

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ БАШЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ И ИХ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ПРИМЕРЕ БАШНИ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Сабитов Линар Салихзанович ^{1,2}

¹заведующий кафедрой «Энергобезопасность», Казанский (Приволжский) федеральный университет (Казань, Россия),

²доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающие технологии», Казанский государственный энергетический университет (Казань, Россия);
e-mail: l.sabitov@bk.ru

Маилян Левон Рафаэлович ³.

³Доктор техн. наук, член-корреспондент Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), профессор, профессор кафедры автомобильных дорог, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростовна-Дону, Россия); e-mail: mailyan@sroufo.ru

Аннотация: В данной статье рассматриваются новые эффективные конструкции башенных сооружений (опоры линий электропередачи (ЛЭП), опора ветроэлектрических установок (ВЭУ) и т.д.), на которые получены патенты РФ на изобретения. Приводятся методы их расчеты в программном комплексе ANSYS с целью определения напряженно-деформированного состояния (НДС) и определения их действительной работы. Применение новых технических решений при строительстве башен ВЭУ позволит сократить материалоемкость на 15%.

Ключевые слова: башня ВЭУ, сооружение башенного типа, опора линии электропередачи, метод конечных элементов, компьютерное моделирование, теория прочности по Мизесу

IMPROVEMENT OF CONSTRUCTIONS OF TOWER STRUCTURES AND THEIR NUMERICAL SIMULATION ON THE EXAMPLE OF A TOWER OF A WIND POWER PLANT

Sabitov Linar Salikhzanovich

the head of the Department «Energy Security» Kazan (Volga Region) Federal University
(Kazan, Russia);

associate professor of the Department «Energy Supply of Enterprises and Energy-saving
Technologies» Kazan State Power Engineering University (Kazan, Russia);

e-mail: l.sabitov@bk.ru

Mailyan Levon Rafailovich ³.

³Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of Russian Academy of
Architecture and Construction Sciences, Professor, Department of Highways, Don State
Technical University, Rostov-on-Don, Russia; e-mail: mailyan@sroufo.ru

Abstract: This article discusses new effective structures of tower structures (supports for power transmission lines (PTL), support for wind power plants (WPP), etc.), for which RF patents for inventions have been obtained. Methods of their calculations in the ANSYS software package are given in order to determine the stress-strain state (SSS) and determine their actual work. The

use of new technical solutions in the construction of wind turbine towers will reduce material consumption by 15%.

Keywords: wind turbine tower, tower-type structure, transmission line support, finite element method, computer simulation, von Mises strength theory

При строительстве конструкций башенных сооружений используются в основном три типа технических решений: а) решетчатые, б) сплошнотнечатые, б) комбинированные [1]. Для каждого типа решений есть область оптимального применения по критерию минимума массы [2]. В данной статье рассмотрим конструкцию башни сплошнотнечатую с новыми техническими решениями представленные на рис. 1 [2, 3].

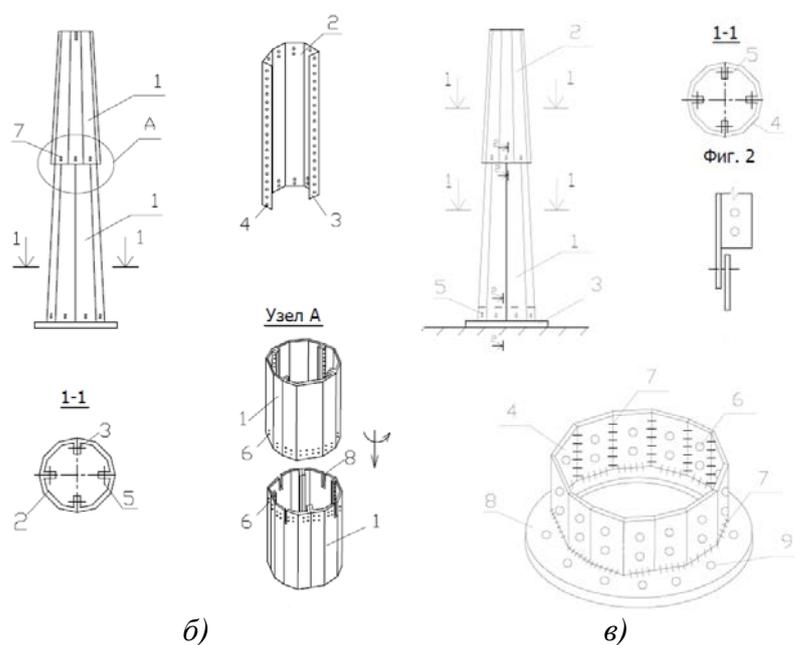


Рис. 1. Конструкция башни ветроэлектрической установки а) общий вид ВЭУ Acciona AW-82-1500 класса IEC III; б) новая конструкция телескопического стыка (патент РФ № 2743116); новая конструкция базы (патент РФ № 2743980)

Объектом исследования является реальная башня ВЭУ Acciona AW-82-1500 класса IEC III применённая при строительстве Адыгейской ветроэлектрической станции (ВЭС). Общий вид ветроэлектрической установки представлен на рис. 1, а.

Характеристики рассматриваемой ВЭУ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики ветроэлектрической установки Acciona AW-82-1500 класса IEC III Адыгейской ветроэлектрической станции

№, п/п	Наименование	Значение
1	Установленная мощность, <i>МВт</i>	1.5
2	Ометаемая площадь, <i>м²</i>	5345
3	Количество лопастей, <i>шт.</i>	3
4	Диаметр ветроколеса, <i>м</i>	82
5	Длина одной лопасти, <i>м</i>	39
6	Масса одной лопасти, <i>кг</i>	5780
7	Масса ротора, <i>кг</i>	32340
8	Масса гондолы, <i>кг</i>	52500
9	Высота башни до оси ступицы, <i>м</i>	80
10	Радиус ступицы, <i>м</i>	3.3

Башня – трёх-секционная тонкостенная стержень-оболочка; толщина стенки нижней секции – $t_1=30$ мм, средней – $t_1=25$ мм и верхней – $t_1=15$ мм, башня имеет диаметр сечения по внешнему периметру внизу – $D_1=4.3$ м, наверху – $D_2=2.6$ м. Материал конструкции – сталь С355. Для учета физической нелинейности использована модель билинейного кинематического упрочнения (Bilinear Kinematic Hardening), представленной на рис. 2. Поверхность текучести описывается критерием Вон-Мизеса и представляет из себя цилиндр, ось которого совпадает с осью гидростатического сжатия в осях главных напряжений (рис. 3).

Расчетная модель представлена трехсекционным стержневым конечным элементом КЭ-410 переменной жесткости. Ветроколесо, ротор и гондола замоделированы в виде сосредоточенной массы в верхней точке башни. Узел сопряжения башни и фундамента – жесткий. Расчет выполнен как на основное сочетание нагрузок, так и на особое. Согласно отчету о микросейсмическом районировании, сейсмичность площадки строительства – 8 баллов по шкале MSK-64. Сейсмическое воздействие уровня «Максимальное расчетное землетрясение» представлено однокомпонентной акселерограммы (рис. 4).

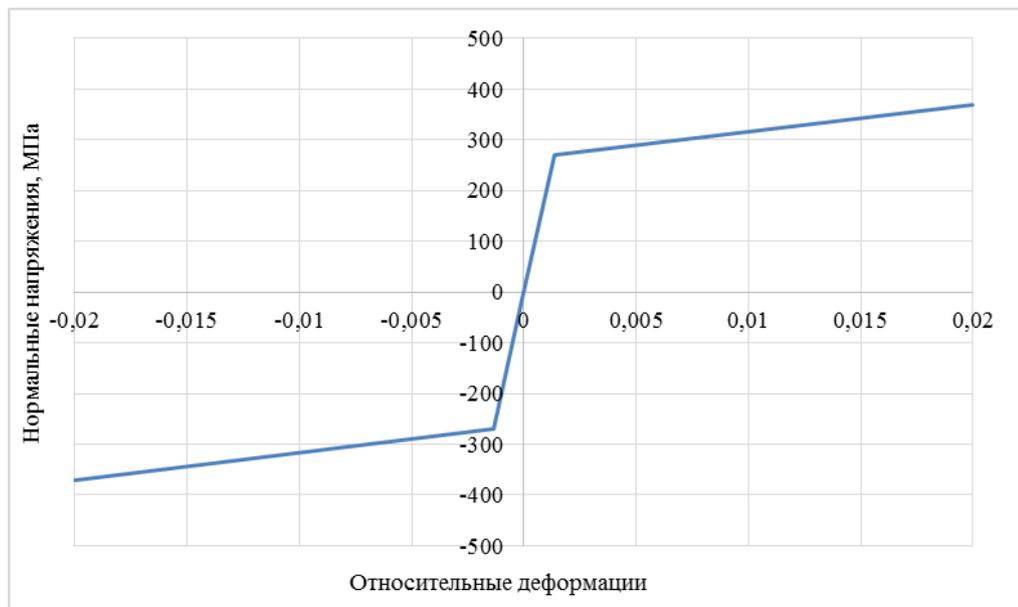


Рис. 2. Билинейная диаграмма деформирования стали

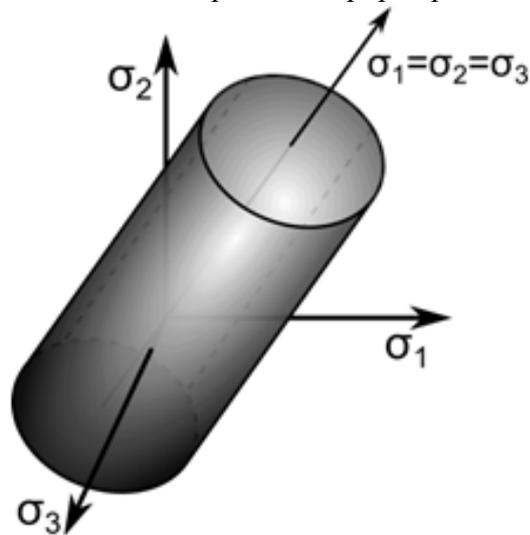


Рис. 3. Поверхность текучести по критерию Вон-Мизеса в осях главных напряжений

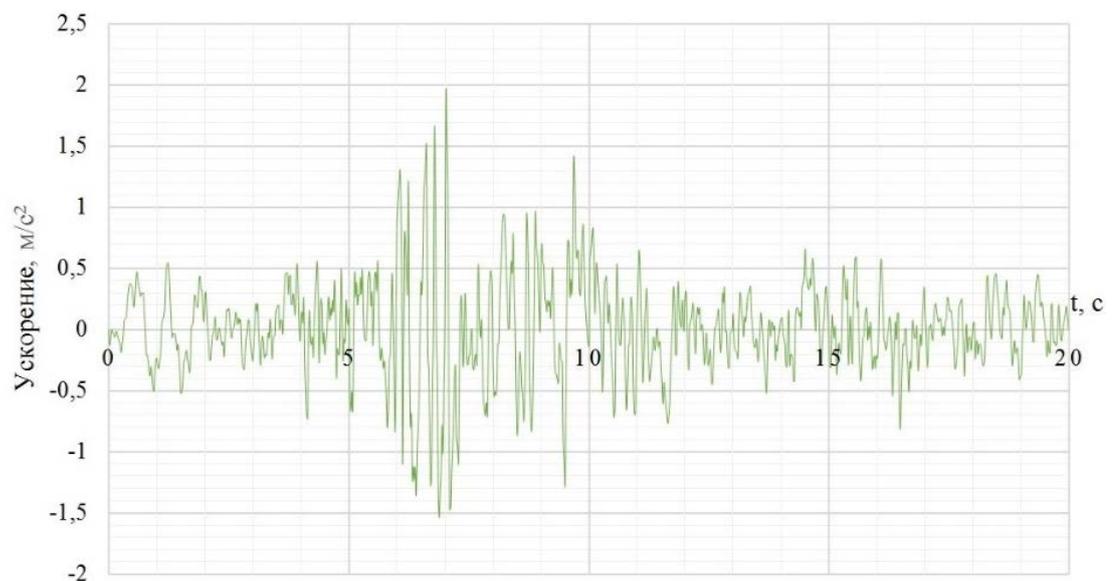


Рис. 4. Однокомпонентная акселерограмма сейсмического воздействия

Пространственный характер сейсмического воздействия в расчете не учитывался ввиду использования симметричного сечения. Опорный узел и телескопический узел стыка за моделированы при помощи пластинчатых конечных элементов КЭ-42, 44. Фундаментные болты замоделированы одноузловым конечными элементами упругой связи КЭ-56, а болты телескопического стыка с использованием универсального стержневого конечного элемента КЭ-10. Передача внутренних усилий с стержневых конечных элементов на модели узлов осуществляется за счет абсолютно твердых тел. Общие виды узлов представлены на рис. 5, 6.

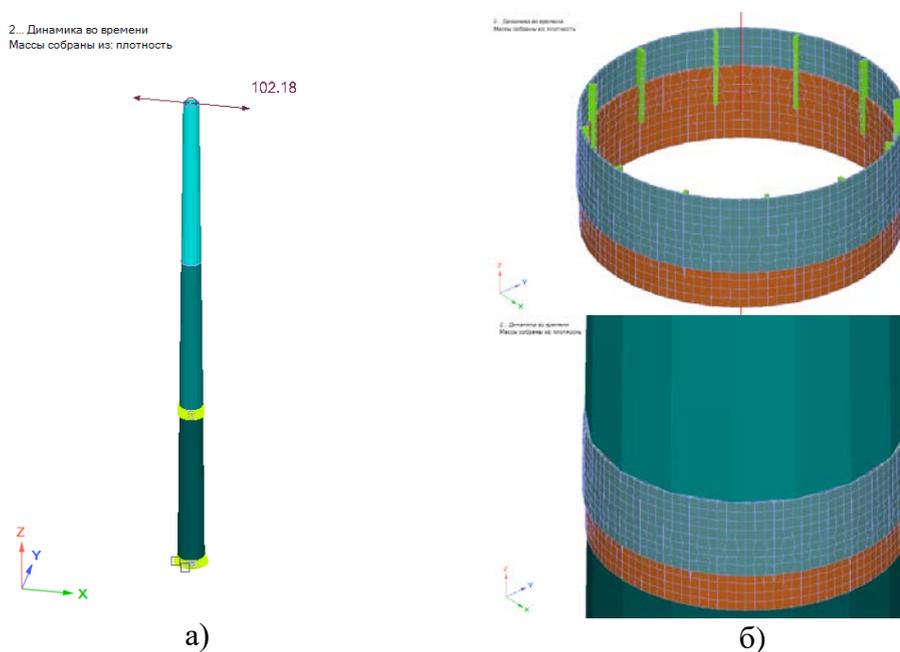
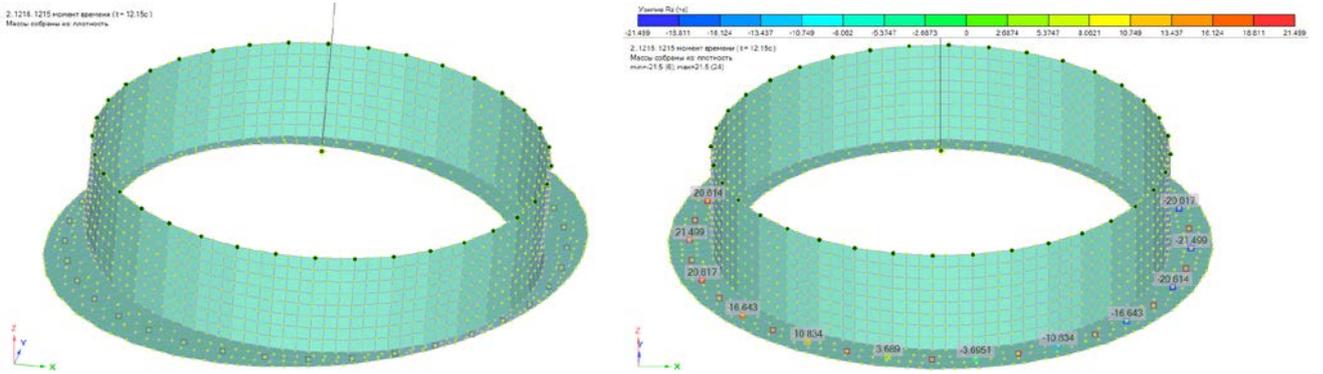


Рис. 5. Расчетная модель ветроэлектрической установки а) общий вид модели; б) общий вид телескопического стыка.

Общие результаты расчета для опорного узла приведены на рис. 7. Дополнительно на рис. 8 представлены графики внутренних усилий в фундаментных болтах в период сейсмического воздействия.



а) б)

Рис. 6. База башины ВЭУ а) деформированный вид опорного узла; б) мозаика продольных усилий в КЭ-56, моделирующих фундаментные болты

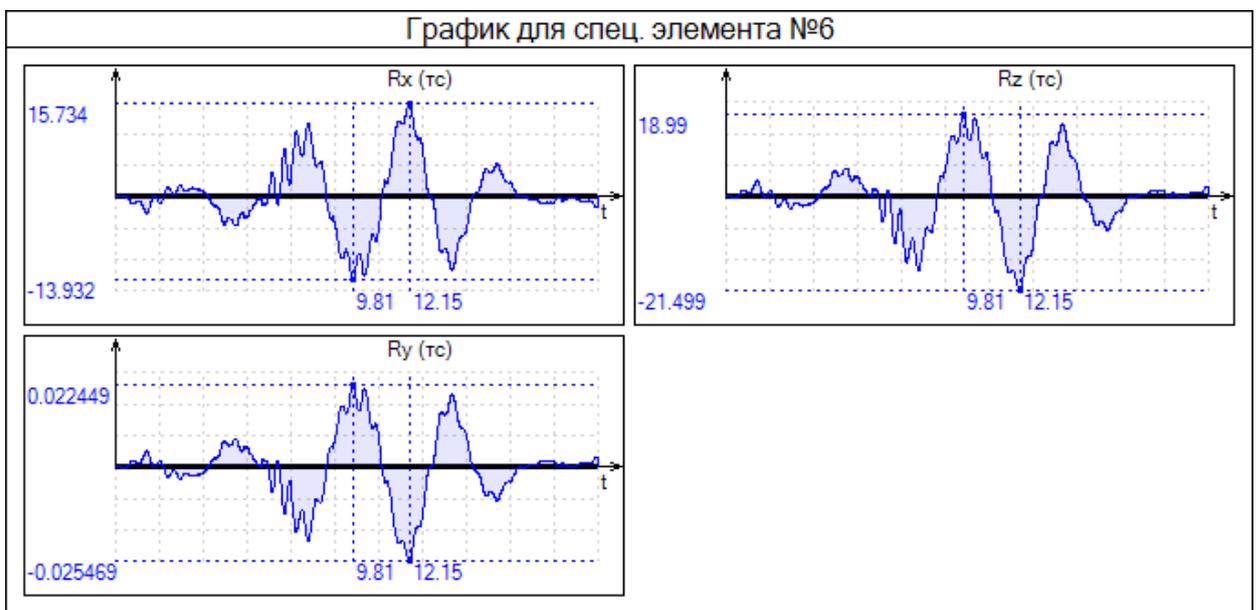


Рис. 7. Графики внутренних усилий в фундаментных болтах в период сейсмического воздействия.

Для иллюстрации полученных результатов на рис. 8-11 приведены распределения интенсивности напряжений по Мизесу для варианта расчета от особого сочетания. Интенсивность напряжений по Мизесу вычисляется по

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)}.$$

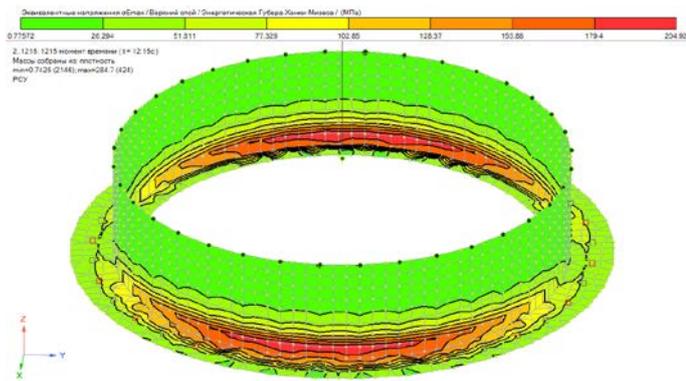


Рис. 8. Изополя эквивалентных напряжений Вон Мизеса по верхней грани пластинчатых конечных элементов опорного узла

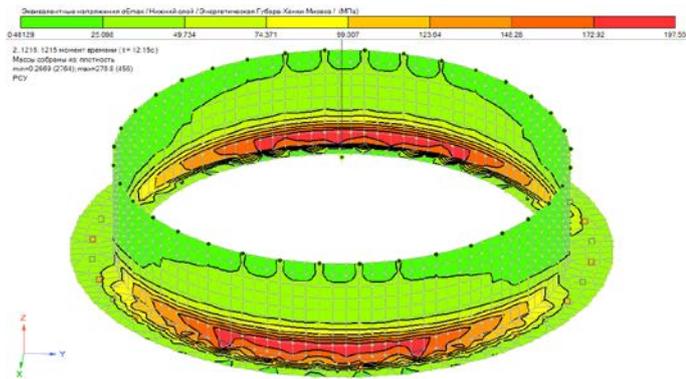


Рис. 9. Изополя эквивалентных напряжений Вон Мизеса по нижней грани пластинчатых конечных элементов опорного узла

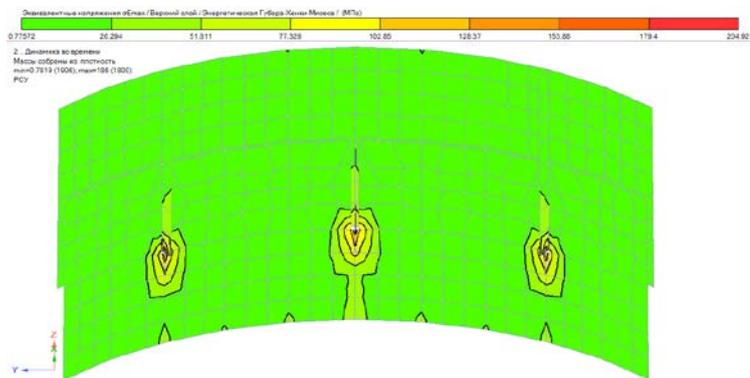


Рис. 10. Изополя эквивалентных напряжений Вон Мизеса по верхней грани пластинчатых конечных элементов телескопического узла стыка

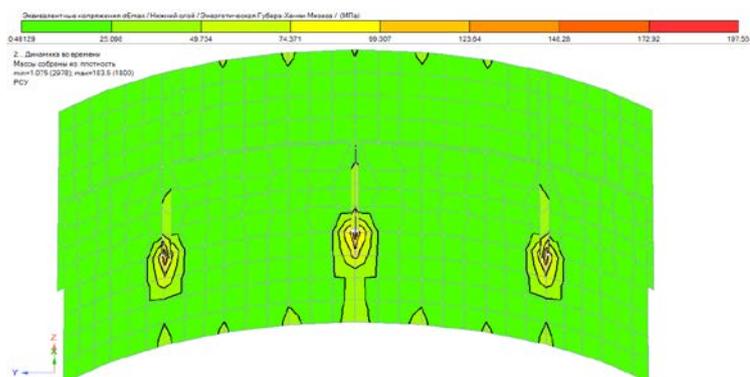


Рис. 11. Изополя эквивалентных напряжений Вон Мизеса по нижней грани пластинчатых конечных элементов телескопического узла стыка

Выводы:

1. Предложены новые эффективные конструкции башенных сооружений, новизна которой подтверждается патентами РФ.
2. Анализ расчетов конструкций применительно к башне ВЭУ Acciona AW-82-1500 класса IЕС IIIВ показал, что применения новых технических решений позволяет уменьшить материалоемкость на 15%.

Литература

1. Кузнецов И.Л., Сабитов Л.С., Исаев А.В. КОНСТРУКЦИИ С СОЕДИНЕНИЯМИ СТАЛЬНЫХ ТРУБ РАЗНОГО ДИАМЕТРА монография М-во образования и науки Российской Федерации, Казанский гос. архитектурно-строительный ун-т. Казань, 2012.
2. Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л., Пеньковцев С.А. ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО ТИПА ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ОПОР Приволжский научный журнал. 2014. № 4 (32). С. 90-94.
3. Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л., Зиганшин А.Д., Киямов И.К., Ахтямова Л.Ш., Кабирова Г.И., Маилян А.Л., Языев С.Б. Опора из секций многогранного сечения Патент на изобретение RU 2743116, заявка №2020128337 от 24.08.2020
4. Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л., Зиганшин А.Д., Киямов И.К., Ахтямова Л.Ш., Кабирова Г.И., Хайретдинов С.Р., Языев Б.М. Опора из многогранных секций Патент на изобретение RU 2743980, заявка №2020128338 от 24.08.2020
5. Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л., Богданович А.У. Напряженно-деформированное состояние слабokonичного стержня переменного сечения Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 7 (90). С. 71-77.

6. Кузнецов И.Л., Исаев А.В., Сабитов Л.С. УЗЕЛ СОЕДИНЕНИЯ ТРУБ Патент на изобретение RU 2288399 С8, 27.11.2006. Заявка № 2005111480/06 от 07.04.2005.

7. Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л., Гатиятов И.З. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УЗЛОВ СОЕДИНЕНИЯ ТРУБ РАЗНОГО ДИАМЕТРА В ОПОРАХ КОНТАКТНЫХ СЕТЕЙ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА Вестник гражданских инженеров. 2014. № 6 (47). С. 90-95.

8. Маилян Л.Р., Зубрицкий М.А., Ушаков О.Ю., Сабитов Л.С. РАСЧЕТ ВЫСОТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ УРОВНЯ «КОНТРОЛЬНОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ» НЕЛИНЕЙНЫМ СТАТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ НА ПРИМЕРЕ АДЫГЕЙСКОЙ ВЭС Строительные материалы и изделия. 2020. Т. 3. № 1. С. 14-20.

9. Стрелков Ю.М., Радайкин О.В., Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л. Сравнительный анализ статической работы различных типов стальных опор линий электропередач на основе компьютерного моделирования системы "опора - фундамент - грунт основания" Строительная механика и расчет сооружений. 2019. № 1 (282). С. 71-79.

10. Гатиятов И.З., Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л. Анализ результатов, полученных при механических испытаниях фрагментов опор электрического транспорта. В сборнике: Эффективные строительные конструкции: теория и практика сборник статей XIV Международной научно-технической конференции. Под редакцией Н.Н. Ласькова. 2014. С. 42-45.