

УДК 692.6

## К вопросу восстановления каменных бескосоурных лестниц в архитектуре Санкт-Петербурга. Часть 3 (пример расчета прямого марша с плоскими ступенями с припазовкой)

М. Д. Вебер<sup>1</sup>, А. В. Кузнецов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Инфорспроект», Россия, 115280, Москва, ул. Ленинская Слобода, 19

<sup>2</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Вебер М. Д., Кузнецов А. В. К вопросу восстановления каменных бескосоурных лестниц в архитектуре Санкт-Петербурга. Часть 3 (пример расчета прямого марша с плоскими ступенями с припазовкой) // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23. Вып. 1. С. 180–189. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-180-189

### Аннотация

**Цель:** привести дополнительные примеры проведения поверочных расчетов каменных бескосоурных лестниц в процессе обследований их технического состояния. **Материалы и методы:** в примерах использованы математический аппарат и данные, отобранные в рамках предыдущих исследований. **Результаты:** проиллюстрированы отличительные аспекты выбранных примеров. Выполнены анализ и интерпретация полученных результатов с учетом последующего применения на реальных объектах. **Практическая значимость:** предоставление практикующим инженерам расчетных инструментов для оценки технического состояния ценных исторических конструкций.

**Ключевые слова:** каменные конструкции, бескосоурные лестницы, висячие лестницы, обследование, реконструкция, реставрация, поверочные расчеты, примеры расчета

### Введение

Представленная статья является заключительной частью предыдущих двух работ [1, 2]. Рассматривается вариант прямого лестничного марша с припазованными ступенями. Для расчета приняты характеристики природного камня, сведения о котором подробно изложены в [1, 2].

Рассмотрим марш (рис. 1), характеристики которого аналогичны предыдущему примеру [2], за исключением сечения ступеней. Параметры ступеней приведены в табл. 1.

Физико-механические свойства путиловского известняка с учетом указанных ранее [2] предпосылок сведем в табл. 2.

Действующие нагрузки сведем в табл. 3.1 и 3.2. Собственный вес ступеней с учетом паза отличается от предыдущего примера [2].

С учетом гипотезы Хеймана [7], оценка прочности ступеней при их работе на изгиб осуществляется следующим образом (рис. 4):

1. Определим момент сопротивления сечения ступени при изгибе в модуле «Консул» пакета SCAD Office (учитывая паз и валик):

$$W_{\text{изг.}} = 1002,3 \text{ см}^3.$$

2. Определим максимальный изгибающий момент:

$$M = \frac{q_{\text{ноз.р.}} \cdot L^2}{2} + M_{\text{оср.р.}} + W_{\text{оср.р.}} \cdot L_1 = \frac{2,54 \cdot 1,0^2}{2} + 0,35 + 0,18 \cdot 0,9 = 1,782 \text{ кН} \cdot \text{м} = 18166 \text{ кг} \cdot \text{см}.$$

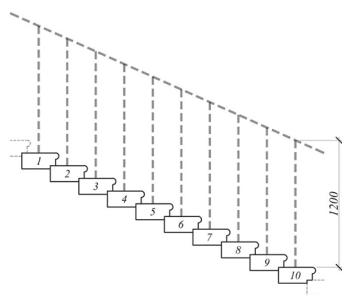


Рис. 1. Продольная схема марша

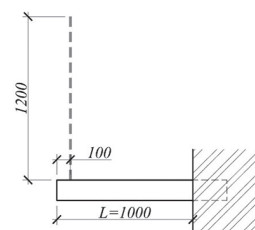


Рис. 2. Поперечная схема марша

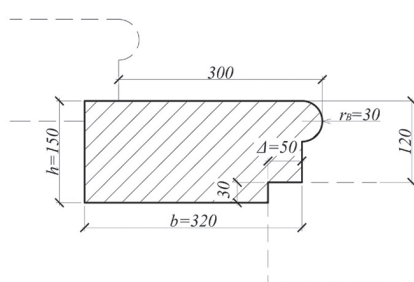


Рис. 3. Сечение ступени

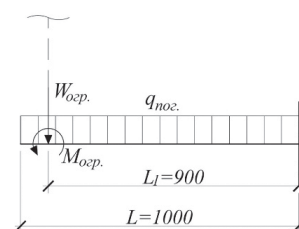


Рис. 4. Расчетная схема ступени для расчета на изгиб

ТАБЛИЦА 1. Параметры ступеней в марше

Параметр	Значение
Материал ступеней	Путиловский известняк
Число ступеней	$n = 10$ шт.
Ширина марша (вынос консоли, рис. 2)	$L = 1000$ мм (1,0 м)
Тип сечения ступеней (рис. 3)	Прямоугольное, с пазами в нижней части
Ширина ступени без учета валика	$b = 320$ мм (0,32 м)
Высота ступени	$h = 150$ мм (0,15 м)
Тип паза	Прямоугольный 50 (ширина) $\times$ 30 (высота) мм

ТАБЛИЦА 2. Физико-механические свойства путиловского известняка, принятые в расчет

Показатель	Значение	Источник
Плотность	2800 кг/м <sup>3</sup>	[3]
Временное сопротивление сжатию в сухом виде	$\sigma_{сж} = 91,9$ МПа	[4, с. 45, 66] [5, с. 89]
Временное сопротивление растяжению	$\sigma_p = 3,06$ МПа	[5, с. 112]
Временное сопротивление изгибу	$\sigma_{из} = 15,31$ МПа	[5, с. 112]
Модуль упругости	$E = 17167,5$ МПа = 175 000 кг/см <sup>2</sup>	[2]
Коэффициент Пуассона	$\nu = 0,32$	[2]
Модуль сдвига	$G = E / (2 (1 + \nu)) = 6502,84$ МПа = 66 287 кг/см <sup>2</sup>	[2]

ТАБЛИЦА 3.1. Значения отдельных нагрузок

Тип нагрузки	Нормативное значение	Коэффициент надежности по нагрузке, $\gamma_f$	Расчетное значение
Вертикальная равномерно-распределенная кратковременная на поверхность ступени	3,0 кПа [6, табл. 8.3 п. 12а]	1,2 [6, п. 8.2.7]	3,6 кПа
Вертикальная кратковременная (приведенная погонная для расчета на изгиб)	$q_{\text{пог.вр.н}} = 0,3$ (ширина приложения) $\times 3,0 = 0,9$ кН·м	1,2 [6, п. 8.2.7]	$q_{\text{пог.вр.р}} = 0,3$ (ширина приложения) $\times 3,6 = 1,08$ кН·м
Вертикальная кратковременная (приведенная сосредоточенная для расчета на кручение)	$P_{i.n} = 0,3$ (площадь приложения) $\times 3,0 = 0,9$ кН	1,2 [6, п. 8.2.7]	$P_i = 0,3$ (площадь приложения) $\times 3,6 = 1,08$ кН
Горизонтальная равномерно-распределенная кратковременная на ограждение	0,8 кН/м [6, п. 8.2.6в]	1,2 [6, п. 8.2.7]	0,96 кПа
Момент в точке крепления ограждения (приведенный сосредоточенный для расчета на изгиб)	$M_{\text{огр.н}} = 0,3$ (длина приложения) $\times 1,2$ (плечо приложения нагрузки, равное высоте ограждения) $\times 0,8 = 0,29$ кН·м	1,2 [6, п. 8.2.7]	$M_{\text{огр.р}} = 0,3$ (длина приложения) $\times 1,2$ (плечо приложения нагрузки, равное высоте ограждения) $\times 0,96 = 0,35$ кН·м
Примечание. Площадь сечения ступени: $0,32$ (ширина $b$ ) $\times 0,15$ (высота $h$ ) $+ 1/2 \times \pi \times 0,03^2$ (площадь валика) — $0,05 \times 0,03$ (площадь паза) = $0,048$ м <sup>2</sup> .			
Собственный вес ступени (погонный для расчета на изгиб)	$q_{\text{пог.ст.н}} = 0,048 \times 2800$ (плотность материала) = $134,4$ кг/м = $1,32$ кН·м	1,1 [6, табл. 7.1]	$q_{\text{пог.ст.р}} = 1,46$ кН·м
Собственный вес ступени (сосредоточенный для расчета на кручение)	$W_{\text{ст.н}} = 0,048 \times 2800$ (плотность материала) $\times 1,0$ (вынос консоли $L$ ) = $134,4$ кг = $1,32$ кН	1,1 [6, табл. 7.1]	$W_{\text{ст.р}} = 1,46$ кН
Собственный вес ограждения	0,5 кН/м	1,2 [6, табл. 7.1]	0,6 кН·м
Собственный вес ограждения (сосредоточенный для расчета на изгиб и кручение)	$W_{\text{огр.н}} = 0,3$ (длина приложения) $\times 0,5 = 0,15$ кН	1,2 [6, табл. 7.1]	$W_{\text{огр.р}} = 0,3$ (длина приложения) $\times 0,6 = 0,18$ кН

ТАБЛИЦА 3.2. Значения суммарных нагрузок

Вид деформации	Проверяемое условие	Прикладываемые нагрузки (нормативные)	Прикладываемые нагрузки (расчетные)
Изгиб	Прочность ступени	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>– равномерно распределенная по всей длине консоли</li> <li><math>q_{\text{пог.р}} = q_{\text{пог.вр.р}} + q_{\text{пог.ст.р}} = 1,08 + 1,46 = 2,54</math> кН·м;</li> <li>– сосредоточенный момент на расстоянии 0,1 м от конца консоли <math>M_{\text{огр.р}} = 0,35</math> кН·м;</li> <li>– сосредоточенная вертикальная сила на расстоянии 0,1 м от конца консоли, (то есть с плечом от места заделки <math>L_1 = 1,0 - 0,1 = 0,9</math> м):</li> <li><math>W_{\text{огр.р}} = 0,18</math> кН</li> </ul>

Изгиб	Деформативность ступени	<ul style="list-style-type: none"> <li>– равномерно распределенная по всей длине консоли: <math>q_{\text{пог.н}} = q_{\text{пог.вр.н}} + q_{\text{пог.ст.н}} = 0,9 + 1,32 = 2,22 \text{ кН}\cdot\text{м} = 2,27 \text{ кг}\cdot\text{см}</math>;</li> <li>– сосредоточенный момент на расстоянии 0,1 м от конца консоли: <math>M_{\text{огр.н}} = 0,29 \text{ кН}\cdot\text{м} = 2957 \text{ кг}\cdot\text{см}</math>;</li> <li>– сосредоточенная вертикальная сила на расстоянии 0,1 м от конца консоли, (то есть с плечом от места заделки <math>L_1 = 1,0 - 0,1 = 0,9 \text{ м}</math>): <math>W_{\text{огр.н}} = 0,15 \text{ кН} = 15,3 \text{ кг}</math></li> </ul>	—
Кручение	Прочность ступени	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>– сосредоточенная в центре ступени: <math>P_i = 1,08 \text{ кН}</math>;</li> <li>– сосредоточенная в центре ступени: <math>W = W_{\text{огр.п}} + W_{\text{ст.п}} = 0,18 + 1,46 = 1,64 \text{ кН}</math></li> </ul>
Кручение	Деформативность ступени	<ul style="list-style-type: none"> <li>– сосредоточенная в центре ступени <math>P_{1н} = 0,9 \text{ кН}</math>;</li> <li>– сосредоточенная в центре ступени: <math>W_n = W_{\text{огр.н}} + W_{\text{ст.н}} = 0,15 + 1,32 = 1,47 \text{ кН}</math></li> </ul>	—

3. Определим максимальное нормальное напряжение изгиба:

$$\sigma = \frac{M}{W_{\text{изг}}} = \frac{18166}{1002,3} = 18,13 \text{ кг/см}^2 = 1,78 \text{ МПа}.$$

4. Определим коэффициент запаса:

$$k = \frac{\sigma_{\text{изг}}}{\sigma} = \frac{15,31}{1,78} = 8,6.$$

Таким образом, вычисленное значение коэффициента запаса 8,6 превышает рекомендованное значение, для которого  $k = 3$ . Следовательно, расчетное значение обеспечивает требуемую прочность ступени при восприятии нагрузок от изгибающих моментов.

Расчет деформации ступеней при их работе на изгиб осуществим следующим образом.

1. Момент инерции при изгибе рассчитывается в модуле «Консул» пакета SCAD Office (учитывая паз и валик):

$$I_{\text{изг}} = 8560,06 \text{ см}^4.$$

2. Для вычисления наибольших вертикальных перемещений воспользуемся принципом суперпозиции отдельных перемещений:

• при приложении на всей протяженности ступени равномерно распределенной нагрузки прогиб будет равен:

$$f_1 = \frac{q_{\text{пог.н}} \cdot L^4}{8EI_{\text{изг}}} = \frac{2,27 \cdot 100^4}{8 \cdot 175000 \cdot 8560,06} = 0,019 \text{ см};$$

• нагрузка от горизонтальной силы, приложенной к ограждению, передается в точках креплений на расстоянии 0,1 м от конца ступени в виде сосредоточенного момента и дает:

$$f_2 = \frac{M_{\text{огр.н}} \cdot L_1(2L - L_1)}{2EI_{\text{изг}}} = \frac{2957 \cdot 90 \cdot ((2 \cdot 100) - 90)}{2 \cdot 175000 \cdot 8560,06} = 0,01 \text{ см};$$

• нагрузка от собственного веса ограждения передается в точках крепления ограждения на расстоянии 0,1 м от конца ступени в виде сосредоточенной силы и дает:

$$f_3 = \frac{W_{\text{огр.н}} \cdot L_1^2(3L - L_1)}{6EI_{\text{изг}}} = \frac{15,3 \cdot 90^2 \cdot ((3 \cdot 100) - 90)}{6 \cdot 175000 \cdot 8560,06} = 0,003 \text{ см};$$

• просуммировав полученные значения, получаем общее вертикальное перемещение (прогиб):

$$f_{\text{max}} = f_1 + f_2 + f_3 = 0,019 + 0,01 + 0,003 = 0,032 \text{ см}.$$

3. По требованиям СП 20.13330.2016 [6, пп. 2а, 3 и примечание 1 табл. Д. 1] допустимый прогиб для элементов лестниц составит:

$$f_u = 2L / 120 = 2 \cdot 100 / 120 = 1,66 \text{ см}.$$

Вычисленное значение значительно превышает величину максимального прогиба

$f_{\max} = 0,032$  см. Следовательно, полученное значение при расчете на деформации ступеней при изгибе обеспечивает требуемую прочность и соответствует требованиям действующих норм.

С учетом гипотезы Ф. Литтла для ступеней с припазовкой [8] (рис. 5) проверка прочности ступеней на кручение осуществляется следующим образом.

Коэффициент  $c$  принимаем аналогично предыдущему примеру [2]  $c = 0,85$ .

Формулы для вертикальных реакций  $R_n$  и  $R_{Wn}$  для припазованных ступеней идентичны формулам для плоских ступеней.

1. Определим крутящий момент в заделке нижней ступени:

$$T_n = \left[ \frac{\left( \sum_{i=1}^{n-1} P_i + (n-1) \cdot W \right)}{c} + \frac{(P_n + W)}{2c} \right] \cdot \frac{b}{2} - H \cdot h,$$

где  $H$  — это расчетное значение общего распора от марша.

Для определения декремента  $H \cdot h$  необходимо вычислить крутящие моменты во всех ступенях марша, как для плоских (неприпазованных ступеней), по формуле:

$$T_n = \left[ \frac{\left( \sum_{i=1}^{i-1} P_i + (i-1) \cdot W \right)}{c} + \frac{(P_i + W)}{2c} \right] \cdot \frac{b}{2}.$$

Декремент  $H \cdot h$  равен среднему арифметическому значению крутящих моментов в ступенях:  $H \cdot h = T_{\text{ave}}$ .

Примечание: расчетное значение распора от марша, действующего на лестничные площадки, определяются по формуле:

$$H = \frac{T_{\text{ave}}}{h} = \frac{2,56}{0,15} = 17,07 \text{ кН.}$$

Результаты вычислений для удобства сведен в табл. 4.

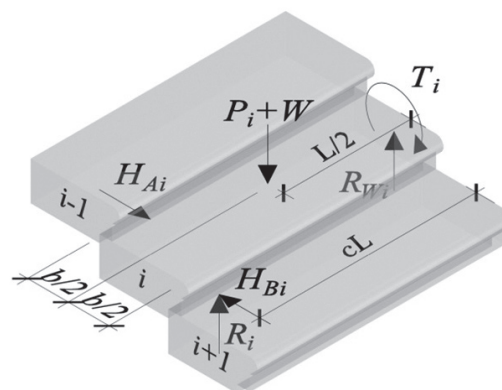


Рис. 5. Схема припазованной ступени при расчете на кручение

ТАБЛИЦА 4. Расчет усредненного момента кручения (от расчетных нагрузок).

Номер ступени (сверху вниз)	Крутящий момент	
	$T_i$ , кН·м	$T_i$ , кг·см
1	0,256	2610
2	0,768	7829
3	1,280	13 048
4	1,792	18 267
5	2,304	23 486
6	2,816	28 705
7	3,328	33 925
8	3,840	39 144
9	4,352	44 363
10	4,864	49 582
Усредненный крутящий момент $T_{\text{ave}}$	2,560	26096

Таким образом,

$$T_n = \left[ \frac{\left( \sum_{i=1}^{n-1} P_i + (n-1) \cdot W \right)}{c} + \frac{(P_n + W)}{2c} \right] \cdot \frac{b}{2} - H \cdot h =$$

$$= \left[ \frac{\left( (10-1) \cdot 1,08 + (10-1) \cdot 1,64 \right)}{0,85} + \frac{(1,08 + 1,64)}{2 \cdot 0,85} \right] \cdot \frac{0,32}{2} -$$

$$- 2,56 = 2,31 \text{ кН} \cdot \text{м} = 23548 \text{ кг} \cdot \text{см}.$$

2. При определении момента сопротивления сечения ступени при кручении в модуле «Консул» пакета SCAD Office с учетом паза значение получается больше, чем полученное по аналитическим формулам без паза (см. предыдущий пример [2]), поэтому примем консервативно:

$$W_k = 1798,87 \text{ см}^3.$$

3. Определим значение максимального касательного напряжения от кручения, возникающего в наиболее опасной зоне — посередине верхней поверхности ступени:

$$\tau = \frac{T_n}{W_k} = \frac{23548}{1798,97} = 13,1 \text{ кг/см}^2 = 1,29 \text{ МПа}.$$

4. В соответствии с методикой, изложенной в приложении 2 ГОСТ 21153.8-88 [9], составим расчетным способом паспорт прочности материала ступеней. Это позволит определить допустимое соотношение касательных и нормальных напряжений в наиболее опасной точке сечения.

• Определяем соотношение безразмерных радиусов предельных кругов Мора  $q_2$  и  $q_1$ :

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p} = \frac{91,9}{3,06} = 30,$$

•  $K_1 + q_1$ , а также  $q_2$  необходимо выписать из таблицы, приведенной в ГОСТ 21153.8-88 [9, табл. 3]:

$$q_2 = 0,0363; K_1 + q_1 = 0,0024;$$

• после выяснения формы огибающей  $a$ :

$$a = \sigma_{сж} / 2q_2 = 91,9 / (2 \cdot 0,0363) = 1265,84 \text{ МПа};$$

• необходимо рассчитать параметр переноса начала координат  $\sigma_0$ :

$$\sigma_0 = a (K_1 + q_1) = 1265,84 \cdot 0,0024 = 3,04 \text{ МПа};$$

• на основании полученного параметра переноса можно определить безразмерную координату  $K$  для нашего напряжения изгиба:

$$K = (\sigma + \sigma_0) / a = (-1,78 + 3,04) / 1265,84 = 0,00095;$$

• получив  $K$ , можно рассчитать безразмерную координату  $l$ :

$$l = 0,73 \cdot \left( \frac{K^2}{K^2 + 1} \right)^{\frac{3}{8}} = 0,73 \cdot \left( \frac{0,00095^2}{0,00095^2 + 1} \right)^{\frac{3}{8}} = 0,00395;$$

• допустимое касательное напряжение для заданного нормального напряжения можно вычислить по следующей формуле:

$$\tau_{пред.} = l \cdot a = 0,00395 \cdot 1265,84 = 5,00 \text{ МПа}.$$

5. Определим коэффициент запаса:

$k = \tau_{пред.} / \tau = 5,00 / 1,29 = 3,87$ , что больше рекомендованного  $k = 3$ , то есть прочность ступени достаточна для восприятия крутящих нагрузок.

Проведем оценку деформативности при кручении в соответствии с предпосылками Ф. Литгла для припазованных ступеней [8].

1. Определим момент инерции сечения ступени при кручении в модуле «Консул» пакета SCAD Office (учитывая паз и валик):

$$I_k = 24092,9 \text{ см}^4.$$

2. Для припазованных ступеней максимальное вертикальное перемещение  $\delta_{(v)}$  имеет место в середине пролета марша, поэтому перемещения ступеней  $\Delta_{(v)}$  суммируются для половины ступеней. Полные углы закручивания определяются по той же формуле, что и для плоских ступеней:

$$\varphi_i = \frac{T_{in} \cdot L}{G \cdot I_k}.$$

Крутящий момент в  $i$ -й ступени (от нормативных нагрузок) вычисляется по формуле:

$$T_{iH} = \left[ \left( \frac{\sum_{i=1}^{i-1} P_{iH} + (i-1) \cdot W_H}{c} \right) + \frac{(P_{in} + W_H)}{2 \cdot c} \right] \cdot \frac{b}{2} - H_H \cdot h,$$

где  $H_H$  — значение суммарного распора от нормативных нагрузок.

Для определения декремента  $H_H \cdot h$  необходимо рассчитать крутящие моменты (от

нормативных нагрузок) во всех ступенях марша, как и для плоских (неприазованных ступеней), по формуле:

$$T_{iH} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^{i-1} P_{iH} + (i-1) \cdot W_H}{c} \right] + \frac{(P_{in} + W_H)}{2 \cdot c} \cdot \frac{b}{2}.$$

Декремент  $H_n \cdot h$  равен среднему арифметическому значению крутящих моментов в ступенях:  $H_n \cdot h = T_{ave n}$ . Результаты расчетов приведены в табл. 5.

Перемещение отдельной ступени вычисляется по той же аналогии:

$$\Delta_{(v)} = h - h \cdot \cos \varphi_i + b \cdot \varphi_i.$$

Результаты расчетов перемещений приведены в табл. 6.

3. СП 20.13330.2016 [6, пп. 2а, 3, прим. 1 табл. Д.1] определяет максимально разрешенный прогиб равным:

$$f_u = \frac{2L}{120} = \frac{2 \cdot 100}{120} = 1,66 \text{ см.}$$

На основании консервативного суммирования компонентов деформации установлено, что суммарное перемещение конструкции, вызванное изгибом и кручением, определяемое по формуле  $f_{max} + \delta_{(v)}$  и равно  $0,032 + 0,114 = 0,146 \text{ см} < f_u = 1,66 \text{ см}$ , где  $f_u$  — допустимый прогиб.

ТАБЛИЦА 5. Расчет усредненного момента кручения (от нормативных нагрузок)

Номер ступени (сверху вниз)	Крутящий момент	
	$T_{in}$ , кН·м	$T_{in}$ , кг·см
1	0,223	2274
2	0,669	6821
3	1,115	11 369
4	1,561	15 917
5	2,008	20 464
6	2,454	25 012
7	2,900	29 559
8	3,346	34 107
9	3,792	38 654
10	4,238	43 202
Усредненный крутящий момент $T_{ave n}$	2,231	22 738

Таким образом, представленный в настоящей статье расчет деформации ступеней из природного камня от изгиба с кручением соот-

ТАБЛИЦА 6. Расчет перемещений ступеней от кручения

Номер ступени (сверху вниз)	Крутящий момент $T_{in}$ , кН·м	Крутящий момент $T_{in}$ , кг·см	Вынос консоли $L$ , см	Модуль сдвига $G$ , кг·см <sup>2</sup>	Момент инерции при кручении $I_k$ , см <sup>4</sup>	Полный угол закручивания $\varphi_i$ , радиан	Перемещение ступени $\Delta_{(v)}$ , см
6	0,223	2274	100	66 287	24 092,9	0,00014	0,0046
7	0,669	6821				0,00043	0,0137
8	1,115	11 369				0,00071	0,0228
9	1,561	15 917				0,00100	0,0319
10	2,008	20 464				0,00128	0,0410
Максимальное вертикальное перемещение ступеней $\delta_{(v)}$ , см							0,114



ветствует требованиям действующих норм — жесткость конструкции обеспечена.

### Заключение

Данной публикацией завершается цикл статей [1, 2], посвященных типологии каменных бескосоурных лестниц и аналитическим методам их расчета. При интерпретации результатов данных расчетов важно учитывать дополнительные запасы, являющиеся следствием ряда упомянутых ранее допущений [2].

В приводимом примере за счет перераспределения усилий как вверх, так и вниз марша, обусловленного припазовкой, значения максимальных крутящих моментов снижаются более чем в 2 раза по сравнению с плоскими ступенями без припазовки. Ранее нами упоминалось, что в практике обследований на реальных объектах встречается полное отсутствие контакта ступеней между собой [1]. Поэтому в практической работе использование расчетных схем, учитывающих положительный эффект от припазовки, допускается только при наличии достаточного объема обосновывающих материалов обследования.

Результаты сравнения геометрических характеристик сечения ступеней для расчета на кручение показали, что применение аналитических формул без учета паза дает более консервативные значения по сравнению с результатами машинных расчетов с учетом паза при помощи модуля «Консул» пакета SCAD Office. Для выполнения поверочных расчетов рекомендуется также проводить подобное сравнение и принимать во внимание наименьшее значение.

### Список источников

1. Вебер М. Д., Кузнецов А. В. К вопросу восстановления каменных бескосоурных лестниц

в архитектуре Санкт-Петербурга. Часть 1 // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2025. Т. 22, вып. 2. С. 509–530. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-509-530.

2. Вебер М. Д., Кузнецов А. В. К вопросу восстановления каменных бескосоурных лестниц в архитектуре Санкт-Петербурга. Часть 2 (пример расчета прямого марша с плоскими ступенями без припазовки) // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2025. Т. 22, вып. 3. С. 739–749. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-739-749

3. Приложение к приказу Минстроя РФ от 31.07.2017 №1056/пр. Сборник №4. Реставрация и воссоздание конструкций и декора из натурального камня. Приложение 3.

4. Лямин Н. Н. Естественные каменные строительные материалы. Вып. I. СПб.: Типография П. П. Сойкина, 1911. 74 с.

5. Субботин М. П. Строительное камневедение (технология естественных строительных камней). С приложением геологии строительного камня геолога Л. Е. Наливайко. Харьков — Киев: Государственное научно-техническое издательство Украины, 1935. 272 с.

6. СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85\* Нагрузки и воздействия». М.: Стандартинформ, 2018.

7. Heyman J. The mechanics of masonry stairs // Structural studies of historical buildings. Vol. 2. Dynamics, Repairs and Restoration. Southampton: Computational Mechanics Publ., 1995. Pp. 259–265.

8. Little Ph., Hough M., Mullarkey E. Stone cantilever stairs — inspection and analysis of cantilever stairs // The Structural Engineer (IStructE). 2009. No. 87 (8). Pp. 26–33.

9. ГОСТ 21153.8-88. Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии. М.: Издательство стандартов, 1986.

Дата поступления: 09.12.2025

Решение о публикации: 11.02.2026



**Контактная информация:**

ВЕБЕР Михаил Давидович — ведущий инженер-конструктор;  
mischaweber@mail.ru

КУЗНЕЦОВ Анатолий Всеволодович — канд. техн. наук, декан факультета «Промышленное и гражданского строительства»; и. о. заведующего кафедрой «Строительные материалы и технологии», akuznetsov@pgups.ru

## Reconstruction of cantilever stone staircases in the architecture of St. Petersburg. Part 3: how to calculate a straight flight staircase with plane treads

M. D. Veber<sup>1</sup>, A. V. Kuznetsov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Inforsproekt LLC, 19 Leninskaya Sloboda str., Moscow, 115280, Russia

<sup>2</sup> Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., St. Petersburg, 190031, Russia

**For citation:** *Veber M. D., Kuznetsov A. V. Reconstruction of cantilever stone staircases in the architecture of St. Petersburg. Part 3: how to calculate a straight flight staircase with plane treads // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 180–189. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-180-189. (In Russian)*

### Abstract

**Objective:** to provide additional case studies of verification analysis for cantilever stone staircases in the context of structural surveys. **Materials and methods:** the case studies employ mathematical modelling techniques and draw on empirical data obtained from prior investigations. **Results:** the selected examples highlighted distinctive aspects of these structures. The analyses and interpretation of the findings have been carried out with consideration of their future implementation in practical projects. **Practical significance:** this paper aims to furnish practicing engineers with methodological guidance to support the conservation of historically valuable structures.

**Keywords:** stone structures, cantilever staircases, hanging stairs, inspection, reconstruction, restoration, verification calculations, calculation examples

### References

1. Veber M.D., Kuznetsov A.V. K voprosu vosstanovleniya kamennykh beskosournykh lestnits v arkhitekture Sankt-Peterburga. Chast' 1 // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. SPb.: PGUPS, 2025. T. 22, vyp.2. S. 509–530. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-509-530. (In Russian)

2. Veber M. D., Kuznetsov A. V. K voprosu vosstanovleniya kamennykh beskosournykh lestnits v arkhitekture Sankt-Peterburga. Chast' 2 (primer rascheta pryamogo marsha s ploskimi stupenyami bez

pripazovki) // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. SPb.: PGUPS, 2025. T. 22, vyp. 3. S. 739–749. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-739-749. (In Russian)

3. Prilozhenie k prikazu Ministroya RF ot 31.07.2017 No.1056/pr. Sbornik No. 4. Restavratsiya i vossozdanie konstruksij i dekora iz estestvennogo kamnya. Prilozhenie 3. (In Russian)

4. Lyamin N. N. Estestvennye kamennye stroitel'nye materialy. Vyp. I. SPb.: Tipografiya P. P. Sojkina, 1911. 74 s. (In Russian)

5. Subbotin M.P. Stroitel'noe kamnevedenie (tehnologiya estestvennykh stroitel'nykh kamnej). S prilozheniem geologii stroitel'nogo kamnya geologa L. E. Nalivajko. Khar'kov — Kiev: Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo Ukrainy, 1935. 272 s. (In Russian)

6. SP 20.13330.2016 “SNiP 2.01.07-85\* Nagruzki i vozdejstviya”. M.: Standartinform, 2018. (In Russian)

7. Heyman J. The mechanics of masonry stairs // Structural studies of historical buildings. Vol. 2. Dynamics, Repairs and Restoration. Southampton: Computational Mechanics Publ., 1995. Pp. 259–265.

8. Little Ph., Hough M., Mullarkey E. Stone cantilever stairs — inspection and analysis of cantilever stairs // The Structural Engineer (IStructE). 2009. No. 87 (8). Pp. 26–33.

9. GOST 21153.8-88. Porody gornye. Metod opredeleniya predela prochnosti pri ob'emnom szhatii. M.: Izdatel'stvo standartov, 1986. (In Russian)

Received: 09.12.2025

Accepted: 11.02.2026

**Author's information:**

Mikhail D. VEBER — Senior structural engineer;  
SPIN: 5863-2454, AuthorID: 1301574;  
mischaweber@mail.ru;

Anatoly V. KUZNETSOV — PhD in Engineering,  
Acting Dean of the Faculty of “Industrial and Civil  
Engineering”, Head of the Department of “Building  
Materials and Technologies”; Scopus 57205441909,  
WoS ResearcherID: HPH-1274-2023, ORCID:  
0000-0002-3809-399X, SPIN: 8756-5314, AuthorID:  
659654; akuznetsov@pgups.ru