

Интернет-журнал «Наукovedение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 9, №2 (2017) <http://naukovedenie.ru/vol9-2.php>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/93TVN217.pdf>

Статья опубликована 25.04.2017

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Егоров В.В. Определение некоторых жесткостных характеристик артиллерийских стволов при автоматизированном проектировании // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №2 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/93TVN217.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

**УДК 623.4.01:004.9**

**Егоров Владимир Викторович**

ФГБОУ ВПО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»  
Россия, Санкт-Петербург<sup>1</sup>

Ассистент

E-mail: [mr.egorovvv@yandex.ru](mailto:mr.egorovvv@yandex.ru)

РИНЦ: [http://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=916615](http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=916615)

## **Определение некоторых жесткостных характеристик артиллерийских стволов при автоматизированном проектировании**

**Аннотация.** При проектировании командных (основных) деталей или узлов сложных технических систем часто возникает необходимость определения их жесткостных характеристик.

В статье рассматривается экспресс-метод определения жесткостных характеристик (статического прогиба и угла поворота сечения дульного среза) артиллерийских стволов при автоматизированном проектировании. Метод основан на математической модели, отличающейся аппроксимацией конических участков металлоконструкции ствола одномерными конечными элементами. Данный метод позволяет учесть при расчёте неравномерность распределения массы ствола по длине, присоединённые узлы и детали, поворот ствола при выборе зазора в ползках (или обоймах) люльки.

На примере ствола 130-мм артиллерийского орудия исследовано влияние количества замещающих конечных элементов на погрешность и время расчёта по представленному методу. Проведено сравнение с альтернативными методами определения статического прогиба и угла поворота сечения дульного среза. Кроме того, рассмотрено изменение статического прогиба и угла поворота дульного среза при удлинении ствола 130-мм артиллерийского орудия.

Приведённые в статье метод и математическая модель могут быть полезны при решении схожих задач, связанных с другими командными деталями или узлами сложных технических систем.

**Ключевые слова:** артиллерийский ствол; жесткостные характеристики; статический прогиб; угол поворота; автоматизированное проектирование; сложные технические системы; командные детали и узлы

---

<sup>1</sup> 198005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1

## Введение

При проектировании командных деталей (узлов), т.е. деталей, во многом определяющих эксплуатационные свойства сложных технических систем (СТС), часто возникает необходимость определить их жесткостные характеристики. Решение проектных задач по командным деталям на ранних стадиях разработки СТС имеет свою специфику [1]: необходимость рассмотреть большое количество проектных вариантов за приемлемое время (как правило, на ранние стадии разработки отводится наименьшее количество времени), слабая детализация объекта проектирования, неполнота или избыточность технического задания. Всё это требует методов и математических моделей для решения проектных задач, специально созданных (или адаптированных) для ранних стадий разработки, приемлемых как по точности, так и по времени расчёта.

Особенно актуально данное положение может быть для задач синтеза, часто требующих при поиске рационального проектного варианта многократного решения задач анализа (в том числе и определения жесткости конструкции).

Для артиллерийских стволов мерой жесткости могут выступать статический прогиб и угол поворота сечения дульного среза [2].

В существующих экспресс-методах определения статического прогиба ствола АО и угла поворота сечения дульного среза часть ствола, выступающую за переднюю опору люльки, представляют в виде круглой консольной балки постоянного сечения (трубы), внутренний диаметр которой равен калибру  $d$ , а наружный подбирается исходя из равенства масс консольных частей ствола и балки [5]. В ряд моделей рассматривается изгиб ствола в динамике, так, например, в работе [6] рассмотрены изгибные колебания с учётом геометрических несовершенств ствола. Подобные модели дают лишь приближённый результат и не позволяют сравнить проектные решения с разной наружной конфигурацией. Последнее необходимо при решении задачи синтеза конструкции.

Также существуют трёхмерные конечно-элементные модели, реализованные в пакетах инженерного анализа, но они отличаются как избыточной детализацией, так и неприемлемым временем расчёта. Такие модели затруднительно встроить в специальные проблемно-ориентированные средства проектирования.

## Модель и метод

Таким образом существует потребность в модели и методе на её основе, которая позволяла бы достаточно точно учесть наружную конфигурацию ствола, а с другой стороны была бы приемлема для ранних стадий разработки. Чтобы создать подобную модель для определения статического прогиба и угол поворота сечения дульного среза ствола рассмотрим расчётную схему на рис. 1.

Будем считать ствол консольной балкой переменного сечения длиной  $L_{кон}$ , находящейся вне люльки, заземленной с зазором  $\Delta$  на длине опорной базы  $L_{оп}$  люльки. На ствол действует распределенная нагрузка от собственного веса  $q$ . Наличие надульного устройства учитывается сосредоточенной нагрузкой  $P_d$ , соответственно. Отличие схемы *a* от схемы *б* на рис. 1 заключается в том, что во втором случае, если центр масс (ЦМ) с учетом казенника и надульного устройства располагается на консольной части ствола, то должен быть учтён поворот ствола при выборе зазора в ползках или обоймах люльки.

Уравнение изогнутой оси балки переменного сечения определяется зависимостью [7]

$$\frac{d^2}{dx^2} \left( E \cdot J_z(x) \cdot \frac{d^2 y(x)}{dx^2} \right) = q(x),$$

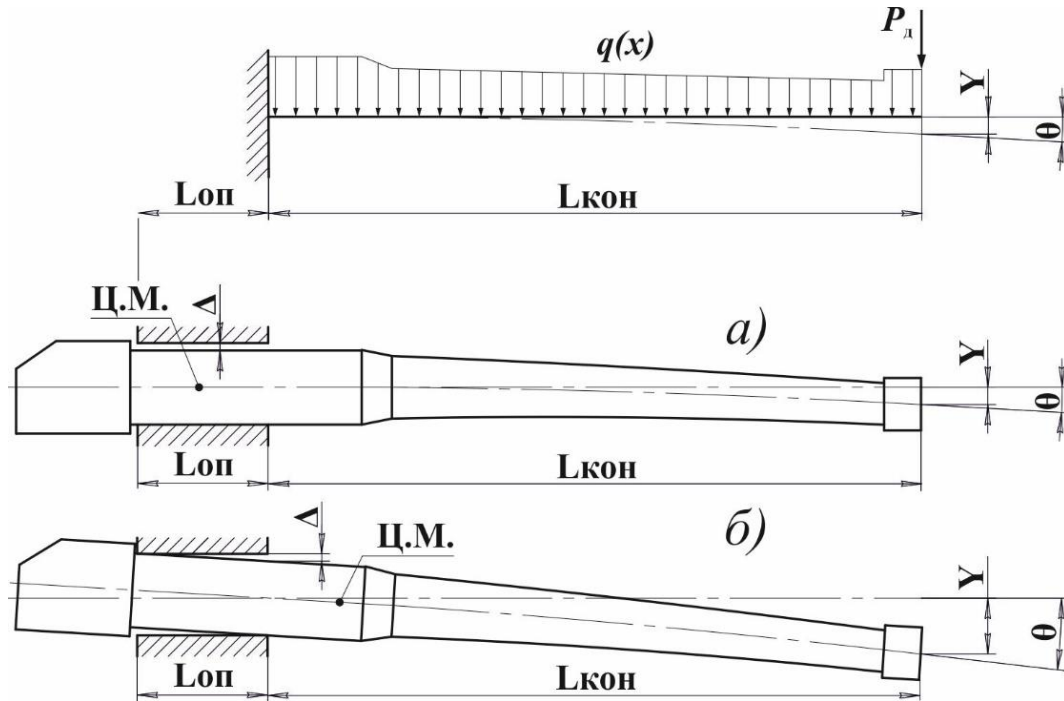
где:

$E$  - модуль Юнга;

$J_z$  - момент инерции сечения;

$y$  - прогиб;

$q$  - интенсивность распределенной нагрузки.



**Рисунок 1.** Расчетная схема определения прогиба ствола в сечении дульного среза (сделан автором): а) ЦМ располагается на опорной поверхности люльки (в базе) б) ЦМ располагается на консольной части ствола

Запишем уравнение изогнутой оси ствола в виде системы четырёх дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{aligned}
 \frac{dy(x)}{dx} &= \theta(x), \\
 \frac{d\theta(x)}{dx} &= \frac{M(x)}{E \cdot J_z}, \\
 \frac{dM(x)}{dx} &= Q(x), \\
 \frac{dQ(x)}{dx} &= q(x),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где:

$\theta$  - угол поворота сечения;

$M$  - изгибающий момент

$Q$  - перерезывающая сила.

Угол поворота сечения  $\theta$  и статический прогиб  $y$  свободного конца ствола с учетом его поворота при выборе зазора  $\Delta$  в ползках или обоймах люльки (если центр масс ствола с учётом надульного устройства и казённого находится впереди опорной базы люльки  $l_{оп}$ ) определим выражениями:

$$\theta(x) = \int_0^{l_{\text{кон}}} \frac{M(x)}{E \cdot J_z} dx + \text{arctg} \left( \frac{\Delta}{l_{\text{оп}}} \right),$$
$$y(x) = \int_0^{l_{\text{кон}}} \theta(x) dx + l_{\text{кон}} \cdot \frac{\Delta}{l_{\text{оп}}}.$$

Решить систему дифференциальных уравнений (1) представляется возможным только для простых случаев. Конфигурация же реального ствола является крайне сложной (кроме того, нельзя исключать такого случая, когда она будет образована не только коническими и цилиндрическими поверхностями), поэтому разумно решить задачу с помощью аппроксимации конфигурации ствола одномерными конечными элементами с заданной точностью, которая зависит от количества конечных элементов (КЭ). В данной постановке конечным одномерным элементом выступит труба длиной  $l$ , с постоянными по всей длине внутренним  $R_1$  и наружным  $R_2$  радиусами.

Тогда момент инерции сечения и интенсивность распределенной нагрузки для конечного элемента как функции от расстояния будут определяться зависимостями:

$$J_z = \frac{\pi}{4} \cdot (R_2^4 - R_1^4),$$
$$q = \pi \cdot \rho \cdot g \cdot (R_2^2 - R_1^2),$$

где:

$\rho$  - плотность;

$g$  - ускорение свободного падения.

Тогда для  $i$ -го конечного элемента можно записать следующие зависимости для перерезывающей силы

$$Q_i(l) = Q_{i-1} + \int_0^l q(x) dx = Q_{i-1} + \pi \cdot \rho \cdot g \cdot (R_2^2 - R_1^2) \cdot l,$$

для момента

$$M_i(l) = M_{i-1} + \int_0^l Q(x) dx = M_{i-1} + Q_{i-1} \cdot l + \pi \cdot \rho \cdot g \cdot (R_2^2 - R_1^2) \cdot \frac{l^2}{2},$$

для угла поворота сечения

$$\theta_i(l) = \theta_{i-1} + \frac{1}{E \cdot J} \cdot \int_0^l \left( M_{i-1} + Q_{i-1} \cdot l + \pi \cdot \rho \cdot g \cdot (R_2^2 - R_1^2) \cdot \frac{x^2}{2} \right) dx =$$
$$= \theta_{i-1} + \frac{1}{E \cdot J} \cdot \left( M_{i-1} \cdot x + Q_{i-1} \cdot \frac{l^2}{2} + \pi \cdot \rho \cdot g \cdot (R_2^2 - R_1^2) \cdot \frac{l^3}{6} \right),$$

для прогиба

$$y_i(l) = y_{i-1} + \int_0^l \theta_{i-1} dx + \frac{1}{E \cdot J} \times$$
$$\times \int_0^l \left( M_{i-1} \cdot x + Q_{i-1} \cdot \frac{x^2}{2} + \pi \cdot \rho \cdot g \cdot (R_2^2 - R_1^2) \cdot \frac{x^3}{6} \right) dx =$$

$$= y_{i-1} + \theta_{i-1} \cdot l + \frac{1}{E \cdot J} \cdot \left( M_{i-1} \cdot \frac{l^2}{2} + Q_{i-1} \cdot \frac{l^3}{6} + \pi \cdot \rho \cdot g \cdot (R_2^2 - R_1^2) \cdot \frac{l^4}{24} \right),$$

где:

$Q_{i-1}$  - значение силы с предыдущего участка (КЭ);

$M_{i-1}$  - значение момента с предыдущего участка (КЭ);

$\theta_{i-1}$ , - значение угла поворота с предыдущего участка (КЭ);

$y_{i-1}$  - значение прогиба с предыдущего участка (КЭ);

$l$  - длина текущего КЭ.

Расчёт лучше начинать со свободной части, чтобы избежать расчёта силы в заделке. При этом для первого сечения необходимо задать  $Q_{i-1} = P_d$  (если есть надульное устройство) и  $M_{i-1} = \theta_{i-1} = y_{i-1} = 0$ . В этом случае угол поворота и прогиб сечения дульного среза определяются как сумма по всем участкам

$$\theta(l_{\text{кон}}) = \sum_i \theta_i(l) + \arctg\left(\frac{\Delta}{l_{\text{оп}}}\right),$$

$$y(l_{\text{кон}}) = \sum_i y_i(l) + l_{\text{кон}} \cdot \frac{\Delta}{l_{\text{оп}}}.$$

### Расчётное время и погрешность

Так как представленная модель и метод для определения жесткостных характеристик стволов должны использоваться на ранних стадиях разработки АО, то разумно оценить расчётное время и погрешность в зависимости от количества КЭ, замещающих один конус металлоконструкции, и сравнить с другими моделями. Данные характеристики были рассмотрены на примере консольной части ствола 130-мм орудия (табл. 1), считая, что поворот от зазора в люльке отсутствует (рис. 1, а). Масс надульного устройства принята равной 30 кг.

**Таблица 1**

**Конфигурация консольной части ствола (составлена автором)**

Фигура	Длина, м	Внутренний диаметр, м	Наружный диаметр первого основания, м	Наружный диаметр второго основания, м
труба	0.5	0.133	0.25	-
коническая труба	0.05		0.25	0.23
труба	1.2		0.23	-
коническая труба	0.75		0.23	0.18
труба	2.5		0.18	-

Для этого на языке Python 3 была создана расчётная программа, которая реализует рассматриваемые в данной статье метод и модель для определения статического прогиба и угла поворота сечения дульного среза ствола. С помощью программы было исследовано влияние количества КЭ, замещающих один конический участок ствола, на погрешность и время расчёта (табл. 2). Плотность и модуль Юнга были приняты при расчётах соответственно равными 7850 кг/м<sup>3</sup> и 200 ГПа.

**Таблица 2**

**Погрешности и расчётные времена для разных методов определения жесткостных характеристик ствола (составлена автором)**

Кол-во замещающих конус КЭ/ метод	Угол поворота, рад	Прогиб консольной части ствола, мм	Относительная погрешность (прогиб), %	Время расчёта	Время расчёта 10 <sup>6</sup> моделей
1	0.001320	2.437	1.25	0.03 мс	29 сек
2	0.001323	2.459	0.36	0.05 мс	50 сек.
3	0.001324	2.464	0.16	0.07 мс	1 мин. 2 сек.
5	0.001324	2.467	0.04	0.1 мс	1 мин. 25 сек.
10	0.001324	2.468	-	0.15 мс	2 мин. 40 сек.
100	0.001324	2.468	-	1.2 мс	20 мин.
Интегрирование функцией odeint	0.001324	2.468	-	4 мс	1 час 5 мин.
Замена одной цилиндрической трубой ( $D_b = 133$ мм $D_n = 205.08$ мм)	0.002403	3.111	26,5	0.01 мс	9 сек.

*Примечание: программно-аппаратные средства: процессор Intel i5-2450M (задействовано одно ядро, максимальная частота 2,5 ГГц), операционная система Linux Mint 17.3, язык программирования Python 3.4*

Кроме того, были реализованы альтернативные расчётные программы. Первая интегрирует систему уравнений методом Адамса с помощью функции odeint из научной библиотеки SciPy. Вторая заменяет фигуры из табл. 1 на одну цилиндрическую трубу эквивалентного объёма (метод рассматривается в [5]). Результаты расчёта альтернативными методами также представлены в табл. 2.

Следует пояснить, что практический интерес представляет именно многократное определение жесткостных характеристик, требуемое при решении задачи синтеза ствола. Например, при поиске рациональной наружной конфигурации ствола методом регулярного сканирования [2] при 10% точности необходимо рассмотреть около 10<sup>6</sup> проектных вариантов.

Рассматривая результаты, приведённые в табл. 2, можно сделать несколько выводов. Во-первых, достаточная для практики точность достигается уже при разбиении каждого конических элементов реальной металлоконструкции на три одномерных КЭ. При этом замена конического элемента металлоконструкции менее чем 10 одномерными КЭ уже не позволяет существенно выиграть в скорости расчёта. Во-вторых, замена консольной части на одну цилиндрическую трубу эквивалентного объёма даёт большую погрешность. В-третьих, решение с помощью функции odeint является неприемлемым по времени расчёта (рекомендации по времени расчета и точности моделей приведены, например, в [4]). Заметим, что несмотря на то, что функция odeint использует скомпилированный решатель Lsoda из Fortran-библиотеки Odepack [10], а программа расчёта с одномерными КЭ является полностью интерпретируемой - последняя выигрывает по времени расчёта.

**Влияние нарезов и удлинения ствола**

Значительная часть современных артиллерийских орудий имеют нарезной артиллерийский ствол. Глубина нарезов, как правило, варьируется от 1% до 2% [8]. Так как

представленная в данной работе модель не учитывает нарезы, то было рассмотрено влияние замены нарезного канала гладким на угол поворота и прогиб консольной части ствола - табл. 3 и табл. 4.

**Таблица 3**  
**Угол поворота и прогиб консольной части ствола (составлена автором)**

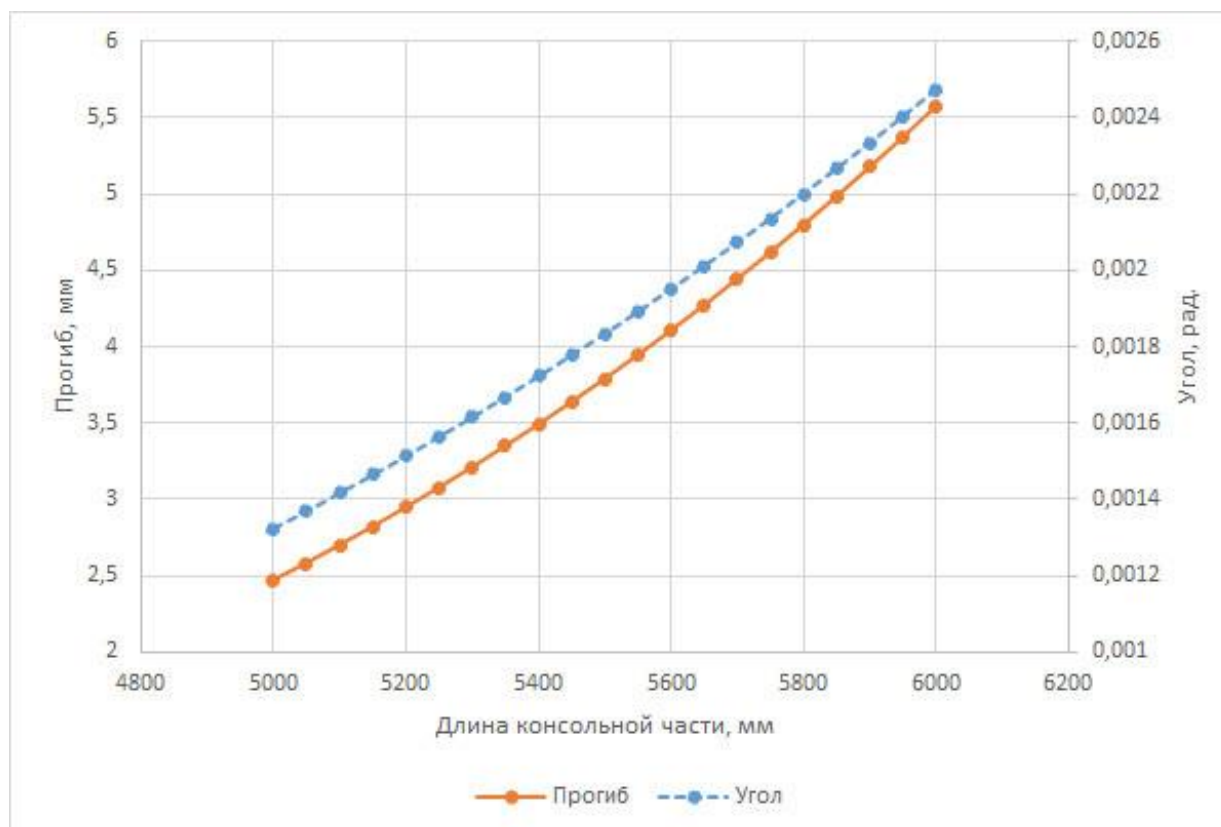
Характеристика	Замена по полям	Замена по средней линии	Замена по нарезам
Внутренний диаметр, мм	130	133	135
Угол поворота, рад	0.001350	0.001324	0.001307
Прогиб консольной части ствола, мм	2.496	2.468	2.451

*Примечание: количество КЭ, замещающих один конический элемент, равно 10*

Кроме того, было рассмотрено влияние удлинения ствола на угол поворота и прогиб консольной части (рис. 2). Данная задача часто возникает при модернизации артиллерийских орудий [9]. Как мы видим из рис. 2, удлинение ствола всего лишь на 1000 мм приводит к более чем двукратному увеличению статического прогиба и угла поворота сечения дульного среза. Таким образом, изменение жесткостных характеристик необходимо обязательно учитывать при модернизации АО, включающей удлинение ствола.

**Таблица 4**  
**Отклонение угла поворота и прогиба консольной части относительно замены по средней линии (составлена автором)**

Характеристика*	Отклонение по полям, %	Отклонение по нарезам, %	относительная разница, %
Угол поворота	1.96	1.28	3.25
Прогиб консольной части ствола	1.13	0.68	1.82



**Рисунок 2.** Изменение статического прогиба и угла поворота дульного среза при удлинении артиллерийского ствола (сделан автором)

### Выводы

В статье предложена уточнённая математическая модель ствола для определения статического прогиба и угла поворота дульного среза, отличающаяся аппроксимацией конических участков металлоконструкции ствола одномерными конечными элементами.

Представлен и реализован в виде расчётной программы метод определения статического прогиба и угла поворота дульного среза на основе предложенной модели.

На примере ствола 130-мм артиллерийского орудия исследовано влияния количества замещающих конечных элементов на погрешность и время расчёта.

Модель и метод, предложенные в статье, являются предпочтительными как по погрешности, так и по времени расчёта в сравнении с существующими.

Исследовано изменение статического прогиба и угла поворота дульного среза при удлинении ствола 130-мм артиллерийского орудия.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров, В.В. Некоторые аспекты автоматизации проектирования стволов артиллерийских орудий / В.В. Егоров // Инновационный арсенал молодежи: труды четвертой науч.-техн. конф. - СПб: ФГУП «КБ «Арсенал»; Балт. гос. техн. ун-т., 2013. - С. 275 - 278.
2. Егоров, В.В. О реализации системного подхода при проектировании командных деталей и узлов сложных технических систем / В.В. Егоров, А.С. Зайцев, Г.В. Лепеш // Техничко-технологические проблемы сервиса - 2014 - №1 (27) - С. 36 - 42.
3. Зайцев А.С. Проектирование артиллерийских стволов: учебное пособие / Балт. гос. техн. ун-т. - СПб. 2007. - 164 с.
4. Новиков, Б.К. Системные аспекты проектирования ствольного оружия: учебник / Б.К. Новиков. - М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2008. - 518 с.
5. Орлов, Б.В. Устройство и проектирование стволов артиллерийских орудий / Б.В. Орлов, Э.К. Ларман, В.Г. Маликов - М.: Машиностроение, 1976.
6. Семёнова, Г.А. Динамика толстостенной неоднородной трубы с геометрическими несовершенствами: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук (01.02.04) / Г.А. Семёнова; ГОУ ВПО «Орловский государственный технический университет». - Орёл, 2008. - 20 с.
7. Феодосьев, В.И. Сопrotивление материалов: учеб. для вузов / В.И. Феодосьев. - 10-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. - 592 с.
8. Физические основы устройства и функционирования стрелково-пушечного, артиллерийского и ракетного оружия. Ч. 1 Физические основы устройства и функционирования стрелково-пушечного и артиллерийского оружия / Под ред. А.А. Королева, В.Г. Кучерова. - Волгоград: «Политехник», 2003. - 559 с.
9. Широкопад, А.Б. Энциклопедия отечественной артиллерии / А.Б. Широкопад; под. общ. ред. А.Е. Тараса. - Мн.: Харвест, 2000. - 1156 с.
10. Blanco-Silva F.J. Learning SciPy for Numerical and Scientific Computing / F.J. Blanco-Silva - Birmingham: Packt Publishing, 2013. - 150 p.



**Egorov Vladimir Viktorovich**

Baltic state technical university «VOENMEH», Russia, St. Petersburg

E-mail: mr.egorovvv@yandex.ru

## **Determination of some stiffness characteristics of artillery barrels in computer-aided design**

**Abstract.** In the design command (main) parts or assemblies of complex technical systems it is often necessary to determine their stiffness characteristics.

The article discusses the express-method to determine the stiffness characteristics (static bending and rotation angle of the cross section of the muzzle) artillery barrels in computer-aided design. The method is based on the mathematical model, wherein the approximation of the conical sections of the barrel of a one-dimensional finite elements. This method allows to take into account when calculating the uneven mass distribution of the barrel length, attached components and parts, rotation the barrel when choosing a gap in the slides (or clips) of the cradle.

For example, the barrel 130-mm artillery gun was investigated the effect of amount of replacement of finite elements on error and time of calculation by the presented method. A comparison with alternative methods for determining the static bending and the rotation angle of the muzzle cross section is made. In addition, the change in the static bending and the rotation angle of the muzzle cross section the elongation of the barrel of a 130-mm artillery gun is considered.

In article the method and the mathematical model can be useful in solving similar problems associated with other command parts or assemblies of complex technical systems.

**Keywords:** artillery barrel; stiffness characteristics; static bending; angle of rotation; computer-aided design; complex technical systems; main parts and assemblies