

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ РАСТЯЖЕНИЯ, КРУЧЕНИЯ И ИЗГИБА В ПОДЪЕМНОМ КАНАТЕ С УЧЕТОМ РАЗЛИЧИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

С.В. Поляков, А.Е. Пушкарев

В данной статье с помощью нелинейных зависимостей исследуется влияние деформаций растяжения, кручения и изгиба с учетом волнистости на геометрические параметры и механические свойства каната. Представлены результаты по нагружению канатов с различными геометрическими параметрами и механическими свойствами винтовых элементов. В результате расчетного исследования определены количественные значения влияния деформаций на канаты с одинаковыми и различными геометрическими параметрами и механическими свойствами винтовых элементов.

Ключевые слова: канат, деформации, допустимое значение, волнистость, угол свивки, расчет каната.

DETERMINATION OF TENSION, TORSION AND FLEXURE STRAINS IN THE LIFTING ROPE OF DIFFERENT GEOMETRIC PARAMETERS AND MECHANICAL PROPERTIES

S.V. Polyakov, A.E. Pushkarev

In the article the influence of strains of tension, torsion and flexure on geometrical parameters and mechanical properties of a rope has been analyzed with nonlinear dependences taking into account undulation. Results of loading the ropes of different geometric parameters and mechanical properties of screw elements are presented. On the base of analysis there were obtained the quantitative values of the deformation influence on ropes of the different and similar geometric parameters and mechanical properties of screw elements.

Keywords: rope, strains, acceptable value, waviness, angle of the coil, rope analysis.

Введение

При эксплуатации в подъемных канатах появляется волнистость в результате различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, при которой ось каната принимает форму пространственной винтовой линии. При этом необходимо знать допустимое значение радиуса волнистости, при котором возможна дальнейшая эксплуатация каната.

Влияние собственного веса подъемного каната существенно отражается на характере его деформаций.

Как известно, учет геометрической нелинейности каната уменьшает значения соответствующих перемещений, рассчитанных по линейным уравнениям. Ошибка по удлинению каната при больших длинах (более 1000 м) может со-

ставлять 48 %, а по углу раскручивания достигать до 100 % [1–3].

Такое расхождение расчетов свидетельствует о том, что учет геометрической нелинейности является необходимым при анализе напряженно-деформированного состояния канатов в подъемно-транспортных машинах при его раскручивании.

Учитывая большую потребность в стальных канатах в подъемно-транспортном оборудовании и небольшой срок их службы, на первый план выходит задача повышения стойкости и безопасности их эксплуатации.

Целью исследования является выявление влияния деформаций каната, полученных с помощью нелинейных зависимостей, на геометрические параметры и механические свойства винтовых элементов.

Методы экспериментального определения деформаций в подъемном канате

Основным экспериментом, который может подтвердить правильность теоретических выводов в исследовании напряженно-деформированного состояния подъемного каната с учетом образовавшихся изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов при нелинейности деформаций, является исследование деформаций растяжения и кручения канатов, изготовленных с учетом и без учета образовавшихся изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов [4–7].

Л.И. Шигариной был предложен метод по измерению перемещений подъемного каната: продольные, угловые и радиальные, возникшие при его нагружении [8]. При известных значениях перемещений с помощью полученных автором формул можно перейти к соответствующим значениям деформаций.

Применяемый при эксперименте прибор для замера деформаций имеет некоторые недостатки. К наиболее значимым недостаткам можно отнести то, что в качестве регистрирующего устройства используется часовая индикатор, который не дает требуемой точности измерения деформаций. А также эксперимент проводился без учета возможных изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов подъемного каната [9–10].

Представляет интерес эксперимент, проведенный в лаборатории сопротивления материалов Дальрыбвтуза, который заключался в испытаниях образцов стальных канатов с органическими сердечниками рабочей длиной 1 м и диаметром 16,0, 17,5, 19,5, 21,0, 24,0 и 27,0 мм по ГОСТ 3070-66. Испытания проводились с помощью специального прибора, позволяющего проводить два рода испытаний: при неподвижном и вращающемся верхнем конце образца. Все испытания проводились до натяжения $2/3$ разрывного усилия. При каждом варианте испытания образцы подвергались пятикратному нагружению с последующей разгрузкой и при каждом испытании составлялись таблицы отмеченных параметров. Запись проводилась с интервалом 4,9 кН до натяжения 19,6 кН и с интервалом 9,8 кН до максимального.

При обработке данных эксперимента было обнаружено, что характеристики, полученные при четвертом, пятом

и последующем циклах нагружения, совпадают, то есть канат начинает работать в области упругих деформаций [9–11]. Поэтому характеристики образцов снимались при пятом цикле нагружения.

К недостаткам этого метода относятся громоздкость и трудоемкость эксперимента, который проводился над стальными канатами с органическими сердечниками; также в нем не учитывалось изменение геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов подъемного каната [12].

Особый интерес представляют исследования напряженно-деформированного состояния подъемных канатов с образовавшейся в них волнистостью, проведенные А.Б. Гуревичем. Во время проведения эксперимента были изготовлены образцы канатов с различным значением радиуса волнистости. Однако автором не были проведены исследования подъемных канатов без учета образования волнистости, а также не сделан сравнительный анализ и соответствующие выводы [13–14].

Необходимо отметить, что не было устройства для исследования напряженно-деформированного состояния подъемных канатов с возникающими в них изменениями геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов. Совместно с доктором технических наук М.Н. Хальфиным в лаборатории канатов кафедры подъемно-транспортных машин и роботов ЮРГТУ (НПИ, г. Новочеркасск), было сконструировано и изготовлено специальное устройство, предназначенное для замера продольной и крутильной деформации подъемных канатов на базе 5-тонной разрывной машины УММ-5, содержащее блок для замера деформаций и регистрирующую аппаратуру (рис. 1) [15–18].

Принцип действия устройства состоит в замере деформаций растяжения и кручения на участке каната, изготовленного как с учетом, так и без учета изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.

Результаты экспериментальных исследований

Испытывались четыре пары образцов, причем исследовалось напряженное состояние образцов при натяжении P винтовых элементов как с равномерными, так и неравномерными геометрическими параметрами и механическими свойствами (табл. 1).

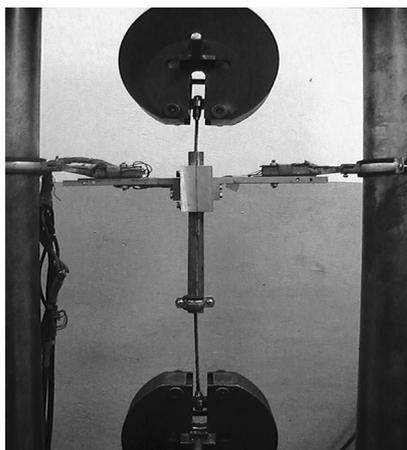


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки для измерения деформаций растяжения и кручения на участке каната

После сопоставления с длиной образца получим значения деформаций растяжения и кручения, которые представлены в табл. 2.

Рассматривалось влияние натяжения на деформации растяжения и кручения стальных канатов с равномерным натяжением винтовых элементов, а также канатов с учетом изменений геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.

На рисунках 2–5 представлены зависимости для канатов, изготовленных как с равномерным натяжением винтовых элементов, так и с учетом неравномерности геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов.

Таблица 1

Экспериментальные значения удлинения и угла поворота канатов при $P = 1000$ Н

№ п/п	Конструкция каната	Диаметр каната d , мм	Радиус волнистости R_v , мм	Удлинение ϵ , мм	Угол поворота ϕ , град
1	1+6	2,4	0,24	0,6	0,0037
2	1+6	5	0,58	0,85	0,012
3	$6 \cdot 9 (1+6) + 1 \cdot 7 (1+6)$	3,4	0,691	0,55	0,008
4	$6 \cdot 9 (1+6) + 1 \cdot 7 (1+6)$	4	0,58	0,41	0,0078

Таблица 2

Экспериментальные значения деформаций растяжения и кручения

№ п/п	Конструкция каната	Диаметр каната d , мм	Радиус волнистости R_v , мм	Удлинение, ϵ , мм/мм	Кручение, θ , рад/м	Натяжение P , Н
1	1+6	2,4	0,24	0,00109	0,00039	1000
				0,0021	0,00072	1500
				0,00297	0,000998	2000
				0,0033	0,00108	2500
				0,00353	0,001154	3000
2	1+6	5	0,58	0,00155	0,000396	1000
				0,0031	0,000732	3000
				0,0045	0,000984	5000
				0,0056	0,001153	7000
				0,0065	0,001284	9000
				0,007	0,001363	11000
				0,0074	0,00142	13000
				0,0075	0,001479	15000
3	$6 \cdot 9 (1+6) + 1 \cdot 7 (1+6)$	3,4	0,691	0,001	0,000246	1000
				0,001731	0,000448	2000
				0,002074	0,000582	3000
				0,002207	0,000657	4000
				0,002291	0,000713	5000
4	$6 \cdot 9 (1+6) + 1 \cdot 7 (1+6)$	4	0,58	0,00123	0,000244	2000
				0,00215	0,000475	4000
				0,0027	0,000666	6000
				0,003	0,0008	8000
				0,0032	0,000873	10000

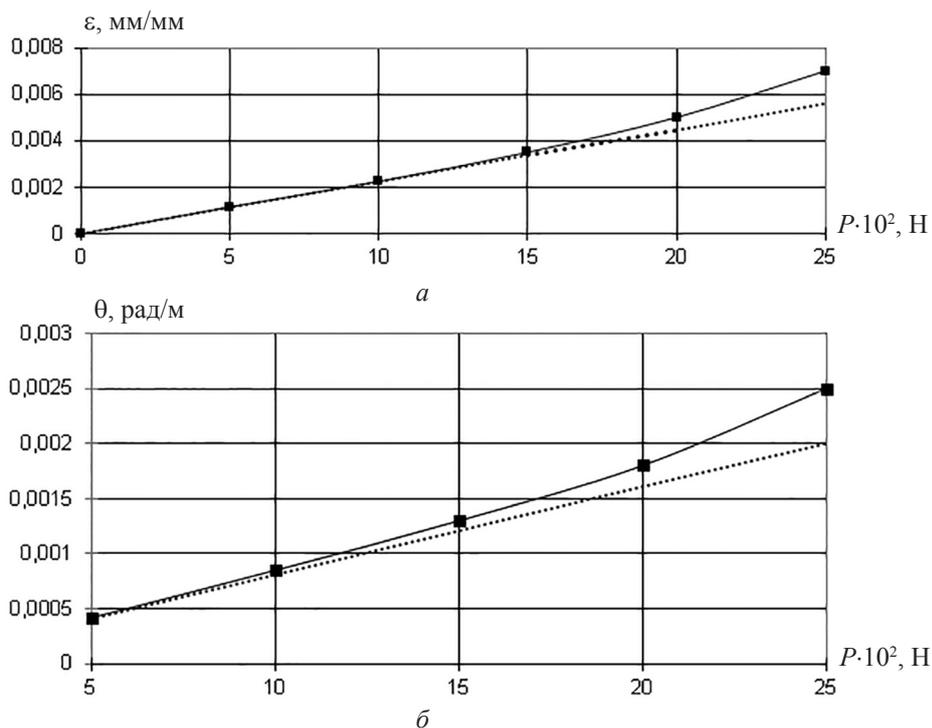


Рис. 2. Влияние натяжения на деформацию растяжения (а) и кручения (б) для однопрядных канатов диаметром 2,4 мм: с равномерными геометрическими параметрами и механическими свойствами проволок (.....) и с учетом их неравномерности (—■—)

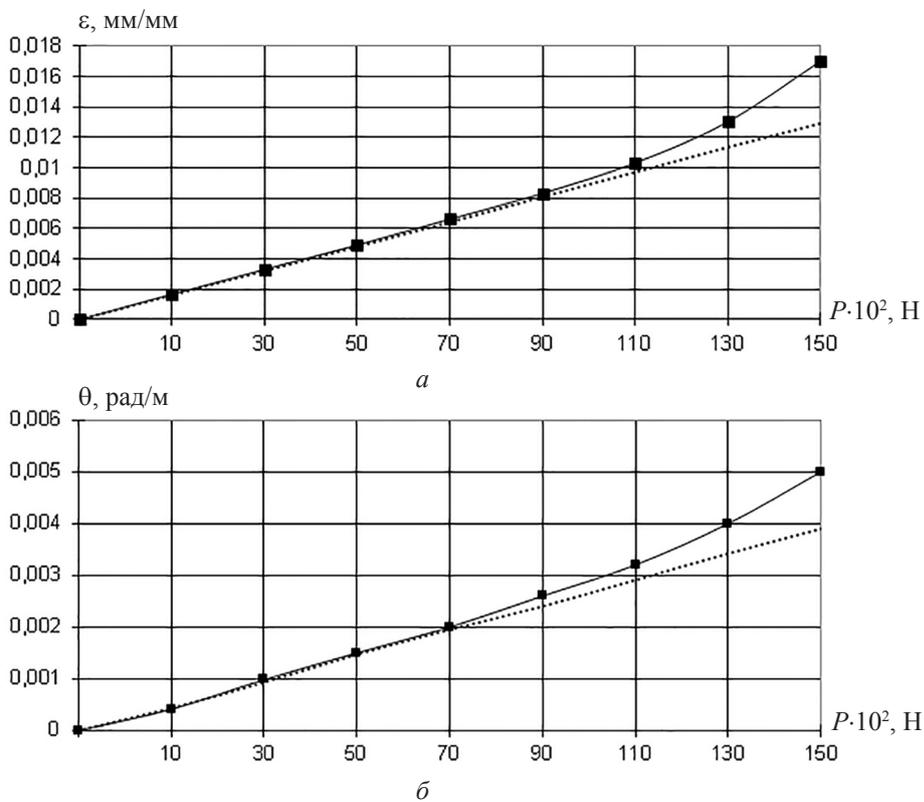


Рис. 3. Влияние натяжения на деформацию растяжения (а) и кручения (б) для однопрядных канатов диаметром 5 мм: с равномерными геометрическими параметрами и механическими свойствами проволок (.....) и с учетом их неравномерности (—■—)

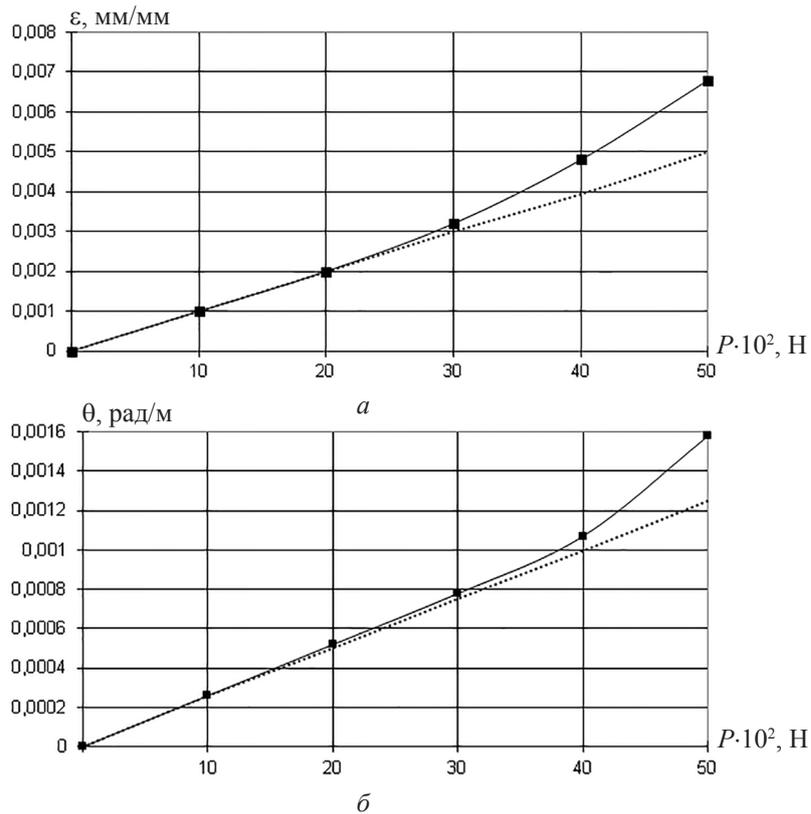


Рис. 4. Влияние натяжения на деформацию растяжения (а) и кручения (б) для многопрядных канатов диаметром 3,4 мм: с равномерными геометрическими параметрами и механическими свойствами прядей (.....) и с учетом их неравномерности (—■—)

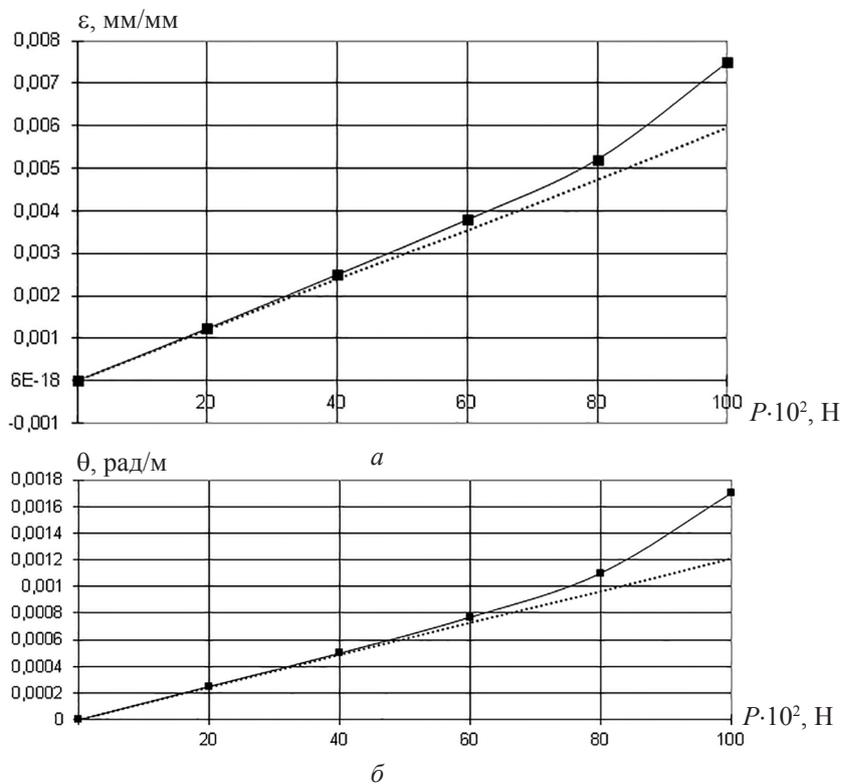


Рис. 5. Влияние натяжения на деформацию растяжения (а) и кручения (б) для многопрядных канатов диаметром 4 мм: с равномерными геометрическими параметрами и механическими свойствами прядей (.....) и с учетом их неравномерности (—■—)

Исследование напряженно-деформированного состояния канатов (см. рис. 2–5) показывает, что деформации растяжения и кручения при приложении нагрузки к канату, изготовленному с учетом различия геометрических параметров и механических свойств винтовых элементов, в среднем в 1,5 раза больше деформаций, возникающих в канатах с одинаковыми геометрическими параметрами и механическими свойствами винтовых элементов. Причем в канатах с неравномерными геометрическими параметрами и различными механическими свойствами винтовых элементов острее проявляется нелинейность деформаций.

Заключение

На основании выполненных экспериментальных исследований подтверждены существующие закономерности влияния конструктивных параметров подъемных канатов на их прочностные характеристики. Это позволяет обосновать оптимальную неравномерность геометрических параметров канатов и различие механических свойств винтовых элементов при нелинейных зависимостях, обеспечивающие повышение надежности и долговечности подъемных канатов, что имеет большое практическое значение для строительной отрасли России.

Список литературы

1. *Stiepanov A., Koskin A.* A few words more on the properties of viscoelastic winding ropes // *Minine hoisting '96. Vol. 2: International Scientific and Technical Conference; 8–10 October 1996, Gliwice, Poland.* P. 65–68.
2. *Глушко М.Ф.* Стальные подъемные канаты. – Киев: Техника, 1966. – 327 с.
3. *Хальфин М.Н., Гуревич А.Б., Иванов Б.Ф.* Исследование деформаций шахтных канатов в условиях эксплуатации // *Новочерк. политехн. ин-т. – Новочеркасск, 1990.* – 8 с.
4. *Мусихин В.А.* Расчет и конструирование стальных спиральных канатов, используемых в качестве предварительно напряженной арматуры железобетонных конструкций: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 2003. – 206 с.
5. Основы технологии, расчеты и механическое оборудование для производства стальных канатов: учеб. пособие / *В.Д. Королев, И.И. Боков, Л.Е. Кандауров, Л.Г. Утяганов.* Магнитогорск: МГМА, 1997. – 171 с.
6. *Букштейн М.А.* Производство и использование стальных канатов. М.: Metallurgy, 1973. – 360 с.
7. *Козлов В.Т.* К вопросу упругой отдачи стальных канатов // *Стальные канаты.* 1964. Вып. 1. С. 144–151.
8. *Шигарина Л.И.* Экспериментальные исследования упругих характеристик канатов // *Прочность долговечность стальных канатов:* сб. тр. 1981. С. 183–189.
9. *Рыжиков В.А.* Исследование канатов с неравномерным технологическим натяжением прядей при свивке // *Грузоподъемные и погрузочные машины.* Новочеркасск: НПИ. 1985. С. 94–96.
10. *Чумаков А.С., Мереняшев М.И., Габрюк В.И.* Механические характеристики стальных канатов // *Рыбное хозяйство.* 1976. № 1. С. 44–46.
11. *Ксюнин Г.П., Хальфин М.Н., Рыжиков В.А.* Влияние равномерности технологического натяжения на прочность // *Известия СКНЦ ВШ.* 1984. № 1. С. 12–19.
12. *Шигарина Л.И.* Экспериментальные исследования упругих характеристик канатов // *Прочность долговечность стальных канатов:* сб. тр. 1981. С. 183–189.
13. *Гуревич А.Б.* Повышение технического ресурса шахтных канатов с металлическим сердечником и методы оценки их надежности: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Орджоникидзе, 1988. – 16 с.
14. *Хальфин М.Н., Гуревич А.Б., Иванов Б.Ф.* Исследование деформаций шахтных канатов в условиях эксплуатации. Новочеркасск: Новочерк. политехн. ин-т, 1990. – 8 с.
15. *Хальфин М.Н.* Определение напряжений, возникающих в проволоках при изгибе каната // *Подъемно-транспортное оборудование.* 1985. № 16. С. 64–68.
16. *Поляков С.В.* Уравнение нелинейной статки каната двойной свивки с учетом волнистости // *Новые технологии управления движением технических объектов:* матер. 8 Междунар. науч.-техн. конф., г. Новочеркасск, 14 декабря 2005 г. Ростов-н/Д.: Изд-во СКНЦ ВШ, 2006. – Вып. 6. С. 83–88.
17. *Поляков С.В.* Уравнение нелинейной статки каната спирального каната с учетом волнистости // *Новые технологии управления движением технических объектов:* материалы 8 Междунар. науч.-техн. конф., г. Новочеркасск, 14 декабря 2005 г. Ро-

стов-н/Д: Изд-во СКНЦВШ, 2006. – Вып. 6. – С. 88–91.

18. Поляков С.В. Исследование подъемного каната с возникшими изменениями геометрических параметров и механиче-

ских свойств винтовых элементов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-257-264. 2019. № 2. С. 257–264.

**ПОЛЯКОВ
Сергей Владимирович**

E-mail: 555ots@mail.ru
Тел.: 921-835-19-57

Аспирант кафедры наземных транспортно-технологических машин Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета. Сфера научных интересов: конструирование подъемных стальных канатов. Автор более 15 научных статей, монографии, двух учебных пособий и патента на изобретение.

**ПУШКАРЕВ
Александр Евгеньевич**

E-mail: pushkarev-agn@mail.ru
Тел.: (921) 630-52-28

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры наземных транспортно-технологических машин Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета. Сфера научных интересов: исследования в сфере горных машин и комплексов. Автор более 20 научных статей, трех монографий, пяти учебных пособий.