

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ЛИЦЕЙ № 2 «ПРЕСТИЖ» С УГЛУБЛЕННЫМ ИЗУЧЕНИЕМ
ОТДЕЛЬНЫХ ПРЕДМЕТОВ ГОРОДСКОГО ОКРУГА МАКЕЕВКА»
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**ФОРМИРОВАНИЕ ГОРОДСКОГО ЛАНДШАФТА НА ОСНОВЕ ФИЗИЧЕСКИХ
МОДЕЛЕЙ ПОВЕДЕНИЯ ОДИНОЧНОГО ДЕРЕВА С РАЗЛИЧНОЙ КОРНЕВОЙ
СИСТЕМОЙ НА ГРУНТОВОМ ОСНОВАНИИ ПРИ ВЕТРОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

Вид работы – исследование

Номинация (направление) Зеленая инженерия

Авторы

Исаев Валентин Игоревич

класс 10

телефон +7(949)473-56-71

Сидоренко Вадим Денисович

класс 10

телефон +7(949)331-89-82

Руководитель работы

Левчук Марина Владимировна

должность учитель физики

преподаваемый предмет физика

телефон +7(949)382-69-64

Макеевка

2025

Аннотация

В данной работе рассмотрены вопросы формирования «зеленой» инфраструктуры городов. При этом в исследовании учтено, что выбор только по эстетическим параметрам деревьев, без учета всех факторов влияющих на ветроустойчивость деревьев, часто приводит к их вывалу при резком воздействии ветра. Для исследования было избрано одиночное дерево (не насаждение) и изучены физические модели, показывающие факторы, влияющие на ветровую устойчивость дерева на грунтовом основании. Математический аппарат моделей позволил разработать автоматизированный калькулятор для проектирования устойчивой к действию ветровой нагрузки «зеленой» инфраструктуры города на основе моделирования поведения одиночного дерева. Калькулятор разрабатывался в среде программирования PyCharm на языке Python.

СОДЕРЖАНИЕ

| НАЗВАНИЕ РАЗДЕЛОВ | СТР. |
|--|------|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| 1. ВЕТРОУСТОЙЧИВОСТЬ ДЕРЕВЬЕВ | 5 |
| 1.1. Подходы к определению ветроустойчивости деревьев | 5 |
| 1.2. Факторы, влияющие на физическую устойчивость деревьев в грунтовом основании | 6 |
| 1.2.1. Анализ типов корневых систем и состояния почвы на природную стабилизацию деревьев | 6 |
| 1.2.2. Крона дерева и её влияние на его природную стабилизацию при воздействии ветра | 7 |
| 1.2.3. Механические свойства древесины | 9 |
| 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОУСТОЙЧИВОСТИ ДЕРЕВЬЕВ | 10 |
| 2.1. Физические подходы к определению ветроустойчивости деревьев | 10 |
| 2.2. Моделирование физических реакций дерева на воздействие ветра | 12 |
| 2.3. Автоматизированный калькулятор | 14 |
| ВЫВОДЫ | 16 |
| Список литературы | 17 |

ВВЕДЕНИЕ

Деревья называют лёгкими планеты, но их продолжительность жизни зависит от многих показателей. Достаточно мощным фактором, влияющим на состояние лесных насаждений, является ветер. Его резкое воздействие может привести к ветровалам, уничтожить как отдельно стоящее дерева, так и целую плантацию насаждений. Поэтому важно заблаговременно оценить воздействие ветра на насаждения и свести к минимуму последствия правильным выбором древесных пород и их размещения на почве.

При наблюдении за поведением различных деревьев под воздействием ветра, возникает вопрос: почему во время сильного ветра у одних деревьев ломается ствол, другие деревья выворачивает из земли с корнем, третьи же гнутся до самой земли, но не ломаются. Если дерево рассматривать не как биологический объект, а как некую физическую модель, есть возможность определить физические основы ветроустойчивости деревьев.

Любая модель состоит из набора факторов, выносимых на рассмотрение, с учётом их значимости и иерархии по степени влияния. А так же оговариваются те факторы, которые не имеют существенного влияния на результат в условиях данной конкретной модели. В общем случае определены пять факторов, влияющих на способность дерева противостоять ветру:

- строение корневой системы дерева;
- механические свойства древесины;
- виды крон;
- свойства почвы, в которой произрастает дерево;
- биологический возраст дерева.

В последние годы в научных работах используются различные подходы для определения ветроустойчивости. Так в работах Ю.В. Захарова и В.Г. Суховольского была использована модель, в которой дерево рассматривалось как зафиксированная с одного конца балка. Для условий фиксации были выбраны два обобщённых типа корневых систем – поверхностная и стержневая, при этом не проводится качественный анализ влияния формы кроны дерева. Но научные выводы не имеют широкого практического применения из-за сложного математического аппарата и трудоёмкого процесса вычислений.

Поэтому, **целью проекта** стала разработка автоматизированного калькулятора для проектирования устойчивой к действию ветровой нагрузки «зеленой» инфраструктуры города на основе моделирования поведения одиночного дерева.

Для реализации проекта необходимо решить такие задачи:

1. Разработать автоматизированный калькулятор для проектирования устойчивой к действию ветровой нагрузки «зеленой» инфраструктуры города на основе моделирования поведения одиночного дерева.
2. Проанализировать факторы, влияющие на природную стабилизацию деревьев при ветровом воздействии.
3. Определить физические модели дерева для оценки его устойчивости под действием ветра и дать их сравнительный анализ.

Для того, чтобы обеспечить высаживание устойчивых к действию сильных ветров пород деревьев, необходимо иметь методы определения их природной стабилизации в условиях повышенной ветровой активности. Количественные показатели для расчётов дают различные физические модели, позволяющие определить ветроустойчивость дерева. И чем больше факторов учитывается, тем более универсальна модель. Использование физических моделей, позволит научно подходить к выбору пород деревьев для высадки в городах. Автоматизированный калькулятор процесс выбора породы дерева делает быстрым и простым.

1. ВЕТРОУСТОЙЧИВОСТЬ ДЕРЕВЬЕВ

1.1. Подходы к определению ветроустойчивости деревьев

Для выявления реальных особенностей ветровала некоторые исследования по ветроустойчивости дерева проводились экспериментально, например, при измерении скорости ветра одновременно измерялись напряжения волокон в поверхности изогнутого ствола, или использовался специальный экспериментальный вывал дерева. Такие исследования весьма трудоемки, и в связи с этим необходимо разрабатывать универсальные методы для детального моделирования механических свойств дерева и моделирования его упруго механических реакций, вызванных действующим ветром [2, 15].

Обычно изгиб дерева моделируется с помощью балки под действием нагрузки. Но с точки зрения прочности, конструкция балки невыгодна, ибо её второй конец не закреплён. Для такой конструкции свойственны большие величины изгибающих моментов, особенно когда действующие силы находятся около свободного конца, что как раз характерно для деревьев. В таких моделях не учитывается влияние корневой системы физическую стабильность дерева.

Для выявления реальных особенностей ветровала применялся метод опытных образцов, когда исследования по ветроустойчивости дерева проводились экспериментально. В реальных условиях измерялись напряжения волокон в поверхности изогнутого ствола во время измерения скорости ветра. Этот подход у исследованию трудоёмок. Более универсальным является методы моделирования механических свойств дерева и его упруго механических реакций, вызванных действующим ветром.

1.2. Факторы, влияющие на физическую устойчивость деревьев в грунтовом основании

Реакция дерева на действие ветра зависит от многих факторов. При расчете ветровой нагрузки часто учитываются максимальная скорость ветра, размеры, форма и аэродинамическое сопротивление кроны, высота дерева. Но в стандартных моделях мало учитывается типы корневой системы и почва, в которой произрастает дерево [6, 33].

1.2.1. Анализ типов корневых систем и состояния почвы на природную стабилизацию деревьев

Существует 10 наиболее распространённых типов корневых систем, присущих основным породам деревьев, применяемых в парковых насаждениях городов средней полосы России (рис. 1.1.):

1. Стержневая слабоветвящаяся, которая характерна для проростков и всходов;
2. Стержневая глубоковетвящаяся (также известна, как стержнево-пальчатая). К ней можно отнести виды рода астрагал из секции трагакант;
3. Стержневая интенсивноветвящаяся (например, дуб);
4. Поверхностно-стержневая (пихта сибирская, сосна обыкновенная);
5. Колоколовидно-стержневая (липа, ряд представителей рода ильмовых);
6. Поверхностно-стержнево-якорная (лиственница сибирская);
7. Поверхностно-якорная (сосна кедровая сибирская);
8. Кистевидная (ясень);
9. Куполовидная (ряд представителей рода ильмовых);
10. Поверхностная (ель).

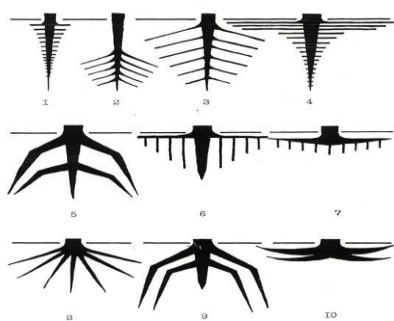


Рис. 1.1

Для визуализации поведения деревьев с различной корневой системой, были смоделированы несколько ситуаций в программе Cinema 4D с использованием ресурса Autodesk 3DS Max 2015:

- ситуация 1 для ели с поверхностной корневой системой в сухом грунте;
- ситуация 2 для ели с поверхностной корневой системой во влажном грунте;
- ситуация 3 для вяза с куполовидной корневой системой в сухом грунте;

- ситуация 4 для вяза с куполовидной корневой системой во влажном грунте;
- ситуация 5 для ясеня с кистевидной корневой системой в сухом грунте;
- ситуация 5 для ясеня с кистевидной корневой системой во влажном грунте.

Анализ смоделированных ситуаций показал, что каждый тип корневой системы обладает своими особенностями. Ко всему стоит добавить, что довольно важным фактором устойчивости дерева является глубина проникновения корней. Максимальная глубина была зафиксирована на дерново-слабоподзолистых почвах с отсутствием признаков оголения. Для создания модели, определяющей ветроустойчивость, подходят предельно обобщенные корневые системы – дерево со стержневой корневой системой, достаточно глубоко уходящей в почву, и дерево с поверхностной корневой системой [3, 35].

1.2.2. Крона дерева и её влияние на его природную стабилизацию при воздействии ветра

Площадь живой кроны и её поперечного сечения показывает разную «парусность» деревьев. Как образец, ели с плоской формой кроны больше подвержены воздействию ветра, чем ели с висячей кроной, а деревья с низко опущенной кроной имеют большую устойчивость, чем деревья с высоко поднятой кроной (отсюда результат – чем ниже опущена крона дерева, тем больше его ветроустойчивость). В моменты урагана, когда скорость ветра достигает 130-150 км/ч, дерево со стволом диаметром 50 см может выдерживать напряжение воздуха силой до $50-70 \cdot 10^3$ Н [9, 25]. Для того, чтобы выдержать такой натиск, дерево наклоняется и принимает флагообразную форму, изгибаются ветви, разворачиваясь почти на 90 градусов. В среднем дерево имеет 35-40 тыс. листьев с общей площадью 80-120 м² [6, 23]. Несмотря на то, что все листья во время воздействия ветра размещаются параллельно воздушному потоку, их потеря существенно сокращает трение и давление потока на дерево.

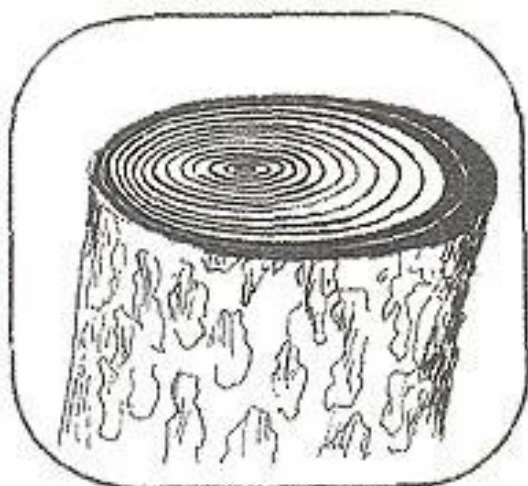
Как и в случае с типами корневых систем, так и тут можно различить 10 типов крон дерева: раскидистая, пирамидальная, овальная, яйцевидная, стелющаяся, зонтичная, шаровидная, плакучая, вьющаяся, подушечная.

Перечисленные типы крон можно увидеть на рис. 1.2.



Рис. 1.2

Как можно наблюдать, у многих деревьев форма кроны округла и хорошо обтекаема потоком воздуха. Центральным положением является ствол дерева, играющий роль несущего стержня. Крона располагается так, чтобы не нарушить центр тяжести дерева. Безусловно, эта симметрия может нарушиться под влиянием внешних факторов, но дерево не погибнет от этого, ибо будет приведена к действию система приспособления к новым условиям. К примеру, при постоянном воздействии ветра центр тяжести дерева может сместиться. В этом случае в районе корневой лапы начнётся усиленное нарастание биомассы древесины, что укрепит дерево в положении крена (рис. 1.3).



Нарастание биомассы в ствол при постоянно дующих ветрах

Величина и распределение действующих на дерево сил ветра и изгибающего момента зависят от формы и размеров кроны, высоты ее расположения и густоты, а также от скорости ветра. Элементарные силы от ветра, действующие на каждую ветвь, ствол, хвоинки и листья, могут быть приведены к одной равнодействующей силе F . Эту силу можно определить, используя уравнение аэродинамики, принадлежащее И. Ньютону:

Рис. 1.3.

$$F(h) = C_D S \frac{\rho v(h)^2}{2} \quad (1.1)$$

где C_D - коэффициент сопротивления, S – площадь вертикальной проекции кроны, ρ – плотность воздуха (1,25 кг/м³), v – скорость ветра, h – высота ствола дерева [5, 76].

Аэродинамические свойства кроны дерева зависят от скорости ветра. Поэтому, для определения коэффициента сопротивления от скорости ветра берутся экспериментальные данные, которые устанавливают зависимость изменения этого показателя в диапазоне от 0,7 до 0,22 [5, 77]. Крайние точки соответствуют в первом случае полному отсутствию ветра, а во втором – значению скорости ветра 33 м/с. Также коэффициент сопротивления различается в зависимости от густоты кроны: для густых крон - 0,6 (ель), средней густоты - 0,5, редких - 0,4 [6, 46].

В физических моделях устойчивости деревьев считают, что расчетные силы ветра являются статическими, отсутствует передача усилий от ветвей к стволу, и поэтому момент кручения из-за возможной асимметрии кроны не учитывается [4, 13].

Обычно считается, что силы ветра при расчётах являются постоянными, нет передачи усилий от ветвей к стволу, и, соответственно, момент кручения пренебрегается из-за возможной асимметрии кроны. К тому же пренебрегают порывистостью ветра. Это может привести к серьезной недооценке действительных сил, так как кратковременная максимальная скорость ветра может быть в три раза больше средней скорости ветра [7, 22].

1.2.3. Механические свойства древесины

Важнейшими механическими свойствами древесных растений являются плотность (ρ) и модуль упругости (E) древесины. Оба эти параметра заметно варьируют при изменении влажности древесных волокон: плотность растёт пропорционально влажности, а модуль упругости имеет сложную зависимость от нее. Даже среди древесных форм эти показатели значительно отличаются. Так, виды, произрастающие на территории Европы, характеризуются минимальными значениями плотности древесины – $\sim 400 \text{ кг/м}^3$, а максимальными – для самшита вечнозеленого – $\sim 950 \text{ кг/м}^3$ [6, 102]. Модуль упругости – соотношение между приложенной нагрузкой и величиной деформации, вызванной ею, – изменяется в зависимости от направления, в котором приложена сила. Он максимален в направлении роста древесных волокон.

Модуль упругости и плотность древесины изменяются в зависимости от интенсивности регулярных механических нагрузок, таких как ветер, осадки и др. Изменения в строении тканей в ответ на действие механических нагрузок, типа прикосновения и трения, а также изгибы и вибрации направлены на усиление механической прочности. Так древесина дуба выдерживает на сжатие давление $450\text{-}500 \text{ кг/см}^2$, а на растяжение – до 1050 кг . Это означает, что прочность ее на растяжение может соперничать с лучшими видами нейлоновых тканей. Эти показатели могут изменяться для разных пород. Когда дерево подвергается постоянно действию ветров, прочность его древесины возрастает на $5\text{-}10 \%$, увеличивается свилеватость (на стволе волокна располагаются по спирали), что значительно увеличивает его прочность [2, 17].

Свилеватость — порок строения древесины, выражающийся в извилистом или беспорядочном расположении волокон древесины. Различают:

- волнистую свилеватость (с более-менее правильным расположением волокон)
- путаную свилеватость (с хаотичным, беспорядочным расположением волокон)

Волнистая свилеватость ярко показана на рис. 1.4, а путанная на рис. 1.5.

Известно так же, что при одной и той же густоте и средней высоте береза имеет меньшие диаметры по сравнению с сосной и елью. Деревья березы испытывают меньшую ветровую нагрузку за счет укороченных крон и большей их ажурности и отчасти гибкости ветвей, а по своим механическим характеристикам древесина березы прочнее, поэтому допустимое напряжение на изгиб больше, чем для сосны и ели, отсюда и ствол может быть тоньше [2, 33].



Рис. 1.4



Рис. 1.5

Исследования некоторых учёных в умеренных лесах показали, что лиственные породы более ветроустойчивы, чем хвойные. Объясняют это тем, что лиственные породы безлиственны зимой, когда штормовые ветры более вероятны [4, 28].

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОУСТОЙЧИВОСТИ ДЕРЕВЬЕВ

2.1. Физические подходы к определению ветроустойчивости деревьев

Любое дерево можно представить в виде консоли с одним закреплённым и одним свободным концом. Такой подход требует введения нескольких приближений:

1. Длина стержня должна быть много больше диаметра. Тогда растяжением можно было пренебречь и рассматривать случай чистого изгиба. При этом в начальном положении поперечное сечение можно рассматривать плоским и перпендикулярным к оси изгиба ствола. Для большинства деревьев это справедливо из-за их гибкости. Поэтому напряжение волокон пропорционально расстоянию от нейтральной оси, которая определяется линией нулевого напряжения [5, 78].
2. Деформация древесины ствола описывается согласно закону Гука.
3. В отсутствии нагрузки стержень сохраняет прямолинейное состояние. Эффективная составляющая внешней силы действует перпендикулярно оси ствола [5, 79].

По упругости существует ряд формул для нахождения элементов изгиба упругой балки

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{EI} \quad (2.1)$$

где $1/r$ – кривизна изогнутой балки, I – момент инерции сечения, E – модуль упругости вдоль волокон, M – изгибающий момент [4].

Размер действующих на дерево сил изгибающего момента и ветра зависит от кроны, высоты её расположения и плотности, от скорости ветра

$$M(h) = R(h) \cdot h \quad (2.2)$$

где M – изгибающий момент, R – сила ветра, h – высота дерева.

Сила ветра определяется по формуле 1.1.

Из курса сопротивления материалов нормальные напряжения, возникающие в поперечном сечении бруса при изгибе:

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (2.3)$$

где W – коэффициент сопротивления сечения балки.

Для круглого сечения ствола:

$$W = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \quad (2.4)$$

где d – диаметр дерева на высоте груди взрослого человека [3].

Соответственно, подставляя, получим формулу для изгибающего момента:

$$M = \frac{\pi}{32} d^3 \sigma \quad (2.5)$$

Кроме напряжений, вызываемых изгибающим моментом, в стволе возникают другие напряжения:

- от силы тяжести самого ствола и кроны – перпендикулярные напряжения;
- от перерезывающей силы $F(h)$ – напряжения, действующие по касательной;
- от крутящего момента (при асимметричной кроне дерева);
- от изгибающего момента.

Можно пренебречь всеми напряжениями, за исключением напряжения изгиба (в силу их малости). Но и в этом случае дерево находится в сложном напряжённом состоянии [5, 67].

Ствол дерева можно представить как составную конструкцию: годовые кольца с различными модулями упругости. Каждый год добавляет к конструкции 1 слой и в результате имеется n слоёв. Отдельно взятый слой обладает своим модулем упругости E_i , $i = 1, \dots, n$.

Сопротивление ствола изгиба на определённой высоте или изгибная жёсткость определяется по формуле

$$\alpha = EI \quad (2.6)$$

где E – модуль упругости, I – момент инерции сечения [4, 77].

Так как на общее состояние дерева влияет каждое годовое кольцо, формула для определения изгибной жёсткости должна учитывать вклад всех колец

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \alpha_i \quad (2.7)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^n E_i I_i \quad (2.8)$$

Учёт всех этих физических факторов позволит вычислить напряжение в любом годичном кольце [7, 79].

2.2. Моделирование физических реакций дерева на воздействие ветра

Для объективной оценки устойчивости дерева были взяты по отдельности дерево со стержневой корневой системой и дерево с поверхностной корневой системой. Первое можно рассмотреть на примере парусной яхты типа «швертбот» (лодка с вертикальным килем-доской), а второе – на примере парусной яхты типа «катамаран». Под действием постоянной силы ветра на парус яхта кренится. Точно так же под действием ветра на крону кренится дерево. Давление ветра на крону образует кренящий момент. При этом сила тяжести и сила реакции опоры, действующие на дерево, не находятся в одной плоскости, и образуют пару сил, стремящуюся возвратить дерево в нормальное положение [8, 103].

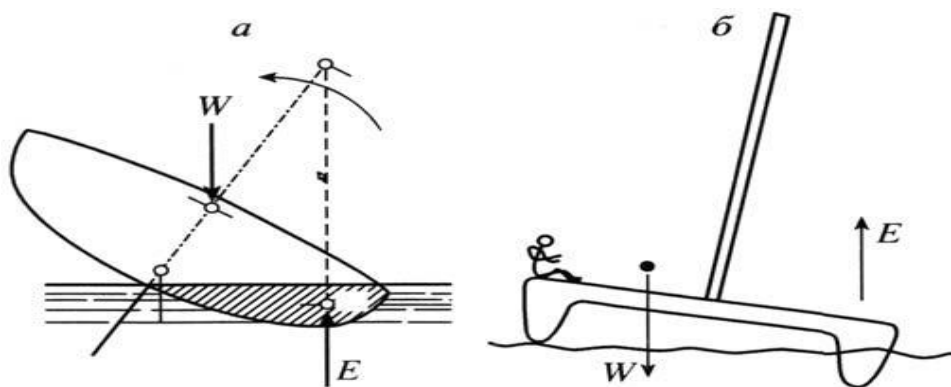


Рис. 2.1.

График (рис. 2.2.) показывает зависимость действующих моментов силы M от угла крена θ [8]:

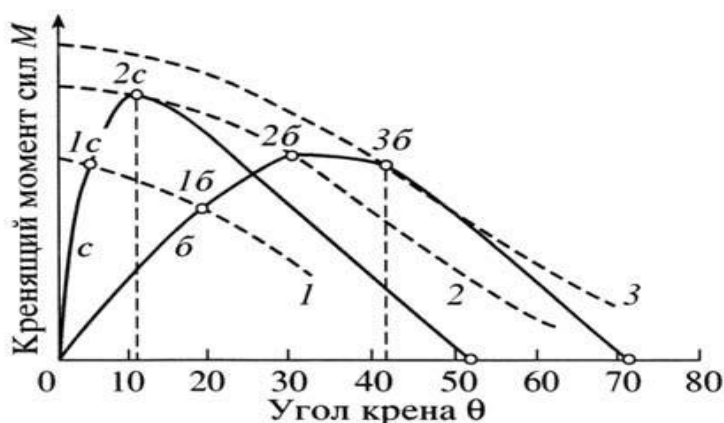


Рис. 2.2.

Видно, что когда кренящий момент ветра (1-3) больше момента устойчивости (с, б), то дерево кренится до тех пор, пока моменты не выровняются. Также видно, что дерево с горизонтальной корневой системой должно выдерживать без существенного крена ветры большей силы, чем деревья с вертикальной корневой системой. Но при достижении критической силы ветра эти деревья резко теряют устойчивость и вываливаются с корнями. Деревья с вертикальной корневой системой могут сохранять устойчивость при бóльших углах

крена, чем деревья с горизонтальным расположением корней, однако под ветровым воздействием они будут сильнее изгибаться и у них существенно возрастет вероятность излома ствола.

Другой тип модели – дерево как жёсткая колонна на упругом основании под действием горизонтально направленной силы P [5, 127]. С этой точки зрения и анализируется устойчивость дерева. Физические свойства основания определяются как реакция основания в некоторой точке. Эта реакция пропорциональна осадке подошвы в этой же точке $\gamma = -c\theta$, где c – коэффициент пропорциональности.

Угол отклонения колонны (рис. 2.3) находится из уравнения моментов

$$-Ph - Ql\theta + cJ = 0 \quad (2.9)$$

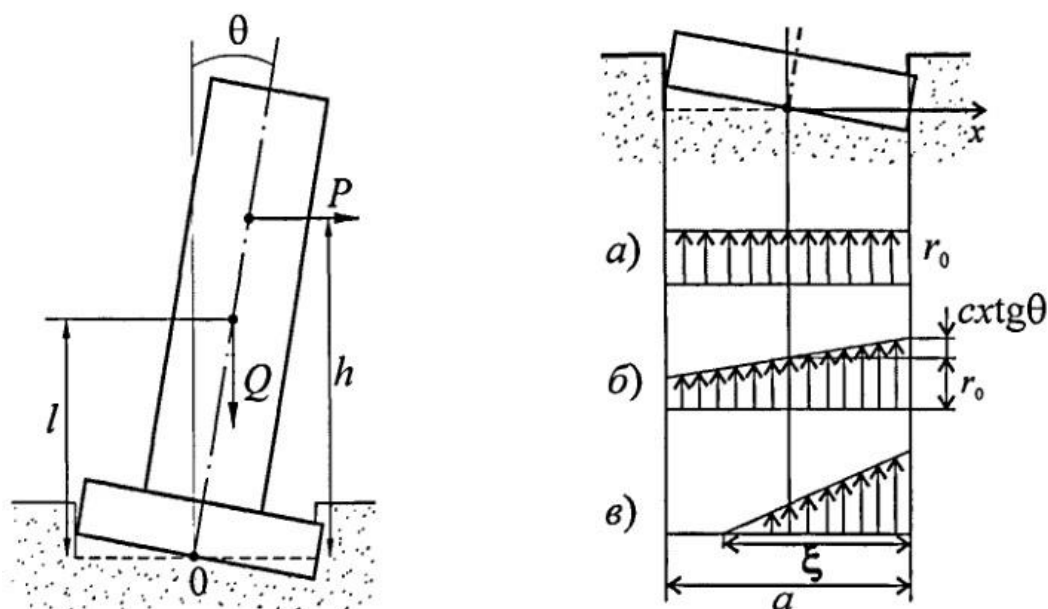


Рис. 2.3

В этом уравнении первый член – момент горизонтальной силы P (h – ордината точки приложения силы P); второй член – момент силы веса колонны Q (в этом и последующем члене сделано приближение $\theta \approx \sin \theta \approx \text{tg } \theta$); третий член – момент распределенных сил реакции основания (J – момент инерции площади основания относительно оси, перпендикулярной плоскости чертежа и проходящей через центр тяжести подошвы фундамента).

Из формулы (2.9)

$$P = (cJ - Ql) \theta / h \quad (2.10)$$

Такая модель позволяет внутри неё перейти от рассмотрения деревьев со стержневой корневой системой к деревьям с поверхностной системой. При этом увеличиваются геометрические параметры фундамента.

При $P = 0$ определяется критическое значение нагрузки для конкретной колонны (дерева)

$$Q = cJ/l \quad (2.11)$$

Колонна будет устойчива до тех пор, пока подошва плотно прилегает к основанию. В момент её отрыва от основания устойчивость становится зависима от угла отрыва от основания

$$\theta = 2Q/ca^2b \quad (2.12)$$

где a и b – стороны основания колонны. При увеличении действия силы P , угол наклона растёт. Максимальной силе, которую может выдержать колонна без опрокидывания соответствует предельный угол

$$\theta = (Q/18l^2 bc)^{1/3} \quad (2.13)$$

Дальнейшее увеличение действия силы приводит к опрокидыванию колонны. Соответственно и дерево в таких условиях будет вывернуто из земли. Было показано, что дерево с горизонтальной корневой системой должно выдерживать без существенного крена ветры большей силы, чем дерево с вертикальной корневой системой. Но при достижении критической силы ветра дерево с горизонтальной корневой системой резко теряет устойчивость и вываливается с корнями. Деревья с вертикальной корневой системой могут сохранять устойчивость при больших углах крена, чем деревья с горизонтальным расположением корней, однако у таких деревьев существенно возрастает вероятность излома ствола. Использование моделей позволяет смоделировать реальную ситуацию с конкретным деревом.

2.3. Автоматизированный калькулятор

Программное обеспечение написано на языке Python (рис. 2.4). Минимальная версия Python для запуска: 3.9. Для запуска необходимо иметь ОС Windows 10 (или выше) или установленный пакет Microsoft Visual C++ 2015. Для отрисовки графического интерфейса используется библиотека PyQt5 (рис. 2.5). Математические операции выполняются стандартными средствами языка. Разрабатывалось в среде программирования Py Charm, после чего было скомпилировано через метод pyinstaller в формат .exe. Приложение кроссплатформено, для его запуска подойдут операционные системы Linux, Windows и Mac OS. Полный вид калькулятора представлен в Приложении.

```

86     def returnToHome_2():
87         MainWindow_3.close()
88
89     def on_click_2():
90         C = int(ui.lineEdit_2.text())
91         j = int(ui.lineEdit_3.text())
92         I = int(ui.lineEdit_4.text())
93         # тут посчитаешь по формуле всё что тебе нужно
94         ans = C * j / I
95         ui.label_9.setText(str(ans))
96
97         ui.pushButton_2.clicked.connect(on_click_2)
98
99
100        ui.pushButton.clicked.connect(returnToHome_2)
101
102        ui.pushButton_3.clicked.connect(openOtherWindow_2)
103
104    def openOtherWindow_3():
105        global MainWindow_4
106        MainWindow_4 = QtWidgets.QMainWindow()
107        ui = Ui_MainWindow_4()
108        ui.setupUi(MainWindow_4)
109        MainWindow.close()
110        MainWindow_4.show()
111
112    def returnToHome_3():
113        MainWindow_4.close()
114
115    def on_click_3():
116        e = int(ui.lineEdit_2.text())
117        I = int(ui.lineEdit_3.text())
118        # тут посчитаешь по формуле всё что тебе нужно
119        ans = e * I**(1/3)
120        ui.label_7.setText(str(ans))
121
122        ui.pushButton_2.clicked.connect(on_click_3)
123
124        ui.pushButton.clicked.connect(returnToHome_3)
125
126
127        ui.pushButton_5.clicked.connect(openOtherWindow_3)

```

Рис. 2.4

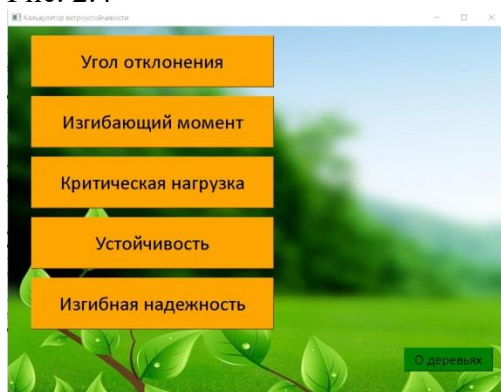


Рис. 2.5

Ссылка на программу:

https://drive.google.com/file/d/1tULWJj3ibOUa_EhwHq0_w5hvfQO8adUWS/view?usp=sharing

ВЫВОДЫ

В процессе выполнения проекта был разработан автоматизированный калькулятор для проектирования устойчивой к действию ветровой нагрузки «зеленой» инфраструктуры города на основе моделирования поведения одиночного дерева.

При исследовании стабилизации деревьев на грунтовом основании изучался ряд факторов, влияющих на устойчивость деревьев. Рассматривались ветроустойчивость на изгиб, корневые системы деревьев, разновидности крон, механические свойства древесины.

Перечисленные особенности ветроустойчивости деревьев, главным образом определяются различной структурной организацией надземных и подземных частей деревьев как одной породы, так и разных пород. От формы ствола, положения прикорневых наплывов и главных корней, от положения дерева в пологе зависит сопротивление дерева на изгиб. Устойчивость деревьев к воздействию внешних и внутренних факторов (влияние ветра, вибрация от движения транспорта) во многом связана с характером корневой системы дерева, ее развитием в тех или иных условиях, а также от качества грунта, в котором оно произрастает.

Рассмотренные модели подходят для создания программных комплексов, которые могут рассчитывать ветроустойчивость различных пород деревьев с учётом всех факторов. Такие подходы в реальных условиях позволят значительно уменьшить вывал деревьев от ветрового воздействия, так как будут высаживаться деревья подходящие по ветроустойчивости к конкретному региону.

Список литературы

1. Захаров Ю.В. Модели устойчивости деревьев и насаждений к воздействию ветра / Ю.В. Захаров, В.Г. Суховольский // Лесоведение. 2004. - N22. - С. 61-67.
2. Попов Е.П. Теория и расчет гибких упругих стержней / Е.П. Попов. - М.: Наука, 1986.
3. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н. Работнов. -М.: Наука, 1979.-744 с.
4. Филенкова Н.В. Изгиб упруго закрепленной консоли под действием поперечной нагрузки / Н.В. Филенкова, А.Ю. Власов. // Тр. III Всесибирского конгресса женщин-математиков / Красноярск: ИВМ СО РАН, 2004, 124-125.
5. Захаров Ю.В. Упруго закрепленный стержень и колонна на упругом основании под действием поперечной нагрузки: модели двух предельных случаев ветроустойчивости дерева / Ю.В. Захаров, Н.В. Филенкова, В.Г. Суховольский //Вестник КрасГУ. «Физико-математические науки». - 2006.-№1.-С. 16-20.
6. Захаров Ю.В. Изгиб жестко и упруго закрепленной консоли при поперечном нагружении - точные решения / Ю.В. Захаров, К.Г. Охоткин, А.Ю. Власов, Н.В. Филенкова. // Сборник трудов XXI Международной конференции. Математическое моделирование в механике сплошных сред.
7. Захаров Ю.В. Точные и приближенные формулы для прогибов упруго закрепленного стержня под действием поперечной нагрузки.
8. <http://www.activestudy.info/biologicheskie-factory-vyvala-derevev/>
9. http://kishar.ru/around/strc_dereva.php