

## Аннотация

В докладе анализируется влияние деформационных характеристик грунта на расчет конструкций опор линий электропередач. Рассмотрены методы учета податливости грунтового основания в модели системы "конструкция-фундамент-основание", выполненной в программной системе Plaxis. Приведены результаты сравнительного анализа усилий в элементах конструкции при различных модулях деформации грунта. Представлен проект модели установки для учета податливости грунтового основания. Исследование демонстрирует значимость нелинейных свойств грунта для повышения точности расчетов и предотвращения прогрессирующего обрушения опор. Подчеркивается необходимость дальнейшего развития методик, учитывающих взаимодействие конструкций и грунтового основания в условиях экстремальных нагрузок.

Ключевые слова: опоры линий электропередач, нелинейные свойства грунта, устойчивость опор

## Введение

Высоковольтные линии (ВЛ) играют важнейшую роль в обеспечении энергетической безопасности и эффективной передачи электрической энергии на большие расстояния. Однако эксплуатация ВЛ сопряжена с рядом угроз, среди которых особое внимание следует уделить возможным авариям, вызванным воздействием катастрофических факторов, таких как сильный ветер, гололед, механические повреждения и другие экстремальные воздействия [1-5]. В таких условиях жесткость конструкций опор ВЛ становится решающим фактором, определяющим их способность сохранять работоспособность, а значит, обеспечивать бесперебойную подачу энергии.

На данном этапе развития расчет конструкций, в том числе и конструкций башенного типа, зачастую производится без учета влияния деформативности грунтового основания. Конструкции надземной части рассчитываются отдельно от подземной части. При этом нормы проектирования указывают на необходимость таких расчетов, но никак не регламентируют данный процесс.

Следует обратить внимание что податливость грунтового основания может оказать значительное влияние на напряжено-деформируемое состояние элементов конструкции, что и рассматривается в данном докладе. Это было подробно рассмотрено в статье [6], посвященной изучению взаимодействия оснований, фундаментов и поперечных рам стальных каркасов промышленных зданий. Аналогичная работа была проведена и опубликована профессором Трулем В.А. в его диссертационном исследовании [7]. Кроме того, в статьях [8-10] рассматриваются подходы к расчету фундаментов опор линий электропередач.



Рис. 1. Влияние грунтового основания на опоры ВЛ

## Объект исследования

Объектом исследования являются конструкции промежуточной опоры высоковольтной линии электропередачи.

Наибольшее влияние учет податливости грунтового основания оказывает на нижнюю часть сооружения. Поэтому в дальнейшем особое внимание уделяется именно подставкам опор. (см. Рис. 2.). На рисунке 3 представлены выбранные фундаменты. Особое внимание следует уделить стойке этих фундаментов.

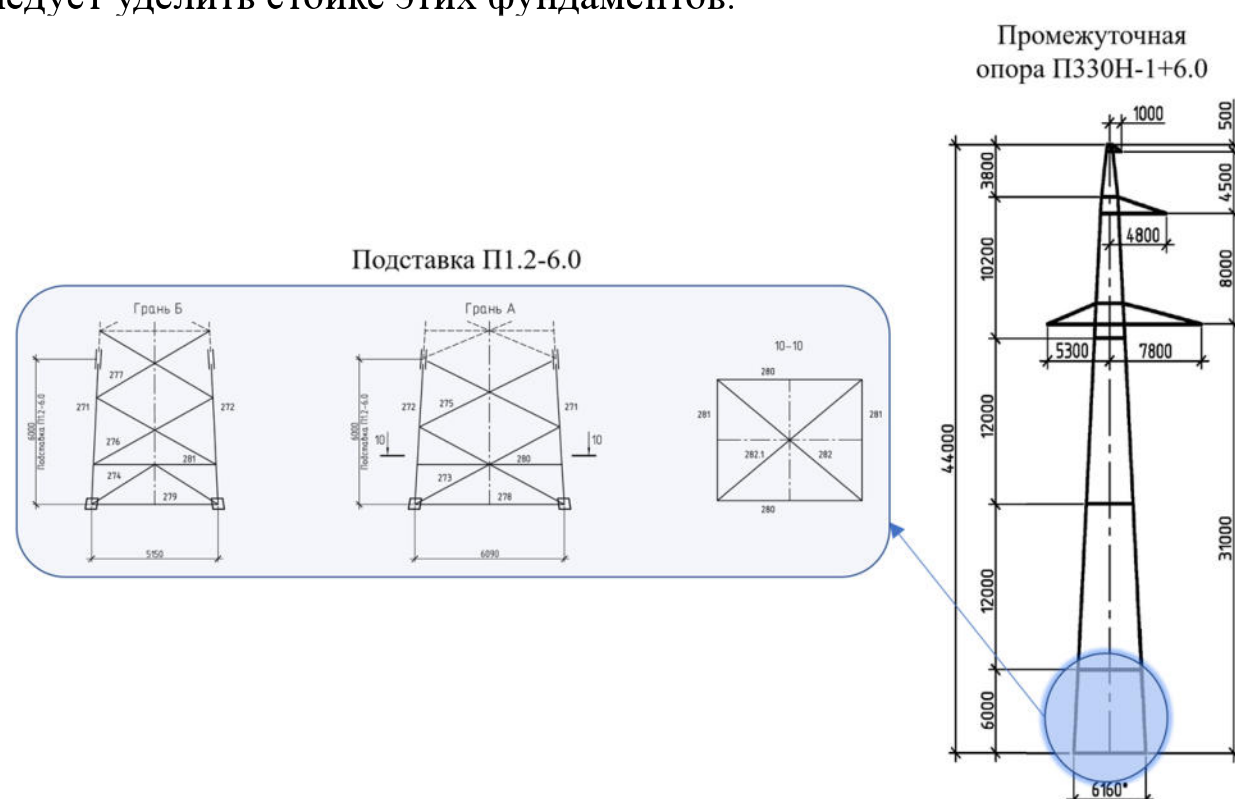


Рис. 2. Промежуточная опора П330Н-1+6.0 и подставка П1.2-6.0

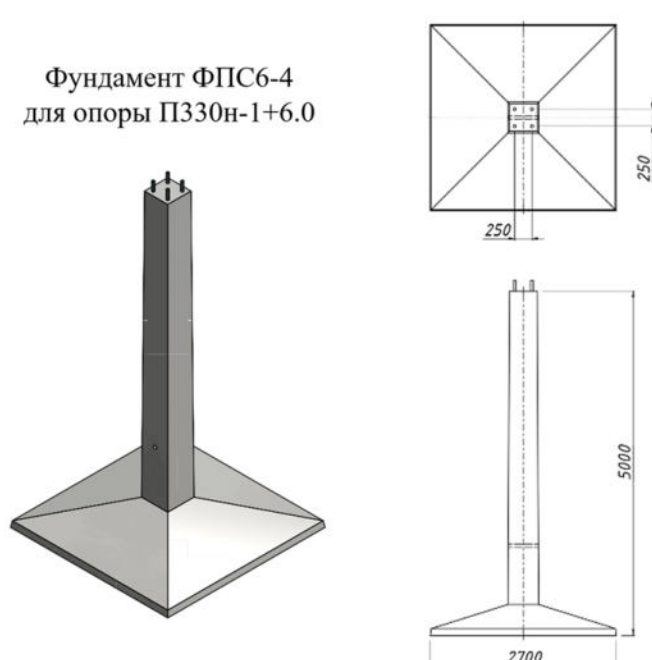


Рис. 3. Фундамент ФПС6-4 для опоры П330н-1+6.0

## Методы учета податливости грунтового основания

Одним из способов учёта податливости грунтового основания является метод стержневого аналога. Этот метод подразумевает замену грунтового основания на его аналог в виде системы стержней. [6]

Однако при использовании метода стержневого аналога моделируемые деформации грунта считаются линейно-упругими. В то же время некоторые программные комплексы способны учитывать более сложные модели грунта. Поэтому возникает необходимость сравнить эти два подхода к учёту податливости грунтового основания.

Расчетные параметры стержневого аналога определяются условиями равенства угловых и линейных перемещений на обрезе фундамента и соответствующими перемещениями пространственной стержневой модели. Если считать ось поворота фундамента неподвижной, уравнения для вертикальных, горизонтальных и угловых перемещений позволяют получить характеристики стержневого аналога в виде, представленном на рисунке 4.

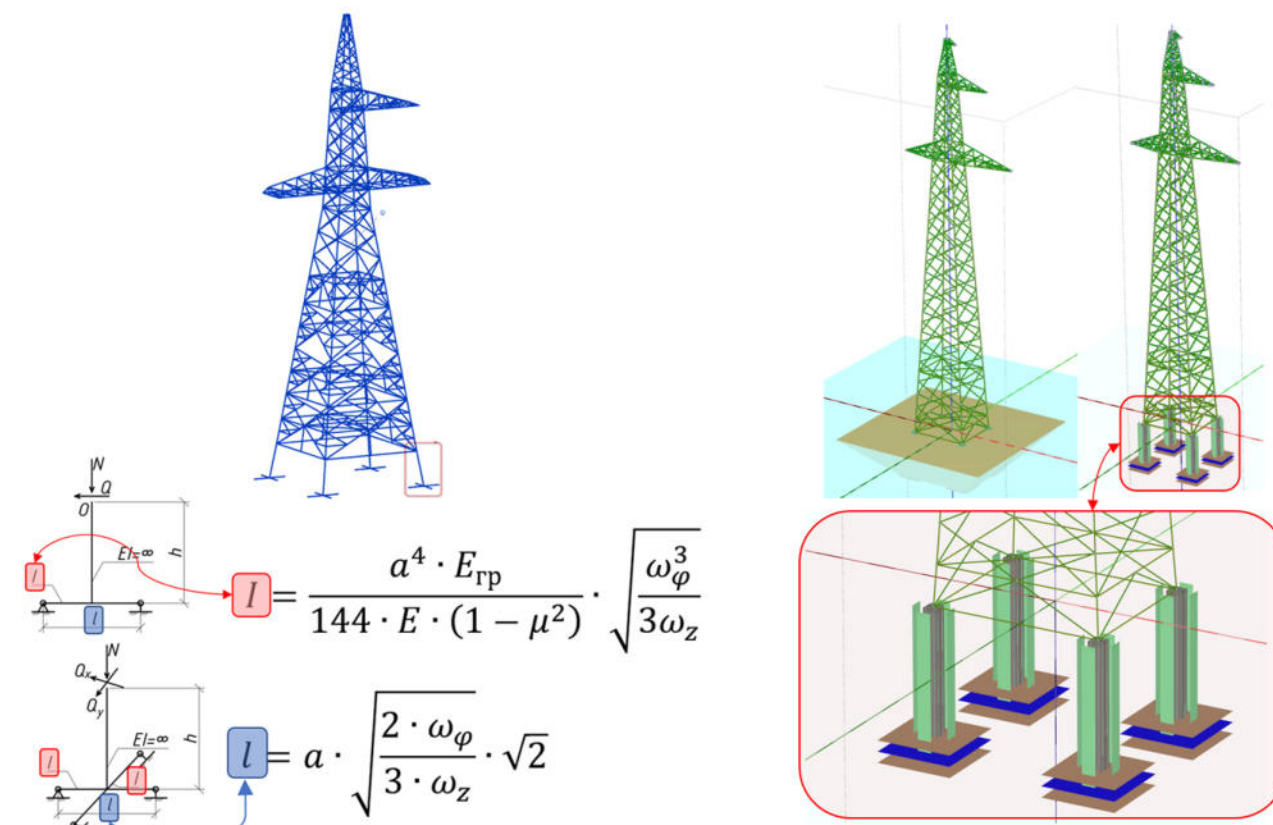


Рис. 4. Схема стержневого аналога и его основные характеристики (слева) Расчетная схема в программе Plaxis (справа)

Для апробации результатов расчета с помощью метода стержневого аналога рассматривается также моделирование полной системы «конструкция-фундамент-основание» в программной системе Plaxis.

Но так как программная система Plaxis заточена в основном для решения задач инженерной геотехники, и инженерной геологии, некоторые важные моменты в проектировании сооружения отсутствуют. Например, одним из допущений в данной расчетной модели является отсутствие шарнирных узлов. Для возможности корректного сравнения результатов полученных с методом стержневого аналога, это допущение транслировалось и в модель с методом стержневого аналога.

## Сравнение результатов

Для сравнения представленных ранее методов произведены расчеты по 3 вариантам изменения податливости основания.

### Первый вариант. Вариант сравнения по модулю деформации грунта

Данный вариант требуется для анализа и нахождения зависимостей между модулем деформации грунта и усилиями в элементах конструкции башенного типа, поэтому изменяемой величиной служит именно модуль деформации грунта, при этом остальные характеристики остаются неизменными.

### Второй вариант. Вариант сравнения по типу грунта

Данный вариант требуется для апробации первого. Как и в предыдущем варианте требуется установить зависимости между модулем деформации грунта и усилиями в элементах конструкции, но грунты подобраны таким образом чтобы описать наиболее часто встречающиеся случаи в действительности, поэтому результаты будут более приближены к реальным значениям, но зависимость будет иметь вес только на приведенном промежутке.

### Третий вариант. Вариант сравнения по коэффициенту пористости грунта

В данном варианте рассматривается только песчаный грунт с изменяющимся коэффициентом пористости и другими связанными характеристиками. Данный тип грунта выбран наиболее встречающийся на рассматриваемом участке ВЛ

Результат показывают, что наибольшее изменения происходят в элементах, предусмотренных в конструкции как раз для восприятия деформации плоскости поверхностей фундаментов. К таким элементам можно отнести элементы диафрагмы жесткости, а также опорные раскосы.

Ниже приведены графики зависимостей усилий в поясе и опорном раскосе от выбранного параметра в каждом варианте. Следует отметить различные тенденции в изменении усилий в этих элементах при расчете по разным методам.

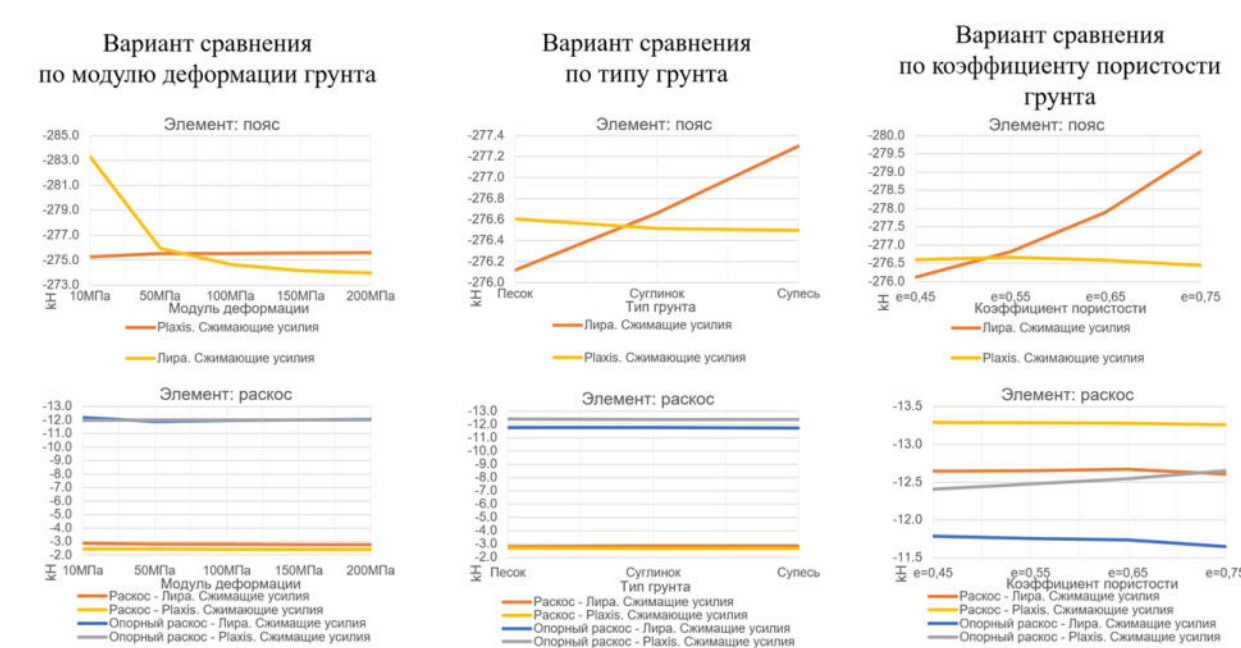


Рис. 5. Графики зависимостей усилий в поясе и опорном раскосе от

## Проект экспериментальной модели подставки промежуточной опоры

Для более детального изучения влияния податливости основания планируется создание экспериментальной модели подставки промежуточной опоры в масштабе 1 к 5 с податливыми опорами. (Рис. 6)

Главной задачей при подготовке к данному эксперименту является создание податливых опор, которые должны отвечать следующим параметрам:

1. Возможность вертикальных перемещений
2. Регулируемая жесткость в направлении вертикальных перемещений
3. Моделирование работы фундамента как на вдавливание, так и на выдергивание
4. Возможность моделирования нелинейной жесткости в обоих направлениях

Разрабатываемая податливая опора состоит из неподвижной части и подвижной, движение которой ограничивается пневмоэлементами, обеспечивающими моделирование жесткости основания путем регулирования давления в этих элементах.

При постоянном изменении направления действия основных внешних сил фундаменты опоры работают попеременно как на вдавливание, так и на выдергивание. Разрабатываемая податливая опора учитывает это обстоятельство. Нижние пневмоэлементы моделирует работу фундамента на вдавливание, а верхние на выдергивание. За счет индивидуального регулирования давления, имеется возможность учета различных жесткостных характеристик для разных направлений. Возможность регулирования давления прямо во время эксперимента позволяет задать как линейную, так и нелинейную зависимость вертикальной деформации от приложенной нагрузки

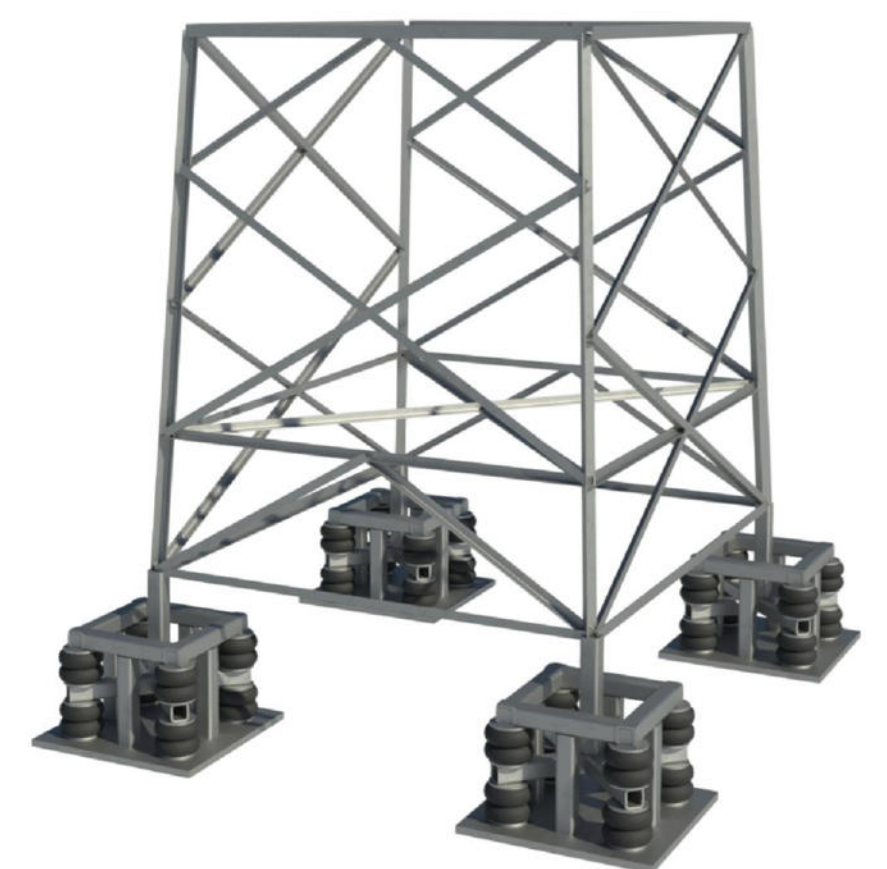


Рис. 6. Проект экспериментальной модели подставки промежуточной опоры с податливыми опорами

## Выводы

Были созданы расчетные схемы, которые описывают систему «конструкция — фундаменты — основание» промежуточной опоры высоковольтной линии электропередачи (ВЛ) 330 кВ. Эти схемы были разработаны для программных комплексов LIRA и Plaxis. Система «конструкция-фундаменты-основание» с использованием стержневой модели была преобразована в единую стержневую систему. Усилие в её элементах было определено с помощью известных программных комплексов, основанных на методе конечных элементов. Это позволило получить достоверные решения для промежуточных опор воздушных линий электропередач. Предложенный проект экспериментальной модели отвечает поставленным требованиям необходимым для детального изучения системы "конструкция-фундамент-основание" с учетом нелинейных свойств основания. По результатам данного эксперимента будет произведено уточнение метода стержневого аналога для расчета таких систем.

## Библиографический список

1. Губаев, Д.Ф. Обнаружение гололеда на линиях электропередачи локационным методом: дис. канд. техн. наук: 05.11.2013 / Д.Ф. Губаев – Казань, 2009. -186 л.
2. Дьяков, А.Ф. Опыт борьбы с гололедом на линиях электропередачи / А.Ф. Дьяков // Электр. станц. – 1982. - №1. – С. 50-54.
3. Дьяков, А.Ф. Предотвращение и ликвидация гололедных аварий в электрических сетях / А.Ф. Дьяков. – Петрозаводск: Южнерготехнадзор, 2000. – 284 с.
4. Дьяков, А.Ф. Системный подход к проблеме предотвращения и ликвидации гололедных аварий в энергосистемах / А.Ф. Дьяков. – М.: Энергоатомиздат, 1987. -160 с.
5. Сенькин Н.А., Косолапов М. Д. Аварии на ВЛ: конструкции и технологии экстренного восстановления // Воздушные линии. 2014 №3. С. 3-26.
6. Беленя Е. И., Клепиков Л. В. Исследование совместной работы оснований, фундаментов и поперечных рам стальных каркасов промышленных зданий // Научное сообщение. – 1957. – №. 28. – С. 58.
7. Трулев В. А. Исследование действительной работы конструкций опор воздушных линий электропередачи [Текст]: Автореферат дис. на соискание ученой степени доктора технических наук / Ленингр. инж.-строит. ин-т. – Ленинград: [б. и.], 1966. - 43 с.: черт.
8. Козловский, В. Е., Касаткина, А. В. Расчет деформаций оснований выдергиваемых фундаментов опор ВЛ [Текст] / В. Е. Козловский, А. В. Касаткина // Фундаменты. — 2023. — № 2. — С. 52-53.
9. Сенькин Н. А. Учет совместной работы конструкций и основания при проектировании стальных опор линий электропередачи // Взаимодействие оснований и сооружений. Подземные сооружения и подпорные стены: труды международной конференции по геотехнике ТК-207 ISSMGE (16-18 июня 2014 г.). 2014. Т. 2. С. 93-100.