

**Канашин И. В., Хромов А. И., Григорьев Я. Ю., Григорьева А. Л.**  
**I. V. Kanashin, A. I. Khromov, Ya. Yu. Grigoriev, A. L. Grigorieva**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО  
ОБРАЗЦА ПРИ УСЛОВИИ МАЛОЦИКЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ**

**MODELING OF THE DEFORMATION PROCESS OF AN EXPERIMENTAL SAMPLE  
UNDER THE CONDITION OF LOW-CYCLE LOADING**

**Канашин Илья Валерьевич** – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: jan198282@mail.ru.

**Илья В. Канашин** – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: jan198282@mail.ru.

**Хромов Александр Игоревич** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Прикладная математика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: jan198282@mail.ru.

**Alexander I. Khromov** – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Applied Mathematics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: jan198282@mail.ru.

**Григорьева Анна Леонидовна** – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой «Прикладная математика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: naj198282@mail.ru.

**Anna L. Grivorieva** – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Head of the Applied Mathematics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: naj198282@mail.ru.

**Григорьев Ян Юрьевич** – кандидат физико-математических наук, доцент, проректор по учебной работе Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: jan198282@mail.ru.

**Yan Yu. Grigoriev** – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Vice-Rector for Academic Affairs of the Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: jan198282@mail.ru.

**Аннотация.** В данной статье представлена математическая модель, описывающая поведение материала в окрестности точек образования микротрещин при многократном циклическом нагружении, а также определён критерий начала образования разрушения и дописан программный комплекс, позволяющий определить количество циклов нагружения в зависимости от геометрии полосы и физических свойств.

**Summary.** This article presents a mathematical model describing the behavior of a material in the vicinity of microcrack formation points under repeated cyclic loading, also defines a criterion for the beginning of fracture formation and adds a software package that allows determining the number of loading cycles depending on the band geometry and physical properties.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, малоцикловое нагружение, механика деформируемого твёрдого тела, поле тензора перемещений, деформация.

**Key words:** mathematical modeling, low-cycle loading, mechanics of deformable solids, displacement tensor field, deformation.

УДК 004.021:004.93'11

**Введение.** В данной работе рассматривается процесс деформирования образца при условии многократного циклического нагружения. В отличие от механических разрушений, которые можно определить визуально, существуют также и усталостные.

При эксплуатации крупногабаритных объектов (самолёты, суда (речные и морские), оболочечные конструкции) в результате циклических нагрузок, связанных с деформацией металла, под

действием внешних сил возникает микронагружение, которое очень сильно влияет на эксплуатацию конструкций и приводит к их деформации. В процессе функционирования элементы могут начать разрушаться внутри, появятся так называемые микротрещины, которые впоследствии приведут к внезапному разрушению конструкции.

Для исследования данного явления предлагается использовать значение первого главного тензора Альманси ( $E_1$ ), а также значение диссипации энергии.

В условиях малоциклового нагружения количество нагружений будет составлять не более 10 000 раз. Главным критерием нагружения будет являться достижение критической величины энергии диссипации, которая суммируется в результате многократных деформаций материала и при каждом последующем деформировании увеличивается, достигая определённого значения:

$$\Sigma W = W_{кр.}$$

После осуществления образцом определённого количества циклов деформирования наступает полная потеря пластичности и образуется трещина.

В данной работе предложено исследовать процесс малоциклового усталости со стороны деформационного процесса. Каждый этап деформирования рассмотрен как отдельный деформационный процесс, по окончании которого в материале происходят процессы, ведущие к накоплению энергии диссипации и изменению начальных условий для тензора скоростей деформации и напряжения. Каждый цикл разбивается на растяжение и сжатие, после растяжения под действием пластических свойств образец возвращает свою исходную геометрическую форму, но определённые параметры, описывающие механические свойства материала, изменяются (например, плотность), что приводит к накоплению энергии. Пример развития изменения свойств материала из-за малоциклового нагружения представлен на рис. 1.

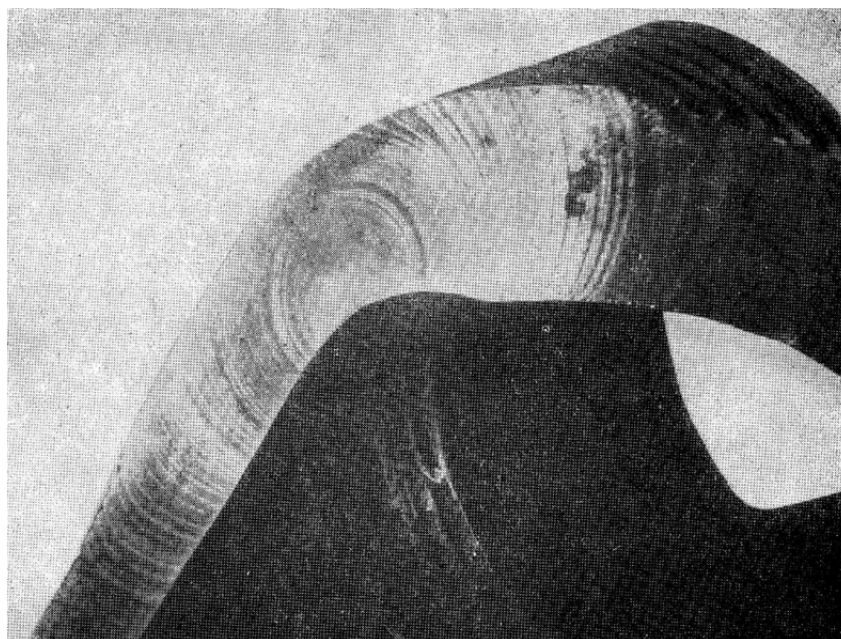


Рис. 1. Поверхность излома коленчатого вала из стали 40ХНМА с концентрическими усталостными линиями

В реальных процессах деформирования материала в элементах конструкций деформационные процессы могут значительно отличаться от одноосного деформирования, и это обобщение должно учитывать следующие особенности малоциклового усталости:

1. диапазон пластического деформирования материала значительно превышает диапазон малых деформаций, что требует использования в качестве меры деформаций тензоров конечных деформаций;

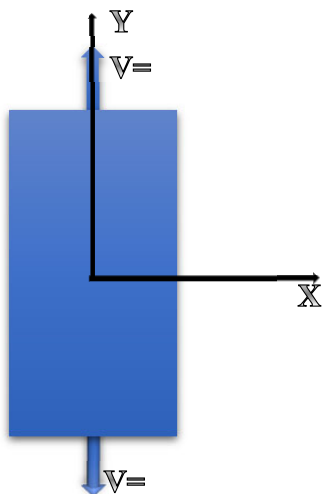


Рис. 2. Плоская полоса при растяжении

2. повреждаемость материала осуществляется за счёт энергии гистерезиса на пластических деформациях, связанных с упрочнением материала, что требует учёта эффекта Баушингера.

Для данного исследования был создан программный комплекс, который позволяет определить максимально возможное количество деформационных нагрузок при циклическом нагружении для плоских образцов, изготовленных из различных материалов. Предлагается рассмотреть плоский образец, изображённый на рис. 2 [1-10].

На рис. 3 представлено одно из окон интерфейса программы.

Интерфейс программы состоит:

- из «полей со списком» для выбора типа образца (полоса); материала, из которого изготовлен образец; размеров образца (длина и ширина полосы в миллиметрах); времени полуцикла нагружения в секундах (в течение выбранного периода времени образец растягивается, затем на протяжении такого же отрезка времени сжимается, что составляет один цикл нагружения);
- кнопок для запуска эксперимента, вывода определяемых в каждом полуцикле параметров в таблицу, сброса результатов эксперимента, после которого появляется возможность провести новый эксперимент [11; 12];
- текстового поля для вывода основного определяемого параметра (количества циклов до появления в образце трещины) и перехода ко второму этапу (нагрузению с разрывным полем скоростей перемещений). В качестве критерия перехода ко второму этапу выступает предельное значение мощности диссипации энергии  $W$ , рассчитываемое для выбранного материала перед началом эксперимента в зависимости от его коэффициентов относительного удлинения и относительного сужения [13-15].

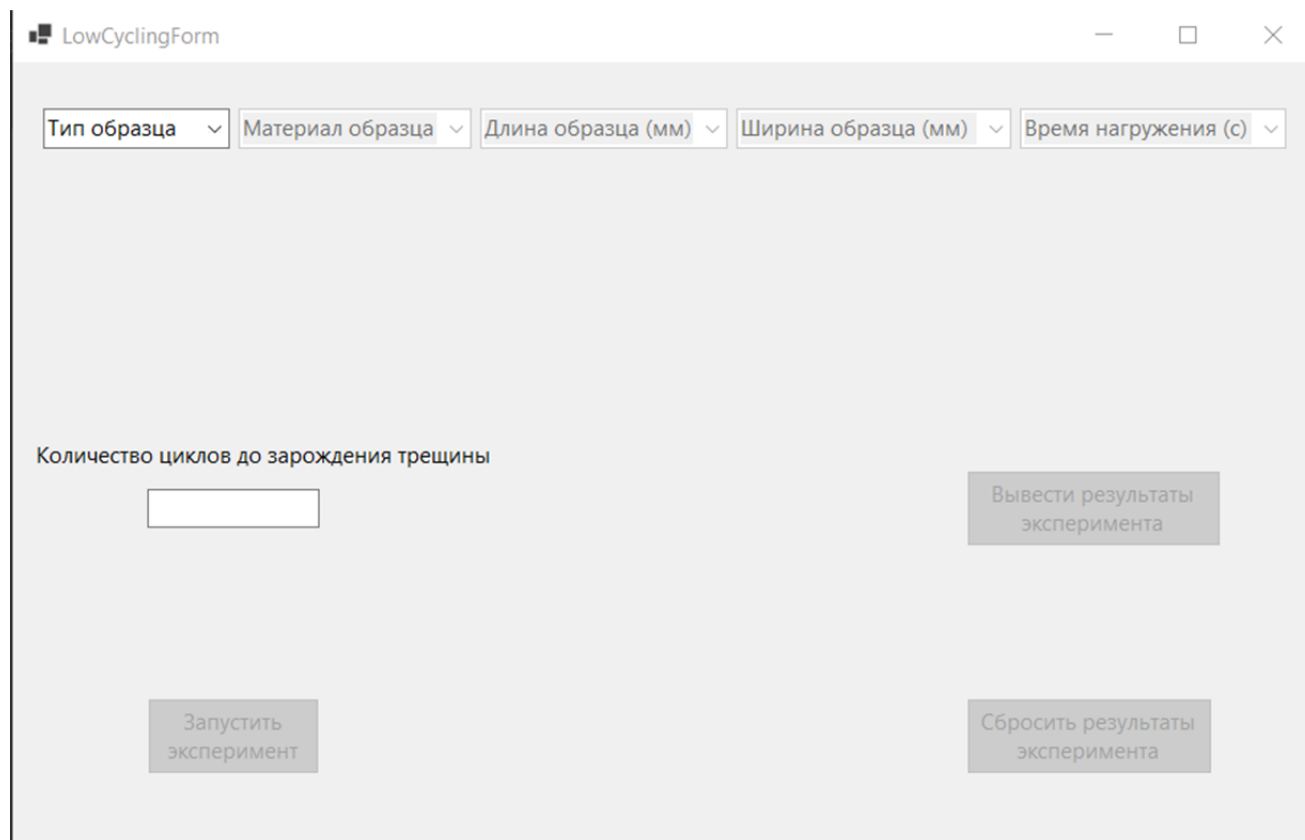


Рис. 3. Окно интерфейса программы № 1

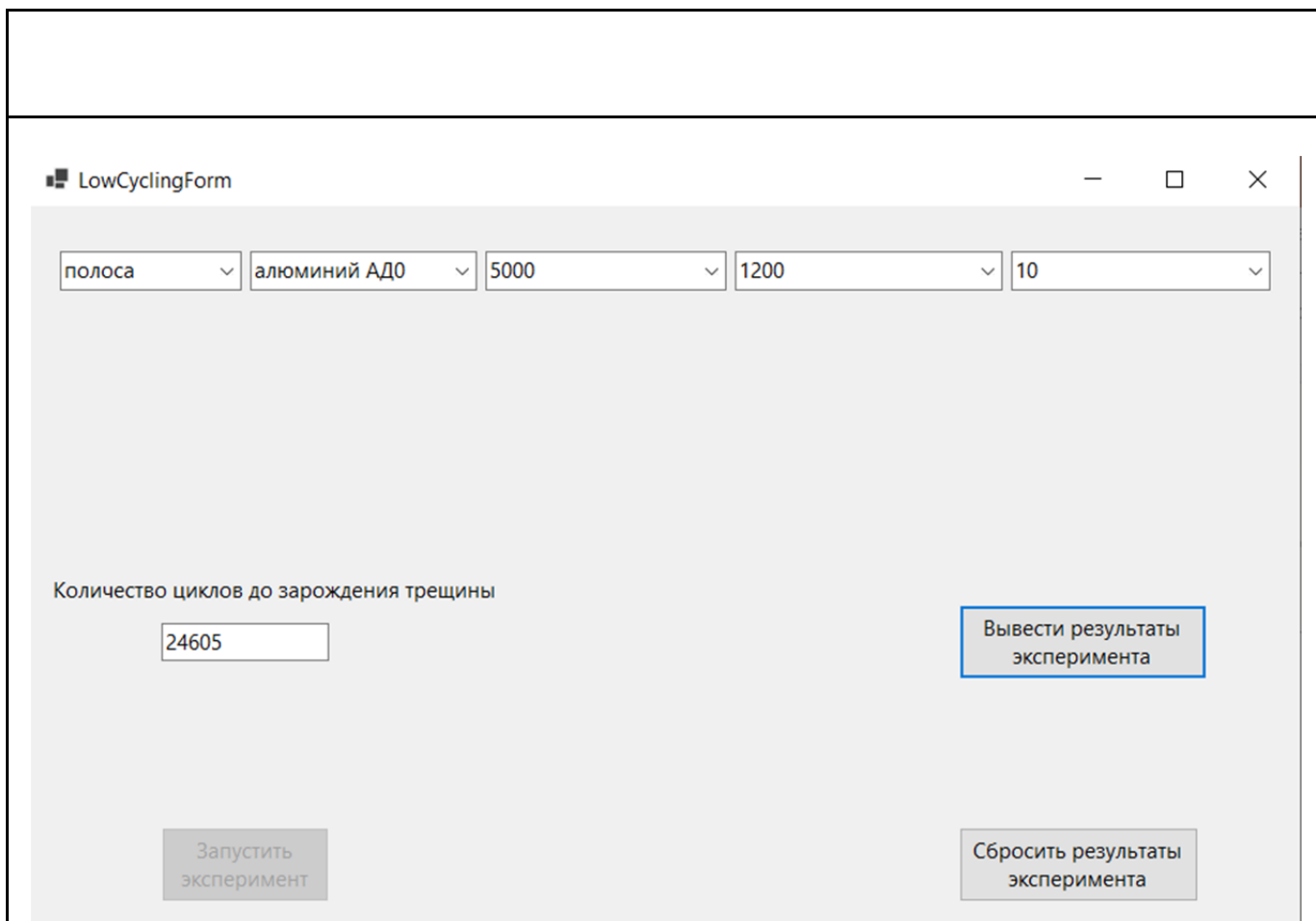


Рис. 4. Окно результата работы программы

На рис. 4 представлен результат работы программы. В качестве исходных данных были выбраны: материал образца – алюминий АД0, размеры полосы – 5000×1200 мм, время полуцикла нагружения – 10 с, скорость деформирования полосы – постоянная величина, равная 0,001 мм в секунду. В результате для количества циклов до образования в образце трещины было получено значение 24 605. Из приведённой ниже таблицы (см. рис. 5) с основными параметрами следует, что образование трещины происходит после 49 211 полуциклов нагружения, следовательно, переход через критическое значение мощности диссипации энергии и образование трещины происходит при сжатии образца на 24 606 цикле [16-18].

№	Граничные напряжения	Необходимое усилие	Изменение ширины полосы	Длина полосы	Ширина полосы	Первое главное значение тензора Альманси	Второе главное значение тензора Альманси	Мощность диссипации энергии
1	160	383,999232001...	2,39999519990...	5,00001	1,1999976000048	1,99999400001...	-2,000002E-06	3,19999360001...
2	-160	-384,000000000...	-2,39999519990...	5	1,2	-1,20000836062...	4,00000653543...	6,39999360001...
3	160	383,999232001...	2,39999519990...	5,00001	1,1999976000048	1,99999400001...	-2,000002E-06	9,59998720002...
4	-160	-384,000000000...	-2,39999519990...	5	1,2	-1,20000836062...	4,00000653543...	0,00012799987...
5	160	383,999232001...	2,39999519990...	5,00001	1,1999976000048	1,99999400001...	-2,000002E-06	0,00015999980...
6	-160	-384,000000000...	-2,39999519990...	5	1,2	-1,20000836062...	4,00000653543...	0,00019199980...
7	160	383,999232001...	2,39999519990...	5,00001	1,1999976000048	1,99999400001...	-2,000002E-06	0,00022399974...
8	-160	-384,000000000...	-2,39999519990...	5	1,2	-1,20000836062...	4,00000653543...	0,00025599974...
9	160	383,999232001...	2,39999519990...	5,00001	1,1999976000048	1,99999400001...	-2,000002E-06	0,00028799968...
10	-160	-384,000000000...	-2,39999519990...	5	1,2	-1,20000836062...	4,00000653543...	0,00031999968...
11	160	383,999232001...	2,39999519990...	5,00001	1,1999976000048	1,99999400001...	-2,000002E-06	0,00035199961...
12	-160	-384,000000000...	-2,39999519990...	5	1,2	-1,20000836062...	4,00000653543...	0,00038399961...
13	160	383,999232001...	2,39999519990...	5,00001	1,1999976000048	1,99999400001...	-2,000002E-06	0,00041599955...

Рис. 5. Данные по состоянию нагруженной полосы

№	Граничные напряжения	Необходимое усилие	Изменение ширины полосы	Длина полосы	Ширина полосы	Первое главное значение тензора Альманси	Второе главное значение тензора Альманси	Мощность диссипации энергии
49201	160	383,999232001...	2,39999519990...	5,00001	1,1999976000048	1,99999400001...	-2,000002E-06	1,57443042553...
49202	-160	-384,000000000...	-2,39999519990...	5	1,2	-1,20000836062...	4,00000653543...	1,57446242553...
49203	160	383,999232001...	2,39999519990...	5,00001	1,1999976000048	1,99999400001...	-2,000002E-06	1,57449442547...
49204	-160	-384,000000000...	-2,39999519990...	5	1,2	-1,20000836062...	4,00000653543...	1,57452642547...
49205	160	383,999232001...	2,39999519990...	5,00001	1,1999976000048	1,99999400001...	-2,000002E-06	1,57455842541...
49206	-160	-384,000000000...	-2,39999519990...	5	1,2	-1,20000836062...	4,00000653543...	1,57459042541...
49207	160	383,999232001...	2,39999519990...	5,00001	1,1999976000048	1,99999400001...	-2,000002E-06	1,57462242534...
49208	-160	-384,000000000...	-2,39999519990...	5	1,2	-1,20000836062...	4,00000653543...	1,57465442534...
49209	160	383,999232001...	2,39999519990...	5,00001	1,1999976000048	1,99999400001...	-2,000002E-06	1,57468642528...
49210	-160	-384,000000000...	-2,39999519990...	5	1,2	-1,20000836062...	4,00000653543...	1,57471842528...
49211	160	383,999232001...	2,39999519990...	5,00001	1,1999976000048	1,99999400001...	-2,000002E-06	1,57475042521...

Рис. 6. Данные по состоянию нагруженной полосы (часть 2)

На рис. 5 и 6 приведена таблица, в которую выводятся определяемые в каждом полувцикле нагружения параметры: напряжения на верхней и нижней границах образца; усилие, необходимое для растяжения полосы; изменение ширины полосы в текущем полувцикле нагружения; длина и ширина полосы к концу текущего полувцикла; первое и второе главные значения тензора Альманси, определяющие деформирование образца; мощность диссипации энергии, по значению которой определяется момент образования трещины. Предельное значение мощности диссипации энергии для алюминия АД0, полученное в результате работы программы, равно 1,5747504251; предельное значение мощности диссипации энергии алюминия АД0, приведённое в справочнике по конструкционным материалам, равно 1,6.

Таким образом, данное научное исследование даёт возможность спрогнозировать развитие микротрещин на поверхности и внутри определённых видов металла. В данной работе была рассмотрена сталь, которая является строительным материалом судов, самолётов, автомобилей и т. д. Иногда очень важно иметь возможность аналитически оценивать и заранее прогнозировать состояние элементов конструкций, изготавливаемых на промышленных предприятиях, а также избегать проблем, связанных с эксплуатацией крупных технических систем, таких как речные и морские суда.

**Вывод.** Необходимость данного исследования связана с актуальностью аналитической оценки состояния элементов конструкции, которые изготавливаются на промышленных предприятиях Хабаровского края, при их деформировании. Представителями данных предприятий являются КнААЗ, АСЗ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мокшанов, А. С. Металлы и их сплавы, применяемые в авиационной промышленности / А. С. Мокшанов, А. А. Панюжев // Траектория научно-технологического развития России с учётом глобальных трендов: сборник научных трудов по материалам Междунар. науч.-практ. конф., 29 ноября 2019 г. – Белгород: ООО Агентство перспективных научных исследований (АПНИ), 2019. – С. 138-142.
2. Развитие техники и технологии испытания баллистических шлемов / Е. А. Чернышов, И. Д. Романов, А. Д. Романов, Р. О. Горбатов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № I-1 (37). – С. 100-107.
3. Амосов, О. С. Создание интеллектуальной информационно-телекоммуникационной системы безопасности вуза нового поколения: о новом проекте Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета / О. С. Амосов, С. Г. Баена, Я. С. Иващенко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № I-1 (29). – С. 119-120.

4. Амосов, О. С. Сетевая классификация атак в задачах информационной безопасности на основе интеллектуальных технологий, фрактального и Вейвлет-анализа / О. С. Амосов, Д. С. Магола, С. Г. Баена // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № IV-1 (32). – С. 19-29.
5. Моделирование деформационных процессов элементов сложных конструкций в условиях малоцикло-вой деформации / А. Л. Григорьева, Я. Ю. Григорьев, А. И. Хромов, И. В. Канашин // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – Т. 2. – № 2 (52). – С. 123-128.
6. Хромов, А. И. Поверхность нагружения, связанная с линиями уровня поверхности деформаций несжимаемого жёсткопластического тела / А. И. Хромов, Е. П. Кочеров, А. Л. Григорьева // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2006. – № 43. – С. 88-91.
7. Григорьева, А. Л. Алгоритм решения задачи о растяжении полосы с непрерывным полем скоростей перемещений с использованием деформационно-энергетического условия пластичности / А. Л. Григорьева, Я. Ю. Григорьев // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 1-3. – С. 694-700.
8. Голубева, Н. В. Математическое моделирование систем и процессов: учеб. пособие / Н. В. Голубева. – СПб.: Лань, 2013. – 192 с.
9. Разработка модели определения глубины пространства для задач детектирования препятствий беспилотного летательного аппарата / Р. И. Шишов, Я. Ю. Григорьев, А. Л. Григорьева, Е. П. Жарикова // Современные наукоёмкие технологии. – 2019. – № 11-2. – С. 306-313.
10. Детектирование состояния поверхности / Е. П. Жарикова, И. А. Трещев, Я. Ю. Григорьев, А. Л. Григорьева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № III-1 (39). – С. 58-63.
11. Намоконов, А. Н. Разработка программного комплекса получения параметров, характеризующих поведение быстрохватывающихся бетонов высокопрочных марок / А. Н. Намоконов, А. Л. Григорьева // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. В 3 ч. Ч. 2 / Редакция: Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2020. – С. 330-333.
12. Атюков, Н. В. Математическое моделирование образа объекта с помощью лазерного дальномера / Н. В. Атюков, А. Л. Григорьева // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов / Редакция: Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. В 2 ч. Ч. 2. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2018. – С. 129-131.
13. Архипова, Н. И. Теория системного анализа и управления: учеб. пособие для вузов / Н. И. Архипова, В. В. Кульба, С. А. Косяченко. – М.: Изд-во ПРИОР, 2008. – 384 с.
14. Аттетков, А. В. Введение в методы оптимизации / А. В. Аттетков, В. С. Зарубин, А. Н. Канатников. – М.: ИНФРА-М, 2008. – 272 с.
15. Сухарев, А. Г. Методы оптимизации / А. Г. Сухарев, А. В. Тимохов, В. В. Федоров. – М.: Юрайт, 2014. – 368 с.
16. Голубева, Н. В. Математическое моделирование систем и процессов: учеб. пособие / Н. В. Голубева. – СПб.: Лань, 2013. – 192 с.
17. Тимченко, Т. Н. Системный анализ в управлении / Т. Н. Тимченко. – М.: ПРИОР, 2011. – 162 с.
18. Сарилова, О. А. Факторная модель как метод оценки вклада нематериальных активов в стоимость организации / О. А. Сарилова, А. Л. Григорьева, Я. Ю. Григорьев / Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о человеке, обществе и культуре. – 2012. – № III-2 (11). – С. 107-112.