

НАУЧНО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОЗДАНИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ БАШЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ

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

Аннотация:

В соответствии с указом Президента Российской Федерации № 899 от 7 июля 2011 г. в нашей стране утверждён перечень критических технологий, среди которых значатся «технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии» [1]. В первую очередь речь здесь идёт об электрической энергии, а в составе указанных систем можно выделить не только электротехническую часть, но и составляющую, связанную с возведением строительной инфраструктуры. Для развития экономики по рассматриваемому технологическому направлению необходимо соответствующее научно-методологическое обеспечение, кадры, освоившие это обеспечение, далее следует формирование новых или использование существующих соответствующих организационных структур в министерствах строительства и энергетики, в проектно-деловом и на производстве, а в конечном счёте всё перечисленное следует закрепить на уровне законов и стандартов. Место исследований автора в данной стратегии развития – это разработка научно-методологического обеспечения создания башенных сооружений для сферы энергетики.

Промежуточным итогом этих исследований является монография [2]. Последующее развитие тема получила в статьях [3-16].

Ключевые слова:

Конструкции башенных сооружений, опора линии электропередачи (ЛЭП), башня ветроэлектрической установки (ВЭУ), прочность и деформативность конструкций.

SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL SUPPORT OF CREATION AND IMPROVEMENT OF TOWER STRUCTURES

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

Abstract:

In accordance with the decree of the President of the Russian Federation No. 899 of July 7, 2011, a list of critical technologies has been approved in our country, among which there are “technologies for creating energy-saving systems for the transportation, distribution and use of energy” [1]. First of all, we are talking here about electrical energy, and in the composition of these systems it is possible to distinguish not only the electrical part, but also the component associated with the construction of construction infrastructure. For the development of the economy in the technological area under consideration, appropriate scientific and methodological support is necessary, personnel who have mastered this support, then the formation of new or the use of existing relevant organizational structures in the ministries of construction and energy, in the design

business and in production, and ultimately all of the above follows consolidate at the level of laws and standards. The place of the author's research in this development strategy is the development of scientific and methodological support for the creation of tower structures for the energy sector.

The intermediate result of these studies is the monograph [2]. The topic was further developed in articles [3-16].

Keywords:

Tower structures, power line support, wind turbine tower, strength and deformability of structures.

Под научно-методологическим обеспечением будем понимать совокупность теорий, гипотез, моделей, методов, методик и экспериментальной и нормативной базы, выстроенных в логически непротиворечивую взаимосвязанную структуру, позволяющую создавать, внедрять в производство и эксплуатировать новую более совершенную продукцию. В нашем случае – башенные сооружения для сферы энергетики. Такое понимание вопроса подразумевает наличие определённой последовательности действий, началом которой служат фундаментальные исследования, а окончанием – использование результатов этой последовательности в виде массовой продукции для широкого потребления. Этапами последовательности могут служить прикладные исследования, опытно-конструкторские разработки, создание технических и технологических регламентов, прочих нормативных документов и т.д.

Традиционным подходом к проектированию конструкций башенных сооружений является разделенное рассмотрение его элементов и решение для каждого из них некоторой совокупности частных инженерных задач.

В отличие от этого подхода основополагающим принципом предлагаемого научно-методологического обеспечения служит совместное рассмотрение башенного сооружения, как целостной системы, в виде ствола (стального либо железобетонного), дающего наиболее общее представление о сооружении, фундамента (обычно железобетонного), грунта основания, всевозможных стыковочных узлов, создаваемых с учётом условий их работы под нагрузкой и назначения, а также несущих элементов электротехнической части – проводов, подвесов и т.п. На примере опоры ЛЭП перечисленные конструкции башенного сооружения проиллюстрированы на рис. 1.

Тем не менее основные положения традиционного подхода при таком рассмотрении сохраняются в виде начального приближения для определения оптимальных конструктивных параметров сооружения и для этого в ранее опубликованных работах автора было разработано:

1 – для сплошностенчатого ствола сооружения – поз. 3,5 (рис. 1,а) – расчётная сдвиговая модель и математический аппарат отыскания напряженно-деформированного состояния (НДС) на основе усовершенствования теории А.А. Уманского, на основе чего

далее получена инженерная методика расчёта усилий и напряжений, которая реализована в ПК «AutoRSS.02» [4];

2 – для опорного узла – поз. 2 (рис. 1) – предложено заменить опорные рёбра из пластин специальной конической вставкой оптимальной формы (получен патент [3]), эффективность которой обоснована расчётом, на основе чего далее получена инженерная методика расчёта усилий и напряжений, которая реализована в ПК «AutoRSS.03» [5]; кроме того, для случая фланцевого стыка предложена расчётная модель рёбра жёсткости и математический аппарат отыскания её НДС;

3 – для стыковочного узла двух труб разного диаметра – поз. 4 (рис. 1) – предложены новые решения в виде стыка «труба в трубе», расчётная модель и математический аппарат отыскания НДС такого стыка, а на основе этого разработана инженерная методика расчёта усилий и напряжений в нём, которая реализована в ПК «AutoRSS.01» [6];

4 – для стыковочного узла проводов с мачтой опоры ЛЭП – поз. 9 (рис. 1) – предложена расчётная модель стыка, на основе которой получена оптимальная форма переходного элемента между проводом и изолятором (получен патент [7]), а далее разработана инженерная методика расчёта усилий и напряжений в стыке, которая реализована в ПК «AutoRSS.04» [8];

5 – для фундамента – поз 1 (предложен сборно-разборный фундамент с высокими эксплуатационными характеристиками (получен патент), в последующих главах на основе компьютерного моделирования изучена его совместная работа со стальной опорой).

На первом этапе создания авторского подхода была рассмотрена исследовательская задача о совместной работе стальной стойки-опоры и сборного железобетонного фундамента (получен патент [9]) экспериментальным методом и с применением математического МКЭ-моделирования [4].

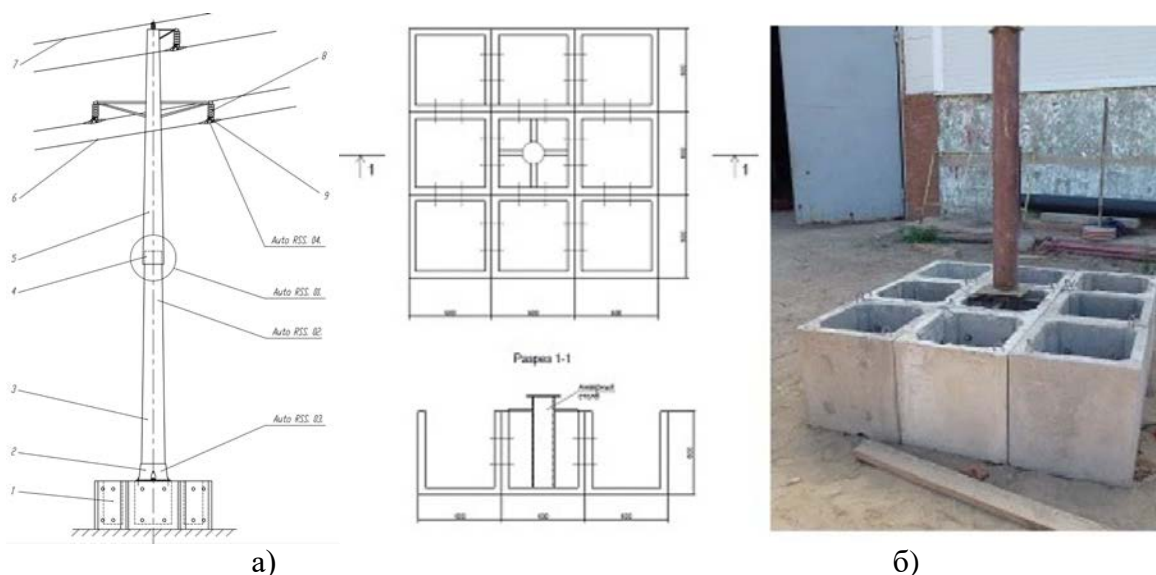


Рис. 1. Информационная схема исследований башенного сооружения: а) опора ЛЭП (1 – фундамент; 2 – опорный узел; 3 – нижняя часть ствола – трубчатый стержень большего диаметра; 4 – стык трубчатых стержней разного диаметра; 5 – верхняя часть ствола – трубчатый стержень меньшего диаметра; 6, 7 – токоведущие провода, выполняющие силовую несущую функцию; 8 – изолятор; 9 – узел крепления проводов к изолятору); б) общие схема и вид системы «стойка опоры-фундамент-грунт основания»

Экспериментальные и теоретические исследования системы (рис. 1,б) показали, что её предельное состояние наступает одновременно из-за потери прочности опорной стойки (в виде появления остаточных пластических деформаций) и грунта основания. При этом разрушение бетонных элементов ячеек и их соединений не зафиксировано. Так же установлено, что совместная работа стойки с фундаментом обеспечивается. Податливость сопряжения призм, из которых состоит фундамент, не оказала существенного влияния на НДС системы в целом. Исходя из перечисленного, рекомендуется новый тип сборно-разборных фундаментов [9] применять в реальных условиях при строительстве башен сотовой связи РМГ-30.

На следующем этапе исследований, по всей видимости, впервые, совместное рассмотрение башенного сооружения, как целостной системы, было проведено в форме компьютерного моделирования в работе [10]. В ней в качестве ствола рассматривается многогранная стальная опора ЛЭП на 10 кВ по серии 3.407.2-181.09 (рис. 2).

Фундамент так же является сборно-разборным, но выполняется согласно другому патенту [9] (рис. 2,в). В отличие от предыдущего варианта он состоит из бетонных призм не с квадратным, а треугольным основанием.

Суть методики моделирования рассматриваемой системы состояла в следующем:

- 1 – определение нагрузок на конструкции (на основе положений СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия» и ПУЭ-7);
- 2 – статический расчет стальной опоры отдельно, как жёстко заделанной консольной стойки полого сечения (в результате этого определяется нагрузка на обрез фундамента);
- 3 – определение размеров подошвы фундамента исходя из нагрузки на него;
- 4 – моделирование единой системы «опора-фундамент-грунт», определение в ней НДС;
- 5 – проверка элементов системы по прочности, устойчивости и деформативности (соответственно по 1-й и 2-й группам предельных состояний).

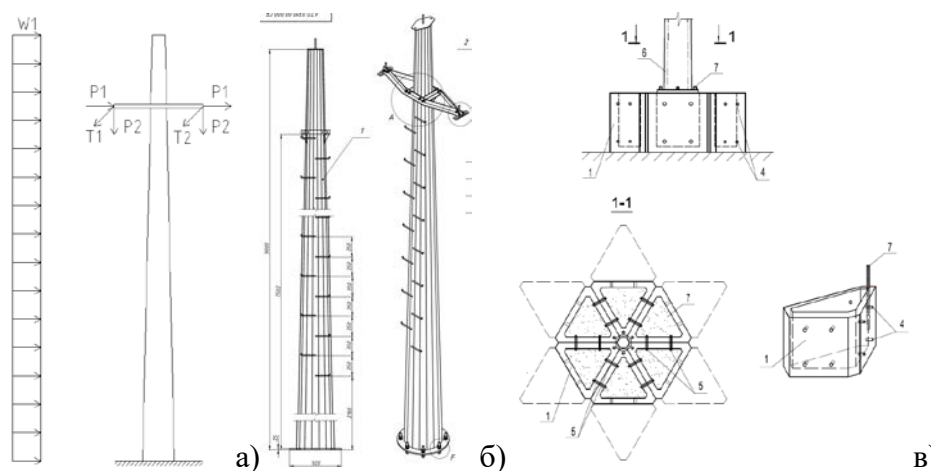


Рис. 2. Опора СМ-10АУ: а – расчётная схема; б – общий вид, в - сборно-разборный фундамент

Система «опора-фундамент-грунт» включает в себя элементы, образованные из материалов с качественно и количественно отличающимися физико-механическими свойствами. Для их моделирования были использованы соответствующие типы конечных элементов и законы деформирования в ПК «Ansys». Их перечень представлен в табл. 1.

Таблица 1

К построению конечно-элементной модели

Параметр КЭ-модели	Стальная опора	Железобетонный фундамент	Грунт основания
Геометрические размеры	В сечении 16-ти угольная труба переменного сечения (Ø676 – Ø282) длиной 9 м	Правильный шестигранник в плане со стороной 1,8 м, высотой 0,6 м, состоящий из призм с основанием в виде правильного треугольника со стороной 0,6 м.	Массив 10x10x10 м
Тип конечного элемента	Shell 181	Solid 65	Solid 45
Закон деформирования	Двухлинейная диаграмма, кинематическое упрочнение с эффектом Баушенгера	Криволинейная диаграмма Карпенко-Радайкина [3]	Определяется теорией прочности
Теория прочности	Мизеса	Вильяма-Варнаке	Друккера-Прагера

Развитием проведённых исследований стал сравнительный анализ статической работы различных типов стальных опор линий электропередач на основе компьютерного моделирования системы «опора-фундамент-грунт основания [11]. Были рассмотрены два конструктивных типа стальных опор ЛЭП: в виде стержней-оболочек замкнутого профиля с переменной по высоте толщиной стенки и в виде решетчатой трёхгранной конструкции, изготавливаемой по патенту [12]. При этом оба типа опор рассматривались для трёх разных высот – под линии электропередач на 10 кВ – высотой 9-11 м, 35 кВ – высотой 20,6 м и 110

кВ – высотой 22,5 м соответственно. Таким образом, всего рассмотрено восемь вариантов опор. Общий вид перечисленных опор представлен на рис. 3.

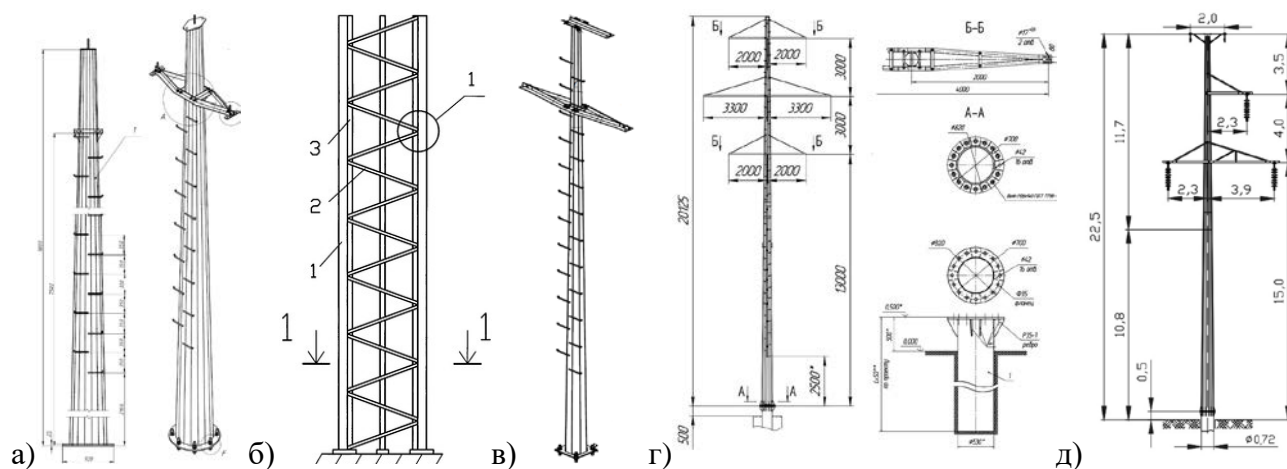


Рис. 3. Типы моделируемых конструкций опор ЛЭП: а) опора анкерно-угловая марки СМ10АУ; б) трёхранняя решётчатая опора марок СТР10АУ, СТР10П, СТР35П, СТР110П; в) опора двухцепная промежуточная марки ПМ35-2ф; г) опора одноцепная промежуточная марки ПМ110-3ФТ

Далее приведены результаты компьютерного моделирования на примере опор ОП-1 и ОП-2. Общий вид КЭ-моделей показан на рис. 4,5.

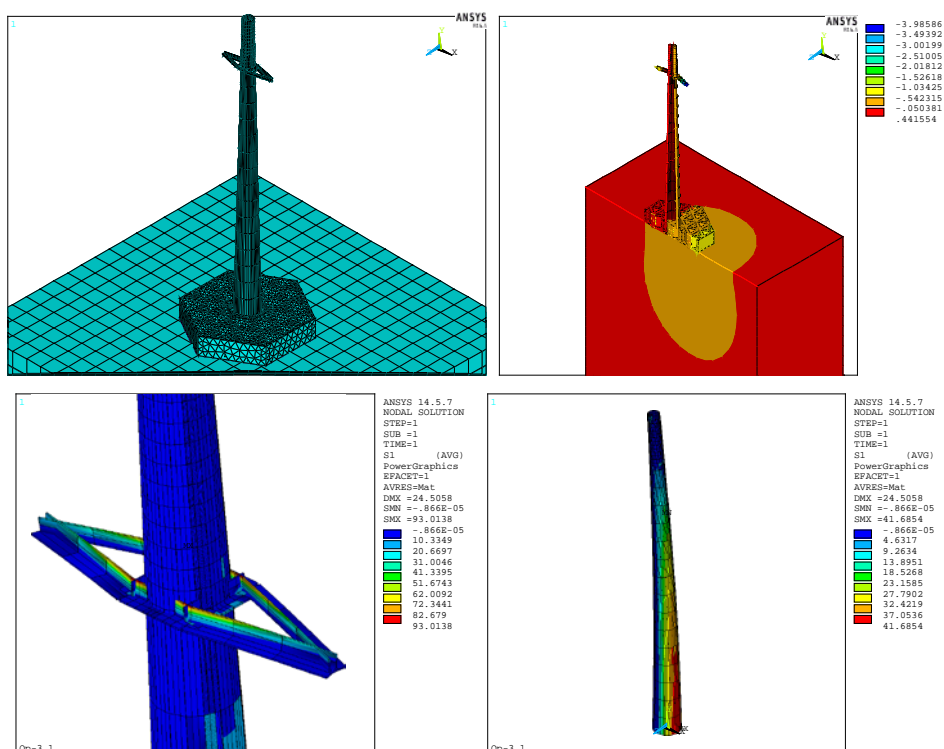


Рис. 4. Оценка НДС системы «опора-фундамент-грунт» тип ОП-1

Анализ НДС показывает, что прочность и устойчивость конструкций сплошнотенчатых и решетчатых сечений обеспечивается. Соответствующие коэффициенты использования получились близкими – 0,912 и 0,837. Несмотря на это, опора ОП-1

(сплошностенчатая) имеет значительные недоиспользованные резервы прочности в сравнении с порой ОП-2 (решетчатая). Следовательно, в решётчатой конструкции усилия распределяются более равномерно и поэтому обоснованно следует ожидать заметную экономию металла за счёт применения данного конструктивного решения для возведения башенных конструкций, особенно для больших высот (свыше 20 м). Результаты определения эквивалентных напряжений в рассматриваемых опорах показаны на рис. 4 (ОП-1) и рис.5 (ОП-2).

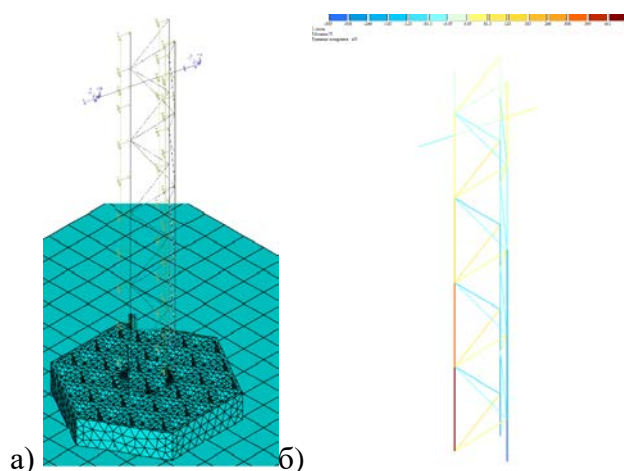


Рис. 5. Конечно-элементная модель системы «опора-фундамент-грунт»: а) для опоры ОП-2; б) результаты Эп. Мх, кН

В дальнейших публикациях планируется осветить результаты моделирования НДС опор всех серий, на основе этого определить рациональную область применения трёхгранных решётчатых опор [12], а также получить инженерную методику их расчёта и конструирования.

Не менее сложной задачей, чем исследование систем с опорами ЛЭП, является вопрос разработке методик проектирования башен ВЭУ. Этому посвящены наши публикации [13-16].

В этих статьях рассматривается совместная статическая работа элементов строительной системы «комбинированная башня – железобетонный фундамент – грунт основания» на примере ВЭУ. При этом под комбинированной башней в статье понимается высотное сооружение, состоящее из двух частей: нижней – трубобетонной, верхней – в виде тонкостенного стержня-оболочки замкнутого профиля. В обоих случаях в качестве оболочки выступает труба со слабой конусностью. Анализ литературы показал, что целостная методика расчёта такой системы на данный момент отсутствует. А при её разработке наиболее полно следует учесть следующие факторы:

- физическую нелинейность свойств материалов;
- геометрическую нелинейность элементов системы (лопастей и др.);
- циклическую усталость материалов – стали и бетона;

- динамические эффекты;
- резонансные явления;
- трение между бетоном и стальной оболочкой, а также между бетоном и грунтом.

Аналитически описать влияние всех перечисленных факторов полностью пока невозможно, что отражено в существующих нормах на проектирование ВЭУ [17,18] и учебно-методической литературе [19]. Однако для этого можно воспользоваться мощным инструментом – компьютерным моделированием в ПК «Ansys». В статье [11] этот инструмент уже был нами применён для исследования совместной работы системы «стальная опора линий электропередач – фундамент – грунт основания». При этом в отличие от неё в рассматриваемой здесь системе учтены следующие особенности:

- ветровая нагрузка на ометаемую поверхностей вращающихся лопастей, важной характеристикой которой является уже не давление, а скорость ветрового потока;
- наличие бетона в нижней части башни;
- силы трения между стальной оболочкой и бетонным ядром.

Последнее два обстоятельства превращают нижнюю часть ствола башни в так называемую труботетонную конструкцию, которая благодаря ряду преимуществ [20,21] существенно увеличивает эксплуатационные свойства ВЭУ, включая прочность, надёжность и долговечность. Использовать труботетон в составе комбинированной башни ВЭУ, по всей видимости, автором предлагается впервые.

В качестве примера рассмотрим ВЭУ Acciona AW-82/1500 класса IEC III на 1,5-2 МВт из [22,23] – рис. 6.

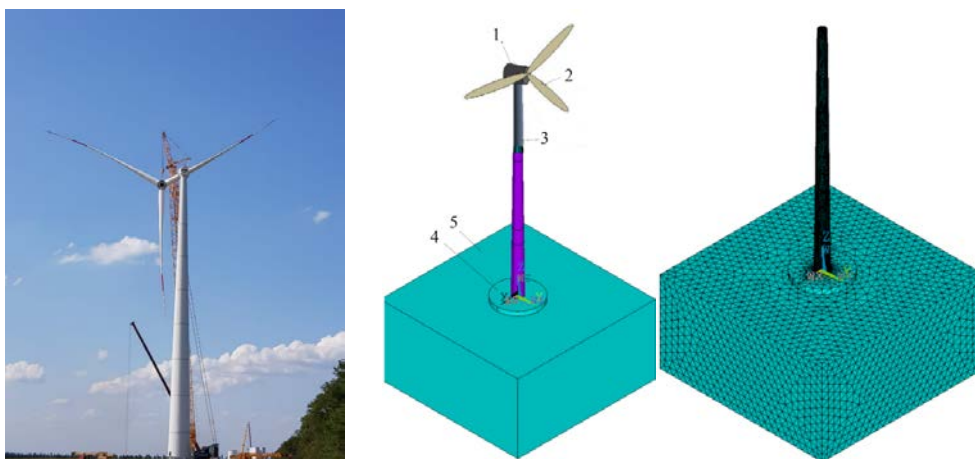


Рис. 6. Конструктивная схема (компьютерная модель в ПК «Ansys») ВЭУ на 2 МВт: 1 – гондола; 2 – лопасти ротора; 3 – башня; 4 – сборно-разборный фундамент; 5 – грунт основания

Фундамент под башню принят массивным из монолитного бетона класса В25, армированного стальной арматурой. В плане фундамент круглого сечения.

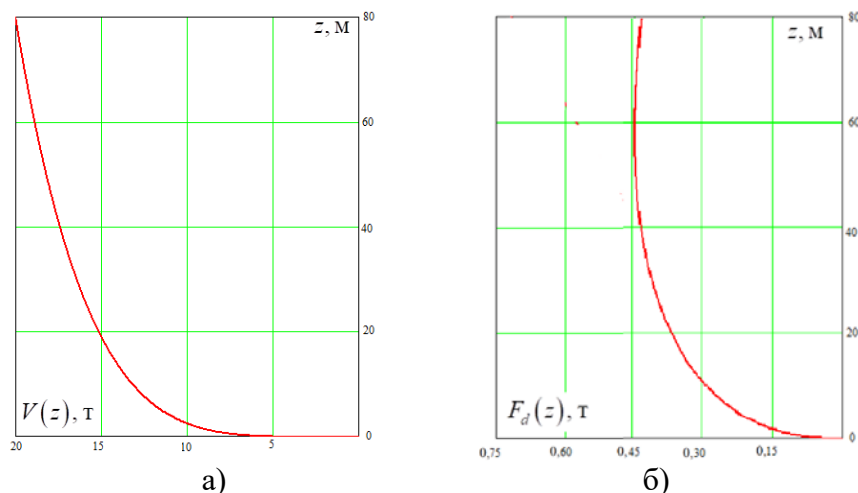
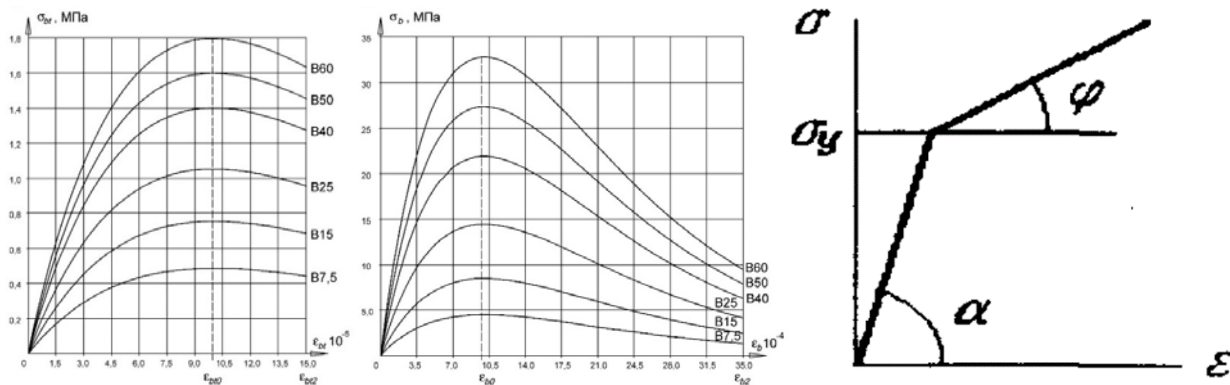


Рис. 7. Распределение скорости ветра V (а) и ветровой нагрузки F_d (б) по высоте

Нагрузки, действующие на конструкцию ВЭУ и принятые с учётом коэффициентов надёжности по нагрузке $\gamma_f=1,0$ и ответственности сооружения $\gamma_n=1,0$. В табл. 2 ГОСТ Р 54418.1-2012 прописаны 8 проектных случаев для расчёта ВЭУ. Наиболее характерным является первый – «Выработка электроэнергии» – расчёт с использованием модели нормальной турбулентности.

Рассматриваемая конструкция включает в себя элементы, образованные из материалов с качественно и количественно отличающимися физико-механическими свойствами. На рис. 8 представлены диаграммы деформирования материалов, используемые для создания модели.

Математические выражения, описывающие диаграммы рис. 8, а-б приведены в статье [24]. В качестве закона деформирования для стали была принята билинейная диаграмма кинематического упрочнения (см. рис. 8, в). Закон предполагает, что на диаграмме « σ - ϵ » сумма напряжений разного знака в процессе нагрузки-разгрузки всегда равна удвоенной величине предела текучести σ_y , то есть учитывается эффект Баушингера. Модель рекомендуется для упругопластических задач с малыми деформациями материала, подчиняющегося условию текучести Мизеса.



а) б) в)
 Рис. 8. Диаграммы деформирования материалов: а) криволинейная диаграмма Радайкина О.В. при растяжении [24]; б) тоже – при сжатии; в) двухлинейная диаграмма, кинематическое упрочнение с эффектом Баушенгера

Таким образом, физический закон деформирования тонкостенной оболочки описывался четырьмя параметрами: модулем упругости $E=206 \cdot 10^3$ МПа, касательным модулем $E^t=75 \cdot 10^3$ МПа, пределом текучести $\sigma_{\text{ym}} = 355 \text{ МПа}$ и коэффициентом Пуассона $\nu=0,3$.

Для определения габаритов фундамента предварительно был выполнен расчёт башни, как жёстко заделанной консольной стойки, то есть без учёта фундамента и грунта основания:

В результате были получены нагрузки на обрез фундамента, по которым с использованием формул СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений» вычислены требуемые габариты фундамента: 18×18 м, высота 1,8 м.

Результаты определения эквивалентных напряжений в башне показаны на рис. 9.

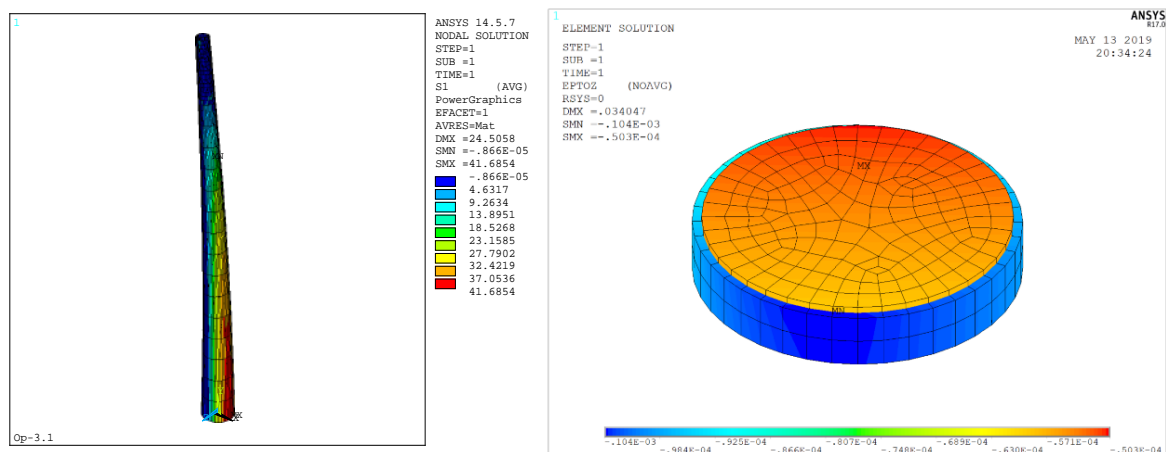


Рис. 9. Результаты компьютерного моделирования башни

Сравнение результатов расчёта с данными работы [22] показало, что разрушающая нагрузка башни увеличилась на 37% за счёт заполнения нижней её части бетоном, что говорит об эффективности предлагаемого решения. При этом разрушение башни с бетонным ядром и без него произошло от потери местной устойчивости стальной оболочки на уровне стыка башни с фундаментом (с сжатой зоне). Полученные результаты об эффективности изгибаемого трубобетона коррелируют с опытными данными работы [25], что говорит о правомерности предлагаемого в данной статье подхода. Более детальному рассмотрению напряжённого деформированного грунтового массива, фундамента, контактного взаимодействия бетонного ядра и стальной оболочки будут посвящены последующие публикации.

ВЫВОДЫ:

1. В настоящей публикации сделано обобщение ранее проведённых автором исследований, что позволяет говорить о целостном научно-методологическом обеспечении создания новых более совершенных башенных сооружений для сферы энергетики. Это обеспечение включает в себя совокупность теорий, гипотез, моделей, методов, методик и экспериментальной и нормативной базы, выстроенных в логически непротиворечивую взаимосвязанную структуру, позволяющую создавать, внедрять в производство и эксплуатировать новую более совершенную продукцию [26].

2. Рассмотрено два наиболее представительных типа башенных сооружений – опоры ВЛЭП и опоры ВЭУ – каждая в виде единой системы «опора-фундамент-грунт основания». Такой подход позволил учесть совместную работу всех компонент системы и перераспределение усилий между ними с учётом физической нелинейности свойств материалов.

3. В перспективе у автора разработать малочисленную группу обобщенных (интегральных) критериев наступления того или иного предельного состояния для всей рассматриваемой системы «опора-фундамент-грунт основания», что возможно сделать, на взгляд автора, на основе теории надёжности и энергетической теории деформирования и разрушения строительных конструкций и сооружений.

Литература

1. Указ Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники и перечня критических технологий Российской Федерации».

2. Кашапов Н.Ф., Сабитов Л.С. Напряженно-деформированное состояние тонкостенных стержней-оболочек закрытого профиля /Казань: Изд-во. Ун-та, 2019. – 252с.

3. Патент на изобретение RU 2620625 С1, 29.05.2017. Заявка № 2016130488 от 25.07.2016. Узел соединения труб разного диаметра Авторы: Гатиятов И.З., Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л., Юдин В.Ю., Мезиков А.К., Никифоров А.И.

4. Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л., Бадертдинов И.Р., Радайкин О.В. Исследование совместной работы стальной стойки-опоры и сборного железобетонного фундамента экспериментальным методом и с применением математического МКЭ-моделирования Вестник гражданских инженеров. 2018. № 6 (71). С. 37-44.

5. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017662991, 22.11.2017. Заявка № 2017617847 от 21.07.2017. «AUTORSS.03» Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л., Юдин В.Ю.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013611451 от 18.01.2013 г. «AutoRSS.01». Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л., Сабитов С.И. Заявка № 2012661265 от 18.12.2012 г

7. Патент на изобретение RU 2615178. Российская Федерация. Способ защиты сталеалюминевых проводов воздушных линий электропередачи от усталостных колебательных повреждений на выходе из поддерживающего зажима / И.Л. Кузнецов, Л.С. Сабитов, Ю.М. Стрелков, А.К. Мезиков, А.И. Никифоров; заявл 10.02.2016; опубл. 04.04.2017. Бюл. № 10. 12 с.

8. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017662990, 22.11.2017. Заявка № 2017617846 от 21.07.2017. AUTORSS.04 Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л., Стрелков Ю.М.
9. Патент на изобретение RU 2633604 С1, 13.10.2017. Заявка № 2016134679 от 24.08.2016. Сборно-разборный фундамент под опору Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л., Хусаинов Д.М., Сабитов С.И., Ахунова З.Р., Стрелков Ю.М.
10. Стрелков Ю.М., Сабитов Л.С., Кашапов Н.Ф., Гильманшин И.Р., Радайкин О.В. Исследование совместной работы опор линий электропередач со сборным железобетонным фундаментом нового типа В сборнике: Энергосбережение. Наука и образование Сборник докладов международной конференции. 2017. С. 424-434.
11. 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.
12. Патент на изобретение RU 2641354 С1, 17.01.2018. Заявка № 2016145699 от 22.11.2016. Трехгранная решетчатая опора Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л., Бадертдинов И.Р., Стрелков Ю.М.
13. Сабитов Л.С., Коноплев Ю.Г., Радайкин О.В. Компьютерное моделирование системы «комбинированная башня - железобетонный фундамент - грунт основания» ветроэлектрической установки для оценки ее эффективности. Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. № 1 (78). С. 345-355.
14. 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.
15. Стрелков Ю.М., Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л., Радайкин О.В., Ахтямова Л.Ш. Компьютерное моделирование системы "стальная башня - железобетонный фундамент - грунт основания" ветроэлектрических установок В сборнике: Эффективные конструкции, материалы и технологии в строительстве Материалы международной научно-практической конференции. 2019. С. 116-127.
16. Сабитов Л.С., Коноплев Ю.Г. К вопросу о численном моделировании системы "башня - фундамент - грунт основания" ветроэлектрических установок Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 12. С. 210-213.
17. Umesh K. N., Bharath P., Mohamed Farzath Iyaz. Design and analysis of 2-MW wind turbine tower // Mechanical And Production Engineering. Vol. 4. Iss. 10. 2016. Pp. 13-17.
18. Chantharasenawong Ch., Jongpradist P., Laoharatchapruerk S. Preliminary Design of 1.5-MW Modular Wind Turbine Tower // AEC17, 2nd TSME International Conference on Mechanical Engineering, 19-21 October 2011.
19. Фатеев Е. М. Ветро двигатели и ветроустановки. М.: Сельхозгиз, 1948. 554 с.
20. Елистратов В. В., Панфилов А. А. Проектирование и эксплуатация установок нетрадиционной и возобновляемой энергетики. Ветроэлектрические установки: учебное пособие. СПб.: Политехнический университет, 2011.
21. Дуванова И. А., Сальманов И. Д. Труبوبетонные колонны в строительстве высотных зданий и сооружений // Строительство уникальных зданий и сооружений. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого совместно с Производственным, научно-исследовательским и проектно-конструкторским учреждением "Венчур". 2014. № 6(21). С. 89-103.
22. Кикин А. И., Санжаровский Р. С, Трулль В. А. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном. М.: Стройиздат, 1974. 144 с.
23. Дейч М. Е. Техническая газодинамика. Изд. 2-е, переработ. М. - Л.: Госэнергоиздат, 1961. 675 с.

24. Радайкин О. В. К построению диаграмм деформирования бетона при одноосном кратковременном растяжении/сжатии с применением деформационного критерия повреждаемости // Вестник гражданских инженеров. СПб.: СПбГАСУ. 2017. № 6. С. 71-78.

25. Ефименко В. И. Прочность и деформации изгибаемых трубобетонных элементов: дис. канд. техн. наук. Полтава, 1989. 185 с.

26. Акт о внедрении результатов научных исследований на тему: «Разработка научно-методологического обеспечения проектирования и возведения новых строительных систем «стальная башня (опора)-железобетонный фундамент-грунт основания», авторы: Л.Р. Маилян, О.В. Радайкин, Л.С. Сабитов, А.Л. Маилян, С.Б. Языев, Стрелков Ю.М., выданный АО «Ветроэнергетическая отдельная генерирующая компания» организация госкорпорации Росатом, №347-70/478 от 25.02.2020.