

Научная статья

DOI: 10.15593/2499-9873/2022.03.03

УДК 539.3

**Ю.И. Лесникова, А.А. Каменских, М.М. Пащенко**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА ТИПА PANDA  
С АЛЮМИНИЕВЫМ ПОЛУПРОСТРАНСТВОМ ПРИ РАЗНОМ  
ХАРАКТЕРЕ СОПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ**

В рамках работы выполнено математическое моделирование деформационного поведения оптического волокна типа Panda с учетом защитно-упрочняющих покрытий. Моделируется контактное-indentирование волокна в алюминиевое полупространство. Рассмотрен разный характер сопряжения элементов контактного узла: совместное деформирование, контактная склейка, фрикционный контакт и их сочетание. Реализация задачи направлена на анализ влияния характера сопряжения элементов системы на деформационные и контактные параметры волокна типа Panda с учетом двухслойного защитно-упрочняющего полимерного покрытия при взаимодействии с металлической поверхностью. В модели не учитываются остаточные напряжения в оптическом волокне после технологического процесса производства и поляризации. Установлено, что характер деформационного поведения оптического волокна уточняется при учете контактной склейки между конструктивными элементами. При учете фрикционного контакта между элементами системы максимальные значения интенсивности напряжения наблюдаются в кварце. Полимерное покрытие отслаивается на части поверхности сопряжения и перестает в полной мере выполнять защитные функции.

**Ключевые слова:** оптическое волокно, моделирование, численный эксперимент, трение, контакт, деформирование.

**Yu.I. Lesnikova, A.A. Kamenskikh, M.M. Pashchenko**

Perm National Research Polytechnic University,  
Perm, Russian Federation

**MATHEMATICAL SIMULATION OF CONTACT  
INTERACTION OF A PANDA TYPE OPTICAL FIBER  
WITH ALUMINUM HALF-SPACE WITH DIFFERENT  
CHARACTER OF ELEMENTS CONJUGATION**

Mathematical modeling of the deformation behavior of a Panda-type optical fiber with protective and hardening coatings was performed as part of the work. The contact indentation of a fiber into aluminum half-space is simulated. The different pattern of the elements conjugations of the contact unite is considered: co-strain, contact gluing, frictional contact and their combination. The problem implementation is aimed at analyzing the pattern influence of the system elements conjugation on the deformation and contact parameters of the Panda-type fiber with two-layer protective-strengthening

polymer coating when interacting with a metal surface. Residual stresses in the optical fiber after the manufacturing process and polarization are not taken into account in the model. It was found that the deformation behavior pattern of an optical fiber is refined when contact gluing between structural elements is taken into account. The maximum stress intensity values are observed in quartz when frictional contact between the elements of the system is taken into account. The polymer coating peels off on part of the mating surface and ceases to fully perform protective functions.

**Keywords:** optical fiber, modeling, numerical experiment, friction, contact, deformation.

## Введение

Механика контактного взаимодействия является одним из наиболее развивающихся и актуальных направлений механики деформируемого твердого тела [1–4]. Это связано с огромным набором инженерных, промышленных, технологических и научных задач, направленных на исследование областей соприкосновения деталей и узлов сложных механизмов. Большое количество деталей механизмов и узлов работают в условиях контактного взаимодействия. К таким конструкциям относятся: зубчатые механизмы [5], опорные части мостов [6], крепление лопаток авиадвигателей [7], биомеханические системы [8–10], оптические системы [11] и др. При этом каждая новая задача с учетом механики контактного взаимодействия несет в себе огромное количество аналитических или численных исследований, направленных на анализ влияния контактных параметров на напряженно-деформированное состояние конструкции [12; 13].

Актуальность задач контакта связана, прежде всего, с развитием компьютерного моделирования, которое позволяет учитывать многие конструкционные особенности сложных конструкций и технологических процессов. Основными параметрами области контакта являются зоны контактных состояний, контактное давление и контактное касательное напряжение. На практике часто появляется необходимость определения контактных параметров в зонах соприкосновения тел, как при расчете на прочность, так и для оценки предела выносливости [6; 14; 15].

В современном приборостроении широко используются оптические волокна. Основные сферы их применения – это изготовление интерферометрических датчиков и оптоволоконных гироскопов [11; 16]. Для применения оптических волокон при повышенных температурах и в агрессивных условиях внешней среды требуются специальные защитные и защитно-упрочняющие полимерные покрытия [11]. Panda – оптическое волокно, которое сохраняет поляризацию вводимого излучения, является одним из самых распространенных и широко исполь-

зуемых волноводов [17–19]. При этом можно отметить достаточно обширный спектр исследований волокон типа Panda: геометрия [20], свойства кварцевых стекол [21], технологические процессы [22] и т.д. Часто при моделировании волоконно-оптических волноводов используют упрощенные модели [23–27]: без учета защитно-упрочняющих покрытий (ЗУП), конструктивных элементов, с канонической упрощенной геометрией, а также без учета характера сопряжения элементов. Учет данных факторов позволит получить новые данные об оптических и деформационных характеристиках объектов исследования, а также приблизить модели оптических волокон к реальности. В рамках технологической механики интересен вопрос о влиянии разного характера взаимодействия конструктивных элементов при контакте объекта с металлическими и неметаллическими поверхностями сопряжения.

Цель данной работы – исследование влияния характера сопряжения элементов волокна типа Panda с защитно-упрочняющим многослойным полимерным покрытием. Рассмотрено разное сочетание вариантов сопряжения между элементами при разных силах индентирования. В рамках первого приближения модель не учитывает остаточные напряжения и термомеханические свойства материалов.

## 1. Постановка задачи

В рамках работы выполнен анализ влияния характера сопряжения между элементами волокна типа Panda с защитно-упрочняющими покрытиями при фрикционном контактном взаимодействии «волновод – полупространство» (рис. 1). Расчетная схема близка к промежуточному технологическому испытанию волокна при изгибе и натяге с алюминиевой катушкой. Задача рассматривается как модельная и направлена на оценку влияния характера сопряжения элементов на напряженно-деформированное состояние в целом и параметры зон контакта в частности.

Расчетная схема задачи включает: волоконно-оптический волновод с учетом многослойного полимерного защитно-упрочняющего покрытия и алюминиевое полупространство. Оптическое волокно состоит из ряда конструктивных элементов: светопроводящая жила, внутренний слой силового стержня, внешний слой силового стержня, кварцевое основание, внутренний и внешний слой защитно-упрочняющего полимерного покрытия (ЗУП<sub>1</sub>–ЗУП<sub>2</sub>).

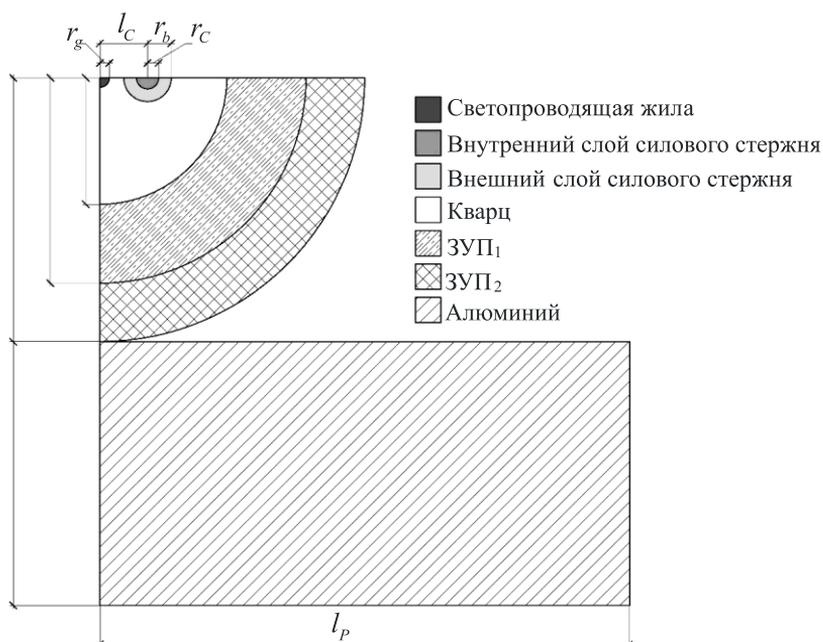


Рис. 1. Расчетная схема контакт волокна с ЗУП и полупространства

Основные геометрические характеристики контактного узла задачи представлены в табл. 1, так же, как и уровень нагрузки. Геометрическая конфигурация волновода соответствует оптоволокну типа Panda. Задача рассматривается в плоской постановке (плоскодеформированное состояние).

Таблица 1

Характеристики расчетной схемы

Параметр	Значение	Параметр	Значение
$r_B$	40 мкм	$r_C$	7,5 мкм
$r_{ЗУП1}$	65 мкм	$r_b$	3,5 мкм
$r_{ЗУП2}$	83,5 мкм	$l_p$	167 мкм ( $2r_{ЗУП2}$ )
$r_g$	3 мкм	$h_p$	83,5 мкм ( $r_{ЗУП2}$ )
$l_C$	15 мкм	$F$	0,05 ÷ 0,5 Н

Задача рассматривается в рамках теории упругости и направлена на анализ влияния граничных условий зоны сопряжения «волокно –

полупространство» и взаимодействия слоев ЗУП и волокна на деформационное поведение контактного узла. В работе рассматривается также влияние характера сопряжения конструктивных элементов оптоволокна на деформирование системы.

Математическая постановка задачи включает уравнения равновесия, физические соотношения и геометрические соотношения в терминах больших деформаций.

В рамках задачи рассмотрены два варианта сопряжения элементов контактного узла [28; 29]: первый – контактная склейка, т.е. полное прилипание контактирующих поверхностей при любом деформировании системы; второй – фрикционный контакт, т.е. контактное взаимодействие включает полный набор статусов контактных состояний (прилипание, проскальзывание, отлипание) с заранее неизвестной площадью и характером распределения.

На рис. 2 показаны зоны сопряжения элементов контактного узла (полупространство отброшено, но учтено в рамках зоны контакта) и поверхности определения граничных условий.

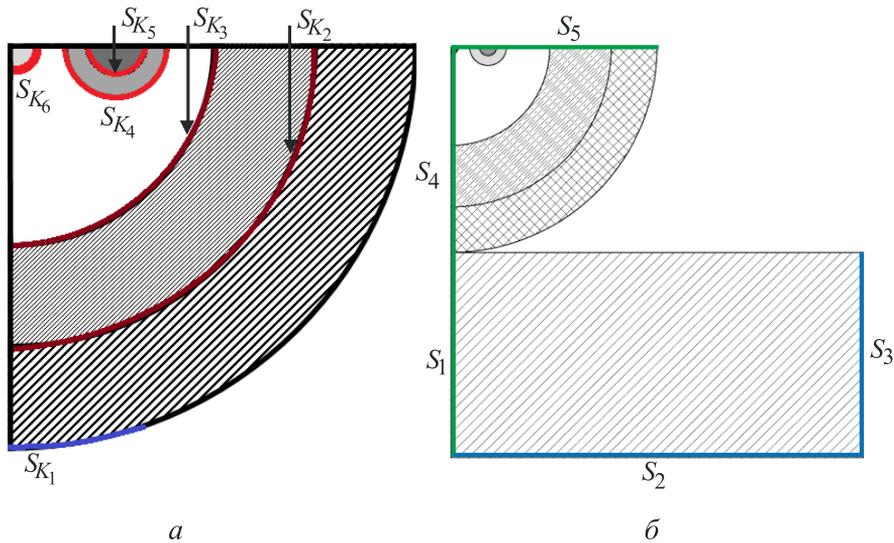


Рис. 2. Поверхности определения контактных (а) и граничных условий (б)

Создано четыре модели, отличающиеся контактными граничными условиями по поверхностям сопряжения:

1. Модель 1:  $S_{K_1}$  – фрикционный контакт;  $S_{K_2} - S_{K_6}$  – совместное деформирование без учета контакта.

2. Модель 2:  $S_{K_1}$  – фрикционный контакт;  $S_{K_2} - S_{K_6}$  – контактная склейка.

3. Модель 3:  $S_{K_1} - S_{K_3}$  – фрикционный контакт;  $S_{K_4} - S_{K_6}$  – контактная склейка.

4. Модель 4:  $S_{K_1} - S_{K_6}$  – фрикционный контакт.

Фрикционный контакт на границах сопряжения  $S_{K_4} - S_{K_6}$  маловероятен из-за особенностей технологического производства оптического волокна (модель 4).

Рассматривается часть конструкции, отброшенные части заменяются граничными условиями и условиями симметрии. Границы  $S_1 - S_3$  относятся к полупространству,  $S_4 - S_5$  относятся к оптоволокну. Полупространство не моделируется как полубесконечная плоскость, ее моделируют как конечный объем материала с граничными условиями соответствующими действию отброшенной части материала. На  $S_1$ ,  $S_3$  и  $S_4 - u_x = 0$ , на  $S_2 - u_y = 0$ . На  $S_5$  запрещен изгиб и приложена сила индентирования:

$$\int_{S_5} p_z dS_5 = -F, \quad u_z = U = \text{const}, \quad \sigma_{xz} = 0, \quad \vec{x} \in S_5,$$

где  $F$  – сила индентирования, приложенная к  $S_5$ ,  $U$  – неизвестная величина.

Задача модельная и не рассматривает остаточные напряжения в оптическом волокне после технологического процесса производства и поляризации. Свойства материалов сборки приведены в табл. 2.

Таблица 2

Физико-механические свойства материалов

Материал	Модуль упругости $E$ , МПа	Коэффициент Пуассона $\nu$
Алюминий	68600,00	0,340
Кварц	72000,00	0,170
Внутренний ЗУП <sub>1</sub>	1837,00	0,498
Внешний ЗУП <sub>2</sub>	2000,00	0,350
Светопроводящая жила	67939,00	0,168

Окончание табл. 2

Материал	Модуль упругости $E$ , МПа	Коэффициент Пуассона $\nu$
Внутренний слой силового стержня	49107,00	0,203
Внешний слой силового стержня	65370,00	0,181

Физико-механические свойства материалов контактного узла табличные, справочные либо получены экспериментально. Коэффициент трения для всех пар материалов выбран из справочной литературы, так как диапазон изменения коэффициентов трения рассматриваемых пар материалов достаточно широкий, то в качестве первого приближения выбран средний для всех материалов коэффициент трения 0,6.

Сходимость численного решения задачи от степени дискретизации системы рассматривалась ранее. Выбрана сетка со сгущением конечных элементов в области сопряжения волокна и полупространства. Так как в задаче выполнен учет силовых стержней и светопроводящей жилы, то в объеме волокна типа Panda без ЗУП также выполнено сгущение элементов.

Моделирование осуществлено в прикладном программном пакете инженерного анализа ANSYS APDL Mechanical с использованием четырехузловых конечных элементов с лагранжевой аппроксимацией и двумя неизвестными в каждом узле PLANE182. PLANE182 позволяет моделировать плоские задачи любого типа. Для реализации контактного взаимодействия используется пара контактных элементов с разными настройками: CONTA171 – контактный элемент типа «поверхность – поверхность»; TARGE169 – целевой элемент, описывающий границу тела сопряжения.

## 2. Анализ результатов исследования

В рамках исследования проанализирован характер изменения параметров напряженно-деформированного состояния системы «волокно – полупространство» и зон контакта. Серия численных экспериментов об индентировании волокна в алюминиевое полупространство при разном

характере сопряжения элементов контактного узла включает нагрузки от 0,05 до 0,5 Н. На рис. 3 представлен характер распределения интенсивности напряжений в разных моделях при одинаковой нагрузке 0,5 Н.

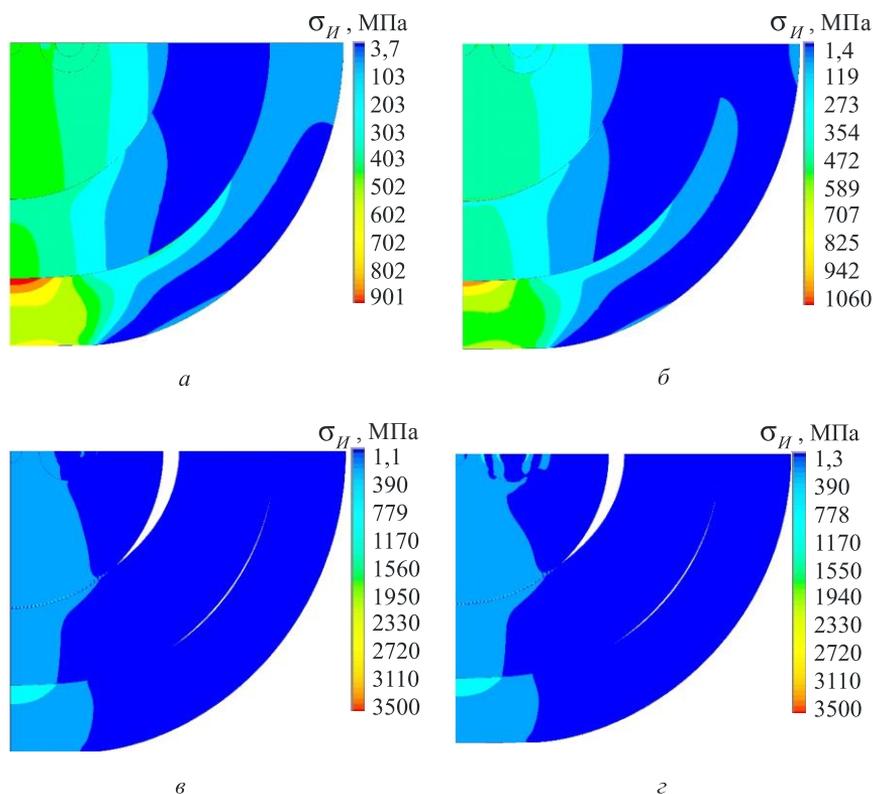


Рис. 3. Интенсивность напряжений в волокне с ЗУП при  $F = 0,5$  Н: а-г – модели 1-4 соответственно

При учете контактной склейки между элементами волокна и ЗУП характер деформирования контактного узла не изменился (рис. 4, б). Максимальная интенсивность напряжений наблюдается во внешнем ЗУП<sub>2</sub>. Увеличение максимальной интенсивности напряжений связано с несовместным деформированием элементом волокна, т.е. уточнен уровень и характер деформирования системы «волокно – ЗУП» из-за учета контактной склейки между элементами.

При учете фрикционного контакта между ЗУП и между «ЗУП – волокно» (рис. 4, в) наблюдается расхождение контактных поверхностей при сжатии, что не противоречит физике процесса. При этом уровень максимальный интенсивности напряжений вырос более чем в 3 раза и наблюдается вблизи зоны контакта кварцевой трубки и ЗУП, т.е. при таком характере сопряжения элементов ЗУП перестают выполнять свои защитные функции и начинают оказывать негативное воздействие на оптическое волокно типа Panda.

При учете фрикционного контакта между всеми конструктивными элементами оптического волокна типа Panda и ЗУП изменился характер распределения интенсивности напряжений в конструктивных элементах: светопроводящей жиле, силовых стержнях и кварцевой трубке. В основном данный эффект связан с потерей контакта на части поверхностей сопряжения: данный эффект наблюдается в области силовых стержней. При этом «дальнего» расхождения поверхностей контакта в оптическом волокне не наблюдается. То есть установлено, что даже при учете фрикционного контакта конструктивные элементы не расходятся и остаются на своих местах с микроскопическими зазорами на части поверхности сопряжения.

В рамках моделирования наблюдается расхождение поверхностей сопряжения между кварцевым основанием волокна и внутренним полимерным ЗУП и между ЗУП<sub>1</sub>–ЗУП<sub>2</sub> при моделях 3–4, учитывающих фрикционный контакт на  $S_{K_2} - S_{K_3}$ . В качестве примера представлен характер деформирования поверхностей контакта  $S_{K_2}$  и  $S_{K_3}$  для модели 4 (рис. 5).

Можно отметить, что площадь раскрытия контакта для первой поверхности сопряжения  $S_{K_3}$  достигает 98 мкм<sup>2</sup>, для  $S_{K_2}$  – 13 мкм<sup>2</sup>. Наиболее негативное влияние на деформирование системы оказывает расхождение контактной поверхности  $S_{K_3}$ , что приводит к потере ЗУП своих защитных свойств. Модель 4 маловероятна в реальном производственном процессе и рассматривается как неблагоприятный случай, с целью оценки влияния характера сопряжения элементов волокна на работу системы.

Выполнена оценка влияния уровня нагрузки на численное решение задачи. Зависимости интенсивности напряжений элементов механической системы от  $F$  представлены на рис. 4.

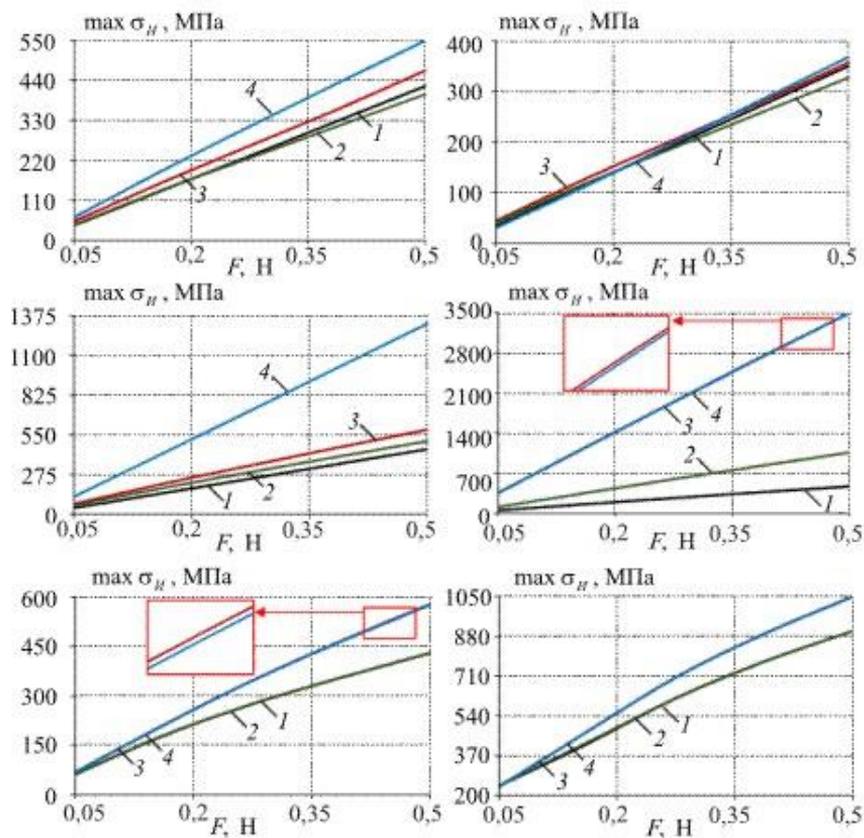


Рис. 4. Зависимость интенсивности напряжений в конструктивных элементах волокна типа Panda от уровня нагрузки  $F$ : 1–4 – модели 1–4 соответственно;  $a$  – светопроводящая жила;  $b$  – внутренний слой силового стержня;  $в$  – внешний слой силового стержня;  $г$  – кварцевое стекло;  $д$  – ЗУП<sub>1</sub>;  $е$  – ЗУП<sub>2</sub>

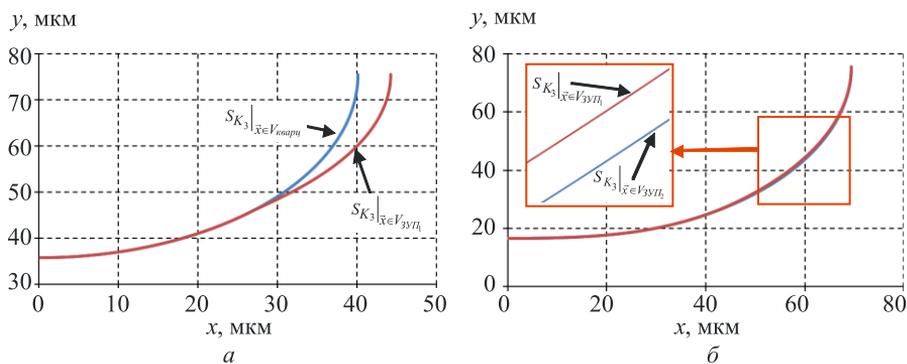


Рис. 5. Границы сопряжения  $S_{K_2} - S_{K_3}$  при  $F = 0,5$  Н (модель 4):  $a$  –  $S_{K_3}$ ;  $б$  –  $S_{K_2}$

Можно отметить, что зависимость максимальных интенсивностей напряжений в механической системе волокна от нагрузки близка к линейной. Небольшая нелинейность изменения максимального уровня интенсивности напряжений наблюдается в материалах ЗУП. Наименьшее влияние характер сопряжения поверхностей контакта оказывает на интенсивность напряжений внутреннего слоя силового стержня. Учет контактной склейки материалов между элементами волокна с ЗУП оказывает наибольшее влияние на характер деформирования кварцевого стекла. Также наблюдается негативный эффект учета фрикционного контакта между элементами волокна.

Контактная склейка «волокно – ЗУП<sub>1</sub> – ЗУП<sub>2</sub>» (модель 2) уменьшает максимальную интенсивность напряжений в объемах светопроводящей жилы и внутреннего слоя силового стержня и увеличивает параметры в объемах внешнего силового стержня и кварцевого стекла. Учет контактной склейки «волокно – ЗУП<sub>1</sub> – ЗУП<sub>2</sub>» оказывает незначительное влияние на деформирование ЗУП. Фрикционный контакт, реализованный в моделях 3 и 4, значительно увеличивают максимальные уровни параметров деформирования во всех материалах по сравнению с моделями 1 и 2. Можно отметить, что при учете фрикционного контакта между конструкционными элементами волокна максимальный уровень интенсивности напряжений в объемах светопроводящей жилы, материалах внутреннего и внешнего силового стержня увеличивается на 17, 3 и 125 % соответственно (сравнение моделей 3 и 4), на остальные элементы влияние незначительное.

Максимальное расхождение поверхностей контакт наблюдается на  $S_{K_3}$  и достигает у всех рассмотренных моделей фрикционного контакта более 4 мкм при максимальной силе индентирования. Такое расхождением поверхностей контакта при габаритных размерах конструкции относится к полному раскрытию поверхностей сопряжения на части контактной границы. Расхождение поверхностей контакта на  $S_{K_2}$  на несколько порядков меньше, чем на  $S_{K_3}$ . Эффект раскрытия контактных поверхностей оказывает негативное влияние на работу всего узла в целом. ЗУП перестает выполнять защитно-упрочняющие функции, что может привести к хрупкому разрушению оптического волокна из-за значительного превышения предела прочности на сжатие кварцевого стекла, которое составляет 588,6 МПа [30].

Рассматривается моделирование контактной задачи, таким образом, важным показателем работы системы являются параметры областей контакта. На рис. 6 представлен характер распределения параметров контакта на  $S_{K_1}$ .

Характер распределения контактного давления более равномерный и мало зависит от моделей сопряжения элементов конструкции. Максимальный уровень контактного давления во всех моделях наблюдается вблизи точки первоначального контакта. На характер распределения контактного касательного напряжения значительное влияние оказывает трение, так как коэффициент трения достаточно большой мы наблюдаем сильное колебание уровня контактного касательного напряжения на поверхности проскальзывания, проскальзывание наблюдается на большей части поверхности контакта.

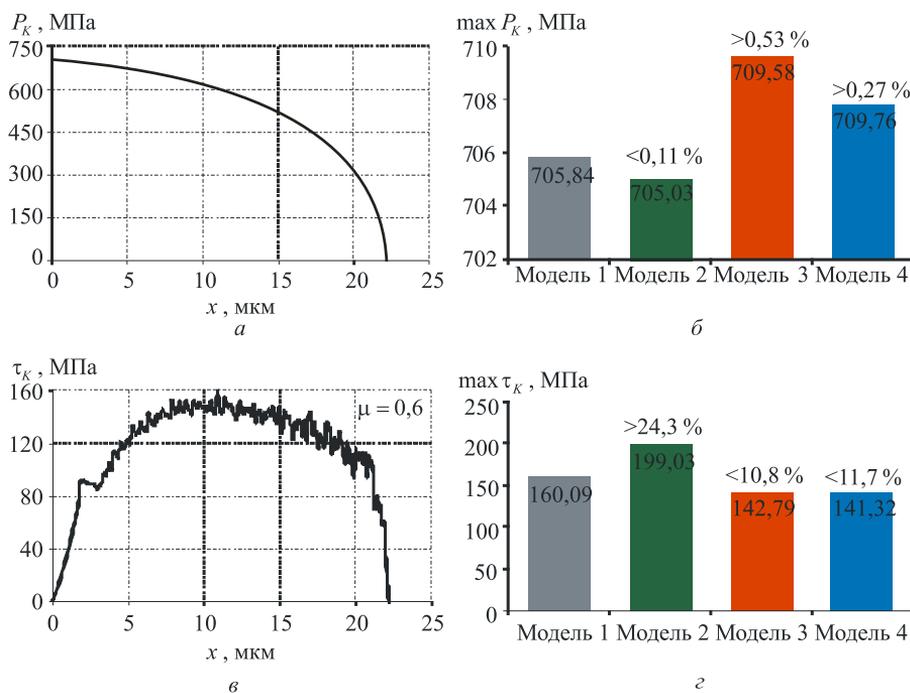


Рис. 6. Параметры контакта на  $S_{K_1}$  при  $F = 0,5$  Н:

- а–б – контактное давление; в–г – контактное касательное напряжение;
- а, в – характер распределения параметров контакта на примере модели 1;
- б, г – сравнение максимального уровня параметров контакта моделей

Учет контактной склейки «волокно–ЗУП<sub>1</sub>–ЗУП<sub>2</sub>» (модель 2) значительно снижает максимальный уровень контактного давления при увеличении более чем на 24 %  $\max \tau_k$ . Учет фрикционного контакта «волокно – ЗУП<sub>1</sub> – ЗУП<sub>2</sub>» (модель 3) и между конструктивными элементами (модель 4) приводит к незначительному увеличению контактного давления на  $S_{k_1}$  (менее 1 %) и снижению максимального уровня контактного касательного напряжения приблизительно на 10–12 %. Модель с учетом контактной склейки дает большую свободу элементам системы «волокно – ЗУП» без потери полного сцепления поверхностей, т.е. результаты работы системы «волокно – ЗУП» при совместном деформировании ограничены из-за постановки задачи.

На рис. 7 показан характер распределения контактного давления механической системы на примере модели 4, где между всеми сопрягающимися поверхностями настроен фрикционный контакт.

Увеличение параметров деформационного поведения системы связано с расхождением поверхностей сопряжения из-за фрикционного контакта.

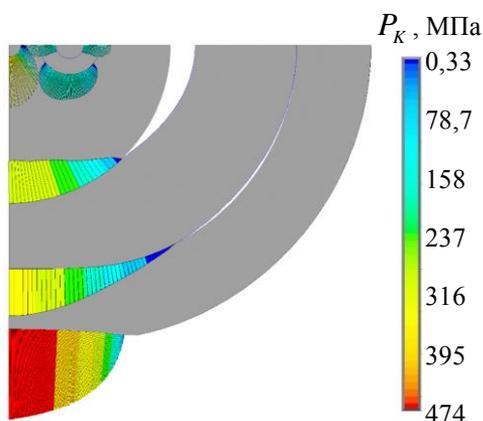


Рис. 7. Характер распределения контактного давления (модель 4)

На рис. 8 представлен характер распределения контактного давления на всех поверхностях сопряжения для моделей 1–4.

Можно отметить, что в рамках фрикционного контакта наблюдаются нулевые значения контактного давления в зонах расхождения контактных поверхностей. В рамках контактной склейки такое невозможно, поэтому наблюдаются отрицательные значения контактного

давления, т.е. в данной зоне наблюдается не сжатие, а растягивание. Также можно отметить, что максимальные значения контактного давления при фрикционном контакте больше, чем при контактной склейке. Характер сопряжения конструктивных элементов волокна и ЗУП оказывает незначительное влияние на распределение и уровень контактного давления на поверхности сопряжения «волокно – полупространство  $S_{K_1}$ ».

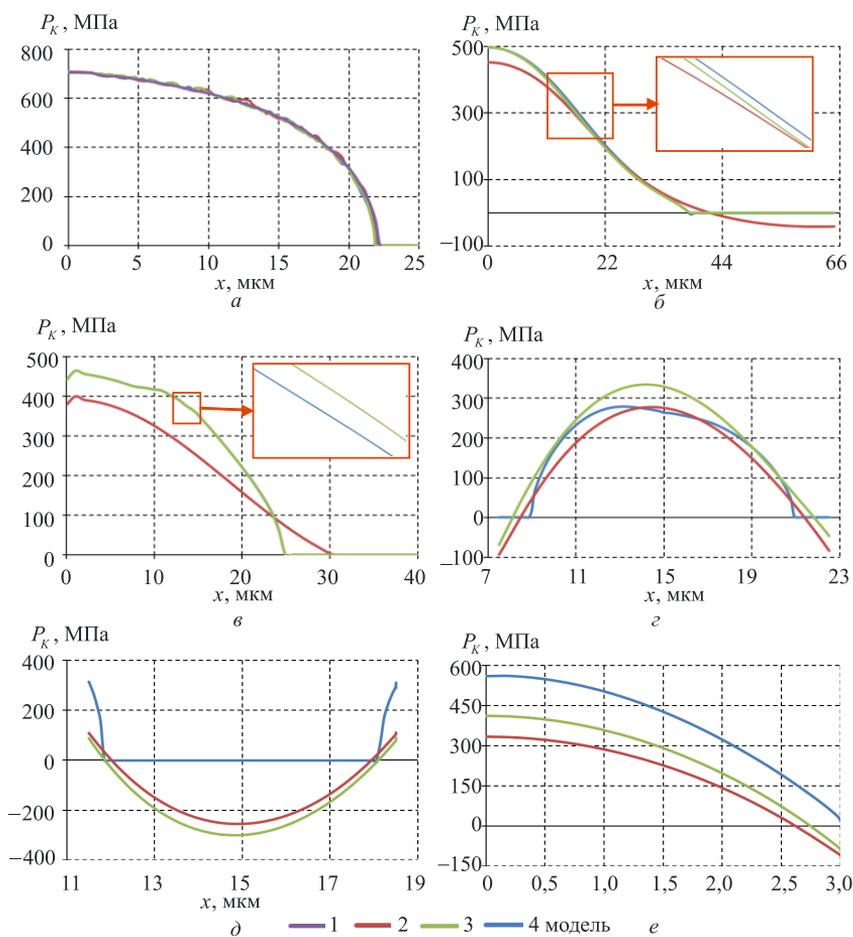


Рис. 8. Характер распределения контактного давления при нагрузке 0,5 Н:  
 $a - S_{K_1}$ ;  $б - S_{K_2}$ ;  $в - S_{K_3}$ ;  $г - S_{K_4}$ ;  $д - S_{K_5}$ ;  $е - S_{K_6}$

## Заключение

В рамках работы построены четыре модели контактного взаимодействия элементов оптического волокна с ЗУП и металлической поверхностью сопряжения. Основными отличиями моделей является характер сопряжения элементов: совместное деформирование, контактная склейка, фрикционный контакт и разное их сочетание. Задача об идентировании волновода в алюминиевое полупространство является модельной. Исследование направлено на оценку влияния характера сопряжения элементов оптического волокна типа Panda с многослойным защитно-упрочняющим полимерным покрытием на напряженно деформированное состояние узла.

В рамках реализации задачи установлено:

– характер контактного деформационного поведения сборки уточняется при учете контактной склейки между конструктивными элементами волокна;

– при учете фрикционного контакта между ЗУП и волокном, а также между всеми конструктивными элементами Panda максимальные значения интенсивности напряжения наблюдаются в кварце, т.е. полимерное покрытие отслаивается на части поверхности контакта и перестает в полной мере выполнять защитные функции;

– при фрикционном контакте элементов Panda не наблюдается сильного искажения границ сопряжения и «дальнего» расхождения поверхностей контакта.

При дальнейших исследованиях модель сопряжения элементов волокна с ЗУП должна быть уточнена:

– нет необходимости учета контактного взаимодействия между кварцевым основанием, светопроводящей жилой и силовыми стержнями, стоит рассматривать Panda в рамках совместного деформирования элементов;

– сопряжения «волокно – ЗУП<sub>1</sub> – ЗУП<sub>2</sub>» стоит рассматривать как контактную склейку, фрикционный контакт стоит рассматривать для оценки неблагоприятных случаев при деформировании конструкции.

В рамках модели материалов необходим учет остаточных напряжений в волокне, а также коэффициентов температурного расширения материалов. В рамках развития задач планируется уточнение моделей поведения материалов, а также оценка влияния характера сопряжения элементов на оптические характеристики.

### Список литературы

1. Goryacheva I., Makhovskaya Yu. Discrete contact mechanics with applications in tribology. – Amsterdam: Elsevier, 2022. – 220 p.
2. Barber J.R. Contact mechanics. – Cham: Springer, 2018. – 585 p.
3. Popp A., Wriggers P. Contact modeling for solids and particles. – Cham: Springer, 2018. – 228 p.
4. Goryacheva I., Paggi M., Popov V. Contact Mechanics Perspective of Tribology. – Lausanne: Frontiers Media SA, 2021. – 389 p.
5. Contact fatigue life estimation for asymmetric helical gear drives / S. Rajesh, P. Marimuthu, P. Dinesh Babu, R. Venkatraman // International Journal of Fatigue. – 2022. – Vol. 164. – Art. 107155.
6. Бураго Н.Г., Журавлев А.Б., Никитин И.С. Анализ напряженного состояния контактной системы «диск–лопатка» газотурбинного двигателя // Вычислительная механика сплошных сред. – 2011. – Т. 4, № 2. – С. 5–16.
7. Adamov A.A., Kamenskikh A.A., Pankova A.P. Influence analysis of the antifriction layer materials and thickness on the contact interaction of spherical bearings elements // Lubricants. – 2022. – Vol. 10, № 2. – Art. 30.
8. Kamenskikh A., Kuchumov A.G., Baradina I. Modeling the Contact Interaction of a Pair of Antagonist Teeth through Individual Protective Mouthguards of Different Geometric Configuration // Materials. – 2021. – Vol. 14, № 23. – Art. 7331.
9. Tribology and biophysics of artificial joints / L.S. Pinchuk, V.I. Nikolaev, E.A. Tsvetkova, V.A. Goldade. – London, Amsterdam: Elsevier, 2006. – 350 p.
10. Горячева И.Г., Мартыненко Ю.Г. Проблемы разработки робототехнических и биомехатронных систем с тактильным осязанием // Вестник нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4. – С. 2112–2114.
11. Лесникова Ю.И. Анализ влияния двухслойного защитно-упрочняющего покрытия на деформационные и оптические характеристики волокна типа Panda // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение. Материаловедение. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 49–61. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.07
12. Yang H., Che X., Yang C. Investigation of normal and tangential contact stiffness considering surface asperity interaction // Industrial lubrication and tribology. – 2020. – Vol. 72(3). – P. 379–388.
13. Contact mechanics between the human finger and a touchscreen under electroadhesion / M. Ayyildiz, M. Scaraggi, O. Sirin, C. Basdogan, Persson Bo N.J. // Proceedings of the national academy of sciences of the united states of America. – 2018. – Vol. 115(50). – P. 1–6.
14. Concrete spherical joint contact stress distribution and overturning moment of swing bridge / T. Liu, O. Yu, J. Fan, Z. Peng, E. Wang // Structures. – 2020. – Vol. 28. – P. 1187–1195.

15. Adamov A.A., Kamenskih A.A., Pankova A.P. Numerical analysis of the spherical bearing geometric configuration with antifriction layer made of different materials // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2020. – No. 4. – P. 15–26.

16. Высокотемпературный волоконно-оптический сенсор контроля радиальных зазоров в стендах газотурбинных двигателей / Г.Л. Даниелян, С.В. Иванов, Е.Г. Стешаков, И.Н. Молокович, Н.А. Иванов, О.В. Вихрова // Фотон-экспресс. – 2019. – № 6(158). – С. 328–329.

17. Multi-parameter sensor based on single long period grating in Panda fiber for the simultaneous measurement of SRI, temperature and strain / F. Esposito, A. Srivastava, A. Iadicicco, S. Campopiano // Opt. & Laser Technol. – 2019. – Vol. 113. – P. 198–203.

18. Monitoring the failure forms of a composite laminate system by using panda polarization maintaining fiber Bragg gratings / X. Zhang, R. Chen, A. Wang, Y. Xu, Y. Jiang, H. Ming, W. Zhao // Opt. Exp. – 2019. – Vol. 27(13). – P. 17571–17580.

19. Metallic structure functional sensor based on embedded Panda fiber by ultrasonic additive manufacturing / X. He, C. Ma, X. Wang, Z. Wang, F. Jiang, L. Yuan // Appl. Opt. – 2020. – Vol. 59(16). – P. 4880–4887.

20. High extinction ratio elliptical core Panda-type polarization-maintaining fiber coil / H. Li, X. Li, J. Wang, M. Rochette, H. Yang // Opt. Lett. – 2021. – Vol. 46(17). – P. 4276–4279.

21. Effects of composition and phase relations on mechanical properties and crystallization of silicate glasses / E. Kilinc, A.M.T. Bell, P.A. Bingham, R.J. Hand // J. Am. Ceram. Soc. – 2021. – Vol. 104. – P. 3921–3946.

22. Glass and process development for the next generation of optical fibers: A Review / J. Ballato, H. Ebendorff-Heidepriem, J. Zhao, L. Petit, J. Troles // Fibers. – 2017. – Vol. 5(1). – Art. 11.

23. Applications of fibre optic temperature measurement / L. Hoffmann, M. Müller, S. Krämer, M. Giebel, G. Schwotzer, T. Wieduwilt // Science Engineering. – 2007. – Vol. 13. – P. 363–378.

24. Analysis of influence of acceleration field on deformation of gyro fiber-optical ring / B. Wang, C. Huang, Q. Hu, J. Kong, P. Chen // Journal of applied optics. – 2021. – Vol. 42(2). – P. 1–9.

25. Multi-wavelength Er–Yb-doped fibre ring laser using a double-pass mach–zehnder interferometer with a sagnac interferometer / J.D. Filoteo-Razo, J.C. Hernandez-Garcia, J.M. Estudillo-Ayala, O. Pottiez // Optics and laser technology. – 2021. – Vol. 139. – Art. 106994. DOI:10.1016/j.optlastec.2021.106994

26. Есипенко И.А., Лыков Д.А. Математическая модель теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа и ее экспериментальная верификация // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. – 2017. – № 5. – С. 31–46.

27. Компьютерная модель погрешностей выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа при внешних воздействиях / К.С. Галягин, М.А. Ошивалов, М.А. Савин, Ю.А. Селянинов // Известия высших учебных заведений. – Приборостроение. – 2015. – Т. 58, №12. – С. 978–984.

28. Kamenskih A.A., Trufanov N.A. Regularities Interaction of Elements Contact Spherical Unit with the Antifrictional Polymeric Interlayer // Journal of Friction and Wear. – 2015. – Vol. 36, № 2. – P. 170–176.

29. Каменских А.А., Пащенко М.М. Исследование влияния характера контактного взаимодействия штампа с многослойным защитно-упрочняющим покрытием на деформационные характеристики системы штамп-полупространство // Научно-технический вестник Поволжья. – 2021. – № 8. – С. 59–62.

30. Shardakov I.N., Trufanov A.N. Identification of the Temperature Dependence of the Thermal Expansion Coefficient of Polymers // Polymers. – 2021. – Vol. 13. – Art. 3035.

31. ГОСТ 15130-86. Стекло кварцевое оптическое. Общие технические условия. – М., 1999. – 30 с.

## References

1. Goryacheva I., Makhovskaya Yu. Discrete contact mechanics with applications in tribology. – Amsterdam: Elsevier, 2022. – 220 p.

2. Barber J.R. Contact mechanics. – Cham: Springer, 2018. – 585 p.

3. Popp A., Wriggers P. Contact modeling for solids and particles. – Cham: Springer, 2018. – 228 p.

4. Goryacheva I., Paggi M., Popov V. Contact Mechanics Perspective of Tribology. – Lausanne: Frontiers Media SA, 2021. – 389 p.

5. Rajesh S., Marimuthu P., Dinesh Babu P., Venkatraman R. Contact fatigue life estimation for asymmetric helical gear drives // International Journal of Fatigue. – 2022. – Vol. 164. – Art. 107155.

6. Burago N.G., Zhuravlev A.B., Nikitin I.S. Analiz naprjazhennogo sostojanija kontaktnoj sistemy «disk–lopatka» gazoturbinogo dvigatelja [Analysis of stress state of gte contact system «disk-blade»] // Vychislitel'naja mehanika sploshnyh sred [Computational Continuum Mechanics]. – 2011. – Т. 4, № 2. – P. 5-16

7. Adamov A.A., Kamenskikh A.A., Pankova A.P. Influence analysis of the antifriction layer materials and thickness on the contact interaction of spherical bearings elements // Lubricants. – 2022. – Vol. 10, № 2. – Art. 30.

8. Kamenskikh A., Kuchumov A.G., Baradina I. Modeling the Contact Interaction of a Pair of Antagonist Teeth through Individual Protective Mouthguards of Different Geometric Configuration // Materials. – 2021. – Vol. 14, № 23. – Art. 7331.

9. Pinchuk L.S., Nikolaev V.I., Tsvetkova E.A., Goldade V.A. Tribology and biophysics of artificial joints. – London, Amsterdam: Elsevier, 2006. – 350 p.

10. Goryacheva I.G., Martynenko Yu.G. Problemy razrabotki robototekhnicheskikh i biomehatronnykh sistem s taktil'nym ochuvstvleniem [The issues of developing robotic and biomechatronic systems with tactile sensing] // Vestnik nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo [Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod]. – 2011. – № 4. – P. 2112-2114.

11. Lesnikova Yu.I. Analiz vlijanija dvuhslojnogo zashhitno-uprochnajushhego pokrytija na deformacionnye i opticheskie karakteristiki volokna tipa Panda [Analysis of the influence of a multi-layer protective coating on the deformation and optical characteristics of a Panda type fiber] // Vestnik PNIPU. Mashinostroenie. Materialovedenie [Bulletin of PNRPU Mechanical engineering, materials science]. – 2022. – Vol. 24, №. 1. – P. 49-61. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.07

12. Yang H., Che X., Yang C. Investigation of normal and tangential contact stiffness considering surface asperity interaction // Industrial lubrication and tribology. – 2020. – Vol. 72(3). – P. 379-388.

13. Ayyildiz M., Scaraggi M., Sirin O., Basdogan C., Persson Bo N.J. Contact mechanics between the human finger and a touchscreen under electroadhesion // Proceedings of the national academy of sciences of the united states of America. – 2018. – Vol. 115(50). – P. 1-6.

14. Liu T., Yu O., Fan J., Peng Z., Wang E. Concrete spherical joint contact stress distribution and overturning moment of swing bridge // Structures. – 2020. – Vol. 28. – P. 1187–1195.

15. Adamov A.A., Kamenskih A.A., Pankova A.P. Numerical analysis of the spherical bearing geometric configuration with antifriction layer made of different materials // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2020. No. 4. – P. 15-26.

16. Danieljan G.L., Ivanov S.V., Steshakov E.G., Molokovich I.N., Ivanov N.A., Vihrova O.V. Vysokotemperaturnyj volokonno-opticheskij sensor kontrolja radial'nyh zazorov v stendah gazoturbinnnyh dvigatelej // Foton-jekspres. – 2019. – № 6(158). – P. 328-329.

17. Esposito F., Srivastava A., Iadicicco A., Campopiano S. Multi-parameter sensor based on single long period grating in Panda fiber for the simultaneous measurement of SRI, temperature and strain // Opt. & Laser Technol. – 2019. – Vol. 113. – P. 198-203. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.12.022>

18. Zhang X., Chen R., Wang A., Xu Y., Jiang Y., Ming H., Zhao W. Monitoring the failure forms of a composite laminate system by using panda polarization maintaining fiber Bragg gratings // Opt. Exp. – 2019. – Vol. 27(13). – P. 17571-17580. <https://doi.org/10.1364/OE.27.017571>

19. He X., Ma C., Wang X., Wang Z., Jiang F., Yuan L. Metallic structure functional sensor based on embedded Panda fiber by ultrasonic additive manufacturing // *Appl. Opt.* – 2020. – Vol. 59(16). – P. 4880-4887. <https://doi.org/10.1364/AO.392317>

20. Li H., Li X., Wang J., Rochette M., Yang H. High extinction ratio elliptical core Panda-type polarization-maintaining fiber coil // *Opt. Lett.* – 2021. – Vol. 46(17). – P. 4276-4279. <https://doi.org/10.1364/OL.437629>

21. Kilinc E., Bell A.M.T., Bingham P.A., Hand R.J. Effects of composition and phase relations on mechanical properties and crystallization of silicate glasses // *J. Am. Ceram. Soc.* – 2021. – Vol. 104. – P. 3921-3946. <https://doi.org/10.1111/jace.17784>

22. Ballato J., Eborndorff-Heidepriem H., Zhao J., Petit L., Troles J. Glass and process development for the next generation of optical fibers: A Review // *Fibers.* – 2017. – Vol. 5(1). – Art. 11. <https://doi.org/10.3390/fib5010011>

23. Hoffmann L., Müller M., Krämer S., Giebel M., Schwotzer G., Wieduwilt T. Applications of fibre optic temperature measurement // *Science Engineering.* – 2007. – Vol. 13. – P. 363-378.

24. Wang B., Huang C., Hu Q., Kong J., Chen P. Analysis of influence of acceleration field on deformation of gyro fiber-optical ring // *Journal of applied optics.* – 2021. – Vol. 42(2). – P. 1-9.

25. Filoteo-Razo J.D., Hernandez-Garcia J.C., Estudillo-Ayala J.M., Pottiez O. Multi-wavelength Er–Yb-doped fibre ring laser using a double-pass mach-zehnder interferometer with a sagnac interferometer // *Optics and laser technology.* – 2021. – Vol. 139. – Art. 106994. DOI:10.1016/j.optlastec.2021.106994

26. Esipenko I.A., Lykov D.A. Matematicheskaja model' teplovogo drejfa volokonno-opticheskogo giroskopa i ee jeksperimental'naja verifikacija [Mathematical model of thermal drift of a fiber-optic gyroscope and its experimental verification] // *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborost. [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.]*, 2017, no. 5, pp. 31–46. <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2017-5-31-46>

27. Galyagin K.S., Oshivalov M.A., Selyaninov Ju.A., Savin M.A. Komp'juternaja model' pogreshnostej vyhodnogo signala volokonno-opticheskogo giroskopa pri vnesnih vozdejstvijah [A computer model of output signal errors for fiber optic gyroscope under external influence] // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie*, 2015, vol. 58, no. 12, pp. 978-984. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2015-58-12-979-984>

28. Kamenskih A.A., Trufanov N.A. Regularities Interaction of Elements Contact Spherical Unit with the Antifrictional Polymeric Interlayer // *Journal of Friction and Wear.* – 2015. – T. 36, № 2. – Pp. 170-176.

29. Kamenskih A.A., Pashhenko M.M. Issledovanie vlijanija haraktera kontaktного vzaimodejstviya shtampa s mnogoslojnym zashhitno-uprochnjajushhim pokrytiem na deformatsionnye harakteristiki sistemy shtamp-poluprostranstvo [Research of the contact interaction character influence of a stamp with a multi layer protective-hardening coating on the deformation characteristics of the stamp half-space system] // Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja [Scientific and Technical Volga region Bulletin]. – 2021. – № 8. – P. 59-62.

30. Shardakov I.N., Trufanov A.N. Identification of the Temperature Dependence of the Thermal Expansion Coefficient of Polymers // Polymers. – 2021. – Vol. 13. – Art. 3035. <https://doi.org/10.3390/polym13183035>

31. GOST 15130-86. Steklo kvarcevoe opticheskoe. Obshhie tehnicheckie uslovija. M., 1999. 30 p.

### Об авторах

**Лесникова Юлия Игоревна** (Пермь, Россия) – ведущий инженер кафедры Вычислительной математики, механики и биомеханики ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр-кт, 29, e-mail: ulesig@gmail.com).

**Каменских Анна Александровна** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительная математика, механика и биомеханика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614013, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ana\_kamenskih@mail.ru).

**Пашенко Максим Михайлович** (Пермь, Россия) – студент кафедры «Вычислительная математика, механика и биомеханика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ura.4132@yandex.ru).

### About the authors

**Yulia I. Lesnikova** (Perm, Russian Federation) – Lead Engineer of Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics, Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky prospect, Perm, Russian Federation, e-mail: ulesig@gmail.com)

**Anna A. Kamenskih** (Perm, Russia) – candidate of technical science, doцент of the Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics PNRPU (29, Komsomolsky Ave., Perm, 614990, e-mail: ana\_kamenskih@mail.ru);

**Maxim M. Pashchenko** (Perm, Russia) – student of the Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics PNRPU (29, Komsomolsky Ave., Perm, 614990, Komsomolsky prospect, e-mail: ura.4132@yandex.ru).

**Библиографическое описание статьи согласно  
ГОСТ Р 7.0.100–2018:**

**Лесникова, Ю. И.** Математическое моделирование контактного взаимодействия оптического волокна типа Panda с алюминиевым полупространством при разном характере сопряжения элементов / Ю. И. Лесникова, А. А. Каменских, М. М. Пащенко. – текст : непосредственный. – DOI: 10.15593/2499-9873/2022.3.03 // Прикладная математика и вопросы управления / *Applied Mathematics and Control Sciences*. – 2022. – № 3. – С. 45–66.

**Цитирование статьи в изданиях РИНЦ:**

Лесникова, Ю. И. Математическое моделирование контактного взаимодействия оптического волокна типа Panda с алюминиевым полупространством при разном характере сопряжения элементов / Ю. И. Лесникова, А. А. Каменских, М. М. Пащенко // Прикладная математика и вопросы управления. – 2022. – № 3. – С. 45–66. – DOI: 10.15593/2499-9873/2022.3.03

**Цитирование статьи в references и международных изданиях**

**Cite this article as:**

Lesnikova Yu.I., Kamenskikh A.A., Strukova V.I. Mathematical simulation of contact interaction of a Panda type optical fiber with aluminum half-space with different character of elements conjugation. *Applied Mathematics and Control Sciences*, 2022, no. 3, pp. 45–66. DOI: 10.15593/2499-9873/2022.3.03 (*in Russian*)

**Финансирование.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-48-596009.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов.** Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Поступила: 10.04.2022

Одобрена: 20.04.2022

Принята к публикации: 01.09.2022