов состоит из нескольких секторов, соединенных друг с другом при помощи разъемных соединений (рис. 1). Это приводит к тому, что на геометрическую

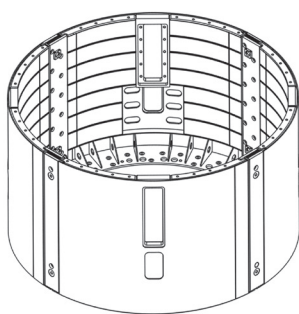


Рис. 1. Корпус стабилизирующей секции опытного образца геохода

точность влияет большое количество факторов, определяющих точность составных частей корпуса и точность сборки корпуса. В работе [5] показано, что взаимное положение секторов при сборке, а также погрешность радиуса оболочки каждого сектора оказывают самое непосредственное влияние на отклонения формы оболочки. Там же предложена модель для определения отклонений на основе значений допусков на составные части корпуса и параметры технологической наладки в процессе сборки. Модель определения отклонений, основанная на учете допусков формы сопрягаемых поверхностей,

приведена в работе [6], а расширенный на трехмерное пространство вариант модели представлен в работе [7].

В то же время практика технологии машиностроения показывает, что значимость тех или иных факторов на возникающие в технологическом процессе погрешности может быть надежно выявлена лишь по итогам реализации исследуемой технологии [8]. Это объясняется не только сложностью аналитического описания влияния разнообразных факторов на точность, но и сложным характером взаимодействия погрешностей [9]. Векторная и вероятностная природа погрешностей приводит к сложным механизмам их суммирования, при которых одна погрешность может поглощаться или компенсироваться другой. В связи с этим во многих работах, посвященных вопросам точности, закономерности формирования погрешностей исследуются на основе данных контроля изготовленных по анализируемой технологии изделий. Подобный подход, примененный к кольцевым сегментным изделиям, продемонстрирован в работе [10]. В этой работе, как и в ряде других, контроль геометрической точности изделий базируется на принципе координатного контроля [11]. Это связано с тем, что

именно координатный контроль позволяет получить достаточно широкий набор данных для дальнейшего анализа точности и выявить характер погрешностей [12].

В значительной части работ, касающихся точности кольцевых сегментных изделий, в качестве основного (зачастую единственного) фактора формирования погрешностей рассма-

тривается погрешность взаимного положения составных частей изделия [6, 7]. Такой подход не бесспорен и требует экспериментальной проверки. К тому же появившийся в последнее время производственный опыт по изготовлению стабилизирующей секции опытного образца геохода показывает, что, по всей видимости, значимыми могут оказаться такие факторы, как деформации составных частей корпусов, вызываемые процессами сварки и обработки давлением.

Все сказанное выше позволяет сформулировать задачу исследования в следующем виде:

установить величину и характер погрешности положения стабилизирующей секции геохода на основе данных координатного контроля, оценить значимость данной погрешности и возможность рассматривать ее в качестве преваляющего фактора, формирующего отклонения от геометрической точности оболочки.

## 1. Методика координатного контроля

Контролю подвергался корпус стабилизирующей секции геохода, изготовленный в условиях опытного производства. В качестве средства координатного контроля использовалась координатно-измерительная машина (КИМ) «FARO Arm Edge 9» типа «искусственная рука» (основные характеристики приведены в табл. 1). Выбор данного вида оборудования в первую очередь обусловлен значительными габаритами корпуса (диаметр – 3200 мм, длина – 1790 мм), которые не позволяют использовать для контроля большинство стационарных КИМ, а также затрудняют использование оптических и лазерных 3D-сканеров.

В процессе контроля корпус устанавливается вертикально на контрольную плиту. На той же плите базируется КИМ. Контроль проводится за четыре позиции КИМ – по одной на каждый сектор корпуса. Для получения координат фиксируемых точек в единой системе координат исполь-

зуется привязка КИМ по базирующим конусам. Для каждого из секторов снимаются координаты от 71 до 90 точек на поверхности оболочки (в зависимости от состояния поверхности).

Первичная обработка данных контроля проводилась в пакете программ PowerINSPECT. Координаты зафиксированных в процессе контроля точек оболочки представлялись в системе координат, связанной с плоскостью контрольной плиты. Для этого на контрольной плите при помощи КИМ были зафиксированы девять точек. Начало системы координат задавалось центром окружности, которая является сечением цилиндра, описанного вокруг всех зафиксированных точек оболочки (прилегающего цилиндра), в плоскости контрольной плиты. Результаты первичной обработки данных контроля оболочки приведены в табл. 2. Следует отметить, что полученные в результате измерений значения отклонений размеров и формы оболочки удовлетворяют требованиям конструкторской документации.

## 2. Анализ данных координатного контроля

Для подробного анализа и определения величин погрешностей положения секторов данные импортировались в специально разработанную программу. Функционирование программы

Таблица 1

Характеристики координатно-измерительной машины

Наименование характеристики	Значение
Размер рабочей зоны, мм	2700
Число степеней свободы	7
Погрешность линейных измерений (по ISO 10360-2:2009), мм	$\pm 0,041$
Повторяемость (по ISO 10360-2:2009), мм	0,029
Тип измерений	Контактные

Таблица 2

Результаты первичной обработки данных координатного контроля

Наименование величины	Обозначение	Значение
Диаметр прилегающего цилиндра, мм	$D$	3195,934
Отклонение от цилиндричности, мм	$\Delta_C$	9,463
Координаты направляющего вектора оси прилегающего цилиндра в базовой системе координат	$a_{x0}$	0,00146
	$a_{y0}$	0,00040
	$a_{z0}$	1,00000

основывается на создании регрессионных моделей цилиндрических поверхностей (модели оболочки корпуса в целом – МОКЦ и моделей

отдельных секторов – МОС) и их последующем исследовании [13]. Последовательность выполняемого анализа схематично приведена на рис. 2.

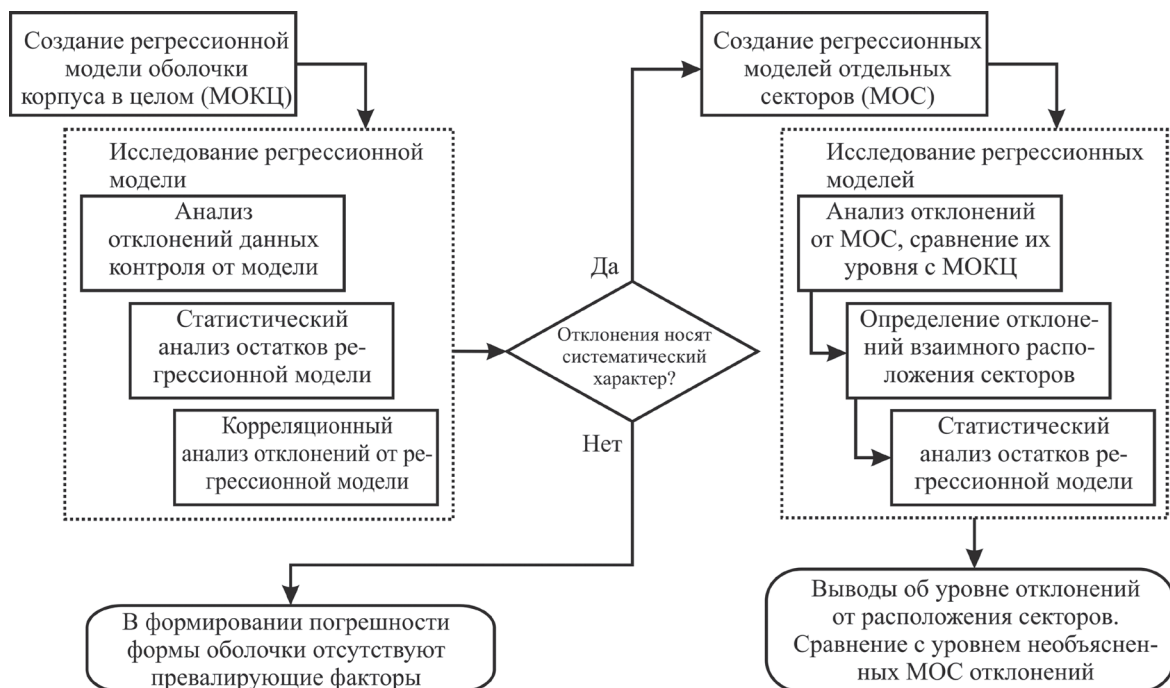


Рис. 2. Последовательность анализа данных координатного контроля

На первом этапе анализа была разработана регрессионная модель оболочки корпуса в целом, основанная на аппроксимации точек цилиндрической поверхностью. Модель формулируется следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \sqrt{A^2 + B^2 + C^2} - r + \varepsilon_i &= 0; \\ A &= -a_y z_i - \sqrt{1 - a_x^2 - a_y^2} (y_0 - y_i); \\ B &= \sqrt{1 - a_x^2 - a_y^2} (x_0 - x_i) + a_x z_i; \\ C &= a_x (y_0 - y_i) - a_y (x_0 - x_i), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x_i, y_i, z_i$  – координаты аппроксимируемых точек;  $a_x, a_y, x_0, y_0, r$  – неизвестные коэффициенты регрессии, имеющие следующий геометрический смысл:  $a_x, a_y$  – координаты направляющего вектора оси аппроксимирующего цилиндра;  $x_0, y_0$  – координаты точки, через которую проходит ось аппроксимирующего цилиндра;  $r$  – радиус аппроксимирующего цилиндра (АЦ);  $\varepsilon_i$  – остаток регрессионной модели.

Направляющий вектор оси аппроксимирующего цилиндра принимался единичным, а точка оси принималась лежащей в плоскости  $XY$ , т. е.

$$\begin{aligned} a_z &= \sqrt{1 - a_x^2 - a_y^2}; \\ z_0 &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Коэффициенты регрессии определялись по методу наименьших квадратов [14]. Результаты создания регрессионной модели приведены в табл. 3. На рис. 3 изображен аппроксимирующий цилиндр и зафиксированные в ходе контроля точки.

Для того чтобы сопоставить полученные в ходе контроля точки с аппроксимирующим цилиндром, их координаты преобразовывались в систему координат, связанную с его осью, и в дальнейшем переводились в цилиндрическую систему координат  $Z-\theta-r$ . При этом угловые координаты  $\theta$  для каждого сектора переводились в первую четверть. На рис. 4 и 5 приведены зависимости радиуса  $r$  от полярных координат  $Z$  и  $\theta$ . Как следует из графиков, во многих случаях существует выраженная закономерность изменения радиуса  $r$  с изменением цилиндрических координат  $Z$  и  $\theta$ . О том же говорят и данные проведенного корреляционного анализа, представленные в табл. 4.



Характеристики регрессионных моделей поверхностей

Наименование величины	Обозначение	Общий цилиндр	Сектор 1	Сектор 2	Сектор 3	Сектор 4
Радиус аппроксимирующего цилиндра, мм	$r$	1595,254	1595,015	1591,890	1604,451	1610,183
Координаты точки оси аппроксимирующего цилиндра, мм	$x_0$	-1,210	-4,849	-7,02070	-9,36417	16,551
	$y_0$	0,652	2,585	-8,01030	-7,89340	-8,622
	$z_0$	0	0	0	0	0
Координаты направляющего вектора оси аппроксимирующего цилиндра	$a_x$	0,00128	0,00440	0,00637	0,00372	-0,00003
	$a_y$	-0,00006	-0,00185	0,00257	0,00107	0,00271
	$a_z$	0,99999	0,99999	0,99998	0,99999	0,99999
Стандартное отклонение, мм	$\sigma$	2,10460	1,42102	1,11303	1,32553	0,99011
Максимальное отклонение, мм	$\varepsilon_{\max}$	5,25217	2,75851	2,84905	3,23230	1,83216
Минимальное отклонение, мм	$\varepsilon_{\min}$	-4,49901	-4,03908	-3,09642	-3,32721	-2,81700
Полное отклонение, мм	$\varepsilon_f$	9,75118	6,79759	5,94547	6,55951	4,64916
Доля необъясненных моделью отклонений (в процентах от полного отклонения общего цилиндра)	$q$	100 %	69,7 %	61,0 %	67,3 %	47,7 %

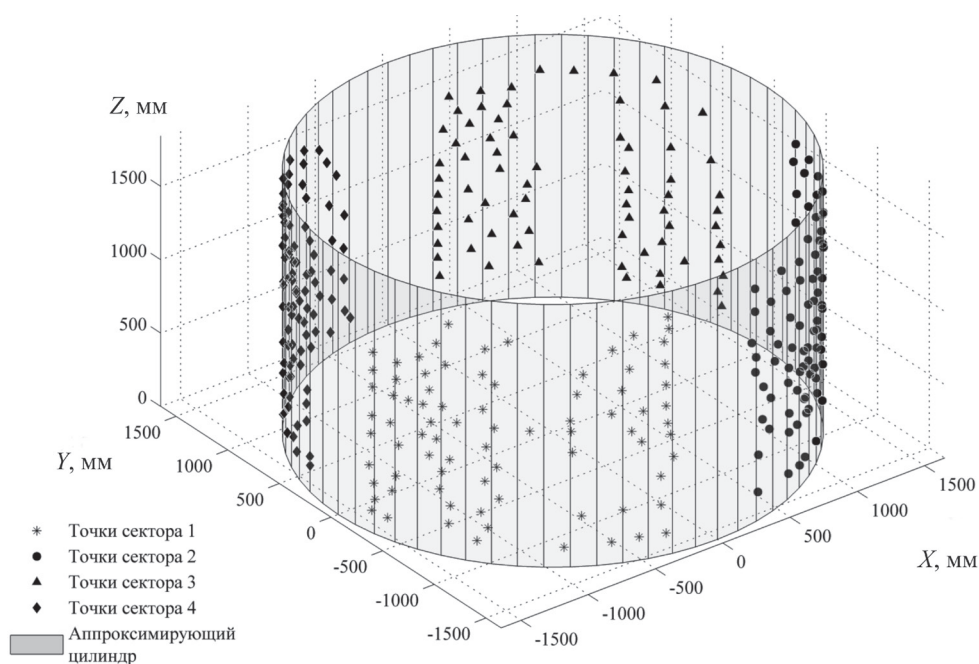


Рис. 3. Результат аппроксимации набора точек

Таким образом, можно предположить, что отклонения радиуса  $\rho$  от МОКЦ носят систематический характер. Для выявления характера отклонений от регрессионной модели исследовался ряд остатков  $\varepsilon$  (табл. 5). Проводился анализ соответствия ряда остатков закону нормального

распределения по критерию Эппса–Палли [15], наличия тренда в рядах  $\varepsilon(\theta)$  и  $\varepsilon(Z)$  по критерию поворотных точек [16] и наличия автокорреляции в рядах  $\varepsilon(\theta)$  и  $\varepsilon(Z)$  по критерию Дарбина–Уотсона [17]. Анализ показал, что ряд остатков МОКЦ не является случайным.

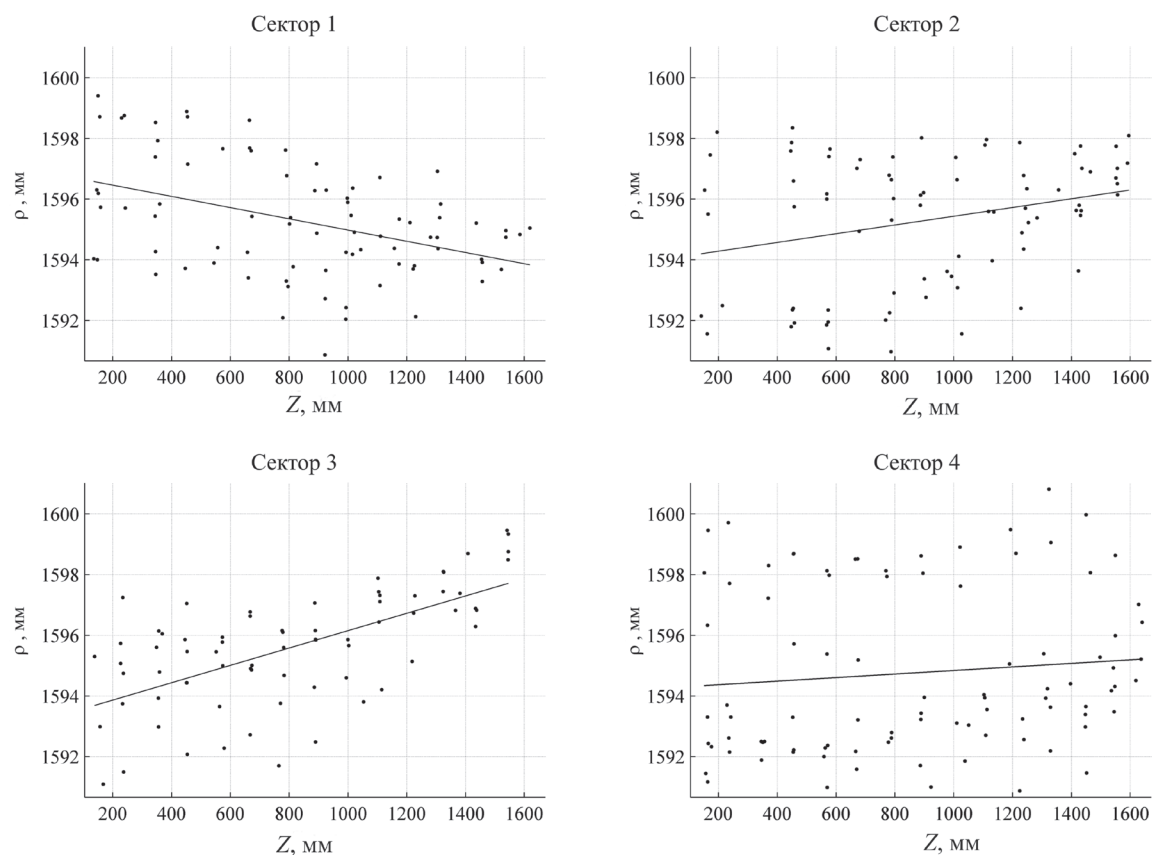


Рис. 4. Зависимость радиуса точек от цилиндрической координаты  $Z$  (в системе координат, связанной с осью МОКЦ)

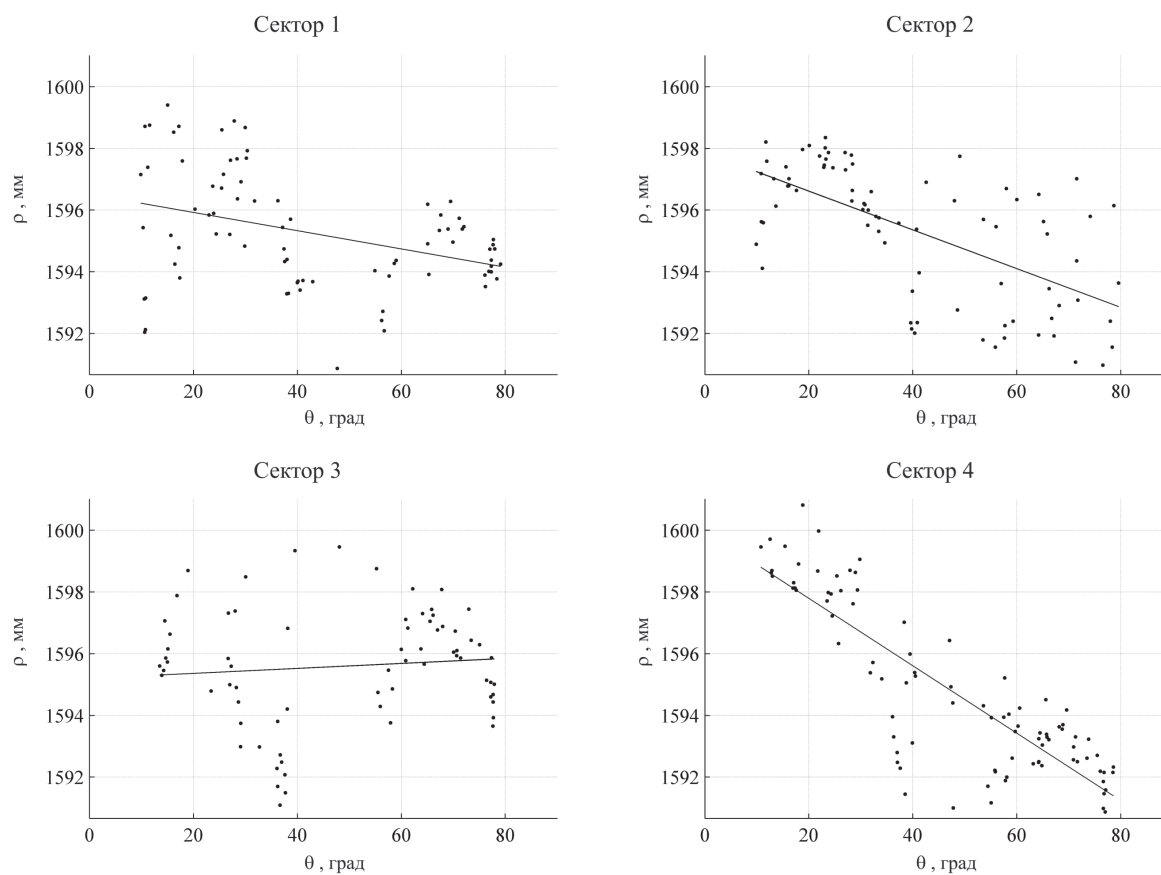


Рис. 5. Зависимость радиуса точек от цилиндрической координаты  $\theta$  (в системе координат, связанной с осью МОКЦ)

Таблица 4

## Данные корреляционного анализа

Наименование величины	Общий цилиндр	Сектор 1	Сектор 2	Сектор 3	Сектор 4
Коэффициент корреляции $\rho(Z)$	0,1261	-0,2688	0,3687	0,7075	0,2633
Уровень значимости корреляции $\rho(Z)$	0,0237	0,0159	$7,6 \times 10^{-4}$	$5,3 \times 10^{-12}$	0,0117
Коэффициент корреляции $\rho(\theta)$	-0,1683	-0,4562	-0,7387	0,4235	0,1330
Уровень значимости корреляции $\rho(\theta)$	0,0024	$2,1 \times 10^{-5}$	$5,2 \times 10^{-15}$	$2,3 \times 10^{-4}$	0,2087
Количество точек	322	80	80	71	91

Таблица 5

## Данные анализа рядов остатков

Наименование величины	Общий цилиндр	Сектор 1	Сектор 2	Сектор 3	Сектор 4
Статистика Эппса–Палли	0,9053	0,3363	0,6347	0,1949	0,7006
Критическое значение (уровень значимости $\alpha = 0,05$ )	0,3803	0,3754	0,3754	0,3751	0,3757
Вывод о соответствии остатков закону нормального распределения	Не соответствует	Соответствует	Не соответствует	Соответствует	Не соответствует
Количество поворотных точек в ряду $\varepsilon(\theta)$	211	51	51	44	57
Вывод о наличии тренда в ряду $\varepsilon(\theta)$	Наличие тренда не выявлено				
Количество поворотных точек в ряду $\varepsilon(Z)$	204	57	52	42	62
Вывод о наличии тренда в ряду $\varepsilon(Z)$	Наличие тренда не выявлено				
Критическое число поворотных точек (уровень значимости $\alpha = 0,05$ )	198,5	44,7	44,7	39,1	51,5
Статистика Дарбина–Уотсона для ряда $\varepsilon(\theta)$	0,6454	0,7655	0,9767	0,7242	1,18
Вывод о наличии автокорреляции в ряду остатков $\varepsilon(\theta)$	Имеется положительная автокорреляция				
Статистика Дарбина–Уотсона для ряда $\varepsilon(Z)$	1,8416	1,9726	1,9843	2,0224	1,9245
Вывод о наличии автокорреляции в ряду остатков $\varepsilon(Z)$	Автокорреляция отсутствует				
Интервалы значимости статистики Дарбина–Уотсона (уровень значимости $\alpha = 0,05$ )	1,5488	1,4650	1,4650	1,4330	1,4989
	1,6154	1,5140	1,5140	1,4884	1,5433
	2,3846	2,4860	2,4860	2,5116	2,4567
	2,4512	2,5350	2,5350	2,5670	2,5011

Далее определялись модели каждого из четырех секторов по уравнениям и с использованием методики, аналогичной той, что применялась при определении МОКЦ. Результаты аппроксимации секторов цилиндрическими поверхностями приведены в табл. 3. На основе данных о координатах осей были вычислены отклонения расположения секторов. На рис. 6 представлены наглядные изображения отклонений расположения. В табл. 6 приведены характеристики отклонений.

Для выяснения, насколько полно погрешность формы оболочки стабилизирующей секции можно объяснить погрешностью взаимного

положения секторов, координаты точек переводились в системы координат, связанные с осями соответствующих цилиндрических поверхностей, аппроксимирующих секторы, по методике, сходной с приведенной в [18].

Аналогично МОКЦ для каждой из МОС выполнялся корреляционный анализ (табл. 4) и анализ ряда остатков (табл. 5).

### 3. Результаты и обсуждение

Исследование регрессионной модели оболочки корпуса в целом показало, что отклонения проконтролированных точек соответствуют

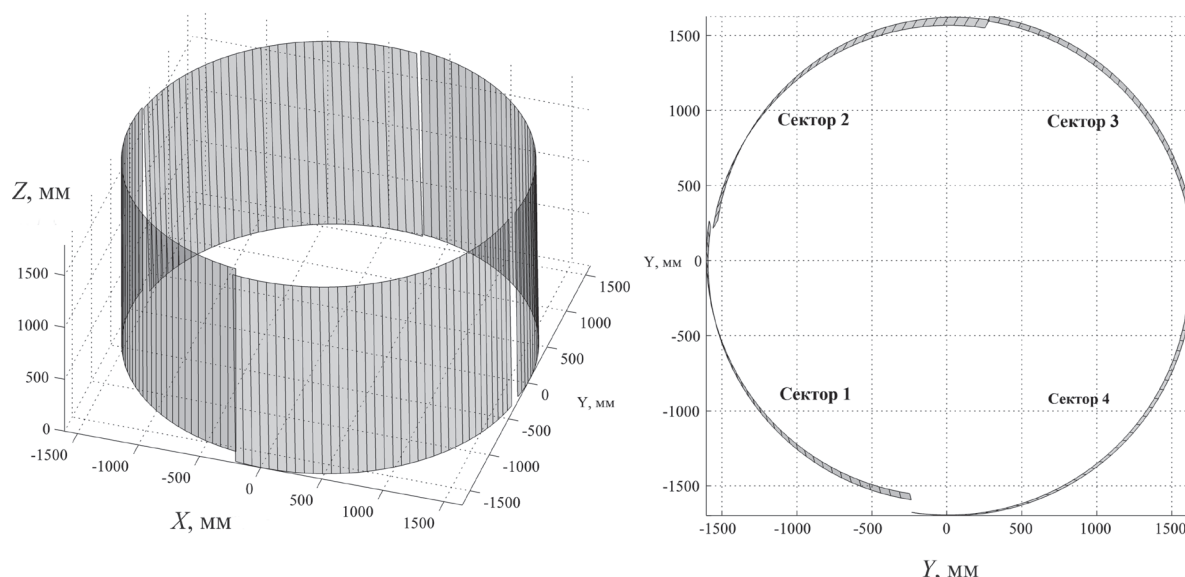


Рис. 6. Аппроксимирующие секторы (отклонения увеличены в 5 раз)

Таблица 6

Характеристики отклонений расположения секторов

Наименование величины	Обозначение	Сектор 1	Сектор 2	Сектор 3	Сектор 4
Смещение в плоскости $XU$ , мм	$d$	4,12	10,43	11,81	20,04
Угол направления смещения, град	$\psi$	152,024	-123,851	-133,655	-27,57
Угол наклона сектора, град	$\alpha$	0,206	0,328	0,154	0,175
Угол направления наклона, град	$\varphi$	-29,888	27,256	24,828	115,342

установленным к стабилизирующей секции требованиям точности. В то же время отклонения близки к границам полей допусков, что в серийном производстве может привести к нарушению требований к качеству продукции. Таким образом, задача повышения геометрической точности оболочек корпусов геохода может быть признана востребованной.

Корреляционный анализ зависимостей радиуса проконтролированных точек относительно оси общего цилиндра показал, что существует статистически значимая связь между полярными координатами точек и радиусом (см. табл. 3). Особенно сильно эта связь проявляется в случае, если рассматривать отдельные для каждого из секторов наборы точек, как показано на рис. 4 и 5. Наиболее естественной причиной данного явления могут являться отклонения взаимного положения отдельных секторов.

Исследование ряда остатков МОКЦ показал, что отклонения от модели носят систематический характер. Подтверждением этого является

несоответствие ряда остатков закону нормального распределения (см. табл. 5) и наличие автокорреляции в ряду остатков  $\varepsilon(\theta)$ . Это означает, что отклонения вызваны одним или несколькими превалирующими факторами. В качестве превалирующего фактора в исследовании рассматривались отклонения взаимного положения секторов и сложно взаимосвязанные с ними погрешности радиусов каждого из секторов, что связано с рядом проведенных ранее теоретических исследований (см. [5; 19; 20]).

Характеристики моделей отдельных секторов показывают, что секторы имеют значительные отклонения расположения относительно оболочки в целом как по углам ориентации, так и по линейным смещениям (см. табл. 6). В частности, линейные смещения достигают 20,04 мм, т. е. превышают величину допусков на геометрическую точность оболочки. Тем не менее, как отмечалось выше, оболочка в целом соответствует требованиям точности. Это связано с компенсацией погрешности радиуса сектора путем его



смещения. Подтверждением последнего является и то, что величины смещения увеличиваются с увеличением величины отклонения действительного радиуса сектора относительно номинального (см. табл. 3). Данное явление описано и теоретически обосновано в работе [5]. Таким образом, при изготовлении секций геохода может использоваться подход компенсации погрешностей по ходу различных стадий производственного процесса [21] или подбор оптимального сочетания экземпляров составных частей и их расположения в сборке [22].

Изучение величин отклонений от МОС показывает, что модели описывают существенную долю отклонений – от 30,3 до 52,3 % от полного отклонения общего цилиндра. В то же время значительная доля отклонений не объясняется лишь погрешностями взаимного положения секторов и погрешностями радиусов секторов.

Исследование рядов остатков моделей оболочек секторов (см. табл. 5) показало, что отклонения от моделей носят систематический характер. Последнее подтверждается наличием автокорреляции в ряду остатков  $\varepsilon(\theta)$ . Кроме того, для секторов 2 и 4 наблюдается несоответствие ряда остатков закону нормального распределения. Это позволяет говорить о том, что в процессе производства существуют другие факторы, проявляющиеся в виде погрешности формы отдельных секторов и оказывающие значительное влияние на точность оболочки в целом. Причем среди этих факторов имеются преобладающие, которые вызывают систематические отклонения от геометрической точности оболочки.

### Выводы

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

1. Отклонения от геометрической точности оболочки стабилизирующей секции опытного образца геохода имеют систематический характер, из чего следует, что формирование погрешностей связано с наличием нескольких преобладающих факторов, характер влияния которых может быть установлен путем разработки и исследования соответствующих математических моделей.

2. Значимую роль в формировании отклонений играют погрешности взаимного положения секторов стабилизирующей секции и их радиу-

сов. Величины отклонений являются существенными и способны объяснить порядка 30...50 % от общей погрешности.

3. Подтвержден сложный характер совместного влияния погрешностей взаимного положения секторов и их радиуса на точность оболочки в целом. Результаты анализа координатного контроля показывают практическую возможность компенсации неточностей отдельных секторов путем их смещения относительно номинального положения.

4. Отклонения расположения секторов и погрешности их радиусов не могут рассматриваться как единственные значимые факторы, обуславливающие формирование неточностей оболочки. Помимо них в процессе производства существуют и другие, в настоящее время не установленные механизмы формирования систематических погрешностей геометрической точности оболочки.

### Список литературы

1. Efremkov A.B. Forming the subterranean space by means of a new tool (geohod) // Proceedings of the 6th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2011), Harbin, 22–24 August 2011. – Harbin, 2011. – Vol. 1. – P. 348–350. – doi: <http://dx.doi.org/10.1109/IFOST.2011.6021037>.
2. Аксенов В.В., Бегляков В.Ю., Капустин А.Н. Анализ несущих конструкций (корпусов) известных технических систем применимых в качестве корпуса (носителя) геохода // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – № 6 (106). – С. 34–36.
3. Капустин А.Н. Предпосылки разработки формы корпуса геохода // Проблемы геологии и освоения недр: труды XVII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 150-летию со дня рождения академика В.А. Обручева и 130-летию академика М.А. Усова, основателей Сибирской горно-геологической школы, 1–6 апреля 2013 г., г. Томск: в 2 т. – Томск, 2013. – Т. 2. – С. 320–321.
4. Вальтер А.В., Аксенов В.В. Варианты обеспечения точности оболочек и собираемости корпусов геохода // Механика XXI века. – 2015. – № 14. – С. 89–92.
5. Аксенов В.В., Вальтер А.В., Бегляков В.Ю. Обеспечение геометрической точности оболочки при сборке секций геохода // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 4 (65). – С. 19–28.

6. Straight-build assembly optimization: a method to minimize stage-by-stage eccentricity error in the assembly of axisymmetric rigid components (two-dimensional case study) / T. Hussain, Z. Yang, A.A. Popov, S. McWilliam // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2011. – Vol. 133, iss. 3. – P. 031014/1–031014/9. doi:10.1115/1.4004202.
7. Memon M., Hussain T., Memon Z.A. Minimizing assembly errors by selecting optimum assembly sequence in the assembly of a rigid circular structure // *Mehran University Research Journal of Engineering & Technology*. – 2012. – Vol. 31, iss. 4. – P. 743–754.
8. Безъязычный Б.Ф., Непомилуев В.В. Некоторые проблемы современного сборочного производства и перспективы их преодоления // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. – 2009. – № 8 (109). – С. 18–25.
9. Аксенов В.В., Вальтер А.В., Лагунов С.Е. Настройка положения опор методом триангуляции при сборке секций геохода // *Технологии и материалы*. – 2015. – № 1. – С. 31–36.
10. Lowth S., Axinte D.A. An assessment of “variation conscious” precision fixturing methodologies for the control of circularity within large multi-segment annular assemblies // *Precision Engineering*. – 2014. – Vol. 38. – P. 379–390. – doi:10.1016/j.precisioneng.2013.12.004.
11. Mian S.H., Al-Ahmari A. Enhance performance of inspection process on coordinate measuring machine // *Measurement*. – 2014. – Vol. 47. – P. 78–91. – doi: 10.1016/j.measurement.2013.08.045.
12. An exploration into measurement consistency on coordinate measuring machines / P. Saunders, A. Wilson, N. Orchard, N. Tatman, P. Maropoulos // *Procedia CIRP*. – 2014. – Vol. 25. – P. 19–26. – doi:10.1016/j.procir.2014.10.005.
13. Zone-Ching Lin, Wen-Jang Wu. Multiple linear regression analysis of the overlay accuracy model // *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*. – 1999. – Vol. 12, iss. 2. – P. 229–237. – doi: 10.1109/66.762881.
14. Nievergelt Y. Fitting cylinders to data // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. – 2013. – Vol. 239. – P. 250–269.
15. Modeling statistic distributions for nonparametric goodness-of-fit criteria for testing complex hypotheses with respect to the inverse Gaussian law / B.Y. Lemeshko, S.B. Lemeshko, M.S. Nikulin, N. Saaidia // *Automation and Remote Control*. – 2010. – Vol. 71. – N 7. – P. 1358–1373. – doi: 10.1134/S000511791007009X.
16. Kendall M.G., Stuart A. The advanced theory of statistics. Vol. 3. Design and analysis, and time-series. – 2nd ed. – London: Charles Griffin, 1968. – 567 p. – ISBN 0852640692. – ISBN 978-0852640692.
17. Durbin J., Watson G.S. Testing for serial correlation in least squares regression. III // *Biometrika*. – 1971. – Vol. 58, iss. 1. – P. 1–19.
18. Вальтер А.В. Программное обеспечение автоматизированного анализа кинематики процесса резания // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2008. – № 1. – С. 18–19.
19. Walter A.V., Aksenov V.V. Determining deviations in geometry of the geokhod shells // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 770. – P. 439–444. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.770.439.
20. Вальтер А.В., Аксенов В.В. Определение отклонений геометрической формы оболочек корпусных изделий геохода // *Актуальные проблемы современного машиностроения: сборник трудов Международной научно-практической конференции*. – Томск: ТПУ, 2014. – С. 165–170.
21. Jiao Y., Djurdjanovic D. Compensability of errors in product quality in multistage manufacturing processes // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2011. – Vol. 30, iss. 4. – P. 204–213. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.770.439.
22. Шилин А.Н., Петров С.А., Заярный В.П. Автоматизация определения оптимальных условий сборки корпусов нефтегазового оборудования // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. – 2010. – № 6 (119). – С. 10–14.

## ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4(69), October – December 2015, Pages 31–42

### Determining the error of location of geokhod stabilizing section sectors on the basis of coordinate measurement data

Walter A. V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: avwalter@tpu.ru

Aksenov V. V., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: v.aksenov@icc.kemsc.ru

Beglyakov V. Yu., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: begljakov@gmail.com

Chazov P. A., Assistant, e-mail: chapaese@gmail.com

Yurga Institute of Technology, TPU Affiliate, 26 Leningradskaya st., Yurga, 652055, Russian Federation

## Abstract

The results of research factual accuracy of the shell stabilizing section of the geokhod prototype are presented. The paper contains an overview of a number of approaches to modeling the mechanisms of formation errors of the ring segmented items and determine its factual accuracy. The problem of experimental verification of the assumptions adopted in the simulation is posed. The study is performed on the basis of experimental data obtained by the coordinate measurement of the geokhod prototype. For the analysis of experimental data, the creation of mathematical models, its research, visualization data and reporting special software is developed. Data is analyzed by the method of mathematical simulation of the shell surface of the stabilizing section in whole and each sector. It is shown that, a significant portion of shell section geometric shape deviations (from 30,3 to 52,3 %) is due to errors in the location of sectors and errors of their radii. On the basis of the simulation absolute values of the respective errors and the actual values of dimensions and deviations are determined. The possibility of providing a given accuracy in the implementation of the shell surface assembly technology used in pilot production is confirmed. At the same time, the proximity of the actual values of the deviations to the limit values can lead to problems in ensuring the consistent quality of geokhod bodies in serial production. The correlation analysis of the data and statistical analysis of series of residuals of the developed models are made. Correlation analysis confirms the dependence of the deviations of the experimental points from their cylindrical coordinates, which confirms the importance of the location of the error sectors in deviations from the geometric precision shell. The results of the statistical analysis of series of models of residues shows that the error location and error sectors of their radii are not the only ones, are significant factors in shaping inaccuracies shell stabilizing section.

## Keywords:

large segmented-ring items, assembly, accuracy, geokhod, shell.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-4-31-42

## References

1. Efremkov A.B. Forming the subterranean space by means of a new tool (geohod). *Proceedings of the 6th International Forum on Strategic Technology IFOST-2011*, Harbin, 22–24 August 2011, pp. 348–350. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/IFOST.2011.6021037>
2. Aksenov V.V., Beglyakov V.Yu., Kapustin A.N. Analiz nesushchikh konstruktov (korpusov) izvestnykh tekhnicheskikh sistem primenimyykh v kachestve korpusa (nosatelya) geokhoda [Analysis of load-bearing structures (buildings) of the prior art systems useful as the body (carrier) of geokhod]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Kuzbass State Technical University*, 2014, iss. 6 (106), pp. 34–36.
3. Kapustin A.N. [Background of design hull shape geohod]. *Trudy XVII Mezhdunarodnogo simpoziuma "Problemy geologii i osvoeniya nedr" imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashchennogo 150-letiyu so dnya rozhdeniya akademika V.A. Obrucheva i 130-letiyu akademika M.A. Usova, osnovatelei Sibirskoi gorno-geologicheskoi shkoly: v 2 t.* [Proceedings of the 17th International Scientific Symposium of students, Postgraduates and young Scientists devoted to the 150th Anniversary of Academician V.A. Obruchev and 130th Anniversary of Academician M.A. Usov, Founders of Siberian Mining School: in 2 vol.]. Tomsk, 1–6 April 2013, vol. 2, pp. 320–321.
4. Walter A.V., Aksenov V.V. Varianty obespecheniya tochnosti obolochek i sobiraemosti korpusov geokhoda [Options for the accuracy of shells and housings collection geohod]. *Mekhaniki XXI veku – Mechanics of the XXI century*, 2015, no. 14, pp. 89–92.
5. Aksenov V.V., Walter A.V., Beglyakov V.Yu. Obespechenie geometricheskoi tochnosti obolochki pri sborke sektiiv geokhoda [Ensuring the geometric accuracy of shell during assembly of Geohod sections]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2014, no. 4 (65), pp. 19–28.
6. Hussain T., Yang Z., Popov A.A., McWilliam S. Straight-build assembly optimization: a method to minimize stage-by-stage eccentricity error in the assembly of axisymmetric rigid components (two-dimensional case study). *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2011, vol. 133, iss. 3, pp. 031014/1–031014/9. doi:10.1115/1.4004202
7. Memon M., Hussain T., Memon Z.A. Minimizing assembly errors by selecting optimum assembly sequence in the assembly of a rigid circular structure. *Mehran University Research Journal of Engineering & Technology*, 2012, vol. 31, iss. 4, pp. 743–754.

8. Bez'yazychnyi B.F., Nepomiluev V.V. Nekotorye problemy sovremennogo sborochnogo proizvodstva i perspektivy ikh preodoleniya [Certain problems of modern assembling and prospect methods of their solution]. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii – Assembling in mechanical engineering and instrument-making*, 2009, no. 8 (109), pp. 18–25.
9. Aksenov V.V., Walter A.V., Lagunov S.E. Nastroika polozheniya opor metodom triangulyatsii pri sborke sektsii geokhoda [Adjusting the position of supports by triangulation during assembly of geokhod sections]. *Tekhnologii i materialy – Technologies and materials*, 2015, no. 1, pp. 31–36.
10. Lowth S., Axinte D.A. An assessment of “variation conscious” precision fixturing methodologies for the control of circularity within large multi-segment annular assemblies. *Precision Engineering*, 2014, vol. 38, iss. 2, pp. 379–390. doi:10.1016/j.precisioneng.2013.12.004
11. Mian S.H., Al-Ahmari A. Enhance performance of inspection process on coordinate measuring machine. *Measurement*, 2014, vol. 47, pp. 78–91. doi: 10.1016/j.measurement.2013.08.045
12. Saunders P., Wilson A., Orchard N., Tatman N., Maropoulos P. An exploration into measurement consistency on coordinate measuring machines. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 25, pp. 19–26. doi:10.1016/j.procir.2014.10.005
13. Zone-Ching Lin, Wen-Jang Wu. Multiple linear regression analysis of the overlay accuracy model. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 1999, vol. 12, iss. 2, pp. 229–237. doi: 10.1109/66.762881
14. Nievergelt Y. Fitting cylinders to data. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2013, vol. 239, pp. 250–269.
15. Lemeshko B.Y., Lemeshko S.B., Nikulin M.S., Saaidia N. Modeling statistic distributions for nonparametric goodness-of-fit criteria for testing complex hypotheses with respect to the inverse Gaussian law. *Automation and Remote Control*, 2010, vol. 71, iss. 7, pp. 1358–1373. doi: 10.1134/S000511791007009X
16. Kendall M.G., Stuart A. *The advanced theory of statistics. Vol. 3. Design and analysis, and time-series*. 2nd ed. London, Charles Griffin, 1968. 567 p. ISBN-10 0852640692. ISBN-13 978-0852640692
17. Durbin J., Watson G.S. Testing for Serial Correlation in Least Squares Regression. III. *Biometrika*, 1971, vol. 58, iss. 1, pp. 1–19.
18. Walter A.V. Programmnoe obespechenie avtomatizirovannogo analiza kinematiki protsessa rezaniya [The software of the automated analysis of the kinematics of the cutting process]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2008, no. 1, pp. 18–19.
19. Walter A.V., Aksenov V.V. Determining deviations in geometry of the geokhod shells. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 770, pp. 439–444. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.770.439
20. Walter A.V., Aksenov V.V. [Determination of deviations of geometric shapes shells case products of geokhod]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii “Aktual'nye problemy sovremennogo mashinostroeniya”* [Proceedings of the International scientific and practical conference “Urgent problems of up-to-date mechanical engineering”]. Tomsk, 2014, pp. 165–170. (In Russian)
21. Jiao Y., Djurdjanovic D. Compensability of errors in product quality in multistage manufacturing processes. *Journal of Manufacturing Systems*, 2011, vol. 30, iss. 4, pp. 204–213. doi: 10.1016/j.jmsy.2011.07.002
22. Shilin A.N., Petrov S.A., Zayarnyi V.P. Avtomatizatsiya opredeleniya optimal'nykh uslovii sborki korpusov neftegazovogo oborudovaniya [Automatic definitions of optimization conditions for oil and gas equipment body assembly]. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii – Assembling in mechanical engineering and instrument-making*, 2010, no. 6 (119), pp. 10–14.

## Funding

The results achieved in the implementation of an integrated project funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation. Contract 02.G25.31.0076.

## Article history:

Received 8 September 2015

Revised 8 October 2015

Accepted 10 November 2015