

## Напряженно-деформированное состояние сооружений электросетевого хозяйства, расположенных в условиях Крайнего Севера

Э.Ю. Абдуллазянов<sup>1</sup>, Л.С. Сабитов<sup>1,2,4</sup>, М.М. Айзатуллин<sup>1</sup>,  
К.Г. Адушкин<sup>5</sup>, В.А. Гарькина<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Казанский государственный энергетический университет,

<sup>2</sup> Московский государственный строительный университет,

<sup>3</sup> Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского  
(Первый казачий университет),

<sup>4</sup> Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

<sup>5</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

**Аннотация:** Приводится метод определения напряженно-деформированного состояния свайных фундаментов под металлические опоры линий электропередач при технической экспертизе объектов электросетевого хозяйства в условиях Крайнего Севера. Дается пример расчета с использованием автоматического программного комплекса ЛИРА. Определяются наиболее напряженные участки конструкций. Доказывается перспектива использования САПР при технической экспертизе объектов электросетевого хозяйства.

**Ключевые слова:** строительные конструкции, металлические конструкции, объекты энергетики, напряженно-деформированное состояние, техническая экспертиза.

Объекты электросетевого хозяйства относятся к элементам критической инфраструктуры, повреждения которых может вызвать катастрофические последствия (как в виде материального ущерба, так и в виде угрозы жизни и здоровья населения). В связи с этим, поддержание строительных конструкций зданий и сооружений электросетевого хозяйства в нормальном эксплуатационном состоянии является актуальной задачей, особенно в условиях Крайнего Севера. Рассмотрим на реальном примере способ проведения технической экспертизы с определением напряженно-деформированного состояния свайных фундаментов под металлические опоры линий электропередач.

Расчеты выполнены с целью проверки свайных фундаментов опор с учетом фактических сверхнормативных отклонений свай в плане. Расчету подлежат фундаменты под одиннадцать опор ВЛ 110 кВ «Полярная ГТЭС» - ПС «Тагул», ПС110/35/10 кВ «Тагул». Исполнительные схемы плановых положений свай для рассматриваемых опор предоставлены заказчиком.

---

Расчетами предусмотрена проверка несущей способности свай (прочности материала свай) при совместном действии вертикальных и горизонтальных сил (в том числе моментов), которые вызваны сверхнормативными отклонениями свай в плане. Расчетная схема свай в грунте описывается как взаимодействие балки и упругого основания (балка на упругом основании с переменным коэффициентом постели) с применением линейных контактных элементов. В расчете реализован учет взаимного влияния рядом расположенных свай относительно друг друга в кусте.

Проверка несущей способности свай (по грунту) на сжатие и выдергивание (в том числе, на воздействие сил морозного пучения), а также проверка осадок свай от действия вертикальных сжимающих сил условиями договора не предусмотрена и в данной работе не выполняется, данные расчеты выполнены проектной организацией при разработке рабочей документации (вертикальные сжимающие и выдергивающие нагрузки не изменяются).

По результатам выполненных расчетов можно сделать вывод, что несущая способность свай (прочность материала свай) одиннадцати опор при расчете на совместное действие вертикальных и горизонтальных сил (в том числе моментов), которые вызваны сверхнормативными отклонениями свай в плане обеспечена.

Для приведения конструкций в работоспособное состояние, дальнейшей безопасной эксплуатации и увеличения срока службы строительных конструкций рекомендуется выполнить следующие мероприятия:

- 1) При монтаже вышележащих строительных конструкций (оголовков свай, ростверков и элементов опор) для свай, у которых зафиксированы сверхнормативные отклонения в плане следует разработать

---

технические решения/ проект по усилению оголовков свай для обеспечения опирания и передачи нагрузок от вышележащих элементов опор на конструкции свай. При разработке технических решений/ проекта следует обратить внимание на обеспечение местной несущей способности стенки трубы оголовка свай в местах передачи сосредоточенных усилий от элементов усиления.

2) Все последующие строительно-монтажные работы следует выполнять в соответствии с действующей нормативной документацией и рабочей документацией шифр 7520014/0275Д-33-835000-КС3 и 7520014/0275Д-33-835000-КС4.

После выполнения работ, при дальнейшей эксплуатации строительных конструкций, необходимо придерживаться системы планово-предупредительного ремонта зданий и сооружений, в соответствии с действующими нормативными документами.

Марка опоры – 2П220-2-5,0; Марка свай – СМ325.10; Свая - труба Ø325x10, сталь – 09Г2С; Диаметр скважины – 400 мм; Общая длина свай – 10 м.; Длина свай, погруженная в грунт – 9,5 м.

Способ погружения свай – буроопускной в предварительно пробуренную скважину. Скважина бурится на 100 мм ниже глубины погружения свай. Диаметр скважины 400 мм (превышает более, чем на 50 мм номинальный диаметр стальной трубы-свай). Перед погружением свай скважина на 1/3 глубины заполняется цементно-песчаным раствором марки не ниже 100 с осадкой конуса 12-16 см. После погружения свай до проектной отметки и ее фиксации в проектное положение в незаполненную часть полости между стенками скважины и свай доливаются цементно-песчаный раствор. Внутренняя полость свай до глубины 3 м от поверхности земли заполняется бетоном класса В7,5, оставшиеся верхняя часть свай заполняется мелкозернистым бетоном класса В15, F150, W4.

---



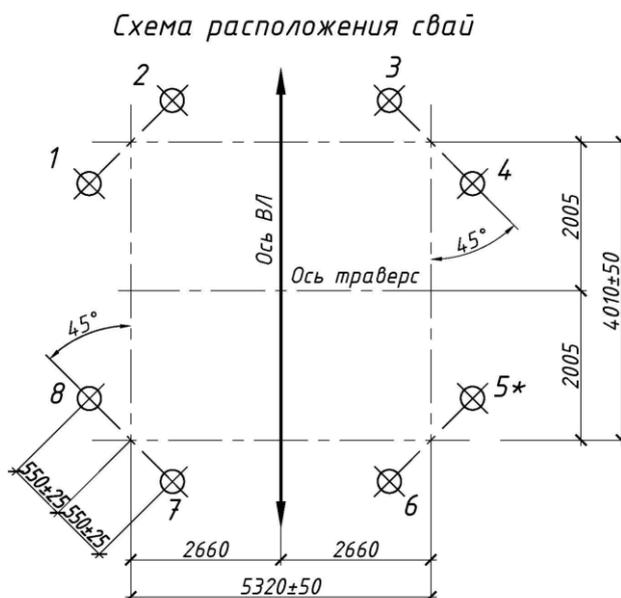


Рис.3. Данные из рабочей документации

Моделирование расчетной схемы. Расчеты выполнены в ПК ЛИРА-САПР. Жесткостные характеристики свай. Верхняя часть свай (3 м, бетон класса В15):

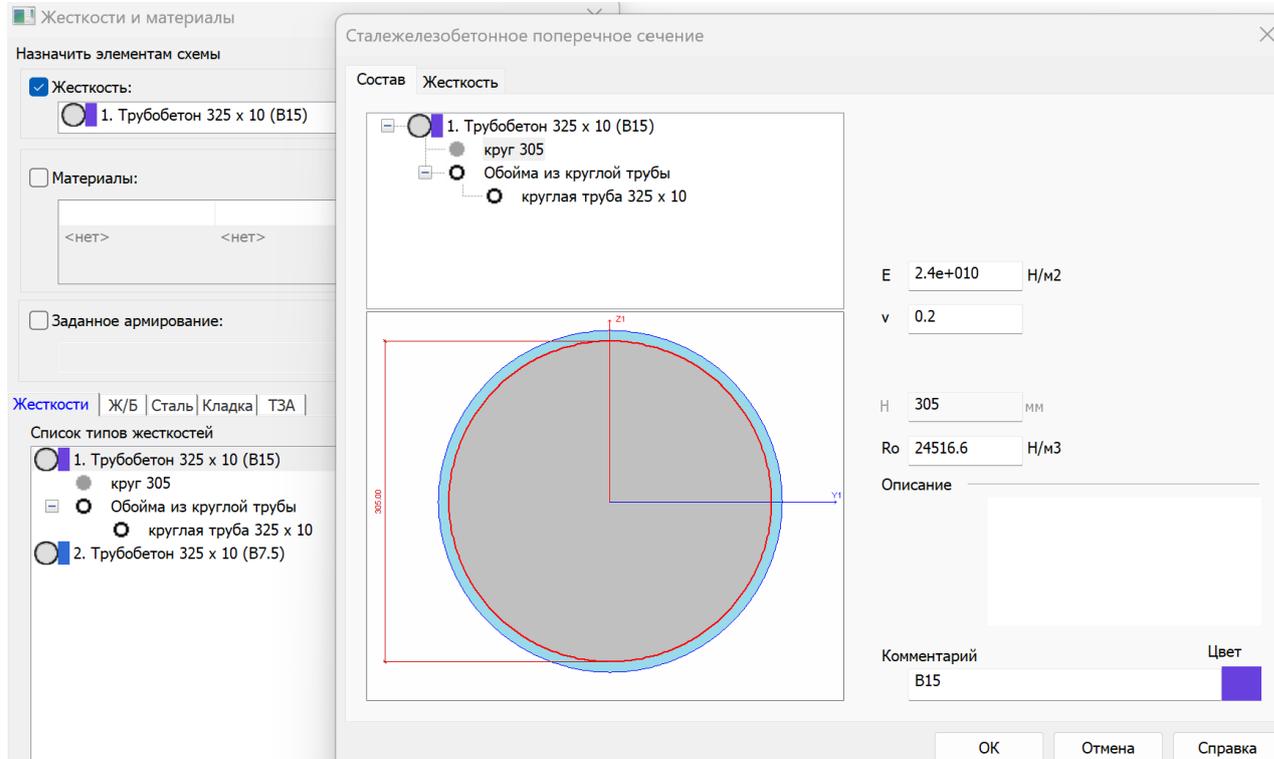


Рис. 4. Окно программы с жесткостными характеристиками свай

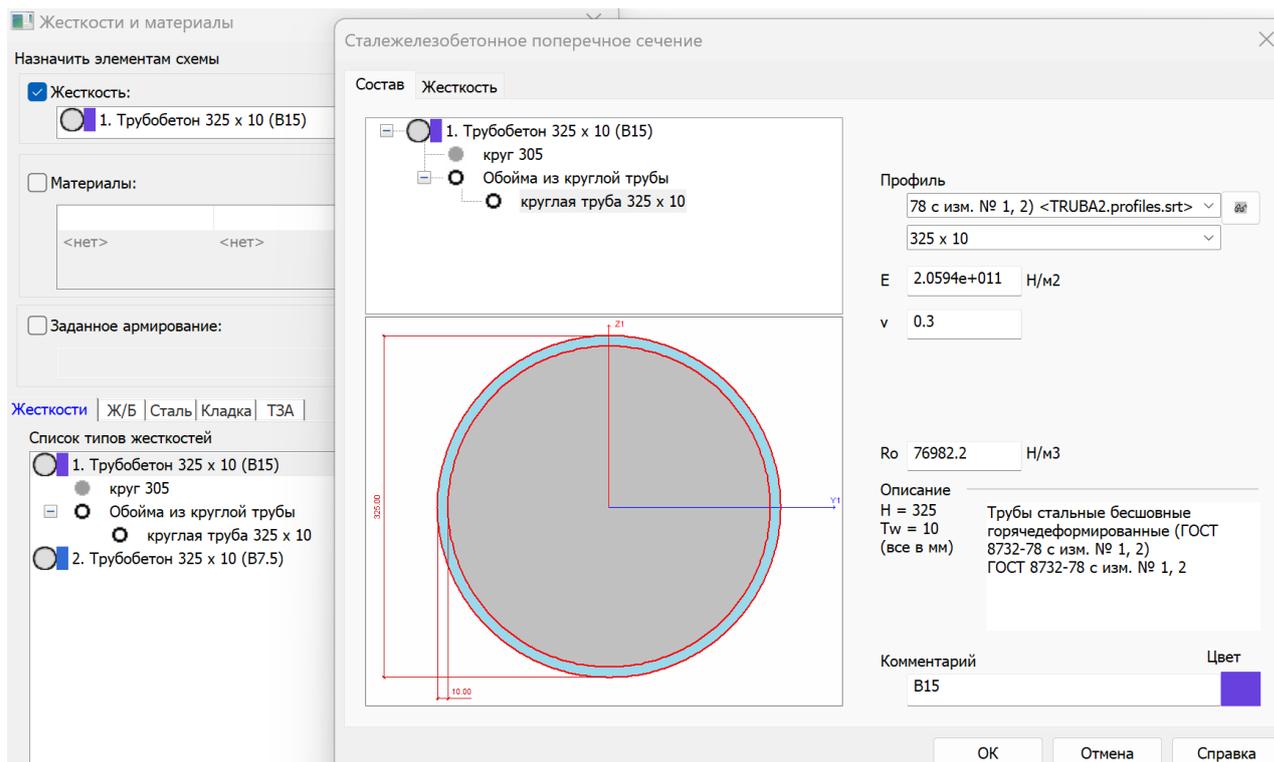


Рис.5. Окно программы с жесткостными характеристиками сваи

Нижняя часть сваи (ниже 3 м, бетон класса В7,5). В расчёте используется КЭ57, который предназначен для моделирования работы сваи совместно с окружающим ее грунтом и реализующий взаимосвязь с системой ГРУНТ. Расчетная схема приведена на рис.6,7.

212000 Н – максимальная вертикальная сжимающая нагрузка на сваю, принятая по рабочей документации;

13000 Н - максимальная горизонтальная нагрузка на сваю, принятая по рабочей документации;

25228 Нм и 49608 Нм – расчетные изгибающие моменты вызванные смещением свай в плане от проектных положений ( $212000 \cdot 0,119 = 25228$  Нм;  $212000 \cdot 0,234 = 49608$  Нм; где 0,119 м и 0,234 м – фактические максимальные отклонения свай в плане).

10000 мм – общая длина сваи от оголовка до острия.

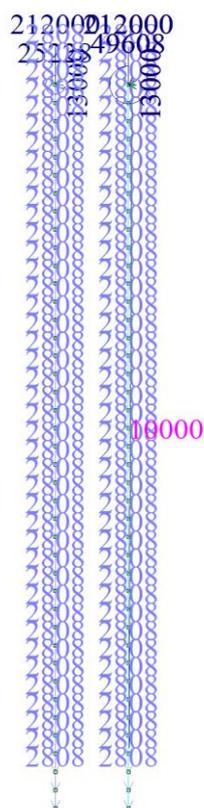


Рис.6. Расчетная схема свай куста

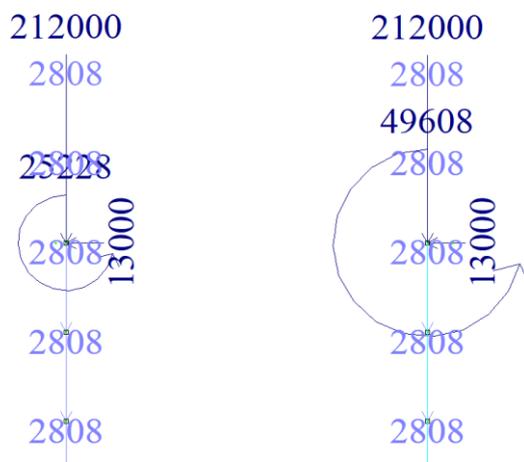


Рис. 7. Расчетная схема свай куста

Значения в расчетной схеме.

2808 Н/м – расчетная погонная нагрузка от веса сваи (посчитана автоматически в программном комплексе);

При расчете значения коэффициентов пропорциональности  $K$  для грунтов в зоне сезонного оттаивания уменьшают на 30% для оттаявших глинистых грунтов и уменьшают на 15% для водонасыщенных песков.

$$K=318 \cdot 0,7=223 \text{ тс/м}^4 \text{ (при } 0,5 < I_L < 0,75 \text{)}.$$

где 0,7 – уменьшение на 30% табличных значений.

Коэффициент пропорциональности для пластично мёрзлого грунта ИГЭ 21911 –  $K=(2,35 \cdot E) / (d \cdot l) = (2,35 \cdot 1500) / (0,325 \cdot 9,5) = 1142 \text{ тс/м}^4$

где,  $E$  – модуль общей деформации, пластично мёрзлого грунта, окружающего сваю, принятое значение  $15 \text{ Мпа} = 1500 \text{ тс/м}^2$  - показатель по справочным данным среди пластично мёрзлых суглинков при заданной степени водонасыщения  $S_r$ .

и  $d$  – соответственно, длина, м, погруженной в грунт части сваи и наружный диаметр, м, круглого или сторона прямоугольного сечения сваи в плоскости, перпендикулярной к действию горизонтальной нагрузки.

Результаты расчета и полученные усилия:

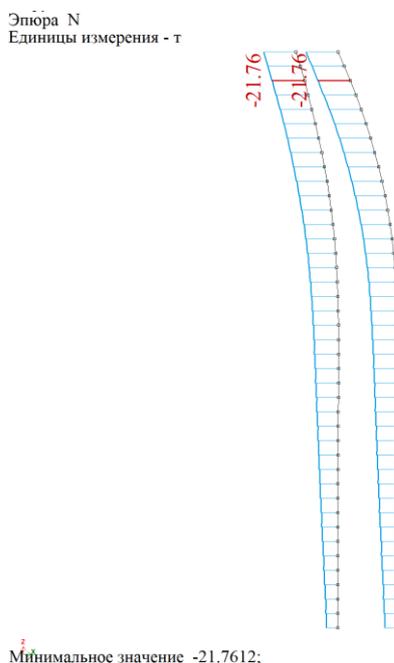
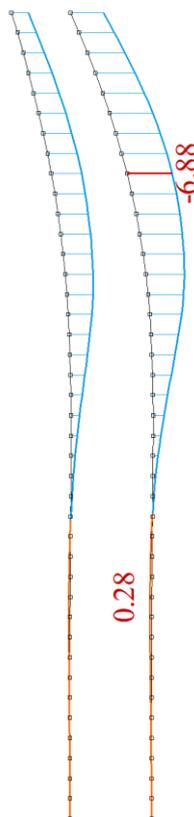


Рис.8. Усилия  $N$ , тс

Эпюра  $M_y$   
Единицы измерения - т\*м



Минимальное значение -6.87767; Максимальное значение 0.282527

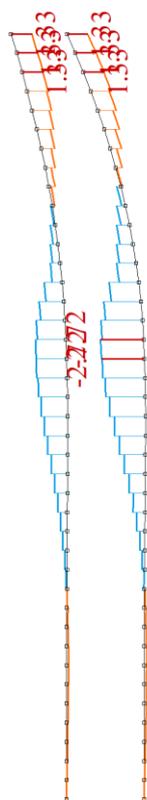
Рис.9. Усилия  $M$ , тс м

Выполним проверку прочности сечения сваи. В запас несущей способности проверка выполнена с учётом стального сечения трубы (без учета работы бетона внутри трубы).

Исходные данные:

Нормальная сила  $N = 21,76 \text{ тс} = 21,76 / 0,00010197162123 = 213392,70414 \text{ Н}$ ; Изгибающий момент  $M_x = 6,88 \text{ тс/ м} = 6,88 / 0,000000101972 = 67469501,43177 \text{ Н мм}$ ; изгибающий момент  $M_y = 0 \text{ тс м} = 0 / 0,000000101972 = 0 \text{ Н мм}$ ; поперечная сила на одну стенку сечения  $Q_y = 2,71 \text{ тс} = 2,71 / 0,00010197162123 = 26576,02152 \text{ Н}$ ;

Эпюра Qz  
Единицы измерения - т



Минимальное значение -2.71731; Максимальное значение 1.32563

Рис. 10 Усилия Q, тс

Физические характеристики: модуль сдвига  $G = 76000$  МПа; модуль упругости  $E = 206000$  МПа; прочность: вид металла - фасонный прокат; сталь и толщина металла - С345 по ГОСТ 27772;  $t =$  от 4 до 10 включ. мм;

Предел текучести стали  $R_{yn} = 345$  МПа; временное сопротивление стали разрыву  $R_{un} = 480$  МПа; расчетное сопротивление растяжению, сжатию, изгибу по пределу текучести  $R_y = 340$  МПа; расчетное сопротивление растяжению, сжатию, изгибу по временному сопротивлению  $R_u = 470$  МПа; расчетное сопротивление стали сдвигу  $R_s = 197$  МПа;

Коэффициенты надежности и условия работы: коэффициент условия работы  $g_c = 1$ ; коэффициент надежности в расчетах по временному сопротивлению  $g_u = 1,3$ ; коэффициент надежности по нагрузке  $g_f = 1,4$ ; основные характеристики сечений:

Трубы стальные бесшовные горячедеформированные по ГОСТ 8732-78; Тр. 325x10; Сечение - одноветвевое; Высота  $h = 325$  мм; ширина  $b = 325$  мм; толщина стенки  $t_w = 10$  мм; толщина полки  $t_f = 10$  мм; радиус закругления  $r = 152,5$  мм; площадь  $A = 98,96017 \text{ см}^2 = 98,96017 / 0,01 = 9896,017 \text{ мм}^2$ ; погонная масса  $m = 77,68373 \text{ кг/м}$ ; момент инерции  $J_x = 12286,52 \text{ см}^4 = 12286,52 / 0,0001 = 122865200 \text{ мм}^4$ ; момент инерции  $J_y = 12286,52 \text{ см}^4 = 12286,52 / 0,0001 = 122865200 \text{ мм}^4$ ; момент сопротивления нетто  $W_{x1} = 756,094 \text{ см}^3 = 756,094 / 0,001 = 756094 \text{ мм}^3$ ; момент сопротивления нетто  $W_{x2} = 756,094 \text{ см}^3 = 756,094 / 0,001 = 756094 \text{ мм}^3$ ; момент сопротивления нетто  $W_{y1} = 756,094 \text{ см}^3 = 756,094 / 0,001 = 756094 \text{ мм}^3$ ; момент сопротивления нетто  $W_{y2} = 756,094 \text{ см}^3 = 756,094 / 0,001 = 756094 \text{ мм}^3$ ; статический момент  $S_x = 496,292 \text{ см}^3 = 496,292 / 0,001 = 496292 \text{ мм}^3$ ; статический момент  $S_y = 496,29 \text{ см}^3 = 496,29 / 0,001 = 496290 \text{ мм}^3$ ; момент инерции при кручении  $J_t = 24573,05 \text{ см}^4 = 24573,05 / 0,0001 = 245730500 \text{ мм}^4$ ;

Дополнительные характеристики сечений: расчетная ширина пояса коробчатого сечения  $b_{ef, 1} = 219$  мм; расчетное сопротивление стали сжатию для полки (пояса)  $R_{yf} = 340$  МПа;

Расчет на прочность внецентренно-сжатых или внецентренно-растянутых элементов. Элемент - внецентренно-сжатый. Сейсмичность площадки строительства - не более 6 баллов.

Коэффициент условия работы  $m_{кр} = 1$ . Предел текучести стали:  $R_{yn} = m_{кр} R_{yn} = 1 * 345 = 345$  МПа. Временное сопротивление стали разрыву:  $R_{un} = m_{кр} R_{un} = 1 * 480 = 480$  МПа. Расчетное сопротивление растяжению, сжатию, изгибу по пределу текучести:  $R_y = m_{кр} R_y = 1 * 340 = 340$  МПа.

Расчетное сопротивление растяжению, сжатию, изгибу по временному сопротивлению:  $R_u = m_{кр} R_u = 1 * 470 = 470$  МПа. Расчетное сопротивление стали сдвигу:  $R_s = m_{кр} R_s = 1 * 197 = 197$  МПа.

Непосредственное воздействие на элемент динамических нагрузок - отсутствует. Ослабления стенки отверстиями - отсутствуют.

Площадь нетто:  $A_n = A = 9896,017 \text{ мм}^2 = 98,96 \text{ см}^2$ . Поперечная сила в сечении - имеется. Касательные напряжения:

$$t = Q_y S_x / (J_x t_w) = 26576,02152 * 496292 / (122865200 * 10) = 10,74 \text{ МПа} .$$

Не выполнены все или некоторые из следующих условий:  $t/R_s = 10,73491/197 = 0,05449 < 0,5$  и  $N/(A_n R_y) = 213392,7/(9896,017 * 340) = 0,06342 > 0,1$

Учет ослаблений сечения. Ослабления рассматриваемого сечения - отсутствуют. Тип сечения - замкнутые. Изгиб - в одной из главных плоскостей.

$N/(A_n R_y g_c) + M_x / (W_{xn1} R_y g_c) = 213392,7 / (9896,017 * 340 * 1) + 67469501,43177 / (756094 * 340 * 1) = 0,32588 < 1$  (32,58758% от предельного значения) - условие выполнено.

Прочность сваи на совместное действие сжимающих и горизонтальных нагрузок обеспечена.

Таким образом, использование автоматизированных систем расчета (ЛИРА, SCAD и иных) может дать наиболее объективную оценку состояния строительных конструкций объектов электросетевого хозяйства.

#### Литература:

1. Ельцов Р.И. Разработка технологического процесса изготовления сварных конструкций // Строительные материалы и изделия. 2021. Т. 4. № 5. С. 35 – 44.
2. Ведяков И.И., Гукова М.И., Фарфель М.И., Кондрашов Д.В., Яровой С.Н. Обследование конструкций зданий и сооружений завода ОАО "Тагмет" // Строительная механика и расчет сооружений. – 2013. – № 1 (246). – С. 58-64.

3. Баламирзоев А.Г., Муртузов М.М., Селимханов Д.Н., Дибирова З.Г., Абдуллаев А.Р. Нелинейные поперечные колебания составных стержней при действии статически приложенной поперечной нагрузки // Строительные материалы и изделия. 2021. Т. 4. № 2. С. 29 – 37

4. Гучкин И.С., Булавенко В.О. Усиление железобетонной балки стальной затяжкой, накладками и фиброармированным пластиком // Региональная архитектура и строительство. 2012. № 1. С. 69-74

5. Евсеев А.Е., Гарькин И.Н., Ахметов Ф.М. Способ получения матрицы жёсткости стержневого конечного элемента для деформационного расчета по дифференциальному уравнению // Системные технологии. 2024. № 2 (51). С. 5-13.

6. Кузин Н.Я., Багдоев С.Г. Оценка внешних факторов на несущую способность конструкций гражданских зданий // Региональная архитектура и строительство. 2012. №2 С.79-82.

7. Снегирева А.И., Мурашкин В.Г. К вопросу обследования строительных конструкций, зданий и сооружений // Эксперт: теория и практика. 2021. №6 (15). С. 45-51

8. Шеина С. Г., Виноградова Е.В., Денисенко Ю.С. Пример применения BIM технологий при обследовании зданий и сооружений // Инженерный вестник Дона. 2021. № 6. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2021/7037](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2021/7037)

9. Garkin I.N., Garkina I.A. System approach to technical expertise construction of building and facilities // Contemporary Engineering Sciences. – 2015. Vol.8. №5. pp.213-217.

10. Петрова И.Ю., Мостовой О.О. Обзор процесса проведения обследований зданий и сооружений. Проблемы и пути их решения. // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал. 2013. № 1 (36). С. 12-20.

---



11. Нежданов К.К., Гарькин И.Н. Способ проката двутаврового профиля сечения из низколегированной стали // Строительная механика и расчет сооружений. 2011. № 4 (237). С. 51-54.

### References

12. El'cov R.I. Stroitel'nye materialy i izdelija. 2021. Т. 4. № 5. pp. 35 – 44.

13. Vedjakov I.I., Gukova M.I., Farfel' M.I., Kondrashov D.V., Jarovoj S.N. Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij. 2013. № 1 (246). pp. 58-64.

14. Balamirzoev A.G., Murtuzov M.M., Selimhanov D.N., Dibirova Z.G., Abdullaev A.R. Stroitel'nye materialy i izdelija. 2021. Т. 4. № 2. pp. 29 – 37.

15. Guchkin I.S., Bulavenko V.O. Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo. 2012. № 1. pp. 69-74.

16. Evseev A.E., Gar'kin I.N., Ahmetov F.M. Sistemnye tehnologii. 2024. № 2 (51). pp. 5-13.

17. Kuzin N.YA., Bagdov S.G. Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo. 2012. №2. pp.79-82.

18. Snegireva A.I., Murashkin V.G. Jekspert: teorija i praktika. 2021. №6 (15). pp. 45-51.

19. Sheina S. G., Vinogradova E. V., Denisenko Yu. C. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. № 6. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2021/7037](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2021/7037)

20. Garkin I.N., Garkina I.A. Contemporary Engineering Sciences. 2015. Vol.8. №5. pp.213-217.

21. Petrova I.Ju., Mostovoj O.O. Inzhenerno-stroitel'nyj vestnik Prikaspija: nauchno-tehnicheskij zhurnal. 2013. № 1 (36). pp. 12-20.

22. Nezhdanov K.K., Gar'kin I.N. Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij. 2011. № 4 (237). pp. 51-54.

**Дата поступления: 7.10.2024**

**Дата публикации: 21.11.2024**

---