

## РАЗДЕЛ 3. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.7.08: 528.721.212.6

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ 3D-МОДЕЛИ ЛОПАТКИ ОСЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА

Б. Ф. Азаров

*В статье описан процесс создания пространственной модели лопатки осевого вентилятора для разработки рабочей конструкторской документации. В качестве метода выполнения работ использовалась технология наземного лазерного сканирования (НЛС). В процессе создания пространственной модели была разработана методика лазерного сканирования для малогабаритного объекта, обеспечивающая высокую точность получения параметров модели. Сделан вывод о том, что для случая сканирования малогабаритного объекта наиболее приемлемым следует считать приведение результатов сканирования в единую систему координат по узловым точкам. В этом случае сканы (первичные данные сканирования) будут объединены в локальной системе координат прибора. При этом на точность объединения будут влиять только ошибки сканирования марок на каждой станции. Также положительным моментом использования такого варианта привязки следует считать то, что места расположения марок и самого прибора могут быть выбраны достаточно произвольно. В результате обработки данных была получена трехмерная цифровая модель лопатки в виде облака точек лазерных отражений (ТЛО), а также облако ТЛО для ее хвостовой части. Также была выполнена оценка точности построения цифровой модели лопатки. Тем самым продемонстрирована возможность использования технологии НЛС при разработке конструкторской документации на изготовление рабочих чертежей малогабаритных деталей сложной формы.*

*Ключевые слова: лопатка, конструкторская документация, цифровая модель, наземное лазерное сканирование, облако точек лазерных отражений, сканер GLS-1500.*

В последнее время технология наземного лазерного сканирования (НЛС) находит широкое применение при проектировании различных объектов, в том числе малогабаритных, имеющих сложную пространственную форму. В данной статье описывается процесс создания пространственной трехмерной модели лопатки осевого вентилятора PP120 AN-3200/2000B SG-IRON в виде облака точек лазерных отражений (ТЛО) для ее дальнейшего использования при разработке рабочей конструкторской документации.

Для создания цифровой модели лопатки необходимо выбрать соответствующую методику лазерного сканирования для малогабаритного объекта и непосредственно выполнить его многократное лазерное сканирование с повышенной точностью измерений. Затем следует провести первичную обработку результатов сканирования: объединение данных сканирования в единую условную систему координат, создание исходных облаков ТЛО, удаление «шумов» из облаков, осуществление их экспорта в виде DXF-файлов. Также необходимо выполнить оценку точности построения 3D-модели лопатки.

Методика выполнения работ по наземному лазерному сканированию существенно за-

висит от характеристик объекта [1,2]. Так, для построения цифровой 3D-модели отдельного малогабаритного объекта, сканирование может быть выполнено без создания геодезической основы, когда объединение сканов (данных сканирования, полученных с отдельных стоянок прибора – станций) происходит не менее чем по трем общим для каждой пары сканов маркам, которые в свою очередь сканируются на каждой станции. При этом определять пространственные координаты X, Y, Z марок в какой-либо заданной заранее системе необязательно. Фактически это означает, что нет необходимости предварительно создавать для сканирования объекта планово-высотное обоснование в виде системы точек, для которых определены плановые и высотные координаты в общей заранее заданной системе. Поэтому точки, над которыми будут устанавливаться марки при сканировании, могут быть выбраны произвольно.

При выполнении сканирования каждый скан (результат сканирования на станции) представляет собой массив точек с пространственными прямоугольными координатами, определенными в системе координат самого прибора, т.е. в локальной системе координат

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ 3D-МОДЕЛИ ЛОПАТКИ ОСЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА

[3]. Для приведения данных сканирования в единую систему координат необходимо при обработке измерений выполнить так называемую «регистрацию» [4] – пространственную привязку каждого скана.

Для случая сканирования малогабаритного объекта наиболее приемлемым следует считать регистрацию данных сканирования по узловым точкам. В этом случае сканы (первичные данные сканирования) будут объединены в локальной системе координат прибора. При этом на точность объединения будут влиять только ошибки сканирования марок на каждой станции. Также положительным моментом использования такого варианта привязки следует считать то, что места расположения марок и самого прибора могут быть выбраны достаточно произвольно. В нашем случае выбор способа привязки данных сканирования обусловлен требованиями к точности результатов сканирования.

Работы по сканированию выполнялись наземным лазерным сканером GLS-1500 фирмы TOPCON. Первичная обработка результатов сканирования выполнялась в программном продукте ScanMaster фирмы TOPCON, поставляемом вместе с прибором GLS-1500.

Согласно Руководству [5] у лазерного сканера GLS-1500 в зависимости от расстояния, требуемой точности и времени работы имеется три режима сканирования. Для выполнения измерений с максимально высокой точностью применяется режим «SFINE» – высокоточный, когда при сканировании используется три системы линз.

Основными факторами, повлиявшими на выбор конкретной методики сканирования исследуемого объекта для создания его 3D-модели, послужили, во-первых, размеры самого объекта и, во-вторых, повышенные требования к точности результатов сканирования. Лопатка осевого вентилятора вместе с хвостовиком имеет габариты 710×430 мм при толщине от 3 до 30 мм (рисунок 1).

Согласно исследованиям характеристик наземных импульсных лазерных сканеров [6, 7], основными факторами, влияющими на точность измерений этими приборами, являются угол падения лазерного луча на поверхность объекта, ее альбедо (отражательная способность) и расстояние до объекта сканирования. Так, максимальный угол разворота поверхности сканируемого объекта по отношению к падающему лучу лазера не должен превышать 50°. Точность измерения расстояний сканером выше для окрашенных в светлые тона поверхностей. Для импульсных лазерных сканеров наивысшая точность измерения расстояний

лежит в диапазоне дистанций от 10 до 100 м. Исходя из выше изложенного, перед сканированием цвет поверхности лопатки был изменен с помощью мела на белый, так как, согласно [8], отражательная способность белой гипсовой поверхности составляет 85%. Места установки прибора были выбраны так, чтобы луч лазера при сканировании падал на вертикально расположенную поверхность лопатки под углом около 1,5°. Сканирование выполнялось с двух стоянок прибора. При этом расстояние от прибора до объекта было примерно одинаковым и составляло около 8 м. Станции (точки стояния прибора) намечались заранее так, чтобы лопатка оказалась примерно посередине между ними и на одной прямой, соединяющей места размещения сканера.

Для того чтобы получить 3D-модель объекта, необходимо выполнить обработку результатов сканирования. Для сканера GLS-1500 первичная обработка данных сканирования выполняется в ПО ScanMaster. Для объединения данных сканирования лопатки, полученных с разных точек стояния прибора, выполнялась регистрация сканов по связям узловых точек. Предварительно в проекте создавались три отдельные «связи узловых точек», а на каждой станции, на которых были отсканированы три общие марки, по их сканам создавались «узловые точки». Перед регистрацией во вкладках «Свойства» для каждой пары общих для двух станций узловых точек указывался общий номер «связи узловых точек». Далее используя вкладки программы ScsnMaster «Инструменты» – «Редактор регистрации» для станций, имеющих общие узловые точки, выполнялась автоматическая регистрация по «Связям узловых точек». При этом в программе ScsnMaster автоматически определяются ошибки регистрации узловых точек по трем координатным осям, по которым можно судить о точности пространственного положения результатов сканирования. На рисунке 2 приведены результаты регистрации (объединения данных сканирования) сканов, полученных при сканировании лопатки, расположенной вертикально.

Далее в проекте по объединенным сканам лопатки создавалось исходное облако точек, из которого удалялись «шумы» – отразившиеся при сканировании посторонние предметы, не относящиеся к объекту. На рисунке 3 приведены результаты регистрации (объединения данных сканирования) сканов, полученных при сканировании «хвостовика» лопатки, расположенной горизонтально. Затем по объединенным сканам «хвостовика» лопатки создавалось исходное облако точек, из которого удалялись «шумы».



Рисунок 1 – Лопатка осевого вентилятора

| Связи узловых точек |             |                        |        |        |        |                          |                                  |                                  |                                  |
|---------------------|-------------|------------------------|--------|--------|--------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|                     | Изображение | Название               | E      | N      | H      | Количество узловых точек | Средняя ошибка узловой точки - E | Средняя ошибка узловой точки - N | Средняя ошибка узловой точки - H |
|                     |             | Связь узловых точек 01 | -5,144 | 10,001 | 0,173  | 2                        | 0,000                            | 0,000                            | 0,000                            |
|                     |             | Связь узловых точек 02 | -3,741 | 6,206  | -1,414 | 2                        | 0,000                            | 0,000                            | 0,000                            |
| ▶                   |             | Связь узловых точек 03 | -3,851 | 4,595  | -0,491 | 2                        | 0,000                            | 0,000                            | 0,000                            |

Рисунок 2 – Результаты регистрации сканов лопатки

| Связи узловых точек |             |                        |        |       |        |                          |                                  |                                  |                                  |
|---------------------|-------------|------------------------|--------|-------|--------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|                     | Изображение | Название               | E      | N     | H      | Количество узловых точек | Средняя ошибка узловой точки - E | Средняя ошибка узловой точки - N | Средняя ошибка узловой точки - H |
| ▶                   |             | Связь узловых точек 01 | -3,059 | 3,384 | 0,148  | 2                        | 0,000                            | 0,000                            | 0,000                            |
|                     |             | Связь узловых точек 02 | -4,206 | 8,821 | -0,518 | 2                        | 0,001                            | 0,001                            | 0,000                            |
|                     |             | Связь узловых точек 03 | -4,719 | 7,735 | -0,351 | 2                        | 0,001                            | 0,001                            | 0,000                            |

Рисунок 3 – Результаты регистрации сканов «хвостовика» лопатки

Для того чтобы оценить точность построения 3D-модели лопатки, необходимо иметь данные обмера отдельных параметров лопатки (например, ее длины, ширины и толщины в разных местах). Затем, выполнив измерения тех же параметров созданной 3D-модели, следует сравнить полученные числовые значения с данными обмера самой лопатки. По отклонениям модели от «натуры» можно судить о точности моделирования. Такой массив данных позволит получить статистические характеристики точности построения модели, которые и будут характеризовать точность ее построения.

Перед выполнением моделирования лопатки и ее хвостовика были выполнены ее обмеры в нескольких местах. Результаты обмеров представлены на рисунке 4. На рисунке 4 даны параметры лопатки для вида с первой станции сканирования (вид-1) и параметры для

вида лопатки со второй станции сканирования (вид-2). На рисунке 4 (вид-3) показаны результаты обмера хвостовика лопатки.

После создания облаков ТЛО лопатки и хвостовика по их моделям средствами программы ScanMaster были выполнены измерения тех же параметров. Результаты сравнения измерений представлены в таблицах 1, 2 и 3. Таким образом, в соответствии с точечной оценкой определения параметров лопатки из сравнения результатов натурного обмера и измерений по 3D-модели можно сделать вывод о том, что СКО определения параметров составила от  $\pm 1,2$  мм до  $\pm 1,6$  мм.

Практически определив для измеренных по ее 3D-модели параметров лопатки приближенное среднее значение стандарта (теоретического СКО) величину  $m_{cp} = \pm 1,4$  мм и

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ 3D-МОДЕЛИ ЛОПАТКИ ОСЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА

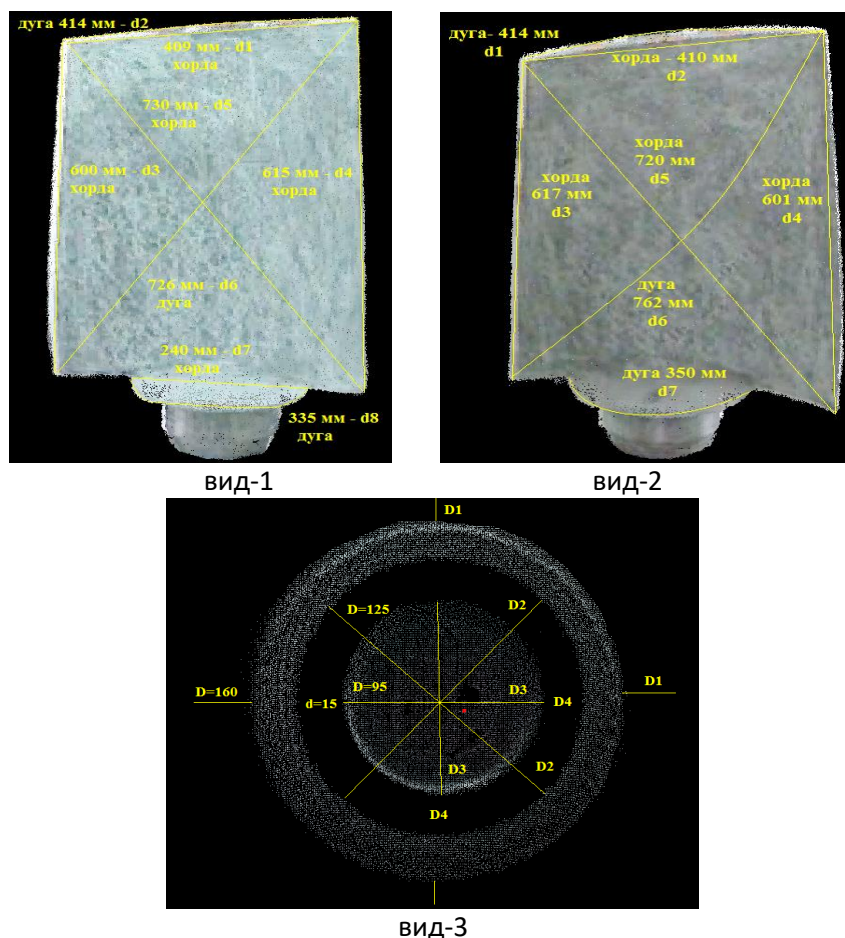


Рисунок 4 – Результаты обмера лопатки и ее хвостовика

Таблица 1 – Результаты обмера исходного облака ТЛО лопатки, вид-1

| № отрезка, $d_i$                        | Натурный обмер, мм | Обмер на облаке, мм | Разность, $\Delta (3) - (2)$ , мм | $\Delta^2$        |
|-----------------------------------------|--------------------|---------------------|-----------------------------------|-------------------|
| 1                                       | 2                  | 3                   | 4                                 | 5                 |
| 1                                       | 409                | 408                 | -1                                | 1                 |
| 2                                       | 414                | 415                 | +1                                | 1                 |
| 3                                       | 600                | 601                 | +1                                | 1                 |
| 4                                       | 615                | 615                 | 0                                 | 0                 |
| 5                                       | 730                | 728                 | -2                                | 4                 |
| 6                                       | 726                | 728                 | +2                                | 4                 |
| 7                                       | 240                | 238                 | -2                                | 4                 |
| 8                                       | 335                | 335                 | 0                                 | 0                 |
| СКО разностей $m_{\Delta} = \pm 1,4$ мм |                    |                     | $[\Delta] = -1$                   | $[\Delta^2] = 15$ |

Таблица 2 – Результаты обмера исходного облака ТЛО лопатки, вид-2

| № отрезка, $d_i$                        | Натурный обмер, мм | Обмер на облаке, мм | Разность, $(3) - (2)$ , мм | $\Delta^2$        |
|-----------------------------------------|--------------------|---------------------|----------------------------|-------------------|
| 1                                       | 2                  | 3                   | 4                          | 5                 |
| 1                                       | 414                | 415                 | -1                         | 1                 |
| 2                                       | 410                | 409                 | -1                         | 1                 |
| 3                                       | 617                | 615                 | -2                         | 4                 |
| 4                                       | 601                | 603                 | +1                         | 4                 |
| 5                                       | 720                | 719                 | -1                         | 4                 |
| 6                                       | 762                | 764                 | +2                         | 4                 |
| 7                                       | 350                | 350                 | 0                          | 0                 |
| СКО разностей $m_{\Delta} = \pm 1,6$ мм |                    |                     | $[\Delta] = -2$            | $[\Delta^2] = 18$ |

Таблица 3 – Результаты обмера исходного облака ТЛО хвостовика лопатки

| № отрезка,<br>$D_i$              | Натурный обмер,<br>м | Обмер на облаке,<br>мм | Разность, $\Delta$ (3) –<br>(2), мм | $d = \Delta - \Delta_{\text{ср}}$ | $d^2$            |
|----------------------------------|----------------------|------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------|
| 1                                | 2                    | 3                      | 4                                   | 5                                 | 6                |
| 1                                | 160                  | 161                    | +1                                  | 0,125                             | 0,015625         |
|                                  | 160                  | 163                    | +3                                  | 2,125                             | 4,515625         |
| 2                                | 125                  | 125                    | 0                                   | -0,875                            | 0,765625         |
|                                  | 125                  | 125                    | 0                                   | -0,875                            | 0,765625         |
| 3                                | 95                   | 94                     | -1                                  | -1,875                            | 3,515625         |
|                                  | 95                   | 97                     | +2                                  | 1,125                             | 1,265625         |
| 4                                | 15                   | 16                     | +1                                  | 0,125                             | 0,015625         |
|                                  | 15                   | 16                     | +1                                  | 0,125                             | 0,015625         |
| СКО разностей $m_d = \pm 1.2$ мм |                      |                        | $[\Delta] = +7 *$                   | $[d] = 0$                         | $[d^2] = 10,875$ |

\* *Примечание: так как сумма разностей  $\Delta$  существенно отличается от нуля, необходимо исключить из них систематическую составляющую и выполнить оценку точности по величинам  $d$ .*

Таблица 4 – Доверительные интервалы для параметров модели лопатки и хвостовика

| Параметры        | Доверительная вероятность, $p$ | Доверительный интервал      |
|------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Лопатка, вид-1   | 0,95                           | $d_{\text{ист}} \pm 3,4$ мм |
|                  | 0,7                            | $d_{\text{ист}} \pm 1,5$ мм |
| Лопатка, вид-2   | 0,95                           | $d_{\text{ист}} \pm 3,8$ мм |
|                  | 0,7                            | $d_{\text{ист}} \pm 1,8$ мм |
| Хвостовик, вид-3 | 0,95                           | $d_{\text{ист}} \pm 2,9$ мм |
|                  | 0,7                            | $d_{\text{ист}} \pm 1,3$ мм |

оценив точность этого приближения в 25% (в абсолютном выражении  $\pm 0,4$  мм), можно по ограниченному числу измерений ( $n = 8$ ) судить о предельной ошибке  $\Delta_{\text{пред}}$  измерения параметров модели:

$$\Delta_{\text{пред}} \leq 2m_{\text{ср}} \text{ с вероятностью } 0,95,$$

$$\Delta_{\text{пред}} \leq 3m_{\text{ср}} \text{ с вероятностью } 0,997.$$

Таким образом, с вероятностью 95% предельная СКО определения параметров лопатки по модели не превысит величины  $\pm 2,8$  мм, и с вероятностью 99,7% предельная СКО определения параметров лопатки по модели не превысит величины  $\pm 4,2$  мм.

Следует отметить, что величины СКО разностей  $m_{\Delta}$  и  $m_d$  являются точечными оценками определения параметров лопатки [9]. Точное же значение параметра  $d_{\text{ист}}$  может быть установлено с помощью величины его предельной погрешности  $\Delta_{\text{пред}}$ , т.к. она позволяет задать интервал, внутрь которого попадает истинное значение измеренной величины (параметра) с заданной доверительной вероятностью  $p$

$$d - \Delta_{\text{пред}} \leq d_{\text{ист}} \leq d + \Delta_{\text{пред}},$$

где  $\Delta_{\text{пред}} = m \cdot t_p$ ;  $t_p$  – коэффициент, зависящий от доверительной вероятности  $p$  и числа избыточных измерений  $N$  для определения ве-

личины СКО  $m$ .

Так как для определения истинного значения параметра достаточно одного измерения, то  $N = n - 1$ . Числа  $t_p$ ,  $p$  и  $N$  связаны законом распределения Стьюдента. Задаваясь доверительной вероятностью 0,95 и  $N = 7$  по таблице распределения Стьюдента из [10] для данных таблицы 1 получим  $t_p = 2,4$ .

Тогда имеем интервальную оценку параметра лопатки  $d = d_{\text{ист}} \pm 3,4$  мм. Если доверительную вероятность принять равной 0,7, то  $t_p = 1,1$  и  $d = d_{\text{ист}} \pm 1,5$  мм.

Аналогично для данных таблицы 2 при  $p = 0,95$  и  $N = 6$  получим  $d = d_{\text{ист}} \pm 3,8$  мм. Принимая  $p = 0,7$  и  $t_p = 1,1$ , получим  $d = d_{\text{ист}} \pm 1,8$  мм. Используя данные таблицы 3 при  $p = 0,95$  и  $N = 8$  получим  $d = d_{\text{ист}} \pm 2,9$  мм. Для  $p = 0,7$  и  $t_p = 1,1$ , получим  $d = d_{\text{ист}} \pm 1,3$  мм. Доверительные интервалы для истинных значений параметров модели лопатки и хвостовика для разных значений доверительной вероятности представлены в таблице 4.

Согласно данным таблицы 4, с доверительной вероятностью 0,7 можно утверждать, что параметры модели лопатки будут отличаться от данных натурального обмера лопатки в пределах от  $\pm 1,5$  мм до  $\pm 1,8$  мм, а параметры модели хвостовика – соответственно на  $\pm 1,3$  мм.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ 3D-МОДЕЛИ ЛОПАТКИ ОСЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА

При повышении уровня доверительной вероятности до 0,95 параметры модели лопатки будут отличаться от данных натурного обмера лопатки в пределах от  $\pm 3,4$  мм до  $\pm 3,8$  мм, а параметры модели хвостовика – соответственно на  $\pm 2,9$  мм.

Таким образом, была получена пространственная цифровая модель лопатки и ее хвостовика в виде облака ТЛО с достаточно высокой точностью. Тем самым продемонстрирована возможность использования технологии НЛС при разработке конструкторской документации на изготовление рабочих чертежей малогабаритных деталей сложной формы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азаров, Б. Ф. Использование наземного лазерного сканирования для обследования состояния берегов Красноярского водохранилища / Б. Ф. Азаров, Е. А. Федорова // *Геопрофи.* – 2014. – № 1. – С. 46-52.
2. Азаров, Б. Ф. К вопросу о методике контроля точности регистрации сканерных станций при выполнении инженерно-геодезических изысканий автодорог / Б. Ф. Азаров // *Ползуновский вестник.* – 2016. – № 4. – С. 125-128.
3. Середович, В. А. Наземное лазерное сканирование / В. А. Середович [и др.]. – Новосибирск: СГГА, 2009. – 261 с.
4. Руководство пользователя ScanMaster, Topcon Corporation, 2010. – 144 с.
5. Руководство по эксплуатации Лазерный сканер GLS-1500, Topcon Corporation, 2008. – 60 с.
6. Иванов, А. В. Разработка методики геодезического контроля инженерных объектов на основе данных наземного лазерного сканирования: дисс. канд. техн. наук. – Новосибирск, 2012. – 150 с.
7. Комиссаров, А. В. Общий подход к изучению погрешностей наземной лазерной съемки, вызванных метрологическими свойствами объектов / А. В. Комиссаров, Т. А. Широкова, Д. В. Комиссаров // *Известия вузов. Геодезия и аэросъемка.* – 2013. – № 1. – С. 36-42.
8. Электронный ресурс: [https://vk.com/wall9813678\\_5738?reply=5750](https://vk.com/wall9813678_5738?reply=5750).
9. Большаков, В. Д. Теория ошибок наблюдений: учеб. для вузов / В. Д. Большаков. – 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Недра, 1983. – 233 с.
10. Большаков, В. Д. Практикум по теории математической обработки геодезических измерений / В. Д. Большаков, Ю. И. Маркузе. – М.: Недра, 1984. – 352 с.

**Азаров Борис Федотович** – к.т.н., доцент, заместитель заведующего кафедрой «Основания, фундаменты, инженерная геология и геодезия» АлтГТУ им. И. И. Ползунова, E-mail: [stf-ofigig@mail.ru](mailto:stf-ofigig@mail.ru).