

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЁТА ПРОФИЛИРОВАННЫХ ЛИСТОВ С ТРАПЕЦИЕВИДНЫМИ ГОФРАМИ ПРОИЗВОЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ**

Целью данной работы является разработка программного обеспечения для проверки предельных состояний, несущей способности и эксплуатационной пригодности стальных листовых профилей с трапециевидными гофрами произвольных размеров, включающего в себя модуль расчёта эффективных характеристик поперечного сечения в соответствии с нормами Еврокода.

Стальной листовой профиль (профлист) относится к тонкостенным конструктивным элементам, которые характеризуются характерными особенностями работы, такими как: возможная потеря местной устойчивости и потеря устойчивости промежуточных элементов жесткости. В ГОСТ 24045-94 для каждого типоразмера и профлиста были приведены значения эффективных характеристик поперечного сечения, учитывающие данные особенности. Однако новая международная редакция ГОСТ 24045-2016 [1] уже не содержит данных по эффективным характеристикам, и их расчёт необходимо выполнять по [2], что является весьма не легкой задачей [3]. Учитывая вышесказанное, автоматизация такого расчёта является весьма актуальной как с научной, так и с практической точки зрения.

Основные положения по расчёту профилированных настилов, а также начальный этап разработки программного обеспечения для решения этой задачи описан в [4].

Данная работа посвящена разработке алгоритма и программы по определению эффективных характеристик в соответствии с Еврокодом [2].

Особенностью работы стальных профилированных листов является то, что из-за высоких сжимающих напряжений происходит потеря как местной устойчивости элементов поперечных сечений, так и устойчивости промежуточных элементов жесткости. В результате потери местной устойчивости картина распределения сжимающих напряжений в элементах поперечного сечения существенно изменяется. С целью упрощения расчётов действительное неоднородное распределение напряжений по всей ширине плоского участка поперечного сечения заменяется на расчётное однородное, но на уменьшенной части поперечного сечения, именуемой эффективной шириной.

Реализация данного расчёта для профилированных листов на первом этапе была выполнена с использованием СКМ MathCAD, а затем на языке программирования C++ в среде разработки Qt Creator.

Рассмотрим поэтапно решение задачи определения эффективных характеристик на примере листа HC-35-1000-0,7, выполненного из стали с  $f_y = 321,61$  МПа, толщиной  $t = 0,65$  мм, высота профиля  $h = 35$  мм.

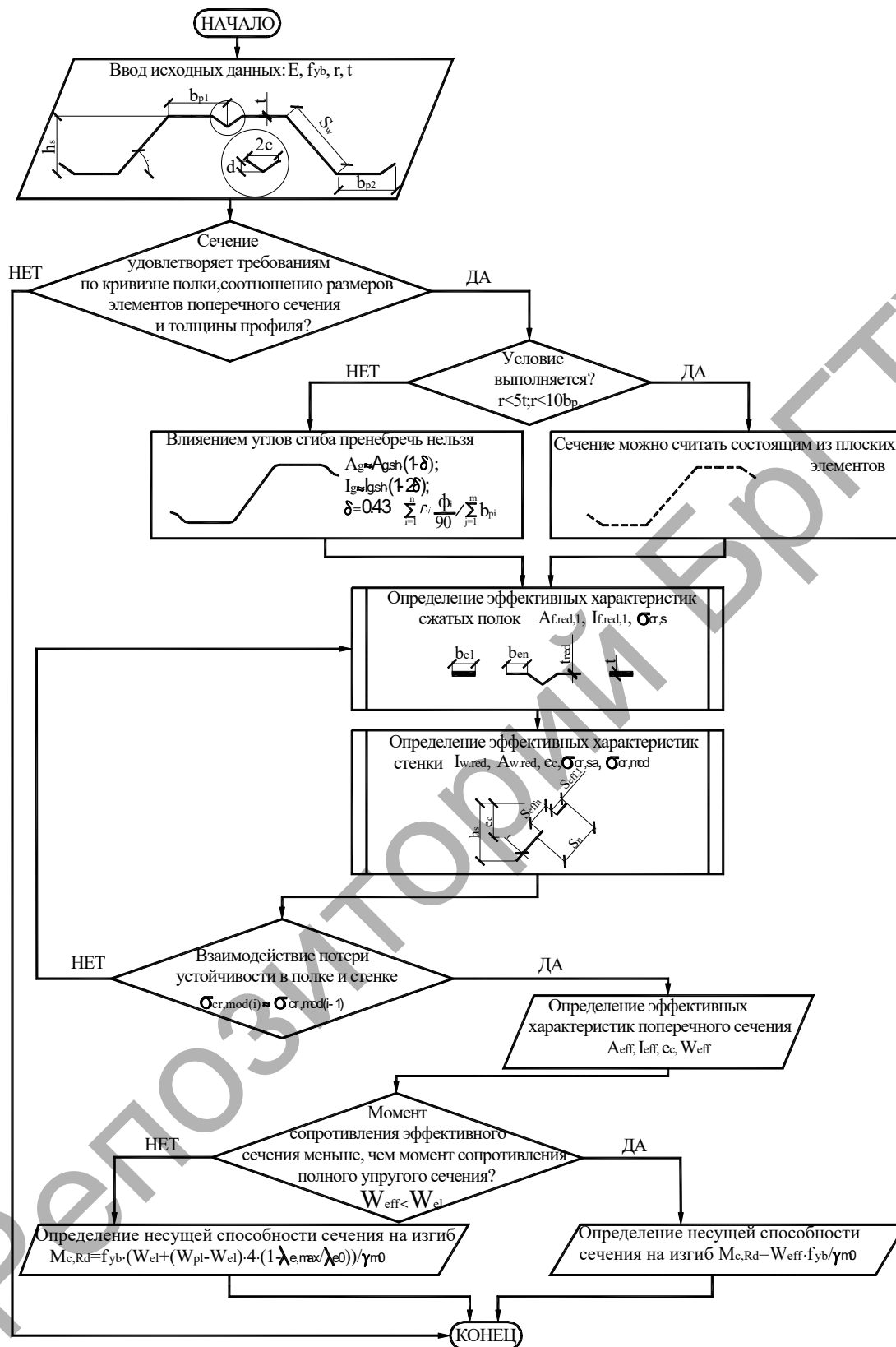
**Этап 1.** Следует сделать проверку на соотношение геометрических пропорций. Для обеспечения необходимой жесткости и исключения преждевременной потери устойчивости самого элемента жесткости размеры элементов жесткости должны быть в следующих пределах:

$$0,2 \leq c/b \leq 0,6;$$

$$0,1 \leq d/b \leq 0,3,$$

если  $c/b < 0,2$  или  $d/b < 0,1$ , то отгиб не учитывается ( $c = 0$  или  $d = 0$ ), при  $c/b > 0,6$  или  $d/b > 0,3$ , то расчёт профиля по данной методике не может быть выполнен.

Если данное условие не выполняется, расчет вести нельзя.



**Рисунок 1 – Алгоритм расчета**

**Этап 2.** Влияние углов сгиба на несущую способность сечения может не учитываться, если внутренний радиус  $r \leq 5t$  и  $r \leq 0,10b_p$ , и поперечное сечение можно считать состоящим из плоских элементов с острыми углами.

**Этап 3.** Определение эффективных характеристик сжатых полок, которое включает в себя:

– определение начального эффективного сечение элемента жесткости с использованием эффективной ширины, определяемой с учетом того, что элемент жесткости обеспечивает полное защемление и  $\sigma_{com,Ed} = f_{yb}/\gamma_{M0}$ ;

– определение коэффициента снижения несущей способности вследствие потери устойчивости формы сечения (плоская форма потери устойчивости промежуточного элемента жесткости), на основе начального эффективного поперечного сечения элемента жесткости и предпосылки о наличии непрерывной упруго-податливой опоры;

– уточнение коэффициента снижения несущей способности вследствие потери устойчивости формы сечения, которое осуществляется итерационным расчетом.

При определении геометрических характеристик эффективного сечения эффективную площадь  $A_{s,red}$  следует определять с учетом уменьшенной толщины  $t_{red} = t_{As,red}/A_s$  для всех элементов, включенных в  $A_s$ .

Геометрические характеристики эффективного сечения при расчете по предельным состояниям следует определять, используя расчетную толщину.

**Этап 4.** Эффективное поперечное сечение стенки должно включать:

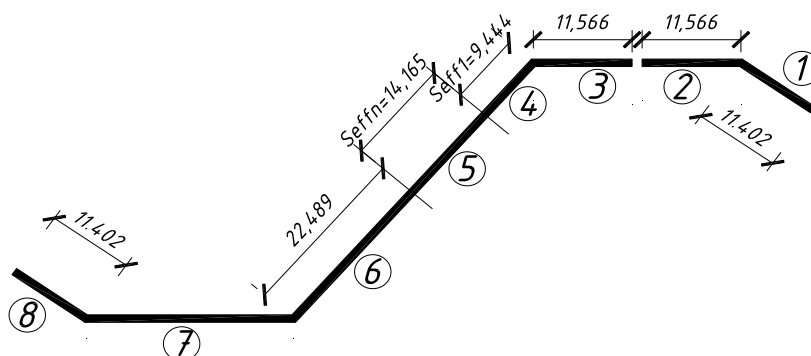
- полосу шириной  $s_{eff,1}$ , примыкающую к сжатой полке;
- уменьшенную эффективную площадь  $A_{s,red}$  каждого из элементов жесткости на стенке, при их количестве не более двух;
- примыкающую к центральной оси эффективного сечения полосу шириной  $s_{eff,n}$ ;
- растянутую часть стенки.

**Этап 5.** В случае наличия элементов жесткости и в полке и в стенке необходимо итерационно уточнить значение  $e_c$  и  $\sigma_{cr,mod}$ .

**Этап 6.** На основе полученных данных об эффективности измерения участков, потерявших местную устойчивость, и редуцированной толщине участков, потерявших устойчивость формы сечения, вычисляются эффективные характеристики поперечного сечения. Расчет удобно выполнять в табличной форме (таблица 1).

**Таблица 1 – Определение эффективных характеристик поперечного сечения**

Эл-т	l	$t_{red}/t$	A/t	z	A·z/t	A·z <sup>2</sup> /t	h	A·h <sup>2</sup> /12
1	11,402	0,889	10,141	3.500	35.489	124.188	7	41.411
2	11,566	0,889	10,287	0	0	0	0	0
3	11,566	1	11,566	0	0	0	0	0
4	9,444	1	9,444	3,585	33,856	121,374	7,170	40,458
5	14,165	1	14,165	12,548	177,742	2230,242	10,755	136,545
6	22,489	1	22,489	26,462	595,104	15747,642	17,075	546,399
7	26,000	1	26,000	35,000	910,000	31850,000	0	0
8	11,402	1	11,402	31,500	359,170	11314,086	7	46.558
			115,494		2111,361	61387,532		811,371



**Рисунок 2 – Эффективное сечение изгиба**

Расстояние от эффективной оси до нейтральной линии сжатой полки:

$$e_{cc} = \frac{2111.361}{115.494} = 18.281 \text{ мм.}$$

Момент инерции полного поперечного эффективного сечения:

$$I_{st} = 61387.532 + 811.371 - 115.494 \cdot 18.281^2 = 23601.219 \text{ мм}^4.$$

Значения основных геометрических характеристик с учетом влияния сгибов и переходом на погонный метр ширины настила углов будут равны:

$$I_g = I_{st} \cdot t \cdot (1 - 2 \cdot \delta) = 23601.219 \cdot 0.65 \cdot (1 - 2 \cdot 0.041) = 14082.84 \text{ мм}^4 = 14,082 \text{ см}^4 / \text{м.п.};$$

$$A_g = \frac{A}{t} \cdot t \cdot (1 - \delta) = 115.494 \cdot 0.65 \cdot (1 - 0.041) = 71.993 \text{ мм}^2 = 7,199 \text{ см}^2 / \text{м.п.}$$

Момент сопротивления эффективного поперечного сечения на 1 м.п. ширины настила:

$$W_{effII}^{M.П.} = \frac{I_g}{e_{cc}} = \frac{140828.4}{18.281} = 7703.543 \text{ мм}^3 / \text{м.п.} = 7.703 \text{ см}^3 / \text{м.п.}$$

**Этап 7.** Момент сопротивления эффективного сечения меньше, чем, момент сопротивления полного упругого сечения  $W_{eff} < W_{el}$ . Т. к. в примере, который принят в рассмотрении момент сопротивления меньше, чем момент сопротивления полного упругого сечения, то

$$M_{c.RdIII}^{M.П.} = \frac{W_{eff} \cdot f_{yb}}{\gamma_{M0}} = \frac{7.703 \cdot 321.61 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^6} = 2.477 \text{ кН} \cdot \text{м} / \text{м.п.}$$

Результат расчёта профлиста HC-35-1000-0,7, выполненного в программе Steel Sheet, показан на рис.3.

**Геометрические размеры:**

Обозначение	f, МПа	t, мм	E, 10 <sup>5</sup> МПа	r, мм	h, мм
NS35	321.61	0.65	2.1	4	35
bs1	bs	Sc	bs1	bs2	
11.401S	26.0000	46.0977	26.0000	11.401S	

**Эффективные характеристики**

	при сжат...	верхних	полках	при сжат...	нижних	полках
A, см <sup>2</sup>	I, см <sup>4</sup>	W <sub>eff1</sub> , см <sup>3</sup>	W <sub>eff2</sub> , см <sup>3</sup>	I, см <sup>4</sup>	W <sub>eff1</sub> , см <sup>3</sup>	W <sub>eff2</sub> , см <sup>3</sup>
727.952	143578.425	7891.412	8543.417	143578.425	7891.412	8543.417

Кнопки: Открыть файл, Пересчитать, Перейти к расчёту несущей способности

**Рисунок 3 – Форма вывода результатов эффективных характеристик**

Применение рассмотренной программы показало удобство работы с ней при выполнении практических расчетов. Программа расчёта эффективных характеристик стального листового профиля достаточно проста в работе, однако наилучшие результаты достигаются при его использовании специалистами, знакомыми с основами проектирования стальных конструкций в соответствии с нормативными документами и существующими методиками.

#### Список цитированных источников

1. Профили стальные листовые гнутые с трапециевидными гофрами для строительства. Технические условия : ГОСТ 24045-2016. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200141111>.

2. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1–3: Supplementary rules for cold-formed members and sheeting: EN 1991-1-3:2006. – Brussels: European Committee for Standardization, October 2006. – 134 p.

3. Жданов, Д. А. К определению эффективных сечений стальных бескаркасных арочных покрытий по Еврокоду / Д. А. Жданов, В. П. Уласевич // Строительная наука и техника. – 2013. – № 2. – С. 22–26.

4. Евчук, Д. И. Расчёт листовых гнутых профилей по ТКП EN 1993-1-3 / Д. И. Евчук // сборник конкурсных научных работ студентов и магистрантов : в. 2ч. – Брест, 2018. – Ч. 1. – С.193–196.

УДК 624.04:681

**Каковко В. И.**

**Научный руководитель: к. т. н., доцент, профессор Уласевич В. П.**

### **АЛГОРИТМ И ПРОГРАММА DresCAD ДЛЯ РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ МАТРИЧНЫМ МЕТОДОМ ДЕФОРМАЦИЙ В PTS MathCAD**

**Постановка задачи.** При проектировании конструктивных схем зданий и сооружений наметилась тенденция использования стержневых систем из прямолинейных легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК) и стальных тонкостенных холоднодеформированных профилей (СТХП), обладающих повышенной деформативностью. Вычисление перемещений и внутренних сил в таких стержневых системах требует применения методов, позволяющих предельно близко приблизить их расчетные модели к реальной их работе. При этом *расчетная модель* должна уметь учитывать геометрическую нелинейность, проявляемую при деформировании. А склонность тонкостенных сечений к потере местной устойчивости требует надежной оценки устойчивости формы равновесия в деформированных состояниях. Кроме того, поскольку стержневые системы сложной стержневой структуры обладают большим числом так называемых лишних связей, важно, чтобы алгоритм расчета при выявлении потери устойчивости отдельными стержнями позволял анализировать проявленную стержневой системой *конструктивную нелинейность* с точки зрения оценки устойчивости *вновь образованной расчетной модели* вплоть до потери устойчивости ее равновесия. Важно также, чтобы расчетная модель учитывала перемещения системы и внутренние усилия в ее стержнях с учетом проявляемой деформированной схемы равновесия под расчетными воздействиями, что даст возможность прогнозировать возможность и вероятность наступления так называемого «прогрессирующего обрушения».

Отсюда вывод: дальнейшее совершенствование моделей эффектов воздействий путем учета повышенной деформативности входящих в нее стержней из ЛСТК или СТХП – задача актуальная как в теоретическом, так и в практическом плане.

**1. О матричном методе деформаций.** Ниже кратко излагаются основные положения алгоритма матричного метода расчета стержневых систем сложной геометрической структуры, построенного на методе деформаций, изложенном в [1]. Его основная отличительная особенность от классического метода перемещений: возможность учета продольных деформаций стержней; возможность учета деформированной геометрии стержней в принятой *основной системе* под расчетными поперечными воздействиями; универ-