

## Влияние погрешностей изготовления квадратных профилей на прочность контактного соединения колонн

Александр Романович Туснин, Иван Владимирович Мыльников

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Рассматривается влияние погрешностей изготовления стальных гнутых замкнутых сварных квадратных профилей размером  $200 \times 8$  мм на прочность монтажного контактного стыка колонн по высоте. Предполагается, что допустимые отклонения размеров выпускаемого стального проката приняты в национальных стандартах с учетом обеспеченности заданного уровня надежности, равного 95,44 %.

**Материалы и методы.** Исследуются законы распределения для таких случайных величин, как толщина листа  $t$ , высота профиля  $h$  и радиус наружного закругления  $R$ . Для учета погрешностей изготовления элементов при определении несущей способности узла при центральном сжатии колонны предлагается ввести понижающий коэффициент условий работы  $\gamma_{\sigma}$ , вычисляемый как отношение порогового значения площади контакта  $A'_{cont}$  к нормативной площади сечения профиля колонны  $A_n$ .

**Результаты.** В зависимости от значений  $t$ ,  $h$ ,  $R$  для нижней и верхней колонн формируются площади их поперечного сечения ( $A_1$  и  $A_2$ ), а также площадь их контакта  $A_{cont}$  при условии симметричности погрешностей изготовления и соосной установке колонн в ходе монтажа. Написана программа на языке Python для генерации возможных значений площади контакта  $A_{cont}$ , подбора аппроксимирующей функции и вычисления коэффициента условий работы  $\gamma_{\sigma}$ .

**Выводы.** В результате исследований с использованием метода Монте-Карло установлено, что при учете влияния погрешностей изготовления для толщины листа  $t$ , высоты профиля  $h$  и радиуса наружного закругления  $R$  прочность контактного стыка колонн при центральном сжатии может снижаться до 84 % от расчетной прочности, установленной по площади поперечного сечения, указанной в сортаменте.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** стальной каркас, контактные соединения, быстросборный узел, стык колонн, квадратные сварные профили, погрешности изготовления, коэффициент условий работы, метод Монте-Карло

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Туснин А.Р., Мыльников И.В. Влияние погрешностей изготовления квадратных профилей на прочность контактного соединения колонн // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 1. С. 54–66. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.54-66

Автор, ответственный за переписку: Иван Владимирович Мыльников, [miv\\_2499@mail.ru](mailto:miv_2499@mail.ru).

## The production inaccuracies' influence of square profiles on the strength of the contact joint of columns

Aleksandr R. Tusnin, Ivan V. Mylnikov

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The production inaccuracies' influence of steel bent closed welded square profiles with a size of  $200 \times 8$  mm on the strength of the mounting contact joint of columns in height is considered. It is assumed that the permissible deviations in the size of the rolled steel produced are accepted in the standards, taking into account the provision of a given level of reliability equal to 95.44 %.

**Materials and methods.** The distribution laws for such random variables as sheet thickness  $t$ , profile height  $h$  and radius of the outer rounding  $R$  are investigated. To account for the production inaccuracies of the elements when determining the bearing capacity of a node under central compression, it is proposed to introduce a reducing coefficient of operating conditions  $\gamma_{\sigma}$ , calculated as the ratio of the threshold value of the contact area  $A'_{cont}$  to the standard cross-sectional area of the column profile  $A_n$ .

**Results.** Depending on the values of  $t$ ,  $h$ , and  $R$  for the lower and upper columns, their cross-sectional areas ( $A_1$  and  $A_2$ ) are formed, as well as their contact area  $A_{cont}$ , provided that the production inaccuracies are symmetrical and the columns are installed coaxially during installation. The program has been written in Python to generate possible values of the contact area  $A_{cont}$ , select an approximating function and calculate the coefficient of operating conditions  $\gamma_{\sigma}$ .

**Conclusions.** As a result of research using the Monte Carlo method, it was found that, taking into account the influence of the production inaccuracies for sheet thickness  $t$ , profile height  $h$ , and outer rounding radius  $R$ , the strength of the column contact joint under central compression can decrease to 84 % of the calculated strength based on the cross-sectional area specified in the grade.

**KEYWORDS:** steel frame, contact joints, quick assembly unit, column joint, square welded profiles, production inaccuracies, coefficient of working conditions, Monte Carlo method

**FOR CITATION:** Tusnin A.R., Mylnikov I.V. The production inaccuracies' influence of square profiles on the strength of the contact joint of columns. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(1):54-66. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.54-66 (rus.).

Corresponding author: Ivan V. Mylnikov, miv\_2499@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрим стальные колонны из гнутых замкнутых сварных квадратных профилей  $200 \times 8$  мм, изготовленных по ГОСТ 30245–2003<sup>1</sup>. Указанное сечение ввиду наличия двух осей симметрии, большой прочности и жесткости достаточно часто встречается в практике проектирования гражданских зданий со стальными каркасами.

Гнутые сварные квадратные трубы получают из листовой заготовки путем профилирования нужного сечения с последующим выполнением продольного сварного шва. После этого производится подрезка по длине и обработка поверхности. Принятый профиль выпускается из стального листа толщиной 8 мм (по ГОСТ 19903–2015<sup>2</sup>); класс точности изготовления листа Б (обычной точности); ширина исходной листовой заготовки 1250 мм [1–4].

Рассмотрим контактный стык двух колонн из квадратного профиля. Такой узел может применяться как монтажный при устройстве каркасов многоэтажных зданий. Для исключения смещения верхней части колонны относительно нижней используются внутренние направляющие пластины (рис. 1), установленные так, чтобы при вариации размеров сечений в пределах допусков производства квадратных труб была возможна установка частей колонн друг на друга.

В таком соединении продольное усилие  $N$  и изгибающий момент  $M$  передаются непосредственно через контакт торцевых сечений нижней и верхней частей колонны. Для обеспечения прочности и облегчения монтажа важно понимать, насколько отличаются друг от друга поперечные сечения нижней и верхней колонн в стыке. Изменение размеров сечения в пределах допусков уменьшает контактную площадь, что влияет на прочность стыка.

В данной статье исследуется влияние погрешностей изготовления колонн из стальных гнутых замкнутых сварных профилей  $200 \times 8$  мм на возможность выполнения контактного узла стыка колонн по высоте. Разработанная методика оценки площади контакта в монтажном стыке может применяться и для квадратных гнутосварных профилей других размеров. При оценке влияния погрешностей произ-

водства квадратных профилей использованы следующие предположения:

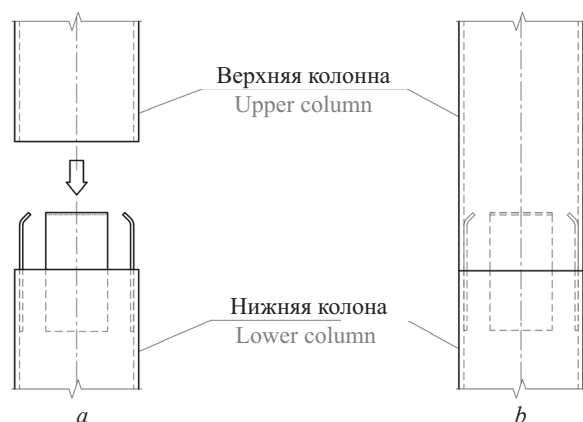
- погрешности симметричны относительно обеих осей симметрии;
- колонны из стальных квадратных профилей устанавливаются друг на друга соосно; дополнительные погрешности из-за неточности монтажа, такие как боковые и угловые смещения, не рассматриваются.

На рис. 2 показана схема формирования площади контакта двух профилей.

В стандартах указаны допуски на предельные отклонения размеров стальной продукции в зависимости от ее вида. С учетом того, что квадратные трубы производятся из листовой стали, необходимо принять во внимание погрешности изготовления и стальных листов, и погрешности формирования замкнутых стальных квадратных труб. В ГОСТ 19903–2015 приведены допустимые погрешности изготовления для листового проката, в ГОСТ 30245–2003 — для квадратных профилей.

Данные ограничения приняты исходя из требований к качеству строительного стального проката, которое зависит от ряда факторов:

- 1) технико-экономических расчетов (баланса безопасности и экономики);
- 2) технологической осуществимости (возможностей промышленного оборудования);
- 3) международного опыта производства (совместимости с мировыми практиками);



**Рис. 1.** Контактный стык колонн из квадратных труб с направляющими пластинами: *a* — в разобранном виде; *b* — в собранном виде

**Fig. 1.** Contact joint of columns made of square profiles with guide plates: *a* — disassembled; *b* — assembled

<sup>1</sup> ГОСТ 30245–2003. Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций. Технические условия.

<sup>2</sup> ГОСТ 19903–2015. Прокат листовой горячекатаный. Соргамент.

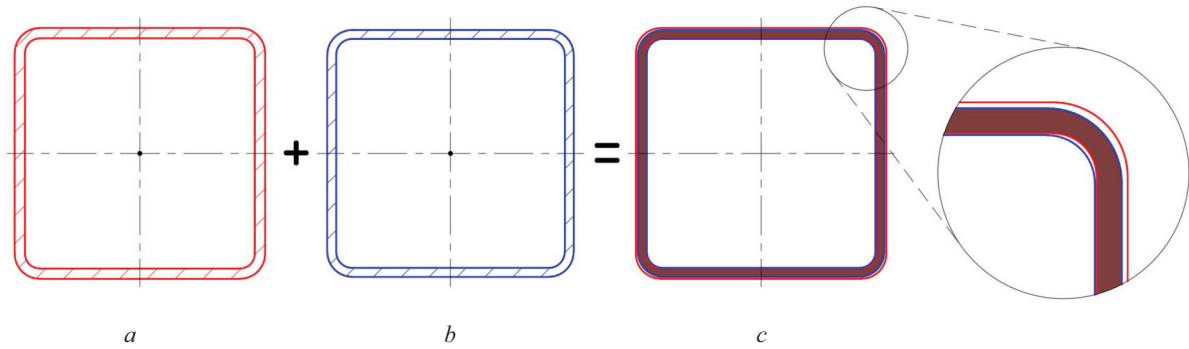


Рис. 2. Схема формирования площади контакта торцов: *a* — сечение нижней колонны; *b* — сечение верхней колонны; *c* — площадь контакта торцов при соосном совмещении сечений двух профилей

Fig. 2. The scheme of the formation of the contact area of the ends: *a* — the section of the lower column; *b* — the section of the upper column; *c* — the contact area of the ends when the sections of the two profiles are coaxially aligned

4) эксплуатационных факторов (нагрузок, коррозионных рисков, точности монтажа).

В стандартах на производимую продукцию указывается диапазон основных параметров профиля (толщины стенки, высоты профиля, радиуса наружного закругления). Наличие диапазона контролируемых параметров позволяет осуществлять отбраковку некачественной продукции. Указанные в стандартах параметры профиля представляют собой математическое ожидание толщины стенки, высоты профиля, радиуса наружного закругления соответственно. Например, для указанного в ГОСТ 30245–2003 типоразмера квадратного стального профиля 200 × 8 мм математическое ожидание высоты профиля  $\bar{h} = 200,0$  мм, а толщины  $\bar{t} = 8,0$  мм [5–8].

Математически изменение параметров можно выразить следующим образом. Пусть  $f(x)$  — функция распределения плотности вероятности параметра  $x$ , непрерывная на интервале  $(-\infty; \infty)$ . Площадь под графиком функции  $f(x)$ , определенной на всей числовой оси, равна 1.

Учитывая ограничения, устанавливаемые нормами на изготовление, область определения функции  $f(x)$  сокращается до отрезка  $[a, b]$ . В этом случае площадь под графиком функции  $f(x)$ , определенной на отрезке  $[a, b]$ , равна  $P(x) = 0,9544$ , что соответству-

ет вероятности изготовления на заводе продукции, удовлетворяющей требованиям стандартов [9–13].

Будем считать, что вероятность поступления в продажу некачественной продукции равна 0 и все изделия без исключения удовлетворяют требованиям на указанные в ГОСТах допуски. Тогда вероятность поставки и использования продукции с параметром  $x$ , значение которого принадлежит регламентированному интервалу  $[a, b]$ , равна 100 %. В этом случае выражение функции плотности распределения вероятности, определенной на отрезке  $[a, b]$ , умножается на коэффициент  $c > 1$ , т.е.  $c \cdot f(x)$ . Площадь под графиком будет  $P_c(x) = 1$ .

Значение масштабного коэффициента  $c$  определяется выражением:

$$c = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx}{\int_a^b f(x) dx} = \frac{1}{0,9544} = 1,04778 \approx 1,05. \quad (1)$$

На рис. 3 показано непрерывное полное распределение продукции  $f(x)$  с параметром  $x$  отбраковки, предельные допуски на изготовление в пределах  $2\sigma_x$  и усеченное распределение  $c \cdot f(x)$  после отбраковки [14–23].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Погрешности изготовления стального листа $t = 8$ мм (по ГОСТ 19903–2015)

В общем случае стальные листы изготавливаются в соответствии с нормальным законом распределения.

Для листов толщиной от 7,5 до 10,0 мм при ширине проката от 1000 до 1500 мм и класса точности изготовления Б указаны допуски  $-0,80$  мм и  $+0,30$  мм. Это означает, что значение  $t$  будет принадлежать отрезку  $[7,2; 8,3]$  мм.

Данный интервал несимметричен относительно своего математического ожидания  $\bar{t} = 8,0$  мм. Слева и справа от  $\bar{t}$  откладываются разные среднеквадратические отклонения:  $\sigma_1 = 0,4$  мм и  $\sigma_2 = 0,15$  мм.

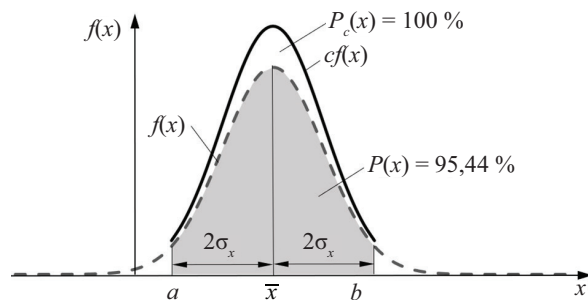


Рис. 3. Плотность полного  $f(x)$  и усеченного  $c \cdot f(x)$  распределения случайной величины  $x$

Fig. 3. Density of the entire  $f(x)$  and limited  $c \cdot f(x)$  distribution of the random variable  $x$

Для того чтобы подобрать закон распределения, сформулированы необходимые условия:

- область определения  $[7,2; 8,3]$ ;
- математическое ожидание равно 8,0;
- площадь под графиком полученной ограниченной функции равна 1;
- площадь под графиком на отрезке  $[7,2; 8,0]$  (слева от математического ожидания) и  $[8,0; 8,3]$  (справа от математического ожидания) равна 0,5. Это условие позволяет получать значения как больше, так и меньше 8,0 с одинаковой вероятностью.

Заданным условиям удовлетворяет бета-распределение. Для задания функции выполнен переход к единичному отрезку:

$$x = \frac{t-7,2}{8,3-7,2} \in [0; 1]; \quad t = 7,2 + 1,1x. \quad (2)$$

На отрезке  $[0; 1]$  плотность распределения задана как:

$$g(x) = \frac{1}{Z(\alpha, \beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1}. \quad (3)$$

В этой формуле величина  $Z(\alpha, \beta)$  называется нормировочной константой, которая вычисляет-

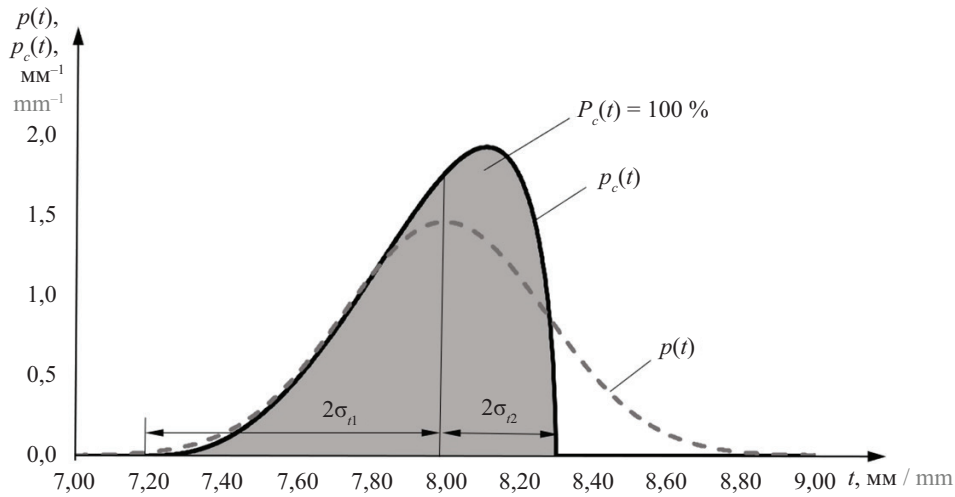


Рис. 4. Нормальное распределение общего вида  $p(t)$  и ограниченное бета-распределение  $p_c(t)$  плотности вероятности для толщины стенки  $t$  квадратного профиля  $200 \times 8$  мм

Fig. 4. The normal distribution of the general form  $p(t)$  and the limited probability density beta-distribution  $p_c(t)$  for the wall thickness  $t$  of a  $200 \times 8$  mm square profile

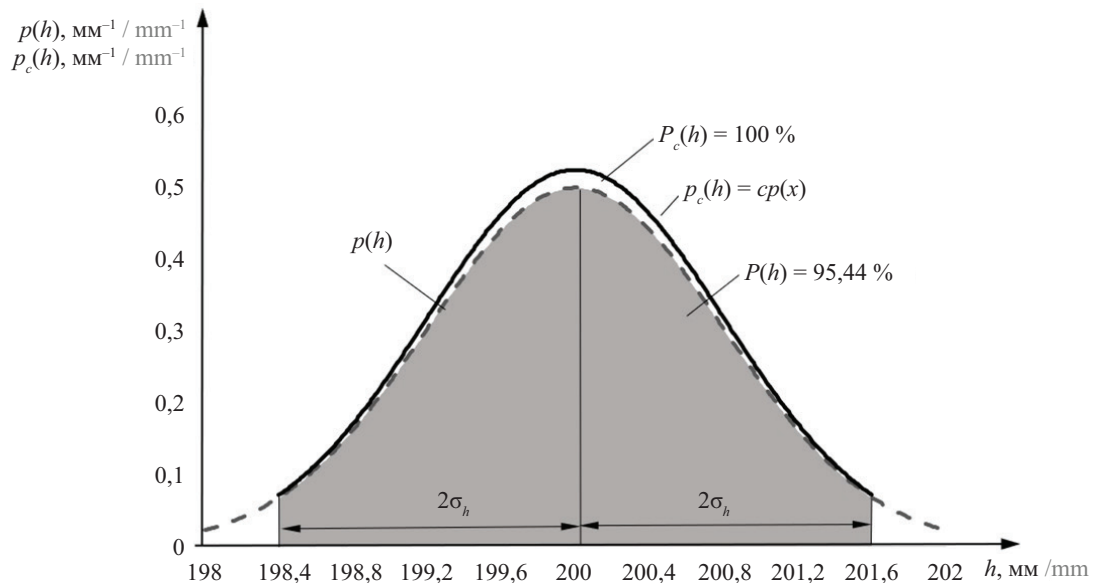


Рис. 5. Плотность нормального  $p(h)$  и усеченного нормального  $p_c(h)$  распределения высоты  $h$  квадратного профиля  $200 \times 8$  мм

Fig. 5. Probability density entire and limited normal distributions for the height of a  $200 \times 8$  mm square profile

ся как бета-функция, зависит от параметров  $\alpha, \beta$  и определяется через интеграл:

$$Z(\alpha, \beta) = B(\alpha, \beta) = \int_0^1 x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} dx. \quad (4)$$

Полученное бета-распределение выглядит следующим образом:

$$p_c(t) = \begin{cases} \frac{1}{(8,3 - 7,2)^8} g\left(\frac{t - 7,2}{8,3 - 7,2}\right) = \\ = \frac{1}{1,1 Z(\alpha, \beta)} \left(\frac{t - 7,2}{1,1}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{t - 7,2}{1,1}\right)^{\beta-1} & \text{при } 7,2 \leq t \leq 8,3; \\ 0 & \text{при } t < 7,2 \text{ и } t > 8,3. \end{cases} \quad (5)$$

Параметры, которые точно удовлетворяют заданным условиям:  $\alpha = 3,51, \beta = 1,51$ . График функции представлен на рис. 4.

### Погрешности изготовления квадратного профиля $200 \times 8$ по высоте (по ГОСТ 30245–2003)

При изготовлении квадратных профилей высотой более 100 мм погрешности по высоте (ширине) составляют  $\pm 0,8\% h$ , т.е. для номинальной высоты профиля 200,0 мм фактическое значение  $h$  будет принадлежать отрезку  $[198,4; 201,6]$  мм.

Распределение плотности вероятности высоты сечения профиля симметричное, принимаем его усеченным нормальным (рис. 5). После отбраковки на заводе-производителе вероятность попадания случайной величины в указанный интервал составляет 100%. Усеченный нормальный закон распределения плотности вероятности для параметра  $h$  выглядит следующим образом:

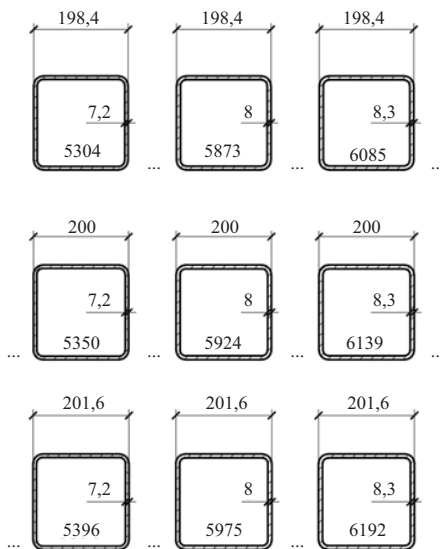


Рис. 6. Некоторые возможные варианты поперечных сечений при погрешностях изготовления стального листа по толщине и квадратного профиля по высоте

Fig. 6. Some possible cross-sectional variants for production inaccuracies of steel sheet in thickness and square profile in height

$$p_c(h) = \begin{cases} \frac{1,05}{\sigma_h \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(h-\bar{h})^2}{2\sigma_h^2}} & \text{при } 198,4 \leq h \leq 201,6; \\ 0 & \text{при } h < 198,4 \text{ и } h > 201,6. \end{cases} \quad (6)$$

где  $\bar{h} = 200,0$  мм — математическое ожидание;  $\sigma_h = 0,8$  мм — среднеквадратическое отклонение величины  $h$ .

Приведены некоторые комбинации в размерах сечений (рис. 6). Внутри сечений показаны полученные площади поперечного сечения в мм<sup>2</sup>.

### Погрешности изготовления квадратного профиля $200 \times 8$ по радиусу наружного закругления (по ГОСТ 30245–2003)

При изготовлении квадратных профилей при  $6,0 < t < 10,0$  мм допустимые значения радиуса наружного закругления  $R$  принадлежат отрезку  $[16,0; 24,0]$  мм.

Распределение плотности вероятности радиуса наружного закругления симметричное, принимаем его усеченным нормальным (рис. 7). После отбраковки на заводе-производителе вероятность попадания случайной величины в указанный интервал составляет 100%. Усеченный нормальный закон распределения плотности вероятности для параметра  $R$  выглядит так:

$$p_c(R) = \begin{cases} \frac{1,05}{\sigma_R \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(R-\bar{R})^2}{2\sigma_R^2}} & \text{при } 16,0 \leq R \leq 24,0; \\ 0 & \text{при } R < 16,0 \text{ и } R > 24,0. \end{cases} \quad (7)$$

где  $\bar{R} = 20,0$  мм — математическое ожидание;  $\sigma_R = 2,0$  мм — среднеквадратическое отклонение величины  $R$ .

Приведены некоторые комбинации в размерах сечений (рис. 8). Внутри сечений показаны полученные площади поперечного сечения в мм<sup>2</sup>.

### Определение коэффициента условий работы $\gamma_d$

Производство квадратных стальных профилей неизбежно связано с погрешностями изготовления. При решении контактной задачи двух фрезерованных торцов эти факторы нельзя игнорировать.

Предельная расчетная продольная нагрузка  $P$  для рассматриваемого контактного стыка колонн определяется из условия прочности колонны для центрального сжатия в упругой стадии:  $P = A_n R_{y, \text{ср}}$ .

Данная формула включает в себя площадь нетто сплошного сечения колонны и не учитывает передачу продольного усилия через неидеальный контакт двух торцов. Как было показано выше, площадь контакта может быть как больше, так и меньше площади сечения нетто.

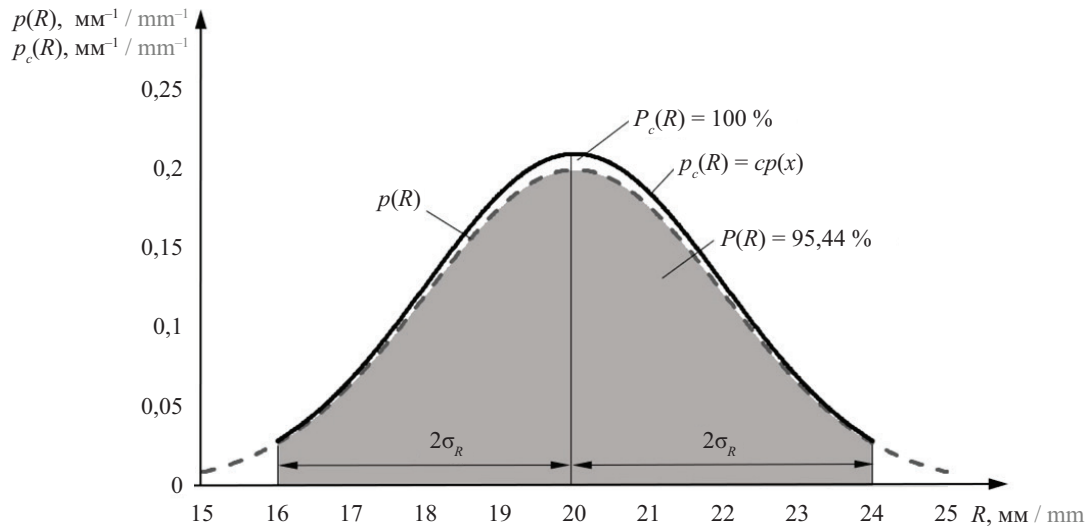


Рис. 7. Плотность нормального  $p(R)$  и усеченного нормального  $p_c(R)$  распределения радиуса наружного закругления  $R$  квадратного профиля  $200 \times 8$  мм

Fig. 7. Probability density entire and limited normal distributions for the radius of the outer rounding of a  $200 \times 8$  mm square profile

Обеспеченность безотказной работы узла принимается равной 0,95. Это и есть вероятность того, что во время работы контактного стыка колонн площадь контакта торцов  $A'_{cont}$  превышает минимально допустимый уровень  $A'_{cont}$ .

Для того чтобы учесть погрешности изготовления элементов при определении несущей способности узла, предлагается ввести понижающий коэффициент условий работы  $\gamma_d$ , вычисляемый как отношение порогового значения площади контакта  $A'_{cont}$  к нормативной площади сечения профиля колонны  $A_n$ :

$$\gamma_d = \frac{A'_{cont}}{A_n}. \quad (8)$$

В итоге получаем выражение для назначения предельно допустимой продольной нагрузки при центральном сжатии на контактный монтажный узел:

$$P = \gamma_d A_n R_y = A'_{cont} R_y. \quad (9)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения площади контакта торцов труб при различных значениях параметров  $t_1, h_1, R_1, t_2, h_2, R_2$ , поиска аппроксимирующей функции  $A_{cont}$  и коэффициента условий работы  $\gamma_d$  написана программа на языке Python, реализующая метод Монте-Карло. Работа узла описывается математической моделью с использованием генератора случайных величин по принятым законам распределения, модель многократно обчисляется, на основе полученных данных вычисляются требуемые вероятностные характеристики.

На рис. 9 схематично показано положение рассматриваемых площадей на узле как функций нескольких переменных.

На рис. 10 показана блок-схема работы программы.

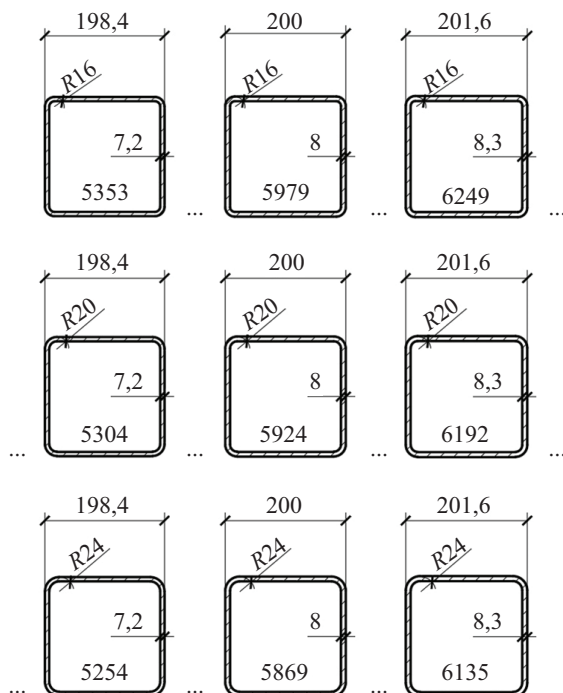


Рис. 8. Некоторые возможные варианты поперечных сечений при погрешностях изготовления стального листа, квадратного профиля по высоте и радиусу наружного закругления

Fig. 8. Some possible cross-sectional variants for production inaccuracies of steel sheet in thickness, square profile in height and radius of the outer rounding

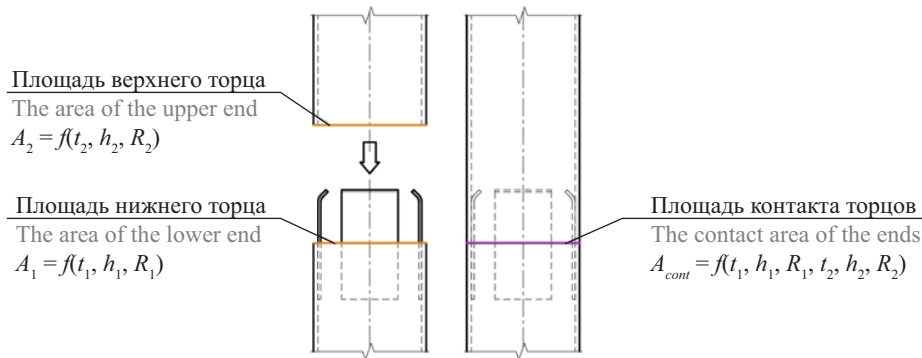
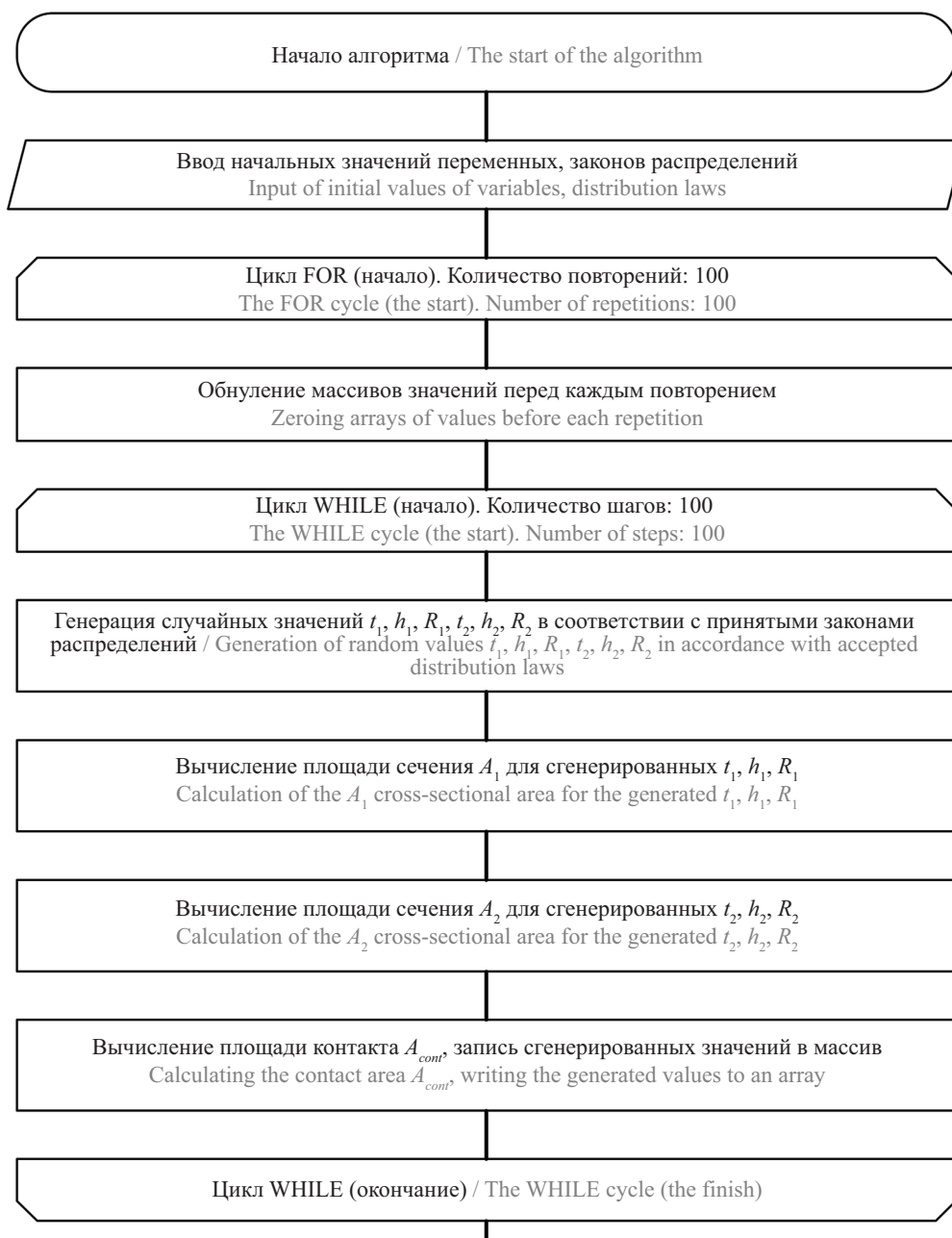


Рис. 9. Схема расположения рассматриваемых площадей на узле как функций нескольких переменных  
Fig. 9. The scheme of the considered areas on the node as functions of several variables



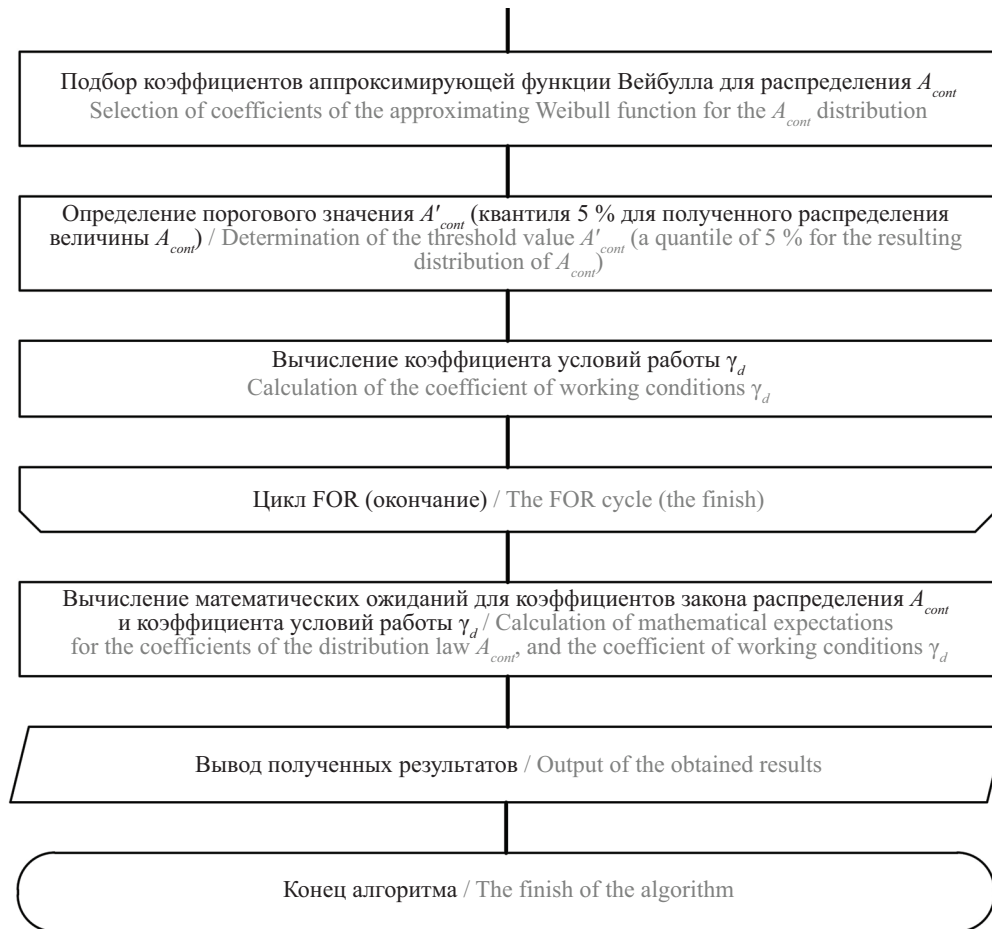


Рис. 10. Блок-схема работы программы

Fig. 10. Block diagram of the program operation

При работе программы реализуется следующая последовательность действий:

1. Загружаются необходимые данные для решения библиотеки.

2. Вводятся начальные значения переменных, параметры используемых законов распределений случайных величин (бета-распределения — для  $t$ , нормального распределения — для  $h$  и  $R$ ).

3. Для реализации метода Монте-Карло формируется цикл for, количество повторений принимается равным 100.

4. С целью выполнения серии независимых расчетов выполняется очистка заполняемых массивов данных.

5. Формируется цикл while, количество шагов принимается равным 10 000.

6. Для каждой колонны задаются параметры  $t$ ,  $h$ ,  $R$  (с индексом «1» — для нижней колонны, с индексом «2» — для верхней колонны). На каждом шаге цикла генерируются случайные значения шести параметров  $t_1$ ,  $h_1$ ,  $R_1$ ,  $t_2$ ,  $h_2$ ,  $R_2$  в соответствии с используемыми законами распределений.

7. На каждом шаге цикла для сечения каждой колонны при случайной комбинации входных пара-

метров  $t$ ,  $h$  и  $R$  с помощью координатного метода задается контур сечения: по заданным формулам определяются координаты точек, по которым строится каждый многоугольник (полигон). Он представляет собой два ломаных замкнутых многоугольника, которые позволяют аппроксимировать реальное сечение с криволинейными секторами прямыми отрезками. На рис. 11 показана схема такой аппроксимации путем разбивки кругового сектора величиной  $90^\circ$  на 6 частей (по  $15^\circ$ ). При таком упрощении полученное значение площади отличается от точного значения всего на 0,15 %. В таблице приведены формулы для определения координат вершин многоугольников, формирующих наружную и внутреннюю границы сечения профиля колонны.

8. На каждом шаге цикла устанавливается площадь поперечного сечения нижней и верхней колонны ( $A_1$  и  $A_2$ ), а также площадь их пересечения (площадь контакта  $A_{cont}$ ) для сгенерированных параметров  $t_1$ ,  $h_1$ ,  $R_1$ ,  $t_2$ ,  $h_2$ ,  $R_2$ .

9. В результате работы цикла while получается массив из значений площади контакта торцов  $A_{cont}$ .

10. Так как исходные параметры подчиняются разным типам распределений, то результирующий

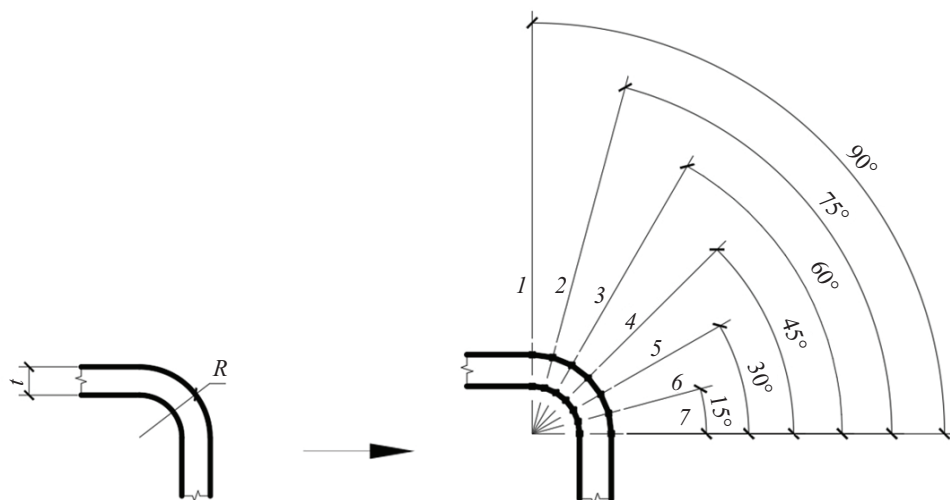


Рис. 11. Схема линейной аппроксимации криволинейного сектора профиля

Fig. 11. The scheme of linear approximation of the curved sector of the profile

Формулы для определения координат вершин многоугольников, формирующих наружную и внутреннюю поверхности профиля колонны

Formulas for determining the coordinates of the vertices of polygons forming the outer and inner surfaces of the column profile

Контур Contour	Точка Point	Абсцисса X Abscissa X	Ордината Y Ordinate Y
Наружный External	1	$\frac{h}{2} - R$	$\frac{h}{2}$
	2, 3, 4, 5, 6	$\frac{h}{2} - R \cdot \left(1 - \cos \frac{m\pi}{12}\right)$ , $m = 5, 4, 3, 2, 1$	$\frac{h}{2} - R \cdot \left(1 - \sin \frac{m\pi}{12}\right)$ , $m = 5, 4, 3, 2, 1$
	7	$\frac{h}{2}$	$\frac{h}{2} - R$
Внутренний Internal	1	$\frac{h}{2} - R$	$\frac{h}{2} - t$
	2, 3, 4, 5, 6	$\frac{h}{2} - R + (R - t) \cdot \left(1 - \cos \frac{5\pi}{12}\right)$ , $m = 5, 4, 3, 2, 1$	$\frac{h}{2} - R + (R - t) \cdot \left(1 - \sin \frac{5\pi}{12}\right)$ , $m = 5, 4, 3, 2, 1$
	7	$\frac{h}{2} - t$	$\frac{h}{2} - R$

закон для полученных данных  $A_{cont}$  можно определить только методом подбора кривой по гистограмме. Наиболее точное описание данных дает распределение Вейбулла, на этом этапе подбираются его коэффициенты  $k, \lambda, \theta$ , которые заполняют массивы значениями.

11. На каждом повторении для подобранной функции распределения случайной величины  $A_{cont}$  определяется квантиль, при котором вероятность превышения  $A'_{cont}$  будет равна 0,95.

12. Вычисляется коэффициент условий работы  $\gamma_{d^*}$  значения вносятся в массив.

13. После завершения работы цикла for вычисляются математические ожидания для коэффициен-

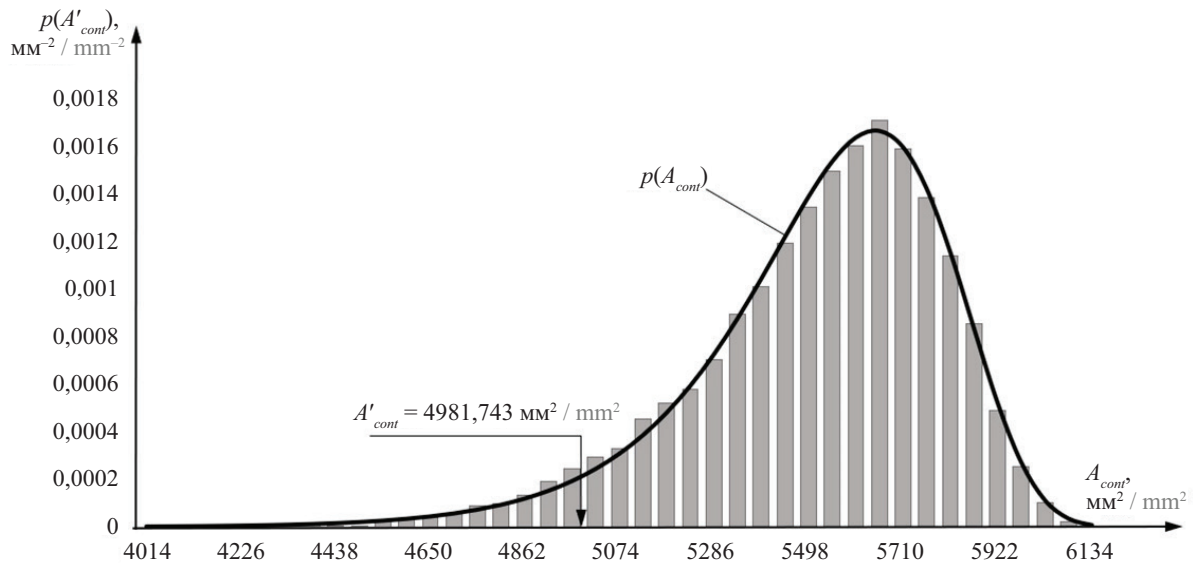
тов закона распределения ( $k, \lambda, \theta$ ) и коэффициента условий работы  $\gamma_{d^*}$ , результаты выводятся на печать.

Формула для полученного распределения Вейбулла выглядит следующим образом:

$$p(A_{cont}) = \frac{k}{\lambda} \left( \frac{A_{cont} - \theta}{\lambda} \right)^{k-1} \cdot \exp\left( -\frac{A_{cont} - \theta}{\lambda} \right), \quad (10)$$

где  $k = 58,903$ ;  $\lambda = 13\,056,885$ ;  $\theta = -7434,884$  мм<sup>2</sup>;  $A_{cont} > \theta$  (значения параметров  $k, \lambda, \theta$  равны вычисленным соответствующим математическим ожиданиям).

На рис. 12 представлена гистограмма и кривая распределения полученных значений площади контакта торцов  $A_{cont}$ .



**Рис. 12.** Гистограмма и кривая распределения полученных значений площади контакта торцов  $A'_{cont}$   
**Fig. 12.** The histogram and distribution curve of the obtained values of the contact area of the ends of  $A'_{cont}$

На каждом повторении цикла было вычислено пороговое значение  $A'_{cont}$ , при котором вероятность превышения равна 0,95, или  $P(A'_{cont} < A_{cont}) = 0,95$ . Математическое ожидание равно  $\bar{A}'_{cont} = 4981,743 \text{ мм}^2/\text{мм}^2$  (см. рис. 12).

Принимаемый коэффициент условий работы равен математическому ожиданию из вычисленных значений:

$$\gamma_d = \frac{\bar{A}'_{cont}}{A_n} = \frac{4981,743}{5924} \approx 0,84. \quad (11)$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования получены следующие результаты:

- подобраны законы распределения для таких параметров, как толщина стенки профиля  $t$  (бета-распределение), высота профиля  $h$  и радиус наружного закругления  $R$  (нормальное распределение);
- с учетом отбраковки полученные распределения были усечены, непрерывные в положительной области распределения определены в пределах границ, заданных в ГОСТах;

- разработана программа в среде Python для определения площади контакта торцов колонн  $A_{cont}$ , которая на примере квадратного гнутосварного профиля  $200 \times 8 \text{ мм}$  позволила сгенерировать 1 000 000 значений площади контакта с учетом варьирования толщины стенки, высоты профиля и радиуса наружного закругления;

- подобран закон, который наиболее точно описывает полученный массив данных  $A_{cont}$ ; оптимальной оказалась кривая, подчиняющаяся распределению Вейбулла;

- предложена формула для вычисления предельно допустимой продольной нагрузки на контактный стык колонн с учетом понижающего коэффициента условий работы  $\gamma_d$ . Для квадратного гнутосварного профиля  $200 \times 8 \text{ мм}$  в результате реализации метода Монте-Карло установлена величина коэффициента условий работы  $\gamma_d$ , равная 0,84;

- предложенная методика определения несущей способности контактного стыка может быть использована для других квадратных гнутосварных профилей.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тихонов С.М., Алехин В.Н., Беляева З.В. и др. Проектирование металлических конструкций. Часть 1: Металлические конструкции. Материалы и основы проектирования : уч. для вузов. М. : Перо, 2023. 464 с.
2. Хлопонин В.Н., Полухин П.И., Погоржельский В.И., Полухин В.П. Горячая прокатка широких полос. М. : Металлургия, 1991. 197 с.
3. Салганик В.М., Румянцев М.И. Технология производства листовой стали : уч. пособие. Магнитогорск : МГТУ, 2007. 319 с.

4. Markulik S., Nagyova A., Turisova R., Villinsky T. Improving quality in the process of hot rolling of steel sheets // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Issue 12. P. 5451. DOI: 10.3390/app11125451
5. Благодарцев И.В., Шемшурова Н.Г., Куницын Д.А. Совершенствование технологии производства прямошовных сварных профильных труб // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2012. № 4 (1348). С. 94–100. EDN NPONXM.

6. Михалкин Д.В., Корсаков А.А., Алютина Е.В., Алещенко А.С., Галкин С.П., Гамин Ю.В. и др. Повышение точности труб путем применения профилированной трубной заготовки // *Металлург*. 2020. № 4. С. 40–45. EDN QFZYNC.

7. Kut S., Stachowicz F. Cross-section deformation and bending moment of a steel square tubular section // *Materials*. 2020. Vol. 13. Issue 22. P. 5170. DOI: 10.3390/ma13225170

8. Kilz J., Güngör B., Aign F., Groche P. Profile defects caused by inhomogeneous longitudinal strain distribution in roll forming // *International Journal of Material Forming*. 2023. Vol. 16. Issue 4. DOI: 10.1007/s12289-023-01762-3

9. Надольский В.В. Коэффициенты надежности для стальных элементов, проектируемых на основе компьютерных численных моделей // *Вестник МГСУ*. 2024. Т. 19. № 10. С. 1606–1616. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1606-1616. EDN UIGFWY.

10. Надольский В.В., Мартынов Ю.С. Оценка требуемого (целевого) уровня надежности на основании предыдущего опыта нормирования // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки*. 2014. № 8. С. 27–34. EDN ТРКРАН.

11. Райзер В.Д. Вероятностные методы в анализе надежности и живучести сооружений. М.: Издательство АСВ, 2018. 394 с.

12. Song I., Park S.R., Yoon S. Probability and Random Variables: Theory and Applications. 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-97679-8

13. Гадалов В.Н., Романенко Д.Н., Болдырева О.Н. Оценка надежности строительных металлоконструкций методом статистического моделирования // *Конструкции из композиционных материалов*. 2011. № 1. С. 31–34. EDN NCPTHD.

14. Олейникова С.А. Аппроксимация закона распределения суммы случайных величин, распределенных по закону бета // *Кибернетика и програм-*

*мирование*. 2015. № 6. С. 35–54. DOI: 10.7256/2306-4196.2015.6.17225. EDN VHWSGZ.

15. Luengo E.A., Gragera C. Critical analysis of beta random variable generation methods // *Mathematics*. 2023. Vol. 11. Issue 24. P. 4893. DOI: 10.3390/math11244893

16. Orlov A.I. Statistical analysis of samples from the beta distribution // *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2023. No. 187. Pp. 184–206. DOI: 10.21515/1990-4665-187-017. EDN RDTMOQ.

17. Тырсин А.Н. Метод подбора наилучшего закона распределения непрерывной случайной величины на основе обратного отображения // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика*. 2017. Т. 9. № 1. С. 31–38. DOI: 10.14529/mmph170104. EDN XRFRL.

18. Thomopoulos N.T. Probability distributions. Springer, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-76042-1

19. Fang K.W. Symmetric multivariate and related distributions. Chapman and Hall/CRC, 2018.

20. Костин В.Н. Результаты анализа законов распределения погрешностей измерений астронавигационных систем // *Навигация и гидрография*. 2018. № 54. С. 30–37. EDN MVMKYP.

21. Рыхлов А.Б. Анализ применения законов распределения для выравнивания скоростей ветра // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле*. 2010. Т. 10. № 2. С. 25–30. EDN NCTNCF.

22. Latour M., Benedetto S.D., Francavilla A.B., Elettore G., Rizzano G. Stiffness and strength of square hollow section tubes under localised transverse actions // *Metals*. 2023. Vol. 13. Issue 10. P. 1767. DOI: 10.3390/met13101767

23. Song I., Park S.R., Yoon S. Probability and Random Variables: Theory and Applications. Springer, 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-97679-8

Поступила в редакцию 23 ноября 2025 г.

Принята в доработанном виде 24 ноября 2025 г.

Одобрена для публикации 16 декабря 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Романович Туснин — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой металлических и деревянных конструкций, директор Института промышленного и гражданского строительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 7034-0713, РИНЦ ID: 455914; Scopus: 6507367654, ResearcherID: U-2546-2018, ORCID: 0000-0002-9997-9436; Tusninar@mgsu.ru;

Иван Владимирович Мыльников — аспирант кафедры металлических и деревянных конструкций; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3437-1337, РИНЦ ID: 1234163, ORCID: 0009-0000-4381-7393; miv\_2499@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Tikhonov S.M., Alyokhin V.N., Belyaeva Z.V. et al. Design of metal structures. Part 1: Metal structures. *Materials and fundamentals of design : textbook*. Moscow, Pero, 2023; 464. (rus.).
2. Khloponin V.N., Polukhin P.I., Pogorzelsky V.I., Polukhin V.P. *Hot rolling of wide strips*. Moscow, Metallurgy, 1991; 197. (rus.).
3. Salganik V.M., Rummyantsev M.I. *Technology of sheet steel production : tutorial*. Magnitogorsk, MSTU, 2007; 319. (rus.).
4. Markulik S., Nagyova A., Turisova R., Villinsky T. Improving quality in the process of hot rolling of steel sheets. *Applied Sciences*. 2021; 11(12):5451. DOI: 10.3390/app11125451
5. Blagodatshev I.V., Shemshurova N.G., Kunityn D.A. Improvement of production technology of straight-seam welded profile pipes. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*. 2012; 4(1348):94-100. EDN NPONXM. (rus.).
6. Mikhalkin D.V., Korsakov A.A., Al'utina E.V., Aleschenko A.S., Galkin S.P., Gamin Yu.V., Bol'nikh K. V., Krivonogov I.N., Khramkov E.V. Improving pipe accuracy by using profiled pipe billets. *Metallurgist*. 2020; 4:40-45. EDN QFZYNC. (rus.).
7. Kut S., Stachowicz F. Cross-section deformation and bending moment of a steel square tubular section. *Materials*. 2020; 13(22):5170. DOI: 10.3390/ma13-225170
8. Kilz J., Gungör B., Aign F., Groche P. Profile defects caused by inhomogeneous longitudinal strain distribution in roll forming. *International Journal of Material Forming*. 2023; 16(4). DOI: 10.1007/s12289-023-01762-3
9. Nadolski V.V. Reliability factors for steel elements designed on the basis of computer numerical models. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(10):1606-1616. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1606-1616. EDN UIGFWY. (rus.).
10. Nadolski V., Martynov I. Estimation of target level of reliability based on the previous experience standardization. *Herald of Polotsk State University. Series F. Civil Engineering. Applied Sciences*. 2014; 8:27-34. EDN TPKRAN. (rus.).
11. Raiser V.D. *Probabilistic methods in the analysis of reliability and survivability of structures*. Moscow, Publishing House ASV, 2018; 394. (rus.).
12. Song I., Park S.R., Yoon S. *Probability and Random Variables: Theory and Applications*. 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-97679-8
13. Gadalov V.N., Romanenko D.N., Boldyreva O.N. Estimation of reliability of building metal designs by method of statistical modeling. *Composite Materials Constructions*. 2011; 1:31-34. EDN NCPTHD. (rus.).
14. Oleinikova S.A. Approximation of the distribution law of the sum of random variables distributed according to the beta law. *Cybernetics and Programming*. 2015; 6:35-54. DOI: 10.7256/2306-4196.2015.6.17225. EDN VHWSGZ. (rus.).
15. Luengo E.A., Gragera C. Critical analysis of beta random variable generation methods. *Mathematics*. 2023; 11(24):4893. DOI: 10.3390/math11244893
16. Orlov A.I. Statistical analysis of samples from the beta distribution. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2023; 187: 184-206. DOI: 10.21515/1990-4665-187-017. EDN RDTMOQ.
17. Tyrsin A.N. The method of selecting the best distribution law for continuous random variables on the basis of inverse mapping. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematics. Mechanics. Physics*. 2017; 9(1):31-38. DOI: 10.14529/mmph170104. EDN XRFRL. (rus.).
18. Thomopoulos N.T. *Probability distributions*. Springer, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-76042-1
19. Fang K.W. *Symmetric multivariate and related distributions*. Chapman and Hall/CRC, 2018.
20. Kostin V.N. The results of the analysis of the distribution laws of measurement errors of astronavigation systems. *Navigation and Hydrography*. 2018; 54:30-37. EDN MMVKYP. (rus.).
21. Rykhlov A.B. Analysis of the application of distribution laws to equalize wind speeds. *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*. 2010; 10(2): 25-30. EDN NCTNCF. (rus.).
22. Latour M., Benedetto S.D., Francavilla A.B., Elettore G., Rizzano G. Stiffness and strength of square hollow section tubes under localised transverse actions. *Metals*. 2023; 13(10):1767. DOI: 10.3390/met13101767
23. Song I., Park S.R., Yoon S. *Probability and Random Variables: Theory and Applications*. Springer, 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-97679-8

Received November 23, 2025.

Adopted in revised form on November 24, 2025.

Approved for publication on December 16, 2025.

**BIONOTES:** **Aleksandr R. Tusnin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Metal and Timber Structures, Director of the Institute of Industrial and Civil Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 7034-0713, ID RSCI: 455914; Scopus: 6507367654, ResearcherID: U-2546-2018, ORCID: 0000-0002-9997-9436; [Tusninar@mgsu.ru](mailto:Tusninar@mgsu.ru);

**Ivan V. Mylnikov** — postgraduate student of the Department of Metal and Timber Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3437-1337, ID RSCI: 1234163, ORCID: 0009-0000-4381-7393; miv\_2499@mail.ru.

*Authors' contribution: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.  
The authors declare that there is no conflict of interest.*