



ISSN 2071-2898 (Print)  
ISSN 2071-2901 (Online)

Терещенко А.Н., Лукин В. В.,  
Головкин К.Д., Плеханов А.В.,  
Родин А. С.

Оценка прочности и  
жесткости  
электромагнитного  
ускорителя с силовым  
корпусом из полимерного  
волоконного  
композиционного материала

**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** Оценка прочности и жесткости электромагнитного ускорителя с силовым корпусом из полимерного волоконного композиционного материала / А.Н.Терещенко [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2015. № 51. 24 с.

URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-51>

**Ордена Ленина  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ  
имени М.В.Келдыша  
Российской академии наук**

**А. Н. Терещенко**, В.В. Лукин, К.Д. Головкин,  
А.В. Плеханов, А.С. Родин

**Оценка прочности и жесткости  
электромагнитного ускорителя  
с силовым корпусом  
из полимерного волокнистого  
композиционного материала**

Москва — 2015

**A. N. Terestchenko**, В.В. Лукин, К.Д. Головкин, А.В. Плеханов, А.С. Родин

*Оценка прочности и жесткости электромагнитного ускорителя с силовым корпусом из полимерного волокнистого композиционного материала*

На основе метода конечных элементов разработана вычислительная программа NDSPDE для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций сложной геометрической формы в условиях плоской деформации. Программа позволяет проводить численные исследования НДС вариантов конструкций стволов электромагнитного ускорителя (ЭМУ) при различных условиях их нагружения с учетом ортотропных свойств применяемых материалов. Результаты численных исследований дают возможность в зависимости от требований, предъявляемых к жесткости и прочности ствола ЭМУ, подбирать подходящие конструкционные материалы, оптимизировать его конструкцию и условия нагружения. Программа позволяет представлять результаты расчетов в удобном для инженерной практики виде.

Приведены примеры расчетов параметров поперечного сечения ствола ЭМУ, включающего в себя силовую оболочку из композиционного материала, рельсы и изоляторы. Выполнены оценки НДС и прочности элементов конструкции.

**Ключевые слова:** *электромагнитный ускоритель, ствол, ортотропные материалы, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, программа.*

**A. N. Terestchenko**, V.V. Lukin, K.D. Golovkin, A.V. Plekhanov, A.S. Rodin

*Estimation of both durability and stiffness of the electromagnetic accelerator with a prestressed glass fiber overwrap.*

The computer code, NDSPDE, was developed based on the finite element method for stresses analysis of complex geometric shapes designs in a plane strain. The code allows you to carry out numerical structural studies of electromagnetic accelerator (EMA) barrels under various electromechanical loads taking into account the orthotropic properties of used constructive materials. Depending on the requirements for durability and stiffness of the EMA barrel, the numerical studies results make it possible to select suitable materials of constructions, to optimize both the barrel design and the barrel electromechanical loading conditions. The code allows you to present the calculation results in convenient form for engineering practice.

This paper also presents the numerical results of the barrel cross-section parameters estimation of EMA, including the prestressed glass fiber overwrap, rails, and insulators. Both stresses and durability of the structural elements estimations of EMA barrel were executed.

**Key words:** *electromagnetic accelerator, barrel, orthotropic materials, stress-deformed state, finite element method, code.*

## 1. Введение

К настоящему времени достигнут значительный прогресс в создании рельсовых электромагнитных ускорителей (далее ЭМУ) для метания тел различной массы. Это стало возможным, прежде всего, благодаря решению ряда технических проблем, связанных с обеспечением жесткости и прочности таких ускорителей. Однако по-прежнему задача обеспечения прочности и жесткости элементов конструкции ЭМУ остается актуальной, что обусловлено как появлением принципиально новых конструкций ускорителя, так и применением в них новых конструкционных материалов.

Как известно, в процессе своей работы ЭМУ испытывают воздействие интенсивных динамических нагрузок, что приводит к возникновению в элементах конструкции высоких напряжений и, как следствие, к их значительному деформированию или даже разрушению. Наиболее нагруженным элементом конструкции ускорителя является его ствол. Стволы ЭМУ имеют, как правило, достаточно сложную конструкцию, состоящую из токопроводящих рельсов, изоляторов и силовых оболочек. Для изготовления стволов применяют различные конструкционные материалы, в том числе и полимерные композиционные материалы (далее ПКМ). Все это существенно усложняет задачу прогнозирования прочности стволов, без решения которой невозможно создание высокоэффективных ЭМУ. Задача прогнозирования прочности включает в себя исследование напряженно-деформированного состояния (далее НДС) стволов и последующую оценку их прочности и жесткости (деформативности). Корректная оценка НДС и прочности стволов позволяет, исходя из общих требований к ЭМУ, оценить их работоспособность уже на стадии проектирования без проведения дорогостоящих натурных испытаний, а также сформулировать рекомендации по совершенствованию (оптимизации) конструкций и требования к физико-механическим характеристикам применяемых в них материалов.

## 2. Физическая и математическая модели механического поведения ствола ЭМУ при выстреле

Механическое поведение ствола ЭМУ, а следовательно, уровень и характер возникающего в нем НДС, полностью определяются геометрическими характеристиками ствола, действующими на него нагрузками и физико-механическими свойствами (характеристиками) используемых в нем материалов. Далее рассмотрим одну из типичных конструкций ствола, поперечное сечение которого приведено на рис. 1.

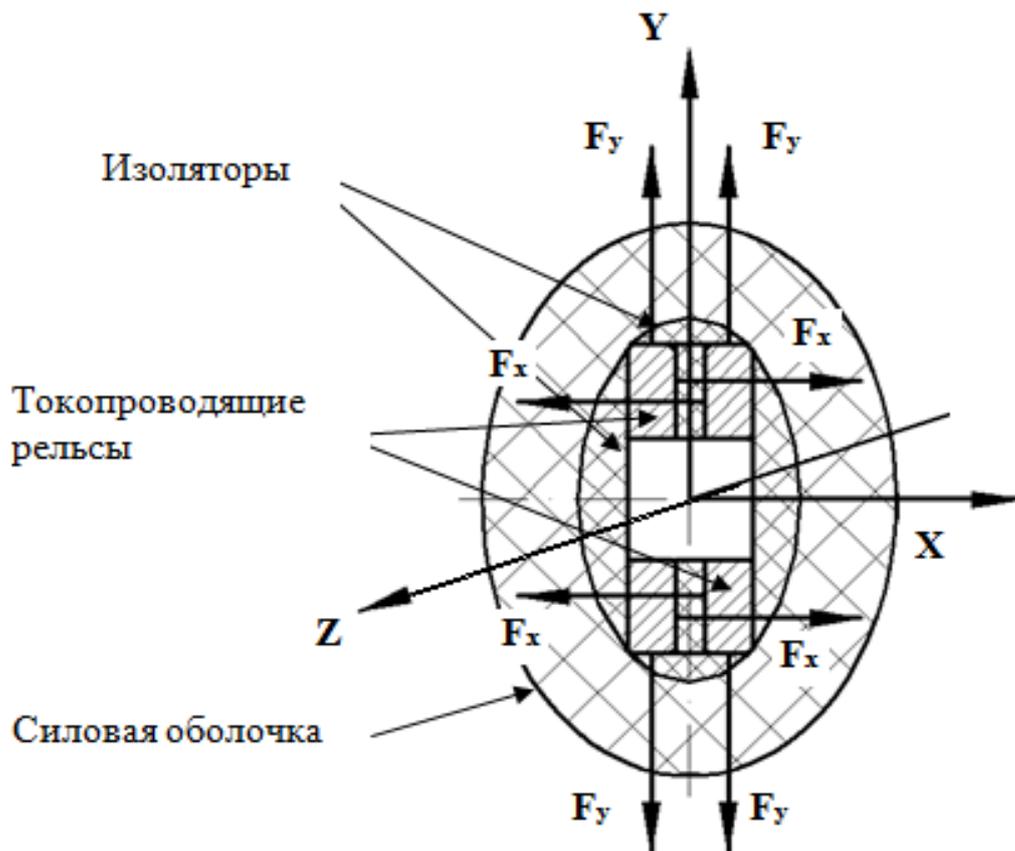


Рис. 1. Поперечное сечение ствола ЭМУ с силовой оболочкой из волокнистого ПКМ

По своим геометрическим характеристикам такой ствол представляет собой длинный толстостенный полый двухслойный цилиндр. Внешняя поверхность цилиндра имеет овальное поперечное сечение, а внутренняя

поверхность (канал) – прямоугольное сечение. Внешним слоем цилиндра является толстостенная силовая оболочка, изготовленная методом непрерывной намотки волокнистого ПКМ. Внутренняя оболочка составная и включает в себя две пары рельсов, изготовленных из токопроводящего материала, и изоляторы из не проводящих ток материалов, например, из ПКМ.

В процессе работы на элементы конструкции ствола действует комплекс высокоинтенсивных динамических нагрузок. Эти нагрузки по характеру их воздействия можно разделить на объемные и поверхностные. К объемным нагрузкам относится электромагнитная сила  $\vec{F} = \vec{F}_x + \vec{F}_y = (F_x; F_y; 0)$ ,  $\vec{F}_x = (F_x; 0; 0)$ ,  $\vec{F}_y = (0; F_y; 0)$ , возникающая при прохождении импульса электрического тока по токопроводящим рельсам. Компонента силы  $\vec{F}$  в  $y$ -направлении расталкивает рельсы. В силу того, что в рассматриваемой конструкции ствола каждая пара токопроводящих рельсов конструктивно состоит из двух проводников, разделенных изолятором, между этими проводниками при прохождении по ним электрического тока возникают объемная электромагнитная сила. Компонента силы  $\vec{F}$  в  $x$ -направлении стремится сблизить проводники. К поверхностным нагрузкам относится контактное давление, которое возникает на площадках контакта рельсов с метаемым телом (далее МТ).

Учитывая интенсивный динамический характер нагрузок, воздействующих на ствол, можно полагать, что используемые в конструкции материалы будут работать на предельных режимах. В этой связи при исследовании НДС ствола важно учитывать реальные физико-механические свойства материалов, из которых изготовлены его элементы. Анализ показывает, что если материал рельсов, в качестве которого обычно используется высоколегированная сталь, медь или сплавы меди, можно в определенных пределах рассматривать как линейно-упругий изотропный материал, то материалы изоляторов и силовой оболочки, даже в пределах их

упругого деформирования, уже нельзя рассматривать как изотропные материалы. ПКМ обладают ярко выраженной анизотропией физико-механических свойств. При этом, если физико-механическое поведение линейно-упругого материала характеризуется двумя константами (модулем упругости и коэффициентом Пуассона), то механическое поведение анизотропного линейно-упругого материала характеризуется уже 21 константой, являющимися компонентами тензора модулей упругости 4-й валентности (или 4-го ранга) [1]. Ситуация значительно усложняется при деформировании элементов конструкции ствола за пределами упругости.

подавляющее большинство современных методов исследования НДС различных инженерных конструкций основывается на решении системы дифференциальных уравнений равновесия (движения) механики деформируемого твердого тела. Это так называемый континуальный подход. В рамках данного подхода с учетом приведенного анализа можно сформулировать задачу исследования НДС ствола ЭМУ под действием электромагнитных сил. Очевидно, что в этом случае должна решаться 3d пространственная задача определения НДС составной конструкции под действием динамических нагрузок с учетом возможного нелинейного характера механического поведения используемых в конструкции изотропных и анизотропных материалов.

Современные численные методы решения задач механики деформируемого твердого тела, такие, например, как метод конечных элементов [2], позволяют при исследовании НДС сложных конструкций использовать расчетные алгоритмы, наиболее полно отражающие механическое поведение этих конструкций, главным образом за счет учета их реальной геометрии и близких к реальным физико-механических характеристик всех используемых в конструкциях ускорителя материалов. Однако в инженерной практике по-прежнему остается актуальной задача разработки упрощенных расчетных алгоритмов для исследования НДС. Применительно к

рассматриваемой конструкции ствола задачу исследования НДС можно существенно упростить, если учесть некоторые его конструктивные особенности и условия нагружения.

Предположим, что вдоль оси  $Z$  все переменные распределены однородно, что позволяет рассматривать плоскую задачу. Согласно рис. 1 ствол ЭМУ симметричен относительно двух взаимно перпендикулярных продольных плоскостей  $X-Z$ ,  $Y-Z$ . Также симметричны приложенные к стволу электромагнитные силы. Поэтому при исследовании НДС ствола достаточно рассматривать только четвертую часть ствола ЭМУ, ограниченную плоскостями  $X-Z$ ,  $Y-Z$ .

Следующее упрощение обусловлено требованием к жесткости ствола, в соответствии с которым ствол должен быть работоспособным в условиях многократного нагружения эксплуатационными нагрузками. Фактически это означает, что элементы конструкции ствола, в особенности его силовая оболочка, должны работать в пределах упругости, так как в противном случае в них могут появиться значительные остаточные деформации. Появление в элементах конструкции ствола остаточных деформаций крайне нежелательно с точки зрения его многократного использования, поскольку такие деформации могут привести к изменению размеров и геометрии канала ствола. Допустимость остаточных деформаций в отдельных элементах должна определяться для каждого конкретного случая в зависимости от конструкции ствола и условий его работы.

Многочисленные исследования (например, [1, 3]) показывают, что физико-механические свойства волокнистых ПКМ с регулярной структурой существенно различаются по двум взаимно перпендикулярным направлениям (в направлении волокон и перпендикулярно направлению волокон). В этом случае имеет место так называемая ортогональная анизотропия механических свойств (ортотропия) [1]. Анизотропный материал силовой оболочки ЭМУ, изготовленной методом непрерывной намотки ленты из жгута, представляет

собой многослойную волокнистую структуру, каждый слой которой имеет определенную ориентацию волокон (рис. 2). В этом случае каждый слой силовой оболочки ствола можно рассматривать как ортотропный. Если учесть, что все слои силовой оболочки должны деформироваться совместно, то при проведении расчетов НДС можно использовать интегральные физико-механические характеристики композиционного материала силовой оболочки по трем взаимно перпендикулярным направлениям (по нормали к поверхности силовой оболочки  $n$ , по образующей силовой оболочки  $l$  и по направляющей силовой оболочки  $t$ ). При этом появляется возможность рассматривать материал силовой оболочки ствола ЭМУ не как анизотропный, а как интегрально ортотропный.

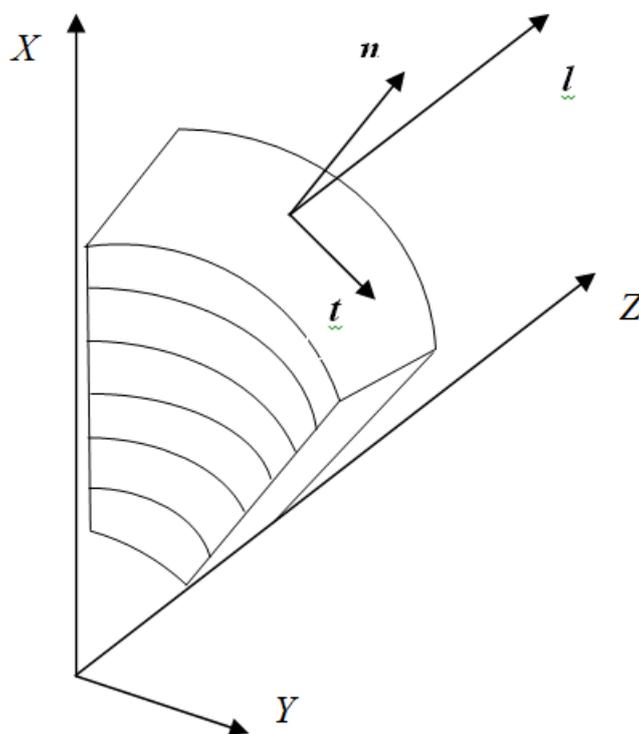


Рис. 2. Элемент силовой оболочки ствола ЭМУ из волокнистого ПКМ

Компоненты электромагнитной силы  $F_y$  и  $F_x$ , см. рис. 1, возникающие при прохождении импульса электрического тока по токопроводящим рельсам и приложенные к ним, симметричны относительно плоскостей  $X-Z$ ,  $Y-Z$ . В силу физических особенностей работы ЭМУ величины этих сил и длина участка

рельсов, к которому они прикладываются, изменяются с течением времени. Поэтому при исследовании НДС ствола ЭМУ удобно рассматривать погонные электромагнитные силы [4], то есть величины электромагнитных сил, отнесенные к длине участка ствола, на котором эти силы действуют. Распределенная сила, необходимая для расчета НДС, получается путем деления погонной силы на площадь поперечного сечения рельса. Мы будем использовать далее понятие погонной силы, так как она естественным образом появляется при расчете силовых нагрузок в стволе ЭМУ.

В отличие от электромагнитных сил контактное давление, обусловленное взаимодействием МТ с рельсами, приложено к рельсам на участке их контакта с МТ. Данный участок контакта также перемещается по стволу ЭМУ с течением времени. Очевидно, что наиболее опасным с точки зрения прочности и жесткости конструкции ствола будет момент времени, когда суммарное действие всех сил максимально. Определение такого момента времени и соответствующего ему уровня НДС элементов конструкции ствола является, вообще говоря, задачей динамики. При этом пространственное НДС, возникающее в стволе, носит волновой характер. На практике для получения проектных оценок с запасом по прочности и жесткости эту задачу можно рассматривать в квазистатическом приближении, заменив динамическое НДС конструкции равным по интенсивности статическим НДС. В этом случае не будет моделироваться полная картина распределения напряжений и деформаций во времени, но зато появляется возможность существенно упростить решение и провести инженерные оценки. Так как длина ствола, как правило, значительно превышает его поперечные размеры, то можно считать, что в любом поперечном сечении ствола, расположенном от его среза на расстоянии, превышающем два поперечных размера, реализуется условие плоской деформации.

С учетом приведенных выше рассуждений система предположений, необходимых для разработки расчетной схемы применительно к решению

задачи исследования НДС ствола ЭМУ при выстреле, может быть сформулирована следующим образом.

1) При исследовании НДС можно рассматривать не все поперечное сечение ствола, а лишь его четвертую часть, ограниченную взаимно перпендикулярными плоскостями  $X-Z$ ,  $Y-Z$  (рис. 1).

2) Все материалы, из которых изготовлены элементы конструкции ствола, работают в пределах упругости.

3) Волокнистый ПКМ силовой оболочки ствола является интегрально ортотропным, причем оси ортотропии совпадают с нормальным, трансверсальным и осевым направлениями по отношению к слоям силовой оболочки.

4) На элементы конструкции ЭМУ действуют постоянные объемные и поверхностные силы, по своей величине равные пиковым значениям соответствующих динамических нагрузок.

Физическая модель механического поведения ствола ЭМУ с силовой оболочкой из волокнистого ПКМ под действием электродинамических нагрузок, сформулированная в виде системы упрощающих предположений, позволяет существенно упростить решение задачи по определению НДС ствола.

Для решения данной задачи воспользуемся методом конечных элементов в перемещениях [2]. Предположим, что имеется некоторая плоская расчетная область  $\Omega$  (рис. 3), состоящая из нескольких подобластей. Используем декартову систему координат  $X, Y$ . Пусть часть подобластей, составляющих рассматриваемую расчетную область  $\Omega$ , заполнена ортотропными волокнистыми ПКМ.

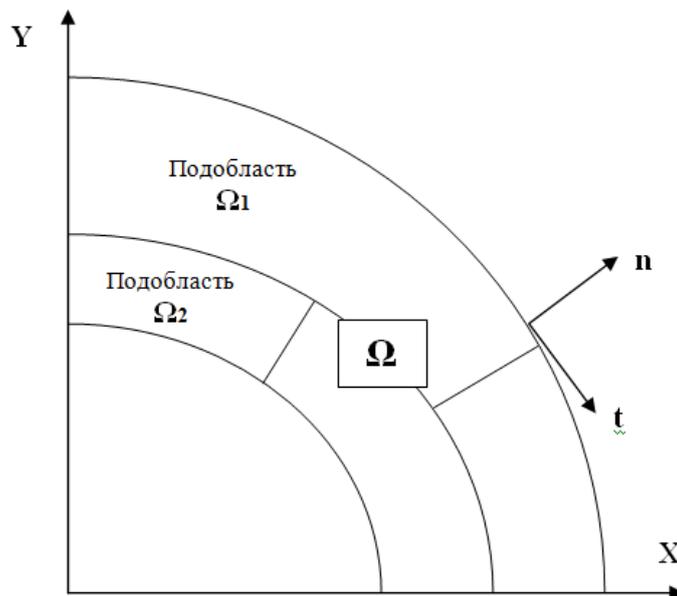


Рис. 3. Плоская расчетная область  $\Omega$

В каждой из таких подобластей первая ось ортотропии  $t$  совпадает с направлением армирующих волокон, а вторая ось ортотропии  $n$  перпендикулярна направлению волокон (рис. 3). В общем случае физико-механические свойства различных подобластей могут быть различными.

Если система всех действующих на рассматриваемую область нагрузок уравновешена, то в ней возникает НДС, которое будет зависеть от геометрических характеристик области, уровня, характера и места приложения нагрузок, а также от физико-механических свойств материалов. Разобьем расчетную область  $\Omega$  на треугольные конечные элементы и будем предполагать, что в пределах каждого такого элемента вектор перемещений является линейной функцией координат. Обозначим модуль упругости и коэффициент Пуассона ортотропного волокнистого ПКМ в направлении оси ортотропии  $t$  как  $E_t$  и  $\nu_t$ , модуль упругости и коэффициент Пуассона в направлении оси ортотропии  $n$  как  $E_n$  и  $\nu_n$ , а модуль сдвига ортотропного волокнистого ПКМ в плоскости осей ортотропии  $t$ - $n$  как  $G_m$ . Заметим, что в подобластях из волокнистого ПКМ оси ортотропии могут не совпадать с направлением осей  $X, Y$ . Физико-механические характеристики таких ПКМ обычно известны только по направлениям осей ортотропии. Однако при

решении задачи по определению НДС в системе координат  $X, Y$  необходимо, чтобы физико-механические характеристики материалов в таких подобластях были определены в той же декартовой системе координат. Это можно сделать, если для каждого конечного элемента, расположенного в любой подобласти из волокнистого ПКМ, известны углы, которые составляют оси ортотропии материала с осями декартовой системы координат  $X, Y$ . С учетом таких углов физико-механические характеристики ортотропного материала, заданные в направлении осей ортотропии, могут быть пересчитаны на направления осей декартовой системы координат  $X, Y$ . В частности, если ось ортотропии  $t$  составляет угол  $\alpha$  с осью  $X$  декартовой системы координат, то согласно [1] соотношения для пересчета интегральных физико-механических характеристик ортотропного материала могут быть записаны в виде:

$$\begin{aligned}
 E_x(\alpha) &= \frac{1}{\frac{\cos^4 \alpha}{E_t} + \frac{\sin^4 \alpha}{E_n} + \left(\frac{1}{4}G_{tn} - \frac{\nu_1}{2}E_t\right)\sin^2 2\alpha}, \\
 E_y(\alpha) &= \frac{1}{\frac{\sin^4 \alpha}{E_t} + \frac{\cos^4 \alpha}{E_n} + \left(\frac{1}{4}G_{tn} - \frac{\nu_1}{2}E_t\right)\sin^2 2\alpha}, \\
 \nu_x(\alpha) &= \frac{\left(\frac{1}{G_{tn}} - \frac{1}{E_t} - 1/E_n\right)\sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + \frac{\nu_t}{E_t}(\sin^4 \alpha + \cos^4 \alpha)}{\frac{\cos^4 \alpha}{E_t} + \frac{\sin^4 \alpha}{E_n} + \left(1/4G_{tn} - \frac{\nu_1}{2}E_t\right)\sin^2 2\alpha}, \\
 G_{xy}(\alpha) &= \frac{1}{4\left(\frac{1}{E_t} + \frac{1}{E} + 2\frac{\nu_t}{E_t}\right)\sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + \cos^2 2\alpha/G_{tn}}, \\
 \nu_y(\alpha) &= \frac{E_y(\alpha)\nu_x(\alpha)}{E_x(\alpha)}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь

$E_x(\alpha)$ ,  $\nu_x(\alpha)$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона ортотропного ПКМ, пересчитанные на направление оси  $X$  декартовой системы координат;

$E_y(\alpha)$ ,  $\nu_y(\alpha)$  – модули упругости и коэффициенты Пуассона ортотропного ПКМ, пересчитанные на направление оси  $Y$  декартовой системы координат;

$G_{xy}$  – модуль сдвига ортотропного ПКМ, пересчитанный в систему координат  $X, Y$ .

Приведенные соотношения позволяют учитывать ортотропные свойства материалов, из которых изготовлены элементы конструкции ствола ЭМУ, при решении задачи по определению его НДС в любой ортогональной системе координат в зависимости от того, как ориентированы по отношению к этой системе оси ортотропии материалов. При этом достаточно знать величину угла, который составляет одна из осей ортотропии материала с какой-либо осью декартовой системы координат. Так как величина угла может быть различной для различных конечных элементов, на которые разбивается расчетная область  $\Omega$ , то при расчете НДС в пределах каждого конечного элемента должны рассчитываться свои физико-механические характеристики.

Для оценки прочности силовых оболочек из волокнистых ПКМ важно знать величины напряжений в системе координат, совпадающей с осями ортотропии  $t, n$ . Эти напряжения могут быть определены через компоненты тензора напряжений, рассчитанные в декартовой системе координат  $X, Y$ , из соотношений:

$$\sigma_t = \sigma_x \cos^2 \alpha + \sigma_y \sin^2 \alpha - \tau_{xy} \sin 2\alpha,$$

$$\sigma_n = \sigma_x \sin^2 \alpha + \sigma_y \cos^2 \alpha + \tau_{xy} \sin 2\alpha,$$

$$\tau_{tn} = \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\alpha + \tau_{xy} \cos 2\alpha.$$

На основе соотношений метода конечных элементов, приведенных в [2], с использованием уравнений (1) для пересчета физико-механических характеристик волокнистых ПКМ, разработана вычислительная программа NDSPDE для расчета НДС поперечного сечения ствола ЭМУ под действием электромагнитных сил. Программа реализована на языке «Фортран» и отлажена с использованием визуальной среды разработки Compaq Visual Fortran 6.6. Для удобства расчета, быстрой обработки и анализа результатов расчета запуск

программы NDSPDE осуществлялся в фоновом режиме с помощью специально разработанной визуальной программной среды RELSOTRON, позволяющей:

- задавать расчетную область и ее подобласти;
- проводить разбиение расчетной области на треугольные конечные элементы с выводом результатов разбиения на экран монитора;
- корректировать сетку конечных элементов;
- задавать граничные условия;
- проводить расчет НДС и обработку результатов расчета с помощью визуальной и табличной форм представления данных.

При разработке программы NDSPDE использовались элементы платформы Теметос [5].

### **3. Исследование НДС и оценка прочности ствола ЭМУ**

С использованием программы NDSPDE проведены исследования НДС ствола ЭМУ, имеющего поперечное сечение, представленное на рис. 1. Предполагалось, что силовая оболочка ствола изготовлена методом непрерывной намотки из волокнистого ПКМ, в котором в качестве армирующего материала используется органопластиковый жгут, а в качестве матрицы – эпоксидная смола. Материал оболочки рассматривался как ортотропный, а оси ортотропии совпадают с направлениями касательной  $t$  и нормали  $n$  к поверхности силовой оболочки (рис. 3). Исходные интегральные механические характеристики силовой оболочки брались в соответствии с осями ортотропии  $t, n$ . Предполагалось, что оси ортотропии слоистого ПКМ изолятора, в качестве которого используется стеклотекстолит, совпадают по направлениям с направлениями осей декартовой системы координат  $X, Y$ , причем основа ПКМ изоляторов направлена по оси  $Y$ , а уток - по оси  $X$ .

Физико-механические характеристики материалов, используемых в конструкции ствола, приведены в таб. 1.

Таблица 1. Физико-механические характеристики материалов, используемых в конструкции ствола ЭМУ

Материал элемента конструкции ЭМУ	Модуль упругости $E_t, E_y$ , ГПа	Модуль упругости $E_n, E_x$ , ГПа	Коэффициент Пуассона $\nu_{tn}, \nu_{xy}$	Модуль сдвига $G_{tn}, G_{xy}$ , ГПа
<b>Силовая оболочка:</b> ПКМ на основе жгута и эпоксидной смолы	96,0	2,7	0,227	3,0
<b>Изоляторы:</b> стеклотекстолит	20,5	16,7	0,150	2,5
<b>Токопроводящие рельсы:</b> сталь	169,0	169,0	0,3	62,0

В табл. 1 модули упругости  $E_t, E_n$ , коэффициент Пуассона  $\nu_{tn}$  и модуль сдвига  $G_{tn}$  относятся к материалу силовой оболочки и взяты в направлении осей ортотропии  $t, n$ , а модули упругости  $E_x, E_y$ , коэффициент Пуассона  $\nu_{xy}$  и модуль сдвига  $G_{xy}$  относятся ко всем остальным материалам и взяты в направлении осей декартовой системы координат  $X, Y$ .

При проведении исследований НДС ствола ЭМУ предполагалось, что на токопроводящие рельсы действует расталкивающая погонная сила  $F_y$ , равная 7590 кН/м, и сжимающая погонная сила  $F_x$ , равная (-) 5 340 кН/м. Это соответствует условиям протекания тока в цепи ускорителя, равного 1 МА.

Для проведения исследований поперечное сечение ствола ЭМУ (рис. 1), являющееся в данном случае расчетной областью, разбивалось на 1 800 треугольных элементов, соединенных между собой в 966 узловых точках. Схема разбиения расчетной области на конечные элементы приведена на рис. 4. Учет физико-механических свойств материалов, используемых в рассматриваемой конструкции ствола, осуществлялся посредством деления расчетной области на одиннадцать подобластей.

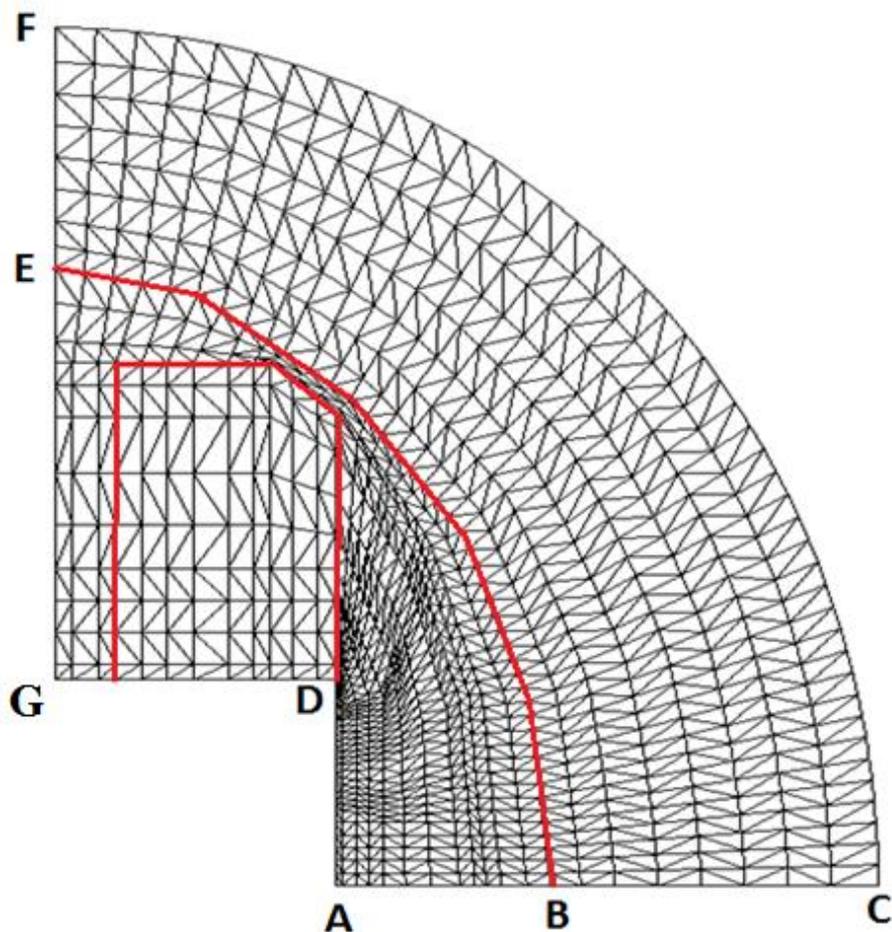


Рис. 4. Схема разбиения поперечного сечения ствола ЭМУ на конечные элементы

На рис. 5 представлено распределение интенсивности деформаций  $E_i$  ( $E_i = \sqrt{\frac{3}{2} \epsilon'_{kl} \epsilon'_{kl}}$ , где  $\epsilon'_{kl}$  – девиатор тензора деформаций) в поперечном сечении ствола. В целях получения большей наглядности картины деформирования поперечного сечения ствола расчетные величины перемещений внешнего и внутреннего контуров сечения на рисунке увеличены в 10 раз.

Анализ перемещений показывает, что в процессе нагружения ствола ЭМУ электромагнитными силами его силовая оболочка вытягивается в направлении оси  $Y$  и сжимается в направлении оси  $X$ . При этом расчетные перемещения составляют: в вертикальной плоскости по оси  $Y$  на канале ствола – 1,1 мм (точка G на рис. 4), на внешней поверхности ствола – 0,9 мм (точка F

на рис. 4), в горизонтальной плоскости по оси  $X$  на канале ствола – 0,5 мм (точка А на рис. 4), на внешней поверхности ствола – 0,4 мм (точка С на рис. 4).

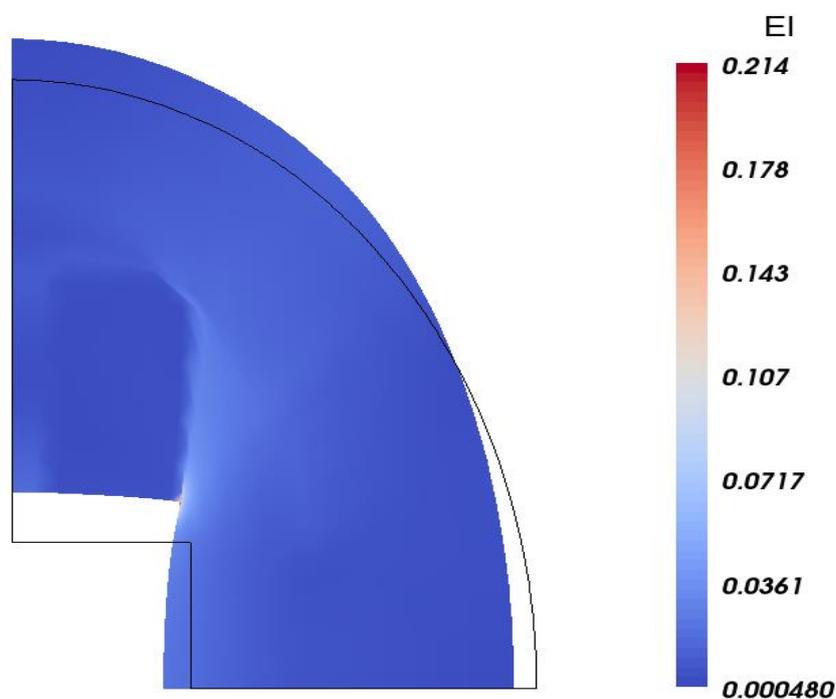


Рис. 5. Распределение интенсивности деформаций ( $E_i$ ) в поперечном сечении ствола ЭМУ при действии электромагнитных сил

На рис. 6 представлено распределение интенсивности напряжений  $S_i$  ( $S_i = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma'_{kl} \sigma'_{kl}}$ , где  $\sigma'_{kl}$  – девиатор тензора напряжения) в поперечном сечении ствола.

Анализ результатов расчета показывает, что максимальное значение интенсивности напряжений  $S_i$  реализуется на поверхности канала ствола (поверхность бокового изолятора) в зоне начала скрепления бокового изолятора с токопроводящим рельсом (точка D на рис. 4) и составляет 1,39 ГПа. В этой точке компоненты тензора напряжений равны:

$$\sigma_x = -0,16 \text{ ГПа}, \sigma_y = 0,49 \text{ ГПа}, \tau_{xy} = -0,72 \text{ ГПа}.$$

Таким образом, в наиболее напряженной точке на границе скрепления боковых изоляторов с токопроводящими рельсами реализуется сложное НДС,

которое характеризуется сдвигом боковых изоляторов относительно токопроводящих рельсов с одновременным их поджатием.

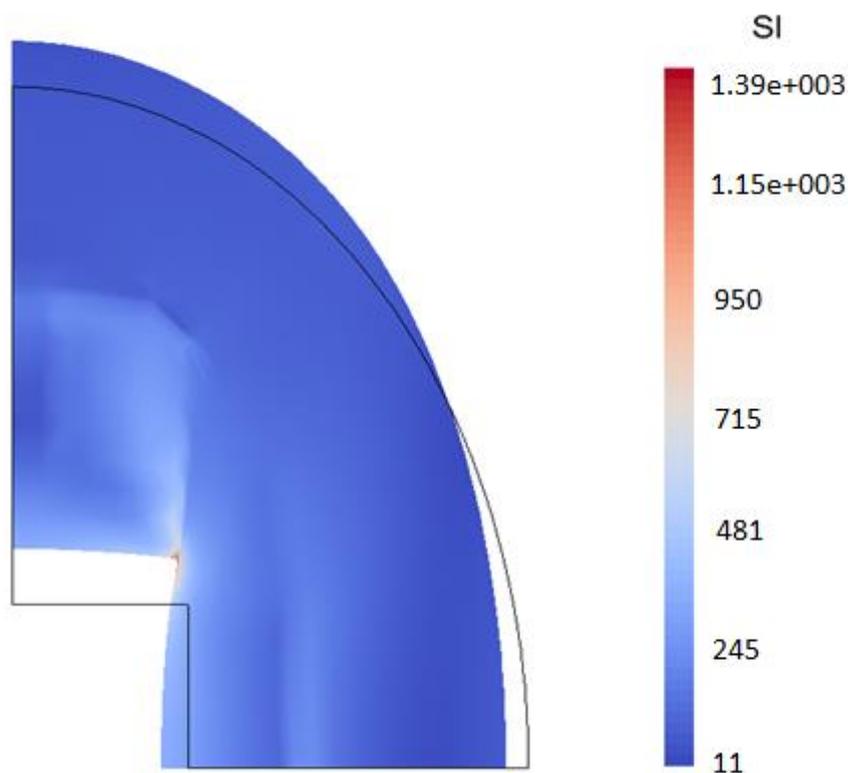


Рис. 6. Распределение интенсивности напряжений ( $S_i$ , МПа)  
в поперечном сечении ствола ЭМУ

В то же время следует отметить, что хотя, безусловно, точка D является концентратором напряжений, но к приведенным выше численным значениям нужно относиться достаточно осторожно. Из аналитических решений аналогичных задач следует, что точка D является особой, поэтому значения напряжений в ней в большой степени зависят от используемой сетки. Кроме того, в рассматриваемом приближении принималось, что различные детали рельсового ускорителя жестко скреплены друг с другом. Если усложнить задачу и учитывать контактное взаимодействие, при котором детали могут двигаться относительно друг друга (с заданными коэффициентами трения), то

значение касательных напряжений ( $\sigma_y$ ) будет, скорее всего, значительно меньше значения, полученного для условия жесткого скрепления тел.

На рис.7 приведено распределение интенсивности напряжений  $S_i$  и компоненты тензора напряжений  $\sigma_y$  по толщине ствола в сечении, совпадающем с горизонтальной плоскостью симметрии ствола (по линии ABC на рис. 4). Как следует из графика, интенсивность напряжений  $S_i$  и тангенциальное напряжение  $\sigma_t$  достигают своих максимальных значений на поверхности боковых изоляторов (окрестность точки А) и на границе скрепления оболочки с боковыми изоляторами (окрестность точки В). В этом сечении  $\sigma_t$  практически совпадает с  $\sigma_y$ . Таким образом, в рассматриваемом сечении реализуется напряженное состояние, близкое к одноосному растяжению. Тогда для оценки прочности может быть использован простейший критерий наибольших растягивающих напряжений.

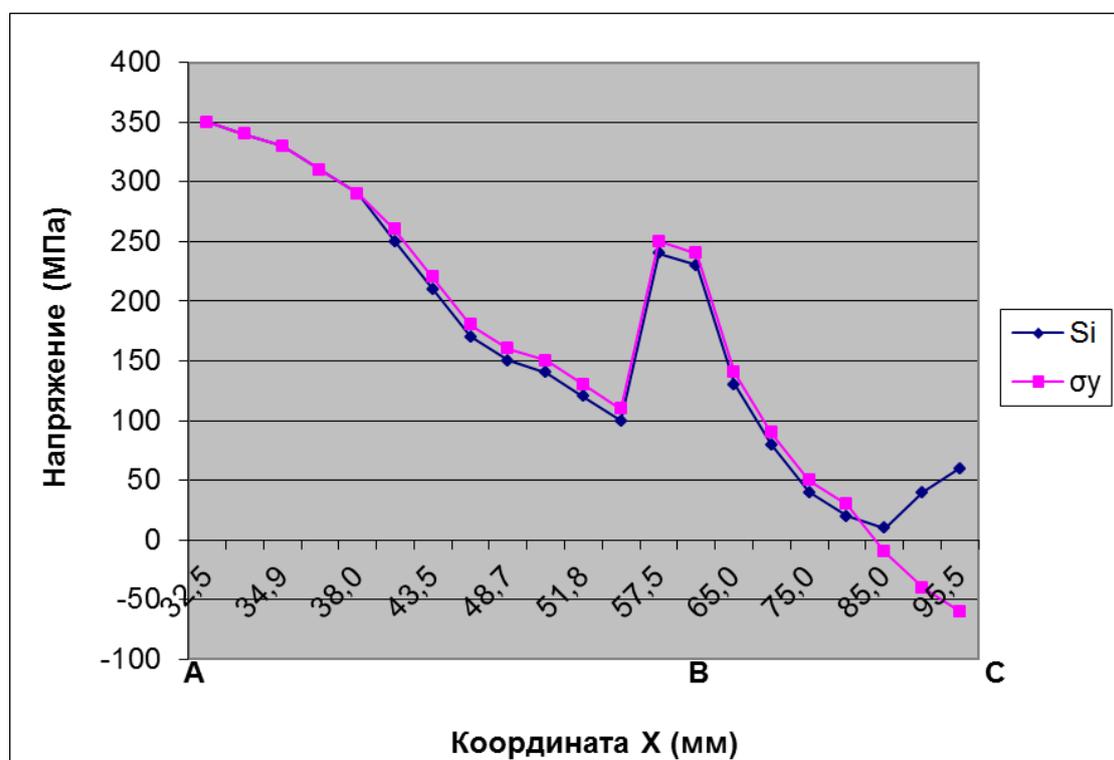


Рис. 7. Распределение интенсивности напряжений  $S_i$  и компоненты тензора напряжений  $\sigma_y$  по толщине ствола ЭМУ

Из рис. 7 также следует, что относительно рассматриваемого сечения вблизи внешней поверхности силовой оболочки (на толщине порядка 10 мм)

реализуется сжатие материала, а наибольшие растягивающие напряжения возникают в боковом изоляторе (350 МПа), при этом они превышают предел прочности стеклотекстолита на растяжение (320 МПа).

Оценка запаса прочности боковых изоляторов и силовой оболочки проводилась исходя из классического критерия наибольших растягивающих напряжений [6] по соотношению:

$$\eta_0 = \frac{\sigma_{po}}{f_1 f_2 f_3 \sigma_y} . \quad (2)$$

Здесь

$\sigma_{po}$  – предел прочности материала (стеклотекстолит, ПКМ);

$\sigma_y$  – максимальное расчетное напряжение;

$f_1$  – коэффициент безопасности, учитывающий погрешность в определении действующих нагрузок;

$f_2$  – коэффициент безопасности, учитывающий погрешность метода расчета;

$f_3$  – коэффициент безопасности, учитывающий погрешность в определении физико-механических характеристик материалов.

В табл. 2 приведены результаты оценки запасов прочности для наиболее напряженных зон ствола ЭМУ.

Расчетный запас прочности силовой оболочки ствола ЭМУ составляет 4,8 при суммарном коэффициенте безопасности 1,71. То есть прочность силовой оболочки ствола ЭМУ при действии электромагнитных сил обеспечивается.

Заметим, что для оценки прочности других элементов конструкции рельсового ускорителя (боковые изоляторы и токопроводящие рельсы) критерий прочности (2) неприменим, так как в наиболее напряженных зонах данных элементов реализуется не одноосное, а сложное напряженное состояние. В этом случае для оценки прочности элементов конструкции ускорителя необходимо применять более сложные критерии, которые учитывают вид напряженного состояния, возникающего в элементах.

Таблица 2. Результаты оценки запасов прочности для наиболее напряженных зон ствола ЭМУ

Коэффициент безопасности, $f_1$	1,2
Коэффициент безопасности, $f_2$	1,1
Коэффициент безопасности, $f_3$	1,3
Максимальное расчетное напряжение, реализующееся в силовой оболочке, МПа	250
Предел прочности ПКМ при растяжении в направлении волокон, МПа	2 060
Запас прочности силовой оболочки	4,8

### Выводы и рекомендации

Исследования НДС ствола показали, что при действии заданных электромагнитных сил канал расширяется в вертикальной плоскости (по оси  $Y$ ) на 2,2 мм и сужается в горизонтальной плоскости (по оси  $X$ ) на 1,0 мм.

Для заданной нагрузки прочность силовой оболочки обеспечивается с запасом 4,8 при суммарном коэффициенте безопасности 1,71. Для оценки прочности других элементов конструкции (боковые изоляторы и токопроводящие рельсы) необходимо разработать критерии прочности, учитывающие сложный вид напряженного состояния, возникающего в зонах, испытывающих максимальные нагрузки.

В конструкции ЭМУ существует концентратор напряжений – зона начала скрепления боковых изоляторов с токопроводящими рельсами со стороны канала. Для получения более точных значений напряжений в этой зоне требуются дальнейшие исследования, включающие в себя использование конечных элементов более высокого порядка, решение задачи контактного взаимодействия элементов конструкции (прежде всего рельсов и боковых изоляторов) и т.д. Вместе с тем следует отметить, что проведенные расчеты показали наличие в боковом изоляторе достаточно больших областей, где возникающие напряжения превышают предел прочности материала изолятора.

## Список литературы

1. Бажанов В.Л. и др. Пластинки и оболочки из стеклопластиков. М.: «Высшая школа», 1970. 408 с.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: «Мир», 1975. 240 с.
3. Васильев В.В. и др. Композиционные материалы. Справочник. М.: «Машиностроение», 1990. 512 с.
4. P. Lehmann P, Vo M.D., Wenning W. Comparative study of railgun housings made of modern fiber-wound materials, ceramic or insulated steel plates// IEEE Transactions on Magnetics, 2005, vol. 41, no. 1, part II, pp. 200-205.
5. Галанин М.П., Горбунов-Посадов М.М., Ермаков А.В., Лукин В.В., Родин А.С., Шаповалов К.Л. Прототип интегрированной программной платформы для сопровождения вычислительного эксперимента в комплексных задачах математического моделирования // Труды Института системного программирования. 2014. Т. 26, вып. 3. С. 51-68.
6. Гольденблат И.И., Копнов В.А. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов. М.: «Машиностроение», 1968. 192 с.

## Оглавление

1. Введение.....	3
2. Физическая и математическая модели механического поведения ствола ЭМУ при выстреле .....	4
3. Исследование НДС и оценка прочности ствола ЭМУ .....	14
Выводы и рекомендации .....	21
Список литературы.....	22