
СТРОИТЕЛЬСТВО, РЕМОНТ И СОДЕРЖАНИЕ МОСТОВ

Научная статья

УДК 624.21

EDN: PDFZVK



**К РАСЧЕТУ СТАЛЬНЫХ СВАЙ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ УСТОЕВ МОСТОВ**

Виктор Иванович Попов

ORCID ID: 0009-0000-5252-8286

Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия
popov.viktor@gmail.com

***Аннотация:** В статье приведена методика расчета стальных свай интегральных устоев, основанная на рассмотрении свай в виде стоек, подверженных действию осевых сил и изгибающих моментов. При этом учитывается влияние бокового давления грунта, интенсивность которого зависит от уровня продольных перемещений интегрального устоя. В методике использованы зависимости, принятые в действующих сводах правил для проектирования мостов и конструкций, а также регламентированные в зарубежной нормативной документации. Методика позволяет подобрать сечения свай и выполнить необходимые проверки по предельным состояниям. Результаты расчетов могут быть использованы при верификации компьютерных расчетов интегральных мостов.*

***Ключевые слова:** интегральный устой, стальные гибкие сваи, боковое давление грунта, перемещения.*

Для цитирования: Попов В.И. К расчету стальных свай интегральных устоев мостов // Дороги и мосты. 2024. № 51/1. С. 140-152.

BRIDGE CONSTRUCTION, REPAIR AND MAINTENANCE

Original article

TO THE CALCULATION OF STEEL PILES OF INTEGRAL BRIDGE ABUTMENTS

Viktor I. Popov

ORCID ID: 0009-0000-5252-8286

Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI),
Moscow, Russia
popov.viktor@gmail.com

Abstract: *The article presents a method for calculating steel piles for integral abutments, based on considering piles in the form of posts subject to axial forces and bending moments. At the same time the influence of lateral soil pressure, the intensity of which depends on the level of longitudinal movements of the integral abutment influence is taken into account. The method uses dependencies adopted in the current codes of practice for bridges and structures design, as well as those regulated in foreign normative documents. The method allows to select pile sections and perform necessary checks. The calculation results can be used to verify computer calculations of integral bridges.*

Keywords: *integral abutment, steel flexible piles, lateral soil pressure, displacements.*

For citation: Popov V.I. To the calculation of steel piles of integral bridge abutment // Roads and Bridges. 2024; (51/1): 140-152. (In Russ.).

ВВЕДЕНИЕ

Интегральные мосты, применяемые в некоторых странах мира, проектируются с использованием компьютерных программ, которые в большинстве своем не позволяют учитывать циклическую работу стальных свай на знакопеременные напряжения. Применяемый в отечественной практике программный комплекс MIDAS упрощенно учитывает боковое давление грунта насыпи в линейной постановке в фазе покоя. В действительности давление грунта за интегральным устоем со временем под действием циклического изменения температуры наружного воздуха распределяется по нелинейной зависимости [1, 2].

Наиболее часто применяемые в интегральных устоях стальные сваи двутаврового профиля в действующем СП 24.13330¹ не представлены, а указана возможность применения только стальных винтовых свай. Кроме того, в отечественных нормативных документах по мостостроению не регламентируется как проектирование интегральных мостов на гибких сваях, так и функционирование стальных свай интегральных устоев, что в определенной степени сдерживает их применение в отечественной практике. В связи с этим целью проведенных исследований являлась разработка методики расчета стальных свай интегральных устоев, которая учитывала бы особенности работы таких свай в условиях знакопеременных перемещений интегральных устоев.

Предлагаемая методика, использует классические методы расчета конструкций и правила действующих нормативных документов^{1,2,3}. Кроме того, имеется возможность использовать ранее полученные исследователями других стран результаты и рекомендации по учету поведения стальных свай интегральных устоев [3, 4].

Метод исследования

Исследование проведено на основе расчетов мостов с интегральными устоями и поведения гибких стальных свай, обеспечивающих перемещения пролетного строения без опорных частей. Рассматриваются мостовые сооружения с малыми пролетами, для которых целесообразно применение интегральных устоев. Общая длина таких сооружений при ограничении перемещений по концам переходных плит до 50 мм составляет порядка 240-280 м в зависимости от способа опирания пролетного строения на промежуточные опоры [5].

В соответствии с СП 24.13330 расчетная модель конструкции должна строиться таким образом, чтобы содержать погрешности только в сторону запаса надежности.

¹ СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 02-03-85 / Минрегион России. – М., 2011. – 90 с.

² СП 35.13330-2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05-03-84* / Минрегион России. – М., 2011. – 347 с. – Консорциум «Кодекс»: офиц. сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200084849> (дата обращения: 16.02.2024).

³ СП 16.13330. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81 / Минстрой России. – М., 2017. – 183 с. – Консорциум «Кодекс»: офиц. сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456069588>(дата обращения: 16.02.2024).

Результаты

Будем рассматривать фрикционную сваю как стойку, заделанную нижним концом и имеющую возможность перемещаться в горизонтальном направлении на величину Δ (рис. 1).

Глубина расположения заделки сваи l_1 может быть определена в соответствии с СП 24.13330 по формуле (1):

$$l_1 = l_0 + \frac{2}{\alpha_\varepsilon}, \quad (1)$$

где

l_0 – расстояние от верха сваи до поверхности грунта основания;
 α_ε – коэффициент деформации, определяемый по Прилож. Г⁴ и имеющий размерность $[\frac{1}{M}]$.

$$\text{Если } \frac{2}{\alpha_\varepsilon} > h, \text{ то } l_1 = l_0 + h,$$

где

h – глубина погружения сваи ниже поверхности грунта основания.

Коэффициент деформации определяется по формуле (2):

$$\alpha_\varepsilon = \sqrt[5]{\frac{Kb_p}{\gamma_c EI}}, \quad (2)$$

где

K – коэффициент пропорциональности, принимаемый в зависимости от вида грунта вокруг сваи по табл. 6.1 [3];

b_p – условная ширина сваи, м;

γ_c – коэффициент условий работы (для отдельно стоящей сваи равен 3);

E – модуль упругости материала сваи, кПа (тс/м²);

I – момент инерции сечения сваи, м⁴.

В рекомендациях американских исследователей [3] стальные сваи интегральных устоев рассматриваются также как отдельные стойки, не соединенные между собой никакими связями (рис. 1). При этом расчетная длина сваи определяется в зависимости от следующего параметра:

⁴СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 02-03-85.

$$l_c = 4 \sqrt[4]{\frac{EI}{K}}, \quad (3)$$

где обозначения совпадают с приведенными в формуле (2).

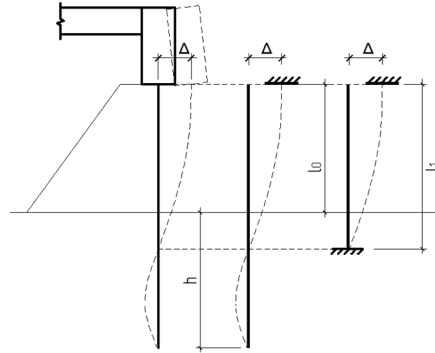


Рис. 1. Расчетная схема сваи интегрального устоя

Длина сваи от поверхности основания до условной заделки l_e определяется по-разному в зависимости от рассматриваемого напряженно-деформированного состояния сваи, а именно: при действии только осевой нагрузки $l_e = 0,5 l_c$, при действии изгибающего момента на сваю $l_e = 0,6 l_c$ и при расчетах на общую устойчивость $l_e = 1,1 l_c$ (**рис. 1**). Полная длина расчетной схемы сваи равна:

$$l_1 = l_0 + l_e. \quad (4)$$

Величина l_1 по формуле (4) при этом оказывается примерно на 25-30 % больше, чем по формуле (1), если не учитывать в формуле (1) пониженный коэффициент K .

Поскольку насыпь и основание сложены из различных грунтов, то в формулах (1) и (3) следует учитывать значение K для эквивалентного однородного грунта.

Эквивалентный коэффициент пропорциональности определяется по формуле (**рис. 2**):

$$K_e = \frac{3}{l_1^3} \int_0^{l_1} K(z)(l_1 - z)^2 dz. \quad (5)$$

При этом кривая деформирования сваи заменяется линейной зависимостью, а именно:

$$x = \Delta (l_1 - z) / l_1, \quad (6)$$

где

Δ – боковое смещение сваи в уровне ее верха.

Поскольку длина l_1 является функцией K_e , то для определения K_e необходимо сделать несколько итераций.

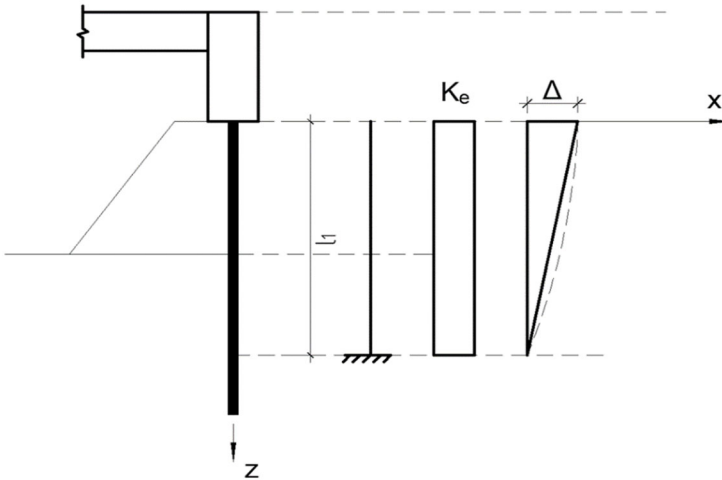


Рис. 2. Схемы к определению эквивалентного коэффициента пропорциональности

Интегральные мосты наиболее чувствительны к перепадам температуры и боковому давлению грунта, которое со временем изменяется и стремится к пассивному давлению [1, 2]. Определим усилия, передающиеся на сваи интегрального устоя от воздействия перепада температуры и бокового давления грунта. Для этого рассмотрим многопролетную схему моста с малыми пролетами, крайний пролет которого с интегральным устоем представлен на **рис. 3**.

Вначале полагаем, что пролетное строение под действием перепада температуры ΔT свободно перемещается в продольном направлении, и тогда перемещение по концам пролета будет равно:

$$\Delta = \frac{1}{2} \alpha \Delta T L, \quad (7)$$

где

α – коэффициент линейного расширения железобетона, $(^\circ\text{C})^{-1}$;
 ΔT – перепад температуры в градусах;

L – длина температурно-неразрезной ветви пролетного строения или длина пролета однопролетного моста.

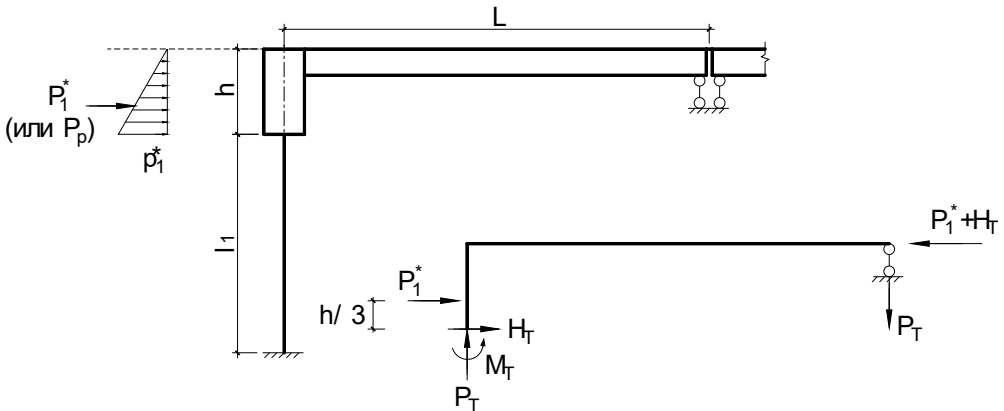


Рис. 3. Схемы и расчетная модель участка интегрального моста в крайнем пролете

Изгибающий момент, действующий на сваи и горизонтальная сила, вызванные перемещением Δ будут определяться по формулам:

$$M_T = \frac{6EI\Delta}{l_p^2} ; \quad (8)$$

$$H_T = \frac{12EI\Delta}{l_p^3} , \quad (9)$$

где

EI – изгибная жесткость сваи.

Расчетную длину сваи l_p , расположенной в грунте при определении M_T и H_T можно принять соответственно равной 0,6 l_1 и 0,5 l_1 [6].

На сваи в грунте действует также боковое давление грунта, которое из-за циклических перемещений интегрального устоя меняется от давления покоя до расчетного значения или в пределе достигает пассивного значения [1, 2].

При предположении, что за интегральным устоем боковое давление не достигает пассивного значения, следует учитывать так называемое расчетное давление P^* . Боковое давление, передаваемое на одну сваю будет определяться по следующим формулам:

$$P_1^* = 0,5 \gamma h^2 k^* B/n , \quad (10)$$

где

γ – удельный вес грунта;
 k^* – расчетный коэффициент бокового давления;
 h – высота тела интегрального устоя;
 B – ширина тела устоя;
 n – количество свай.

$$k^* = k_0 + \left(\frac{\Delta}{0,03H} \right)^{0,6} k_p , \quad (11)$$

где

k_0 – коэффициент давления покоя;
 H – высота насыпи за интегральным устоем;
 k_p – коэффициент пассивного давления.

При этом в соответствии с теорией Кулона:

$$k_0 = 1 - \sin \varphi \text{ и } k_p = \operatorname{tg}^2 (45^\circ + 0,5\varphi) , \quad (12)$$

где

φ – угол внутреннего трения грунта насыпи.

Величина расчетного коэффициента бокового давления k^* должна быть не менее $k_0 + 0,6$.

Осевое усилие, передаваемое на сваи интегрального устоя от температурного воздействия и давления грунта будет определяться по формуле (13):

$$P_T = \frac{P_1^* \frac{2h}{3} + H_T h + M_T}{L} . \quad (13)$$

Для получения полного осевого давления на сваю необходимо к полученному по формуле (12) значению добавить давления, передаваемые на сваю от собственного веса пролетного строения, мостового полотна и временной подвижной нагрузки. Полный изгибающий момент, передающийся на сваи включает составляющие от действия температуры и бокового давления грунта, а также от поворота опорного узла интегрального моста, вызванного действием веса пролетного строения и временной подвижной нагрузки.

По расчетному полному осевому давлению и несущей способности свай, определяемой согласно методике СП 24.13330, находят количество свай в интегральном устое. Затем проводят проверки свай по первой

и второй группам предельных состояний, регламентируемые СП 35.13330 и СП 24.13330. При расчете свай по прочности материала согласно СП 35.13330 учитывается возможность развития в сваях ограниченных пластических деформаций от действия моментной составляющей внешних воздействий.

Для гибких стальных свай необходима проверка по деформациям, т.е. допустимости горизонтальных и угловых перемещений верха свай (СП 24.13330.2011, прил. В). Неограниченное смещение верха свай обуславливает понижение их несущей способности.

Предельные значения деформаций Δ_u должны задаваться при проектировании, что позволяет обеспечивать нормальную эксплуатацию сооружения, т.е. при соблюдении условия:

$$\Delta \leq \Delta_u, \quad (14)$$

где

Δ – текущее перемещение верха сваи.

Критерием предельных деформаций может служить недопущение местной потери устойчивости полок и стенки сваи. Например, для двутавровой сваи из стали С235 профиля 40Ш1С⁵ устойчивость полок и стенки обеспечивается в соответствии с правилами, приведенными в⁶ и, таким образом, такие сваи можно рекомендовать для интегральных устоев.

Предельное горизонтальное перемещение верха стальной сваи можно определить по выражению [3]:

$$\Delta_u = \Delta_b (D_3 + 2,25 C_i), \quad (15)$$

где

D_3 – коэффициент пластичности, принимаемый равным 0,6 для свай, жестко заделанных в тело устоя;

C_i – редуцированный коэффициент вращения сваи;

Δ_b – горизонтальное перемещение верха сваи при возникновении допустимого напряжения в свае.

$$C_i = \frac{19}{6} - \frac{b_f \sqrt{R_y}}{60 t_f}, \quad (16)$$

где

b_f, t_f – соответственно ширина свеса полки сечения сваи и ее толщина;

⁵ ГОСТ Р 58966-2020. Балки стальные двутавровые сварные. Технические условия, Сортамент. М.: Стандартинформ. – 2020. – 31 с.

⁶ СП 35.13330-2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05-03-84* / Минрегион России.

R_y – расчетное сопротивление стали по пределу текучести.

$$\Delta b = \frac{\sigma_b W l_p^2}{D_1 EI} , \quad (17)$$

где

σ_b – допустимое изгибное напряжение в свае, при котором еще не происходит вращения сваи;

W – момент сопротивления сечения сваи;

l_p – расчетная длина сваи;

D_1 – коэффициент, учитывающий граничные условия сваи и равный 6;

EI – изгибная жесткость сваи.

Согласно [4], допустимое напряжение изгиба определяется по формуле (18):

$$\sigma_b = R_y (0,896 - 0,0042 \frac{b_f}{2t_f} \sqrt{R_y}) . \quad (18)$$

При этом должно соблюдаться следующее условие:

$$\frac{65}{\sqrt{R_y}} \leq \frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{95}{\sqrt{R_y}} .$$

Под воздействием внешних нагрузок, приложенных к пролетному строению интегральный устой поворачивается на угол θ (рис. 4).

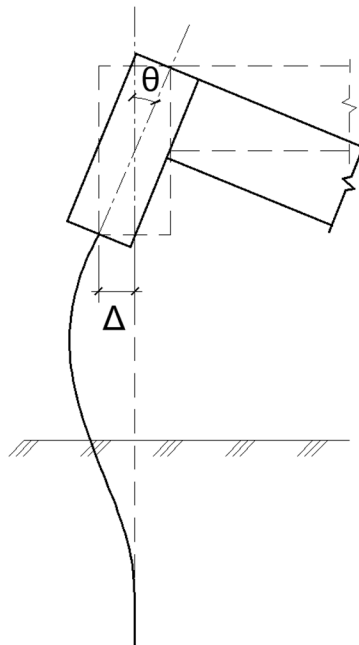


Рис. 4. Линейные и угловые перемещения сваи интегрального устоя

Приближенно можно определить угол поворота сваи по формуле (19):

$$\theta = \frac{qL^3}{24EI_d} , \quad (19)$$

где

q – приведенная к одной балке интенсивность внешних нагрузок;
 EI_d – изгибная жесткость балки пролетного строения.

Поворот опорного узла интегрального моста происходит вначале при объединении балок пролетного строения с монолитным телом интегрального устоя и потом при воздействии подвижной нагрузки. Изгибающий момент в свае от поворота на угол θ равен:

$$M_\theta = \frac{4EI}{l_p} \theta , \quad (20)$$

где

$l_p = 0,6 l_1$;
 EI – изгибная жесткость сваи.

Поворот свай с интегральным устоем создает перелом в профиле проезда, который ограничен действующими нормами.

ВЫВОДЫ

1. Предложенная аналитическая методика расчета стальных свай интегральных устоев позволяет просто подобрать количество и сечение свай, отвечающих требованиям действующих правил и стандартов.
2. Методика учитывает циклическую работу стальных гибких свай, что не регулируется действующими методиками расчета свай в классических опорах и устоях мостов.
3. Результаты расчетов по данной методике могут быть использованы в качестве верификации компьютерных расчетов, которые не учитывают нелинейный характер изменения бокового давления грунта за интегральными устоями.
4. Методика способствует расширению знаний о работе гибких стальных свай в условиях циклических сезонных температурных перемещений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Попов В.И. Боковое давление грунта на интегральные устои мостов / В.И. Попов // *Дороги и мосты*. – №50/2. – 2023. – С. 135-140.
2. Попов В.И. Интегральные мосты: монография / В.И. Попов. – М.: МАДИ, 2021. – 164 с.
3. Abendroth R.E. Rational Design Approach for Integral Abutment Bridge Piles / R.E. Abendroth, L.F. Greimann // *Transportation Research Record*. – 2001. – No 1223. – P. 12-23.
4. *Manuel of Steel Construction: LRFD, 1-st ed.*, American Institute of Steel Construction, Chicago, Ill. – 1986. – 456 p.
5. Попов В.И. Способы улучшения транспортно-эксплуатационных показателей балочных мостов малой и средней длины / В.И. Попов // *Дороги содружества независимых государств*. – 2022. – № 4(99). – С. 93-95.

REFERENCES

1. Popov V.I. Bokovoe davlenie grunta na integral'nye ustoi mostov / V.I. Popov // *Dorogi i mosty*. – №50/2. – 2023. – С. 135-140.
 2. Popov V.I. Integral'nye mosty: monografiya / V.I. Popov. – М.: MADI, 2021. – 164 s.
 3. Abendroth R.E. Rational Design Approach for Integral Abutment Bridge Piles / R.E. Abendroth, L.F. Greimann // *Transportation Research Record*. – 2001. – No 1223. – P. 12-23.
 4. *Manuel of Steel Construction: LRFD, 1-st ed.*, American Institute of Steel Construction, Chicago, Ill. – 1986. – 456 p.
 5. Popov V.I. Sposoby uluchsheniya transportno-ekspluatatsionnyh pokazatelej balochnykh mostov maloj i srednej dliny / V.I. Popov // *Dorogi sodruzhestva nezavisimyh gosudarstv*. – 2022. – № 4(99). – P. 93-95.
-

Информация об авторах

В.И. Попов – кандидат технических наук, профессор, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

Information about the authors

V.I. Popov – Ph. D. (Tech.), Professor, Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), Moscow, Russia

Рецензент: канд. техн. наук В.А. Селиверстов (ФАУ «РОСДОРНИИ»).

Статья поступила в редакцию 16.02.2024. Одобрена после рецензирования 09.04.2024. Принята к публикации 24.04.2024.

The article was submitted 16.02.2024. Approved after reviewing 09.04.2024. Accepted for publication 24.04.2024.