

Учреждение образования  
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 624.014.2:624.04(043.3)

**ЖДАНОВ**  
Дмитрий Александрович

**ДЕФОРМАЦИОННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА  
ПОЛОГИХ БЕСКАРКАСНЫХ АРОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ  
ИЗ РЕБРИСТЫХ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ  
ХОЛОДНОГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности  
05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

Брест 2018

Работа выполнена в учреждении образования «Брестский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Уласевич Вячеслав Прокофьевич**, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Строительные конструкции» учреждения образования «Брестский государственный технический университет», г. Брест

Официальные оппоненты: **Туснин Александр Романович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Металлические и деревянные конструкции» Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, г. Москва

**Надольский Виталий Валерьевич**, кандидат технических наук, доцент, главный конструктор проекта общества с ограниченной ответственностью «ХФ Технологии», г. Минск

Оппонирующая организация: учреждение образования «Полоцкий государственный университет», г. Новополоцк

Защита состоится « 5 » июля 2018 г. в 13 <sup>30</sup> часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.09.01 при учреждении образования «Брестский государственный технический университет» по адресу: 224017, Республика Беларусь, г. Брест, ул. Московская, 267, ауд. 1/323.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять по адресу: 224017, Республика Беларусь, г. Брест, ул. Московская, 267 на имя ученого секретаря совета по защите диссертаций Д 02.09.01, тел: +375 16 240 60 87.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Брестский государственный технический университет».

Автореферат разослан « 1 » июня 2018 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций



(подпись)

В. Л. Шевчук

## ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия во многих странах мира отмечается значительный рост объемов капитального строительства с использованием стальных тонкостенных холодногнутых профилей (далее СТХП) в качестве конструктивных элементов зданий и сооружений. Одна из областей такого применения – сборные бескаркасные арочные покрытия, совмещающие в себе несущие и ограждающие функции.

Благодаря своей экономичности, обусловленной в первую очередь простотой и технологичностью изготовления, малой общей массой и возможностью перекрывать без промежуточных опор пролеты до 30÷40 метров, такие покрытия в настоящее время находят все большее применение при строительстве и реконструкции объектов самого различного функционального назначения.

Богатая номенклатура СТХП, которые для бескаркасных арочных покрытий изготавливают из рулонной оцинкованной стали толщиной 0,6÷2,0 мм методом холодного профилирования, позволяет создавать экономичные конструктивные решения покрытий разнообразной архитектурной формы и цветовой гаммы. Однако широкое использование таких покрытий сдерживается рядом причин, в том числе отсутствием эффективных методов их расчета.

Сказанное в особенности справедливо в отношении пологих бескаркасных арочных покрытий с отношением высоты арочного свода к его пролету  $f/l \leq 1/8$ . Действительная работа таких конструкций остается наименее изученной, а оценка предельных состояний несущей способности и эксплуатационной пригодности представляет достаточно большие трудности, поскольку требует обязательного учета особенностей их работы под нагрузкой, таких как геометрическая нелинейность, возможная ранняя потеря местной устойчивости, неравномерное распределение напряжений по сечению профиля, наличие значительных распорных реакций, а также влияния податливости опорных узлов и начальных несовершенств.

В свете вышесказанного экспериментально-теоретические исследования действительной работы пологих бескаркасных арочных покрытий из СТХП и разработка относительно простых и в то же время достаточно точных методов их расчета являются актуальной задачей.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

В основу диссертации положены материалы научных исследований, выполненных автором на кафедре «Строительные конструкции» учреждения образования «Брестский государственный технический университет» (БрГТУ) в рамках:

– государственной бюджетной научно-исследовательской работы «Экспериментальные исследования элементов бескаркасных арочных покрытий из стальных тонкостенных гнутых профилей» (ГБ 15/202), утвержденной решением научно-технического Совета БрГТУ от 16.09.2014 г., протокол № 6, № государственной регистрации 20151018, 2015 г.;

– научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы «Разработка деформационного метода расчета и проектирования эффективных конструкций покрытий производственных и жилых зданий низкой материалоемкости на базе стальных тонкостенных холодногнутых профилей» (Д-16/143) при финансовой поддержке инновационного фонда Брестского областного исполнительного комитета, договор № 15 от 16.12.2016 г., № госрегистрации 20171621, 2016 – 2017 гг.

### **Цель и задачи исследования**

*Цель исследования:* разработать научно обоснованный метод, алгоритм и прикладную компьютерную программу для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС), а также проверки предельных состояний несущей способности и эксплуатационной пригодности пологих однослойных бескаркасных арочных покрытий из ребристых СТХП произвольного поперечного сечения.

*Задачи исследования:*

1. Выполнить анализ существующей номенклатуры СТХП и видов возводимых из них бескаркасных арочных покрытий; выявить и обобщить факторы, определяющие несущую способность покрытий и особенности их работы под нагрузкой; изучить существующие способы решения задачи расчета несущей способности рассматриваемых покрытий и определить наиболее приемлемую расчетную модель и метод ее реализации.

2. Разработать *деформационный метод расчета* пологих однослойных бескаркасных арочных покрытий из ребристых СТХП на базе двух расчетных моделей: *плоской стержневой модели эффектов воздействий (модели для определения внутренних усилий и деформаций от внешних воздействий)* и *модели сопротивления* продольно-поперечного изгибу сечений ребристых СТХП.

3. Разработать алгоритм деформационного расчета пологих однослойных бескаркасных арочных покрытий из ребристых СТХП и реализовать его в прикладной компьютерной программе.

4. Провести экспериментальные исследования фрагментов ребристых СТХП, а также натуральных фрагментов пологих однослойных бескаркасных арочных покрытий и получить объективные данные, необходимые для проверки достоверности разработанного метода расчета.

5. На основе результатов, полученных в экспериментально-теоретических исследованиях, произвести оценку достоверности предложенного *деформационного метода расчета* и положенных в его основу двух расчетных моделей.

*Объект исследования:* пологие однослойные бескаркасные арочные покрытия, выполняемые из ребристых СТХП.

*Предмет исследования:* методы оценки НДС и предельных состояний пологих однослойных бескаркасных арочных покрытий, выполненных из ребристых СТХП.

## Научная новизна

1. Впервые предложен *деформационный аналитико-численный метод и алгоритм* оценки НДС и проверки предельных состояний несущей способности пологих однослойных бескаркасных арочных покрытий из ребристых СТХП, которые позволяют учитывать взаимное влияние внутренних усилий, определяемых по *плоской стержневой модели эффектов воздействий*, и геометрических характеристик эффективного сечения, определяемых по *модели сопротивления* продольно-поперечному изгибу ребристых СТХП.

2. В базовых уравнениях расчетной *модели эффектов воздействий* впервые предложено учитывать *дополнительный опорный момент*, возникающий от несоосного крепления затяжки, и реализована численная дискретизация интегральных квадратур с непрерывной функцией нагрузки, что позволяет определять перемещения и, связанные с ними, внутренние усилия в пологих гибких арочных системах от произвольных вертикальных воздействий.

3. В *модели сопротивления* ребристых СТХП предложено новое выражение для определения *коэффициента*, учитывающего совместное влияние продольных элементов жесткости в полке и стенке, что позволяет определять эффективные характеристики поперечных сечений от действия фактических напряжений и обеспечивает адекватную оценку НДС ребристых СТХП от совместного действия изгибающего момента и продольной силы.

4. При оценке НДС и проверке предельных состояний ребристых СТХП снижение жесткости участков с поперечными гофрами предложено учитывать путем *редуцирования толщины* граней, что позволяет создать *единую расчетную модель сопротивления* ребристых СТХП произвольного поперечного сечения.

5. Значения продольной и изгибной жесткости, принимаемые в *модели эффектов воздействий* для профилей с поперечными гофрами, предложено вычислять на основе *редуцированного модуля упругости*, конкретное значение которого получают с использованием эмпирического понижающего коэффициента, что позволяет отражать в принятой расчетной модели действительную работу арочного покрытия из СТХП с поперечными гофрами.

## Положения, выносимые на защиту

1. Разработанный *деформационный метод расчета* пологих однослойных бескаркасных арочных покрытий из ребристых СТХП, базирующийся, в отличие от известных методов, на двух расчетных моделях – *плоской стержневой модели эффектов воздействий* и *модели сопротивления* продольно-поперечному изгибу сечений ребристых СТХП, который позволяет осуществлять оценку НДС и проверку предельных состояний конструкций рассматриваемого вида с учетом влияния геометрической нелинейности, начальных геометрических несовершенств, всех потенциально возможных форм потери устойчивости и пониженной, в случае профилей с поперечными гофрами, продольной и изгибной жесткости.

2. *Модель сопротивления* продольно-поперечному изгибу сечений ребристых СТХП, которая, в отличие от известных моделей, определяет эффективные значения характеристик поперечного сечения на основе результирующего распределения напряжений от одновременного действия продольной силы и изгибающего момента и позволяет выполнять проверку предельных состояний несущей способности ребристых СТХП произвольного поперечного сечения, в том числе при наличии поперечных гофров на гранях профиля.

3. Алгоритм деформационного расчета, реализованный в прикладной компьютерной программе, позволяющий выполнять оценку НДС и проверку предельных состояний пологих однослойных бескаркасных арочных покрытий из ребристых СТХП, а также проводить их численные параметрические исследования с минимальными трудовыми и временными затратами.

4. Результаты экспериментальных исследований фрагментов ребристых СТХП трапециевидного сечения на сопротивление сжатию, изгибу и продольно-поперечному изгибу и натуральных фрагментов пологих однослойных бескаркасных арочных покрытий из трапециевидных СТХП с поперечными гофрами при различных вариантах нагружения и крепления к опорам, включая значение коэффициента, учитывающего пониженное значение жесткости профилей с поперечными гофрами, а также полученные опытным путем значения механических характеристик (предела текучести, предела прочности и относительного удлинения) основного металла ребристых СТХП, производимых в Республике Беларусь.

#### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Положения, выносимые на защиту, а также результаты экспериментальных и теоретических исследований получены автором самостоятельно. Научный руководитель *В. П. Уласевич* принимал участие в обсуждении и оценке полученных результатов. В совместной публикации с *И. В. Зинкевичем* вклад соискателя составил 70%.

#### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные результаты исследований доложены и обсуждены:

- на Международной научно-практической конференции «*Новые материалы, технологии и оборудование в промышленности*», г. Могилев, 17–18 ноября 2011 г.;
- на Международном научно-методическом семинаре «*European and National Context in Research*» (на английском языке), г. Новополоцк, 24–25 апреля 2013 г.;
- на XIX Международном научно-методическом семинаре «*Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров*», г. Брест, 23–25 октября 2014 г.;
- на XVIII Международной межвузовской научно-практической конференции «*Строительство – формирование среды жизнедеятельности*», г. Москва, 22–24 апреля 2015 г.;
- на I Международной научной конференции «*Current Research Problems of Materials, Technologies and Organization of Civil Engineering in Cross-Border Approach*» (на английском языке), г. Белосток, 22–23 июня 2016 г.;

– на I Международной научно-технической конференции «*Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования (САПР)*», г. Брест, 30–31 марта 2017 г.;

– на II Международной научной конференции «*Актуальные проблемы исследования материалов, конструкций, технологий и организации строительства в трансграничном аспекте*», г. Брест, 18–20 октября 2017 г.;

– на II Международной научно-технической конференции «*Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования (САПР)*», г. Брест, 29–30 марта 2018 г.

Результаты диссертационного исследования внедрены в практику проектирования в НИЧ БрГТУ, филиал «Брестреставрацияпроект» ОАО «Белреставрация», ООО «Приорпроект» и ООО «Профкомплектация», а также в учебный процесс в БрГТУ. Получено положительное решение о выдаче патента на полезную модель.

### **Опубликование результатов диссертации**

По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, из них: 8 статей (4,2 авторских листа) в рецензируемых научных журналах (из них 1 – в иностранном научном издании на английском языке), отвечающих требованиям пункта 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь; 7 статей (1,8 авторских листа) в сборниках материалов конференций и семинаров (из них 1 – в иностранном научном издании).

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация содержит разделы: «Перечень условных обозначений», «Введение», «Общая характеристика работы», 4 главы основной части, «Заключение», «Библиографический список» и 4 приложения. Объем диссертации составляет 240 страниц, включая 14 таблиц (5 страниц), 84 рисунка (22 страницы), библиографический список из 194-х использованных источников (97 на русском и 97 на английском языках) и 15-ти публикаций автора (18 страниц), а также 4 приложения (69 страниц).

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Первая глава** содержит общие сведения о бескаркасных арочных покрытиях, а также аналитический обзор научно-технической литературы по теме исследования.

Рассмотрена предыстория появления бескаркасных арочных покрытий из СТХП, их основные конструктивные характеристики и область применения. Предложена общая классификация видов СТХП и сооружаемых из них бескаркасных арочных покрытий и, на их основе, принят объект исследования.

Обобщены все основные факторы, учет которых в расчетных моделях является обязательным условием для получения достоверных результатов при оценке НДС бескаркасных арочных покрытий. Показано, что предлагаемые рядом исследовате-

лей (Дж. Абдэль-Саед, Дж. Х. Смит, Х. А. Манг, М. Н. Эль-Атрози, М. Дж. Дэвис, Д. В. Марцинкевич, Г. Ю. Популова, М. А. Липленко) методики и подходы, во-первых, предназначены преимущественно для расчета покрытий с высокой стрелой подъема и, во-вторых, являются весьма трудоемкими, не отличаясь при этом высокой точностью. Показано также, что существующие в действующих нормативных документах методики если и могут быть применены, то исключительно для расчета бескаркасных арочных покрытий из ребристых СТХП без поперечных гофров.

Рассмотрены основные расчетные модели, которые могут быть приняты при проверке предельных состояний несущей способности пологих бескаркасных арочных покрытий, и обоснован выбор *плоской стержневой модели* как основы для разработки метода расчета рассматриваемых конструкций.

Выполнен краткий анализ научных работ по теории расчета арок. Показано, что существующие точные решения задачи (С. П. Тимошенко, Н. Н. Поликарпов, М. А. Козловская, Е. А. Лопаницын и другие) расчета пологих арок имеют тот недостаток, что справедливы лишь в отношении определенного типа арок и для конкретного вида нагрузки, а применение приближенных численных решений (А. А. Пиковский, В. А. Киселев, О. О. Денисов, Э. И. Григолюк, Х. Л. Шреер и другие) имеет определенные ограничения, поскольку оценка НДС и устойчивости в этих решениях выполняется раздельно. Определено, что предложенная В. П. Улашевичем теория деформационного расчета пологих распорных систем с точки зрения универсальности и точности является наиболее приемлемой для использования в качестве основы при разработке *модели эффектов воздействий* для пологих гибких арок, выполняемых из СТХП.

**Вторая глава** содержит описание разработанного *деформационного метода расчета*, предназначенного для оценки НДС, а также проверки предельных состояний несущей способности и эксплуатационной пригодности пологих однослойных бескаркасных арочных покрытий, выполненных из ребристых СТХП, плоские участки поперечного сечения которых могут содержать как продольные промежуточные элементы жесткости, так и поперечные гофры.

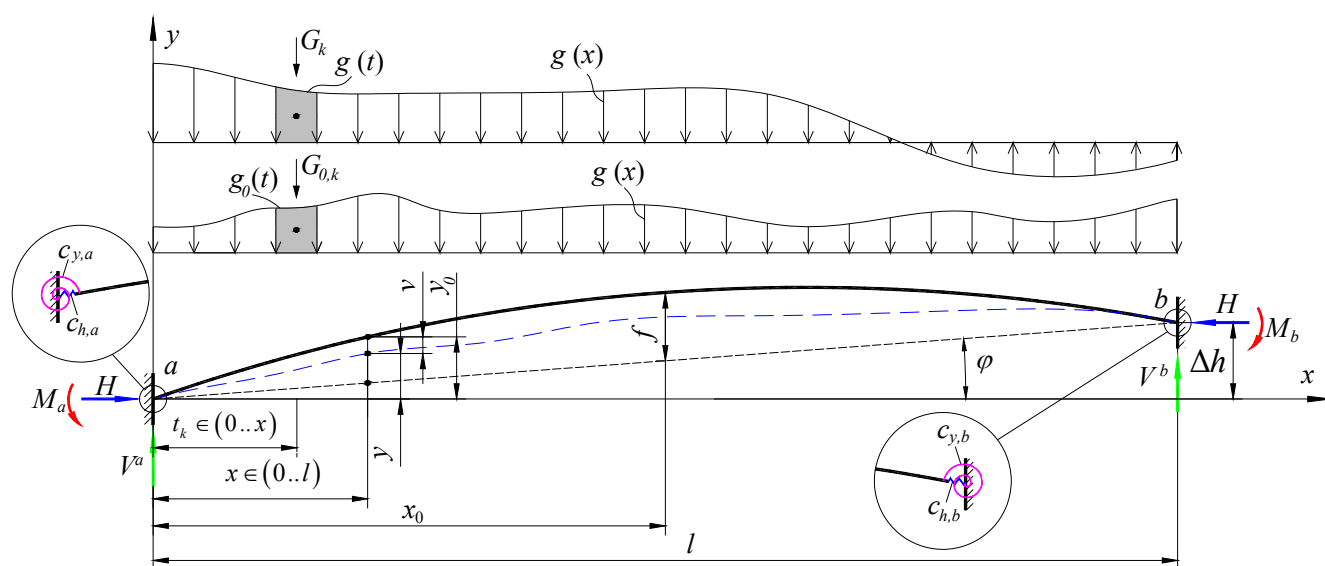
Суть метода заключается в использовании функционально увязанных между собой в единое целое двух расчетных моделей: *плоской стержневой модели эффектов воздействий*, позволяющей вычислять деформации и внутренние усилия от произвольных вертикальных воздействий, и *модели сопротивления* продольно-поперечному изгибу, которая дает возможность оценивать предельные состояния несущей способности ребристых СТХП с учетом геометрических характеристик эффективных поперечных сечений.

*Модель эффектов воздействий* основана на указанной выше теории деформационного расчета пологих однопоясных распорных систем, в соответствии с которой из *всех* возможных равновесных деформированных состояний, количество которых зависит от числа расчетных комбинаций внешних воздействий, одно необходимо



принять за *исходное*, отличающееся тем, что оно должно быть *известным*, т. е. заданным достаточным числом известных параметров таким образом, что все *искомые* параметры могли бы быть вычислены, исходя только из уравнений равновесия. Все остальные возможные деформированные состояния принимаются за *рассчитываемые*, для которых, при определении искоемых параметров, уравнения равновесия должны рассматриваться совместно с уравнениями деформаций.

В принятой расчетной модели условно выделенный расчетный участок арочного свода единичной ширины рассматривается как пологий криволинейный гибкий стержень ( $f/l \leq 1/8$ ) рационального очертания ( $M_0=0$ ), закрепленный на упругих опорах и находящийся в *исходном* деформированном состоянии под воздействием сплошной нагрузки заданной интенсивности  $g_0(x)$  (рисунок 1).



**Рисунок 1. – Деформационная расчетная модель пологой распорной системы**

Функция формы очертания оси пологого распорного гибкого стержня в *исходном состоянии* получена путем замены, в аналитическом решении, интегральных квадратур с нагрузкой  $g_0(x)$  на эквивалентную им систему сосредоточенных сил  $\Sigma G_{0,k}$  по теореме о среднем, и при  $M_0=0$  имеет следующий вид:

$$y_0 = \frac{1}{H_0} \left[ \left( \sum_{k=1}^n G_{0,k} (l - t_k) \right) \frac{x}{l} - \sum_{k=1}^{m_x} G_{0,k} (x - t_k) \right] + x \cdot tg\varphi; \quad (1)$$

где  $H_0$  – распор в исходном состоянии;

$n$  – общее количество сосредоточенных сил;  $t_k$  – привязка силы  $G_{0,k}$ ;

$l$  – расстояние между опорами по горизонтали;

$m_x$  – количество сосредоточенных сил на промежутке от 0 до  $x$ ;

$\varphi = \arctg(\Delta h/l) \leq 20^\circ$ ;  $\Delta h$  – превышение правой опоры над левой.

Для описания упругой линии оси арки в *рассчитываемом состоянии* принято интегро-дифференциальное уравнение В. П. Уласевича в виде:

$$\frac{d^4 v}{dx^4} - \frac{H}{EI} \cdot \frac{d^2 v}{dx^2} = \frac{H - H_0}{EI} \cdot \frac{d^2 y_0}{dx^2} - \frac{g(x)}{EI}, \quad (2)$$

где  $g(x)$  – функция дополнительной нагрузки в рассчитываемом состоянии;

$H$  – распор в рассчитываемом состоянии (растяжение принято со знаком «+»);

$EI$  – изгибная жесткость стержня в рассчитываемом состоянии.

После замены в полученном *В. П. Уласевичем* аналитическом решении уравнения (2) интегральных квадратур с функцией нагрузки произвольной интенсивности в параметрическом виде  $g(x)$  на эквивалентную ей систему сосредоточенных сил  $\Sigma G_k$ , а также учитывая возможный опорный момент  $M_c$  при шарнирном закреплении, функция прогибов  $v$  и функция изгибающих моментов  $M$  в произвольном сечении примут, соответственно, следующий вид:

$$v = \frac{1}{H} \left[ R_t \cdot x - \sum_{k=1}^{m_x} P_k (x - t_k) + M_a + M_c - (M_a - M_b) \frac{x}{l} - M \right] - (y_0 - x \cdot \operatorname{tg} \varphi); \quad (3)$$

$$M = \frac{r}{a} \sin(a \cdot x) - \frac{1}{a} \sum_{k=1}^{m_x} (P_k - \beta \cdot G_{0,k}) \cdot \sin[a \cdot (x - t_k)] + \frac{M_a + M_c}{\sin(a \cdot l)} \sin[a \cdot (l - x)] + \frac{M_b + M_c}{\sin(a \cdot l)} \sin(a \cdot x); \quad (4)$$

где  $R_t = \frac{1}{l} \left( \sum_{k=1}^n P_k (l - t_k) \right)$ ;  $P_k = G_{0,k} + G_k$ ;  $M_c = H \cdot c_e$ ;

$c_e$  – эксцентриситет крепления затяжки при шарнирном закреплении;

$M_a, M_b$  – опорные моменты на левой и правой опоре, соответственно;

$$r = \frac{1}{\sin(a \cdot l)} \sum_{k=1}^n (P_k - \beta \cdot G_{0,k}) \cdot \sin[a(l - t_k)]; \quad a = \sqrt{|H|/EI}; \quad \beta = H/H_0.$$

Функция прогибов арочной системы (3) совместно с условиями продольных и угловых деформаций позволяет сформировать систему основных нелинейных разрешающих уравнений относительно трех неизвестных величин – распора  $H$ , опорных моментов  $M_a$  и  $M_b$ , которая, после некоторых преобразований, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{H \cdot l}{EA \cdot \cos^2(\varphi)} + \left( \frac{H}{EA} - \frac{\cos^3(\varphi)}{2} \right) \frac{D(H)}{H^2} + \frac{1}{\cos(\varphi)} \left[ (H - H_0)(c_{h,a} - c_{h,b}) + \left( \alpha \Delta t - \frac{P_n \cdot l}{EA} \right) \right] + J_0 = 0; \\ M_a(H) = \frac{A_b(H) \cdot B_b(H) - A_a(H) B_a(H) + c_{y,a} B_a(H) v_b}{A_b^2(H) - A_a(H)^2 + c_{y,a} A_a(H) v_a + c_{y,b} A_a(H) v_b - c_{y,a} c_{y,b} v_a v_b}; \\ M_b(H) = \frac{A_b(H) \cdot B_a(H) - A_a(H) B_b(H) + c_{y,a} B_b(H) v_a}{A_b^2(H) - A_a(H)^2 + c_{y,a} A_a(H) v_a + c_{y,b} A_a(H) v_b - c_{y,a} c_{y,b} v_a v_b}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $D(H) = \int_0^l \left( R_t - \sum_{k=1}^{m_x} P_k - \frac{1}{l} (M_a - M_b) - \frac{dM}{dx} \right)^2 dx$ ;

$$A_a(H) = \frac{\operatorname{tg}(a \cdot l) - a \cdot l}{H \cdot l \cdot \operatorname{tg}(a \cdot l)}; \quad A_b(H) = \frac{\sin(a \cdot l) - a \cdot l}{H \cdot l \cdot \sin(a \cdot l)}; \quad B_a(H) = \frac{dv}{dx} \Big|_{x=0; M_a=0; M_b=0}; \quad B_b(H) = \frac{dv}{dx} \Big|_{x=l; M_a=0; M_b=0};$$

$$v_a(H) = 1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)_{x=0}^2 ; \quad v_b(H) = 1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)_{x=l}^2 ; \quad y = y_0 + v ;$$

$$J_0 = \frac{1}{H_0^2} \left( \frac{\cos^3 \varphi}{2} - \frac{H_0}{EA_0} \right) \int_0^l \left( \frac{1}{l} \sum_{k=1}^n G_{0,k} (l - t_k) - \sum_{k=1}^{m_x} G_{0,k} \right)^2 dx - \frac{H_0 \cdot l}{EA_0 \cos^2 \varphi} ;$$

$EA_0, EA$  – продольная жесткость арки в исходном и рассчитываемом состояниях;

$c_{y,a}, c_{y,b}$  и  $c_{h,a}, c_{h,b}$  – коэффициенты угловой и горизонтальной податливости узлов сопряжения с опорными конструкциями левого и правого конца арки соответственно;

$\alpha$  – коэффициент линейного температурного расширения материала арки;

$\Delta t$  – температурный перепад по отношению к исходному состоянию;

$P_n$  – усилие предварительного натяжения.

В случае, если арка окажется в растянуто-изогнутом состоянии, в выражении (4) тригонометрические функции следует заменить на соответствующие им гиперболические.

Блок-схема разработанного алгоритма *модели эффектов воздействий* применительно к выделенному классу задач представлена на рисунке 2.

**Модель сопротивления** продольно-поперечному изгибу сечений ребристых СТХП базируется на положениях *EN 1993-1-3*, согласно которым определение напряжений и оценка предельных состояний осуществляется с использованием геометрических характеристик эффективного поперечного сечения (площади  $A_{eff}$ , момента инерции  $I_{eff}$  и положения центра тяжести  $e_c$ ), значения которых определяются после расчета на устойчивость каждой грани профиля в отдельности.

В случае плоских граней, т. е. граней без продольных промежуточных элементов жесткости и/или поперечных гофров, неоднородное, вследствие местной потери устойчивости, распределение напряжений по поперечному сечению каждой грани заменяется на однородное, а «полная» ширина  $b$  каждой грани – на редуцированную, именуемую *эффективной (рабочей) шириной*  $b_{eff}$  (рисунок 3, б).

Для граней с промежуточными элементами жесткости неравномерность распределения напряжений возникает также вследствие потери устойчивости самих элементов жесткости. В результате, часть сечения, состоящая из промежуточного элемента жесткости и примыкающих к нему эффективных плоских частей, воспринимает меньшие сжимающие напряжения, чем остальные элементы сечения, что учитывается путем *редуцирования* расчетной толщины  $t_{red}$  указанной части сечения (рисунок 3, б).

Эффективную ширину и редуцированную толщину предлагается определять по кривым потери устойчивости согласно *EN 1993-1-3* и *EN 1993-1-5*, при этом, в отличие от стандартного подхода, используемого при расчете колонн и балок, эффективные характеристики арочного профиля автором предложено вычислять не от действия максимальных напряжений в упругой стадии, определяемых при изгибе и сжатии в отдельности, а от действия фактических напряжений, возникающих в сечении в результате совместного действия изгибающего момента и продольной силы.

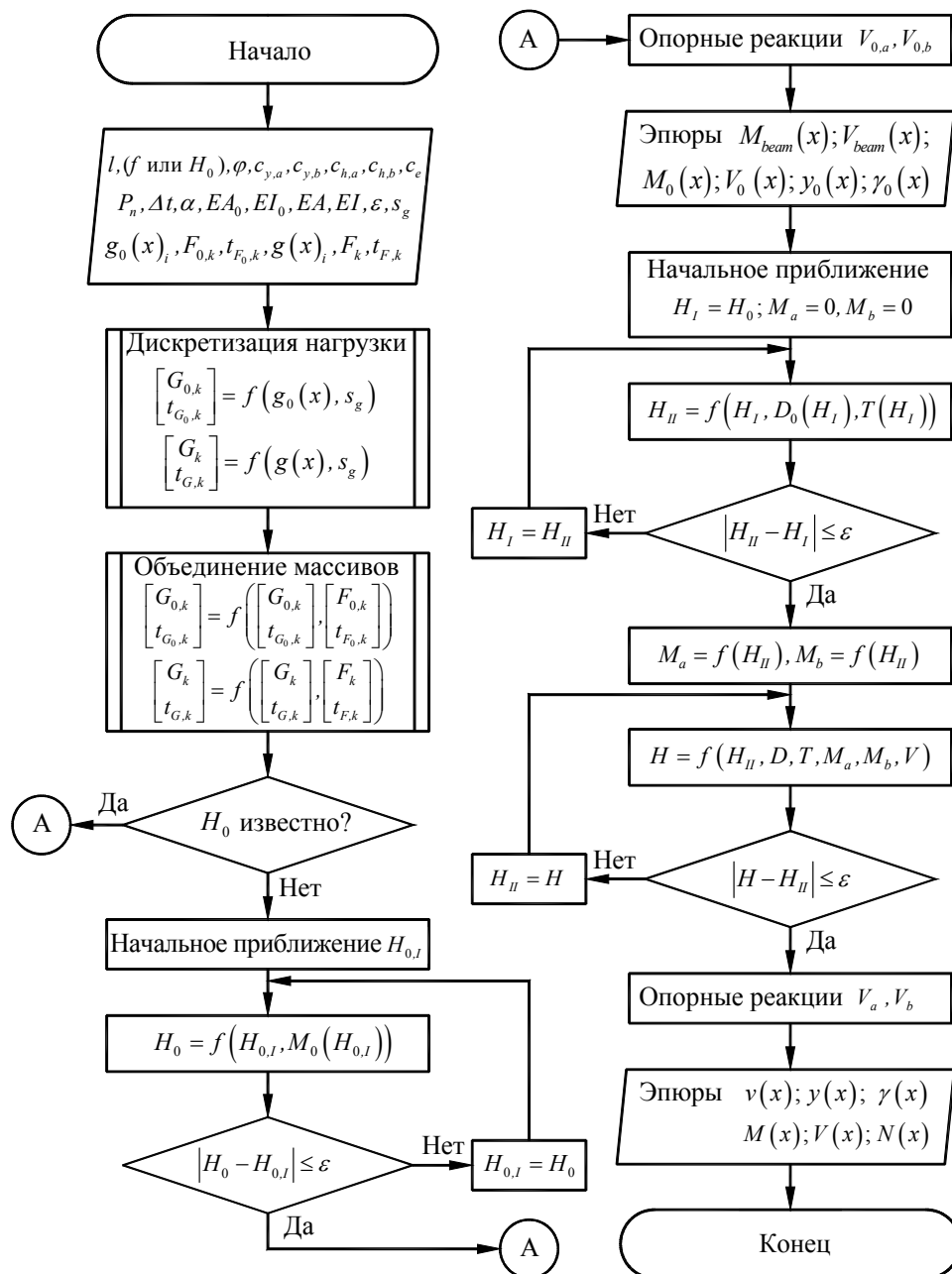
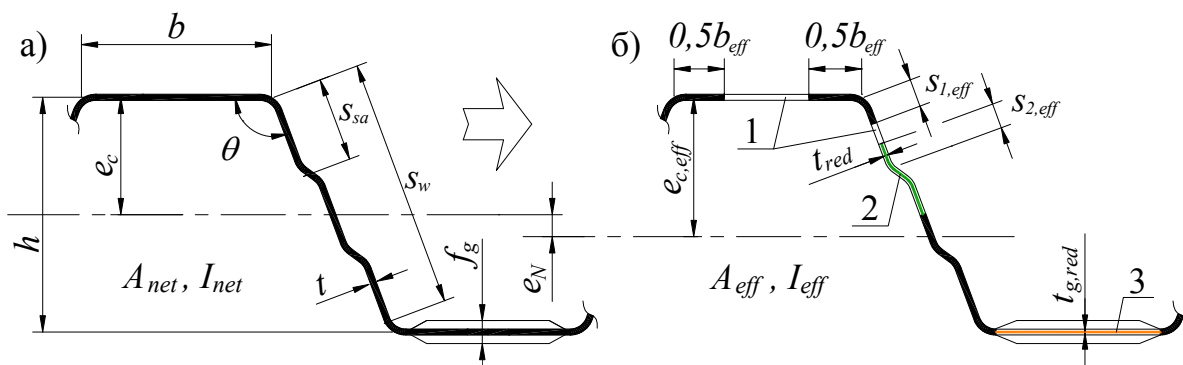


Рисунок 2. – Укрупненная блок-схема алгоритма деформационной модели эффектов воздействий пологих арочных систем



1 – «неэффективные» участки плоских граней; 2 – редуцированная толщина элементов жесткости; 3 – редуцированная толщина участков с поперечными гофрами  
а) «полное» поперечное сечение; б) «эффективное» поперечное сечение

Рисунок 3. – К определению эффективных характеристик поперечного сечения

На основе изложенного выше подхода автором разработан *алгоритм* определения эффективных характеристик поперечного сечения (рисунок 4), а также предложено выражение для определения *коэффициента*  $\beta_s$ , позволяющего учесть взаимное влияние элементов жесткости на полке и стенке, в том числе при неравномерно сжатой стенке с отношением напряжений  $\psi$ :

$$\beta_s = \left( \frac{s_{sa} \cdot (\psi - 1)}{s_w} + 1 \right) \frac{A_s}{A_{sa}} \quad \text{при } 1 \geq \psi \geq \frac{s_{sa} - s_w}{s_{sa}}, \quad (6)$$

где  $s_{sa}$  – расстояние от более сжатого ребра до центра тяжести ближайшего элемента жесткости в стенке (рисунок 3, а);

$s_w$  – полная ширина грани (наклонная высота стенки);

$A_s, A_{sa}$  – эффективные площади элементов жесткости на полке и на стенке.

Для *граней с поперечными гофрами* определение эффективных характеристик поперечного сечения осуществляется вне зависимости от знака и величины действующих напряжений по адаптированной автором методике *Д. В. Марцинкевича*. Снижение жесткости участков с поперечными гофрами предлагается учитывать путем редуцирования их толщины (рисунок 3, б):

$$t_{g,red} = t \cdot k_x, \quad (7)$$

где  $k_x$  – коэффициент снижения жесткости участка грани в зависимости от толщины профиля, а также глубины и формы поперечных гофров.

**Совместная работа двух моделей**, которая позволяет определить значения геометрических характеристик эффективного поперечного сечения от действия фактических напряжений, осуществляется посредством итераций (рисунок 5). Запуск итерационного расчета начинают, задавая в *модели эффектов воздействий* значения жесткостных параметров  $EI$  и  $EA$ , полученные с использованием геометрических характеристик *полного* поперечного сечения, а затем расчет продолжают вплоть до достижения требуемой точности, принимая всякий раз значения продольной и изгибной жесткости, вычисляемые на основе геометрических характеристик *эффективного* поперечного сечения, полученных на предыдущей итерации.

Значения продольной и изгибной жесткости, принимаемые в *модели эффектов воздействий* в рассчитываемом состоянии должны вычисляться для сечения с наиболее неблагоприятным соотношением внутренних сил по выражениям:

$$EA = E \cdot A_{eff}; \quad EI = E \cdot I_{eff}. \quad (8)$$

Для профилей с поперечными гофрами в выражениях (8) вместо модуля упругости основного материала  $E$  автором предлагается использовать его редуцированное значение:

$$E_{red} = k_{sg} \cdot E, \quad (9)$$

где  $k_{sg}$  – понижающий коэффициент для профилей с поперечными гофрами ( $k_{sg} = 0,7$  – для профилей типа *MIC-240*).

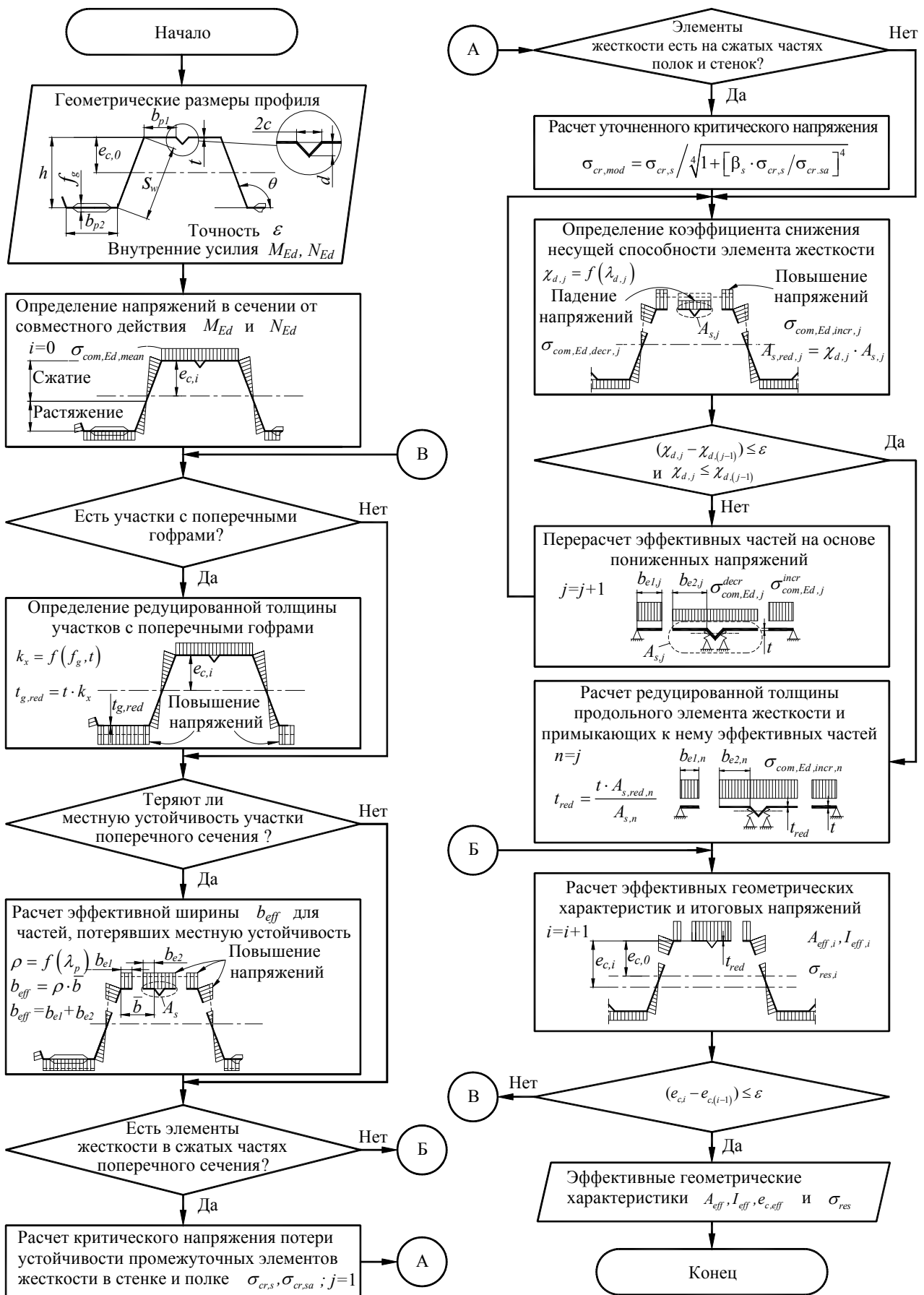


Рисунок 4. – Блок-схема алгоритма определения эффективных характеристик поперечного сечения профиля

Рассмотренные выше алгоритмы успешно реализованы с использованием среды *Borland C++* и модулей пакета *MathCAD* в разработанной автором компьютерной программе *StarsCAD*, рабочий интерфейс которой показан на рисунке 6. Программа позволяет выполнять статический и прочностной расчет пологих бескаркасных арочных покрытий на действие произвольной вертикальной нагрузки с учетом горизонтальной и угловой податливости опорных узлов, расположенных в одном или на разных уровнях, а также при наличии затяжки, установленной в том числе с эксцентриситетом, или без таковой. Нагрузка может быть задана пользователем либо непосредственно – прямым указанием значений сосредоточенных или распределенных нагрузок, либо опосредованно – необходимым количеством параметров окружающей среды и сооружения для программного определения атмосферных нагрузок по действующим нормам. Продольная и изгибная жесткость может быть задана либо пользователем, либо определена путем итеративного расчета эффективных характеристик СТХП с учетом действительного распределения продольных напряжений по сечению от совместного действия осевой силы и изгибающего момента.

Время на ввод исходных данных стандартной задачи в интерактивном пользовательском графическом интерфейсе программы *StarsCAD* составляет 60÷120 секунд, скорость одной итерации по расчету внутренних усилий и оценке предельных состояний (*Intel Core i7, 2,4 ГГц*) – 7÷15 секунд. Для достижения точности  $10^{-4}$  достаточно в среднем 4÷6 итераций.

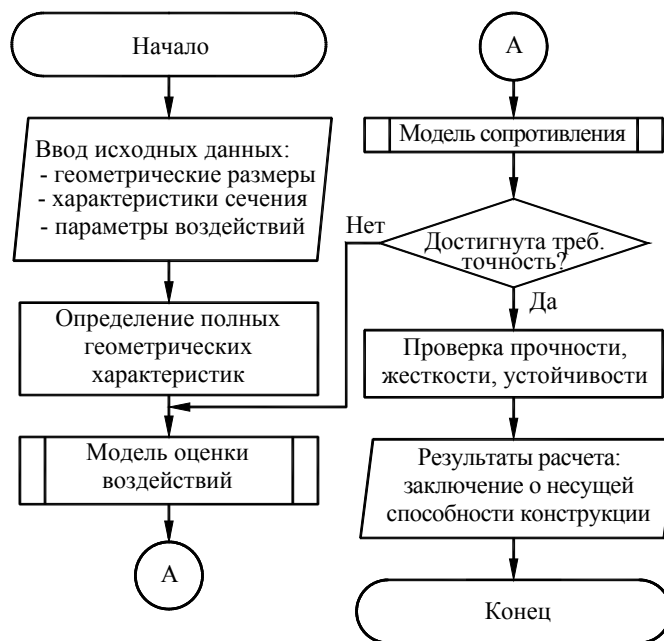


Рисунок 5. – Укрупненная блок-схема алгоритма программы *StarsCAD*

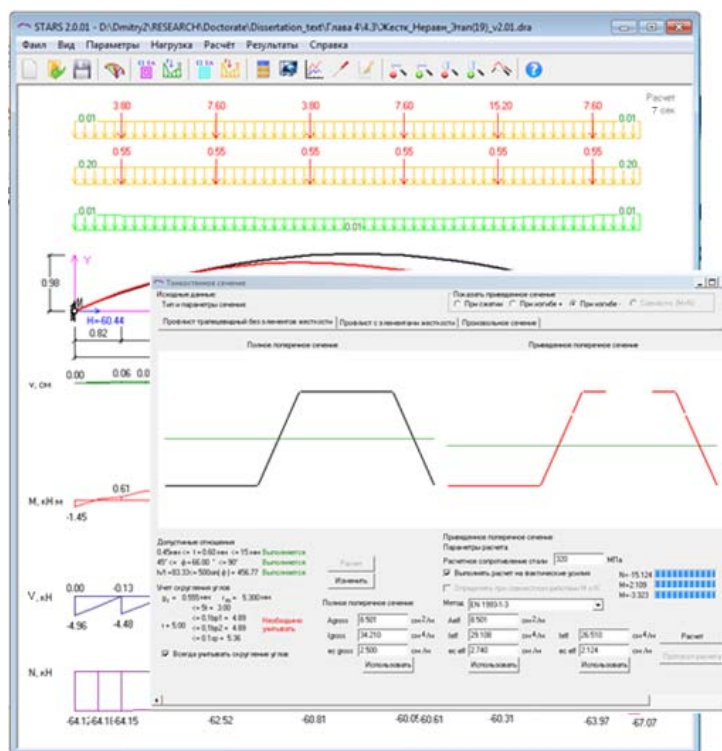
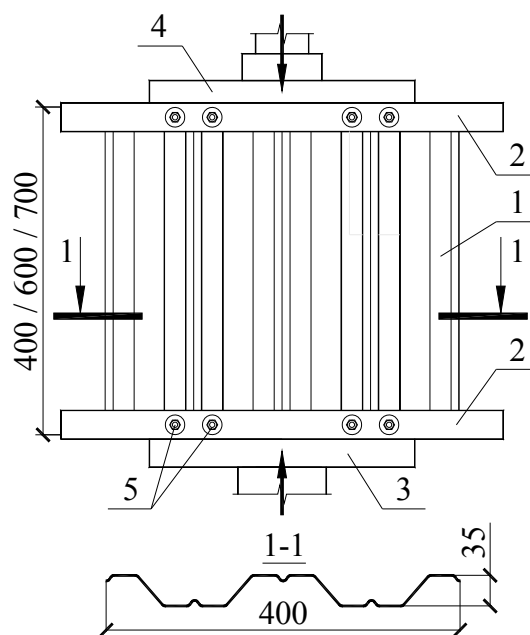


Рисунок 6. – Рабочий интерфейс программы *StarsCAD*

**Третья глава** содержит описание методик проведения и результаты экспериментальных исследований, выполненных автором с целью получения данных, необходимых для объективной оценки достоверности разработанного деформационного метода расчета, которые включали в себя: (а) испытания на сжатие и изгиб 12-ти фрагментов прямолинейных СТХП с гофрами трапециевидного сечения и промежуточными элементами жесткости на полках, (б) испытания на продольно-поперечный изгиб 11-ти фрагментов дугообразных СТХП трапециевидного сечения с поперечными гофрами на нижних полках и стенках и (в) испытания на действие равномерной и неравномерной нагрузок двух натуральных фрагментов пологого арочного покрытия с различными вариантами крепления к опорам, каждый из которых состоял из трех сплоченных между собой профилей трапециевидного поперечного сечения с поперечными гофрами. Для всех партий СТХП, использованных в испытаниях, были предварительно определены опытным путем толщина и механические свойства основного металла, а также толщина слоя защитного цинкового покрытия, которые, соответственно, находились в пределах  $t_{cor} = 0,495 \div 1,135$  мм;  $f_y = 288,36 \div 351,16$  МПа;  $f_u = 347,42 \div 459,16$  МПа;  $A_{80} = 18,79 \div 29,80$  %;  $t_{zink} = 17 \div 36$  мкм.

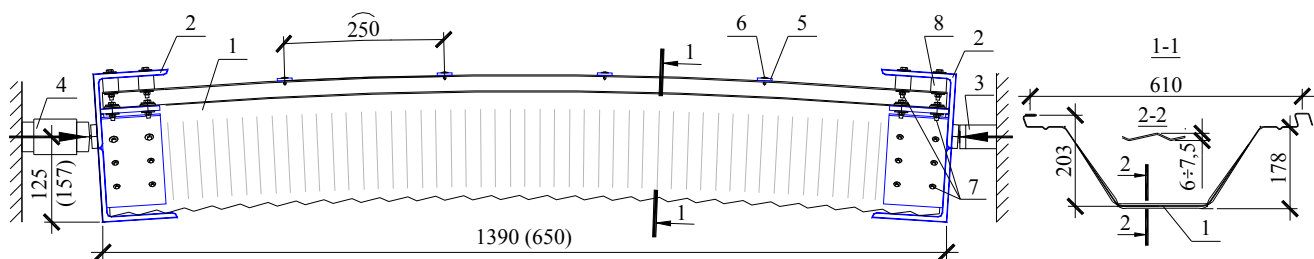
Экспериментальные исследования на сжатие, изгиб и продольно-поперечный изгиб фрагментов СТХП марки *НС-35* по *ГОСТ 24045* и *ПАР178.610 (МІС-240)* по *СТБ 2231* (рисунки 7 и 8) позволили получить значения разрушающих нагрузок для всех партий образцов с ошибкой значений в пределах каждой партии менее 3% и 1,5% соответственно, что дало возможность использовать полученные данные для проверки достоверности разработанной модели сопротивления.

Экспериментальные исследования натуральных фрагментов пологого арочного покрытия пролетом 9,8 м (рисунок 9) из трех профилей типа *МІС-240* ( $t_{cor} = 0,968$  мм,  $f_y = 351,16$  МПа), включавшие в себя пять неразрушающих и два разрушающих испытания, позволили получить значения прогибов и напряжений в характерных сечениях при различных условиях работы покрытия, а также значения предельных нагрузок. Суммарное предельное значение несимметричной нагрузки, распределенной по форме двух разновеликих треугольников по *EN 1991-1-3*, составило для образца с шарнирным опорным узлом  $6F = 38,4$  кН, что соответствует снеговой нагрузке с характеристическим значением  $s_k = 2,88$  кН/м<sup>2</sup>, а для образца с жестким опорным узлом – 45,6 кН ( $s_k = 3,77$  кН/м<sup>2</sup>).



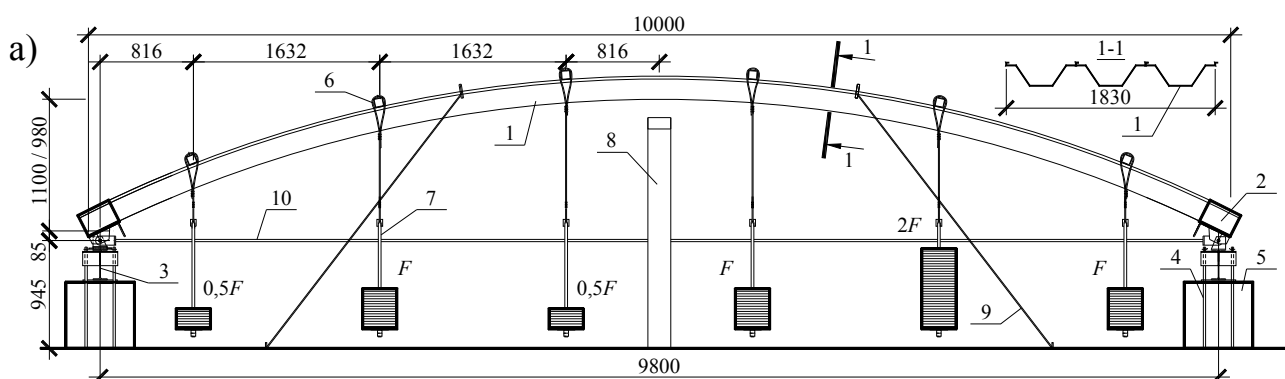
1 – образец; 2 – швеллер; 3,4 – нижняя и верхняя плита; 5 – болт  
**Рисунок 7. – Схема установки для испытаний на сжатие фрагмента СТХП без поперечных гофров**





1 – образец; 2 – опорный элемент; 3 – домкрат; 4 – динамометр;  
5 – поперечная связь; 6 – саморез; 7 – болт; 8 – вкладыш

**Рисунок 8. – Схема установки для испытаний фрагментов СТХП с поперечными гофрами на продольно-поперечный изгиб**



1 – фрагмент покрытия; 2 – деталь опорная; 3 – балка опорная; 4 – тяж; 5 – блок бетонный;  
6 – траверса; 7 – подвес с грузами; 8 – страховочная рама; 9 – оттяжка; 10 – затяжка  
а) схема установки для испытаний; б) общий вид установки для испытаний

**Рисунок 9. – Схема и общий вид установки для испытаний натуральных фрагментов пологого однослойного бескаркасного арочного покрытия**

Установлено, что работа пологих арочных покрытий из СТХП характеризуется выраженной геометрической нелинейностью, а горизонтальная и угловая податливость опорных узлов оказывает существенное влияние на несущую способность покрытия. Подтверждена пониженная изгибная жесткость, свойственная СТХП с поперечными гофрами, которая выражалась как в значительных локальных деформациях покрытия в местах приложения нагрузки, так и в его повышенной деформативности в целом. Разрушение образцов происходило в форме перелома нижних ребер СТХП в приопорной части вследствие достижения предела текучести стали.

В четвертой главе выполнена оценка достоверности как предлагаемого метода расчета в целом, так и входящих в него двух расчетных моделей в отдельности.

Достоверность расчетной модели эффектов воздействий проверялась путем сопоставления результатов расчета двух арок различного типа, выполненных автором на основе данной модели, с взятыми из научной литературы результатами расчетов этих же арок, произведенных другими методами. Сопоставление результатов расчета показало хорошую сходимость полученных значений для всех рассчитываемых параметров. При этом было также установлено, что расчет пологих арочных систем линейными методами может приводить к значительной (до 50%) недооценке величины изгибающих моментов и поперечных сил.

Достоверность расчетной модели сопротивления проверялась путем сопоставления значений разрушающей нагрузки, полученных по расчету и опытным путем для 43-х образцов СТХП различного вида. Все теоретические значения  $r_t$ , были получены автором путем расчетов с использованием данной модели, а экспериментальные  $r_e$ , – в ходе испытаний, выполненных как автором (12 образцов профилей типа НС-35 и 11 – типа МІС-240), так и другими исследователями (8 образцов профилей типа МІС-240 и 12 – типа МІС-120). Статистическая оценка полученных результатов показала их хорошую сходимость: величина коэффициента вариации вектора ошибок составила  $V_\delta = 0,18$  при величине уклона прямой вероятностной модели сопротивления  $r(X)$ , равной  $b = 0,924$  (рисунок 10).

Для проверки достоверности предлагаемого деформационного метода расчета в целом было выполнено сопоставление расчетных и экспериментальных значений вертикальных деформаций продольной оси арки (рисунки 11 и 12), а также предельных нагрузок (таблица 1), полученных соответственно в пяти неразрушающих и двух разрушающих испытаниях (№ 1 и № 7) натуральных фрагментов покрытий с различными вариантами вертикальной внешней нагрузки и устройства опорных узлов. Расчеты были выполнены с использованием программы StarsCAD и с учетом фактических значений коэффициентов податливости, размеров поперечного сечения профиля, а также величины начальных геометрических несовершенств формы оси арки. Анализ полученных данных позволил сделать вывод о достаточно хорошей точности предложенного метода при оценке НДС и проверке предельных состояний несущей способности и эксплуатационной пригодности пологих однослойных бескаркасных арочных покрытий из ребристых СТХП.

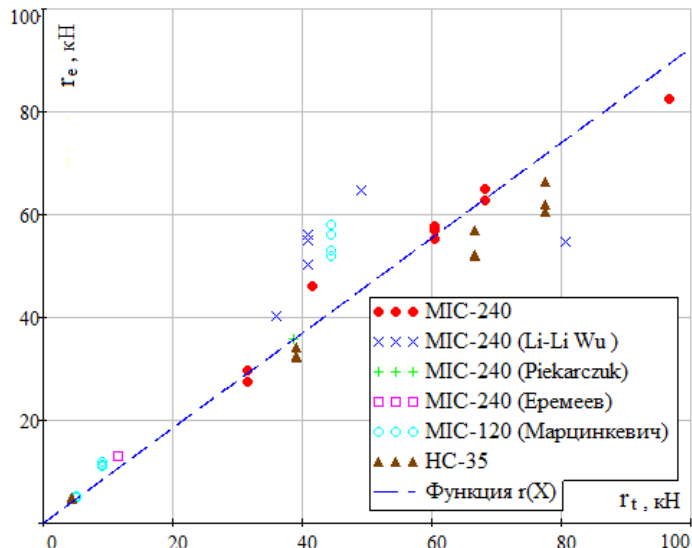
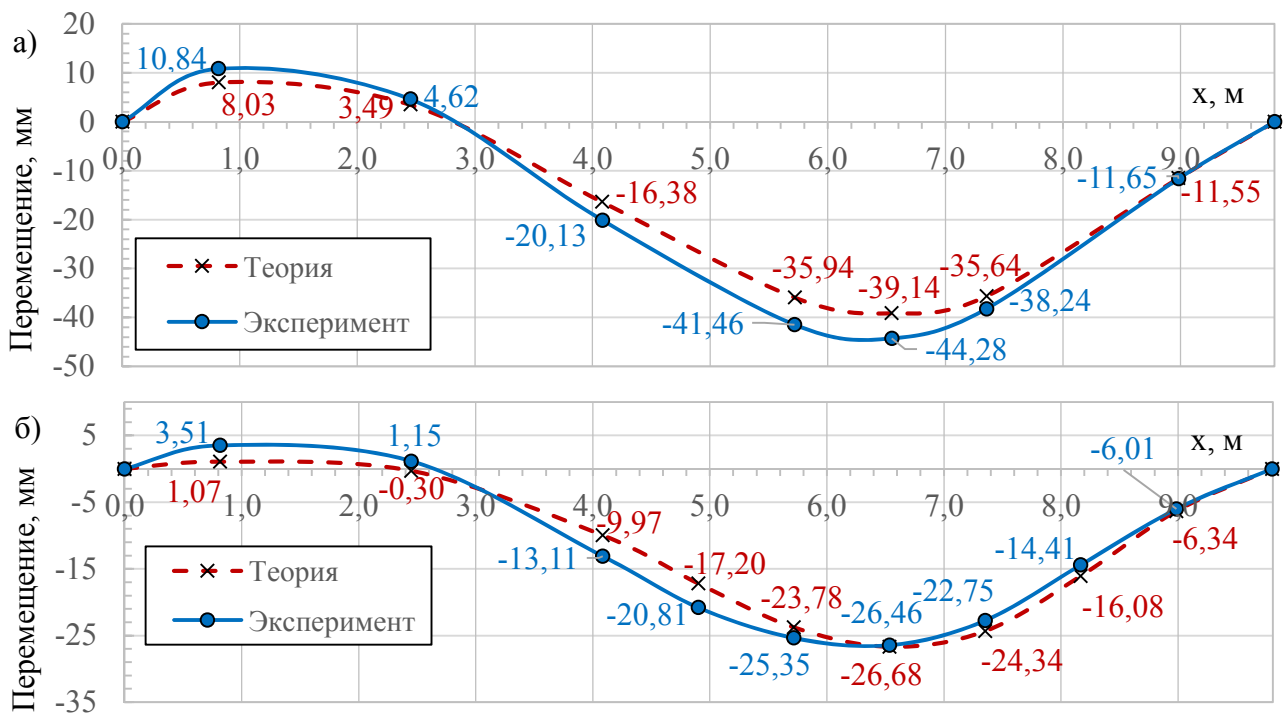
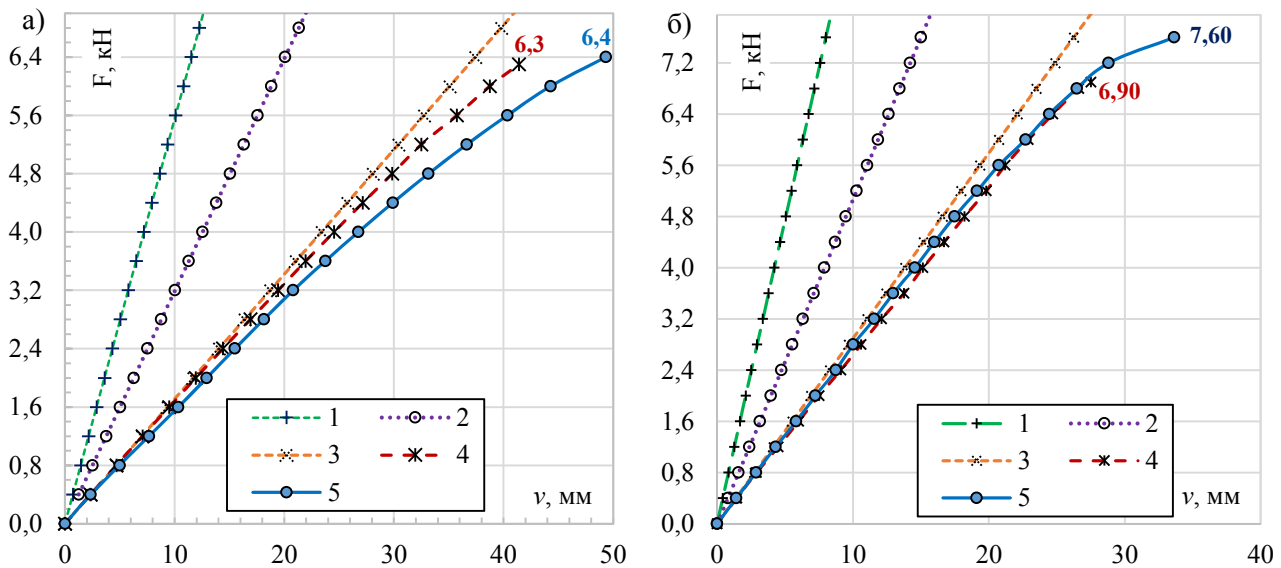


Рисунок 10. – Диаграмма  $r_e - r_t$



а) испытание № 1 (этап 15,  $F = 6,0$ ) ; б) испытание № 7 (этап 17,  $F = 6,8$ )

Рисунок 11. – Прогибы по длине пролета на заключительных этапах испытаний



1 – линейный расчет на основе полных геометрических характеристик; 2 – линейный расчет с геометрическими характеристиками по EN 1993-1-3; 3 – линейный расчет на основе предложенной модели сопротивления; 4 – предложенный деформационный метод; 5 – эксперимент; а) испытание № 1; б) испытание № 7

Рисунок 12. – Прогибы в сечении  $x = 6,53$  м по этапам нагружения

Таблица 1. – Сопоставление величины предельной нагрузки

№ испытания	Пролет, мм	Стрела, мм	Опоры	Предельная нагрузка $F$ , кН		
				Теория	Эксперимент	Расхождение
1	9800	1100	Шарнирные	6,3	6,4	1,5 %
7	9800	980	Жесткие	6,9	7,6	9,2 %

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Разработан *деформационный метод расчета* пологих однослойных бескаркасных арочных покрытий из ребристых СТХП, базирующийся на двух взаимосвязанных между собой и работающих как единое целое расчетных моделях: *плоской стержневой модели эффектов воздействий* и *модели сопротивления продольно-поперечному изгибу сечений ребристых СТХП*. Достоверность предложенного *деформационного метода расчета* подтверждена результатами серии экспериментальных исследований двух натуральных фрагментов пологого однослойного бескаркасного арочного покрытия пролетом 9,8 м, каждый из которых состоял из трех сплоченных между собой арочных СТХП типа *МІС-240*, при действии как симметричной, так и несимметричной нагрузки с различными вариантами крепления к опорам. Расхождение расчетных и экспериментальных значений в двух разрушающих испытаниях составили для *максимальных* прогибов 11,6% и 0,8%, а для *предельных* нагрузок – 1,5% и 9,2% соответственно [4, 7, 8].

2. Разработана *плоская стержневая модель эффектов воздействий*, позволяющая, с учетом геометрической нелинейности, вычислять перемещения и внутренние усилия, возникающие в пологих гибких арочных системах от произвольных вертикальных внешних воздействий с учетом податливости опор, в том числе при наличии затяжки, установленной с эксцентриситетом. Достоверность модели подтверждена хорошей сходимостью выполненных на ее основе результатов расчета ряда пологих арок с имеющимися в научной литературе результатами расчета этих же арок другими методами [1, 2, 4, 7].

3. Разработана *модель сопротивления* продольно-поперечному изгибу сечений ребристых СТХП с одиночными или множественными промежуточными элементами жесткости и/или поперечными гофрами на гранях, позволяющая вычислять эффективные геометрические характеристики поперечных сечений, а также выполнять оценку НДС и проверку предельных состояний несущей способности такого рода профилей. Достоверность модели подтверждена хорошей сходимостью расчетных данных с экспериментальными, полученными как самим автором, так и другими исследователями (в испытаниях на сжатие, изгиб и продольно-поперечный изгиб профилей типа *МІС-240*, *МІС-120* и *НС-35* с различной толщиной основного металла), при этом уклон прямой вероятностной модели сопротивления и величина коэффициента вариации вектора ошибок составили соответственно  $b = 0,924$  и  $V_{\delta} = 0,18$  [3, 4, 7, 8, 13, 15].

4. Впервые разработан и реализован в компьютерной программе *алгоритм деформационного расчета* пологих однослойных бескаркасных арочных покрытий из ребристых СТХП, позволяющий выполнять оценку НДС и проверку предельных состояний несущей способности и эксплуатационной пригодности рас-

смаатриваемых покрытий при действии произвольной вертикальной нагрузки с учетом горизонтальной и угловой податливости опорных узлов, расположенных на одном или же на разных уровнях, в том числе при наличии затяжки, установленной с эксцентриситетом, а также проводить численные исследования расчетных моделей такого рода покрытий с достаточной для инженерных расчетов точностью и минимальными временными и трудовыми затратами (максимальное время расчета рядовой задачи не превышает 90 секунд) [3, 4, 7, 14].

5. В результате комплекса экспериментальных исследований впервые определены *величины сопротивления* сжатию, изгибу и продольно-поперечному изгибу, а также *механические свойства* (предел текучести, предел прочности и относительное удлинение) основного металла ребристых СТХП, производимых в Республике Беларусь (ЗАО «Вертрагия», ООО «Профкомплектация») [5, 8].

6. В результате экспериментальных исследований натуральных фрагментов полового однослойного бескаркасного арочного покрытия из трапециевидных СТХП типа *МІС-240* получены *зависимости значений вертикальных перемещений* оси от величины симметричных и несимметричных нагрузок, установлено значение *понижающего коэффициента*  $k_{sg} = 0,7$  для расчета модуля упругости при определении жесткостных характеристик профилей указанного типа, а также установлены *предельные характеристические значения* снеговой нагрузки в виде двух разновеликих треугольников, которые составили для образца с шарнирным опорным узлом  $2,88 \text{ кН/м}^2$ , а для образца с жестким опорным узлом –  $3,77 \text{ кН/м}^2$  [8].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Предложенный деформационный метод расчета и разработанная на его основе программа *StarsCAD* внедрены в практику проектирования в НИЧ БрГТУ, филиал «Брестреставрацияпроект» ОАО «Белреставрация», ООО «Приорпроект» и ООО «Профкомплектация», а также в учебный процесс в БрГТУ.

2. Теоретические и экспериментальные результаты выполненного исследования использованы при проектировании и строительстве следующих объектов: «*Строительство ангара и площадки для хранения техники в д. Ивахновичи Брестского района*»; «*Навес над цехом сепарации стоков*» в д. Большие Мотыкалы Брестского района; «*Бескаркасные арочные сооружения сельскохозяйственного назначения*» в д. Чемелы Ивацевичского района.

3. По результатам выполненной работы подготовлена заявка и получено положительное решение о выдаче патента на полезную модель (пат. ВУ 11691).

4. Разработанная *модель сопротивления* продольно-поперечному изгибу ребристых СТХП, как с поперечными гофрами на гранях, так и без таковых, может быть использована при разработке методов расчета стальных профилированных настилов и бескаркасных арочных покрытий с высокой стрелой подъема, а также новых редакций *СТБ 2231* и национального приложения к *ТКП EN 1993-1-3*.

# СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

## Статьи в научных изданиях

1. Уласевич, В. П. К оценке влияния геометрической нелинейности на напряженно-деформированное состояние пологих арок / В. П. Уласевич, Д. А. Жданов // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2011. – № 1 : Строительство и архитектура. – С. 78–89.

2. Уласевич, В. П. Особенности напряженно-деформированного состояния гибких пологих арок из стальных тонкостенных гнутых профилей / В. П. Уласевич, Д. А. Жданов // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2012. – № 1 : Строительство и архитектура. – С. 104–110.

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. Уласевич, В. П. Деформационный расчет бескаркасных арочных покрытий из стальных тонкостенных холодногнутох профилей / В. П. Уласевич, Д. А. Жданов // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2015. – № 1 : Строительство и архитектура. – С. 66–72.

5. Жданов, Д. А. Экспериментальные исследования фрагмента пологого арочного покрытия из тонколистового холодногнутого профиля типа МПС-120 с поперечными гофрами / Д. А. Жданов, В. П. Уласевич, И. В. Зинкевич // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2015. – № 8. – С. 33–40.

6. Жданов, Д. А. Бескаркасные арочные покрытия из стальных тонкостенных профилей: история, современное состояние и перспективы применения в Республике Беларусь / Д. А. Жданов, В. П. Уласевич // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2016. – № 1 : Строительство и архитектура. – С. 30–34.

7. Zhdanov, D. A Nonlinear Analysis Method for Arch-Shaped Shell Roofs Made of Cold-Formed Steel Profiles / D. Zhdanov, W. Ulasevitch // Civil and Environmental Engineering. – 2016. – Vol. 7, № 3. – P. 187–191.

8. Жданов, Д. А. Экспериментальная оценка деформационного метода расчета пологих сводов-оболочек из стальных тонкостенных холодногнутох трапециевидных профилей с поперечными гофрами / Д. А. Жданов, В. П. Уласевич // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2017. – № 16. – С. 106–113.

## Материалы конференций

9. Жданов, Д. А. Влияние деформационной схемы пологих арочных систем на их напряженно-деформированное состояние / Д. А. Жданов, В. П. Уласевич // Сборник научных работ студентов высших учебных заведений Республики Беларусь «НИРС-2010» / редкол.: А. И. Жук [и др.]. – Минск : Изд. Центр БГУ, 2011. – С. 133–134.

10. Жданов, Д. А. Влияние учета деформированной геометрии на усилия и деформации пологих гибких арок / Д. А. Жданов, В. П. Уласевич // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 17–18 нояб. 2011 г. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т ; И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2011. – С. 173.

11. Уласевич, В. П. Несущая способность пологих арок из стальных трапецидальных гнутых профилей типа Legato / В. П. Уласевич, Д. А. Жданов // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Респ. Беларусь : сб. тр. XVIII Междунар. науч.-метод. семинара / ПГУ ; под ред. Д. Н. Лазовского, А. А. Хотько. – Новополоцк, 2012. – Т. 1. – С. 110–113.

12. Zhdanov, D. Linear vs Non-Linear Stress-Strain Static Analysis of Shallow Arch-Shaped Self-Bearing Systems Made of Cold-Formed Steel Sections / D. Zhdanov, W. Ulasevitch // European and national dimension in research : Materials of V Junior Researchers' Conference, Novopolotsk, 24–25 Apr. 2013 : in 3 parts / PSU ; ed.: D. Lazouski [et al.]. – Novopolotsk, 2013. – P. 3. – P. 24–27.

13. Жданов, Д. А. Теоретические исследования пологих бескаркасных арочных покрытий из стальных тонкостенных холодногнутох профилей / Д. А. Жданов, В. П. Уласевич // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров : сб. науч. ст. XIX Междунар. науч.-метод. семинара, Брест, 23–25 окт. 2014 г. : в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, Брест. гос. техн. ун-т, Строит. факультет ; редкол.: С. М. Семенюк [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2014. – Ч. 1. – С. 68–75.

14. Жданов, Д. А. Деформационный расчет пологих бескаркасных арочных покрытий из стальных тонкостенных холодногнутох профилей / Д. А. Жданов // Строительство – формирование среды жизнедеятельности : сб. тр. XVII Междунар. межвуз. науч.-практ. конф., Москва, 22–24 апр. 2015 г. – М., 2015. – С. 210–213.

15. Жданов, Д. А. Оценка напряженно-деформированного состояния стальных тонкостенных холодногнутох профилей с поперечно-гофрированными гранями / Д. А. Жданов, В. П. Уласевич // Актуальные проблемы исследования материалов, конструкций, технологий и организации строительства в трансграничном аспекте : сб. ст. II Междунар. науч. конф., Брест, 18–20 окт. 2017 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Брест. гос. техн. ун-т, Белосток. техн. ун-т ; редкол.: С. М. Семенюк [и др.]. – Брест, 2017. – С. 51–57.



## РЭЗІЮМЭ

Жданаў Дзмітрый Аляксандравіч

### Дэфармацыйны метадад разліку спадзістых бескаркасных арачных пакрыццяў з рабрыстых сталёвых танкасценных халоднагнутых профіляў

**Ключавыя словы:** дэфармацыйны метадад, разліковая мадэль, спадзістае бескаркаснае арачнае пакрыццё, сталь, халоднагнуты профіль, геаметрычная нелінейнасць, гранічныя станы.

**Мэта даследавання:** распрацаваць навукова абгрунтаваны метадад, алгарытм і прыкладную камп'ютарную праграму для ацэнкі гранічных станаў спадзістых аднаслаёвых бескаркасных арачных пакрыццяў, якія ўзводзяцца з рабрыстых сталёвых танкасценных халоднагнутых профіляў (СТХП), і эксперыментальна пацвердзіць іх дакладнасць.

**Метады даследавання:** мадэліраванне, вымярэнне, эксперымент, параўнанне, статыстычны аналіз.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Упершыню распрацаваны дэфармацыйны метадад разліку і на яго аснове – алгарытм і камп'ютарная праграма, якія дазваляюць ажыццяўляць ацэнку гранічных станаў спадзістых аднаслаёвых бескаркасных арачных пакрыццяў з рабрыстых СТХП, з улікам геаметрычнай нелінейнасці і магчымай страты мясцовай устойлівасці элементаў сячэння ад сумеснага ўздзеяння выгінальнага моманту і падоўжнай сілы.

Асаблівасцю метададу з'яўляецца тое, што ён грунтуецца на дзвюх, звязаных паміж сабой і функцыянуючых як адзінае цэлае, разліковых мадэлях – плоскай стрыжнёвай *мадэлі эфектаў уздзеянняў* для спадзістых арачных сістэм і *мадэлі супраціўлення* падоўжна-папярочнага выгібу рабрыстых СТХП любога віду.

Атрыманы новыя эксперыментальныя дадзеныя адносна сапраўднай працы рабрыстых СТХП, як з папярочнымі гофрамі, так і без іх, на сціск, выгіб і падоўжна-папярочны выгіб, а таксама спадзістых аднаслаёвых бескаркасных арачных пакрыццяў з трапецападобных СТХП з папярочнымі гофрамі, пры розных варыянтах вертыкальнай статычнай нарузкі і канструктыўнага выканання апорных вузлоў.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні.** Прапанаваны дэфармацыйны метадад разліку, алгарытм і прыкладная камп'ютарная праграма могуць выкарыстоўвацца пры праектаванні спадзістых бескаркасных арачных пакрыццяў рознага прызначэння, а таксама ў якасці віртуальнага інструмента даследавання разліковых мадэляў такіх канструкцый.

**Сфера прымянення:** праектаванне будаўнічых канструкцый, навукова-даследчая дзейнасць, навучальны працэс.



## РЕЗЮМЕ

Жданов Дмитрий Александрович

### **Деформационный метод расчета пологих бескаркасных арочных покрытий из ребристых стальных тонкостенных холодногнутох профилей**

**Ключевые слова:** деформационный метод, расчетная модель, пологое бескаркасное арочное покрытие, сталь, холодногнутоый профиль, геометрическая нелинейность, предельные состояния.

**Цель исследования:** разработать научно обоснованный метод, алгоритм и прикладную компьютерную программу для оценки предельных состояний пологих однослойных бескаркасных арочных покрытий, возводимых из ребристых СТХП, и экспериментально подтвердить их достоверность.

**Методы исследования:** моделирование, измерение, эксперимент, сравнение, статистический анализ.

**Полученные результаты и их новизна.** Впервые разработан деформационный метод расчета и на его основе – алгоритм и прикладная компьютерная программа, позволяющие осуществлять оценку предельных состояний пологих однослойных бескаркасных арочных покрытий из ребристых СТХП с учетом геометрической нелинейности и возможной местной потери устойчивости элементов сечения от совместного воздействия изгибающего момента и продольной силы.

Особенностью метода является то, что он базируется на двух, связанных между собой и функционирующих как единое целое, расчетных *моделях* – плоской стержневой *модели эффектов воздействий* для пологих арочных систем и *модели сопротивления* продольно-поперечному изгибу ребристых СТХП любого вида.

Получены новые экспериментальные данные о действительной работе ребристых СТХП, как с поперечными гофрами, так и без таковых, на сжатие, изгиб и продольно-поперечный изгиб, а также пологих однослойных бескаркасных арочных покрытий из трапециевидных СТХП с поперечными гофрами, при различных вариантах вертикальной статической нагрузки и конструктивного исполнения опорных узлов.

**Рекомендации по использованию.** Предложенный деформационный метод расчета, алгоритм и прикладная компьютерная программа могут использоваться при проектировании пологих бескаркасных арочных покрытий различного назначения, а также в качестве виртуального инструмента исследования расчетных моделей таких конструкций.

**Область применения:** проектирование строительных конструкций, научно-исследовательская деятельность, учебный процесс.

## SUMMARY

Dmitry Alexandrovich Zhdanov

### **A Deformation-Based Analysis Method for Shallow Arched Trussless Roofs Made from Cold-Formed Thin-Walled Steel Panels**

**Key words:** deformation analysis method, analysis model, shallow arch, trussless roof shells, cold-formed steel, geometrical nonlinearity, load-bearing capacity

**The aim of the study** is to develop a scientifically valid analytical-numerical analysis method as well as an algorithm and a computer program allowing the user to evaluate the strain-stress state and load bearing capacity of shallow arched trussless roof shells made from cold-formed thin-walled steel (CTS) panels, as well as to verify their efficiency by experimental testing.

**Research methods used:** modeling, instrumental measurements, laboratory and full-scale testing, data comparison, statistical data analysis.

**Scientific results obtained and their novelty.** A novel numerical-analytical analysis method, an algorithm, and an applied computer program have been developed that allow for shallow arched trussless roof shells made from CTS panels to be efficiently analysed for the stress-and-strain state and load bearing capacity, while taking into account both geometrical nonlinearity, and local and distortional buckling of the panel's cross-sectional elements caused by a combined action of the bending moment and longitudinal force.

Its main feature is that it is based on two, functioning as an integrated whole, inter-related nonlinear models, namely an *action effects model* developed for shallow arched roof systems, and a *resistance model* for the longitudinal-transverse bending of ribbed CTS panels with arbitrary cross-section.

New experimental data have been obtained regarding the actual behaviour and load-bearing capacity of both ribbed CTS panels and shallow arched trussless roofs, the first ones having been tested in compression, bending, and combined bending with compression, while the second ones, under various static loading and support conditions.

**Recommendations for usage.** The proposed deformation analysis method and the applied computer program it has been implemented in, can be used to both analyse and design shallow arched trussless roof shells made from ribbed CTS panels, as well as to carry out scientific research or training university students in civil engineering.

**Fields of application:** analysis and design of building structures, scientific and engineering research, training of civil engineering students in structural steel design.

Научное издание

Жданов Дмитрий Александрович

**ДЕФОРМАЦИОННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА  
ПОЛОГИХ БЕСКАРКАСНЫХ АРОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ  
ИЗ РЕБРИСТЫХ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ  
ХОЛОДНОГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

---

Подписано к печати 31.05.2018. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага «Снегурочка»

Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л. 1,4. Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 100. Заказ № 689.

---

Отпечатано на ризографе учреждения образования  
«Брестский государственный технический университет».

224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/235 от 24.03.2014 г