

Харківський національний університет міського господарства
імені О.М. Бекетова

Міністерство освіти і науки України

Український державний університет залізничного транспорту

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОРЕНЄВ РОМАН ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК: 624.074.43

ДИСЕРТАЦІЯ

**АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ВИНИКНЕННЯ ПРОГРЕСУЮЧОГО
ОБВАЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ОБОЛОНОК СПЕЦІАЛЬНОГО ВИДУ**

05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди

19 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Коронєв Р.В.

Науковий керівник:
Резнік Петро Аркадійович,
кандидат технічних наук

Харків – 2020

АНОТАЦІЯ

Коренєв Р.В. Аналіз можливості виникнення прогресуючого обвалення металевих оболонок спеціального виду. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди (19 – Архітектура та будівництво). – Український державний університет залізничного транспорту МОН України, Харків, 2020.

Дисертація присвячена розробці принципів якісної і кількісної оцінки можливості настання прогресуючого обвалення металевих оболонок спеціального виду.

Зміст дисертації. У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і завдання дослідження, представлено новизну і практичне значення отриманих результатів. Наведено відомості про апробацію основних результатів дисертації, кількість публікацій, структуру та обсяг роботи.

У **першому розділі** подано аналіз ретроспективи та поточний стан розвитку металевих оболонок спеціального виду. Розглянуто принципові технологічні особливості виробництва та монтажу та проведено аналіз конструктивних рішень досліджуваних конструкцій. Проаналізовано роботи авторів, що займаються теоретичними і експериментальними дослідженнями металевих оболонок спеціального виду. Зазначено, що суттєвий науковий інтерес викликають аномалії та колапси, що відбуваються при експлуатації оболонки, які досліджуються.

Проведено аналіз аварійних ситуацій і обвалень безкаркасних аркових споруд, та відзначено, що відбувається втрата стійкості оболонки, виходячи з характеру та швидкості обвалення, відбувається так зване «прогресуюче», або «лавиноподібне» обвалення.

В ході аналізу ряду існуючих будівель і об'єктів, що зводяться, в основі яких лежать розглянуті аркові системи, було встановлено, що на етапі

виробництва і монтажу можливі різні недосконалості, накопичення яких може сприяти зазначеному колапсу. Найбільш істотним з цих віртуальних недосконалостей є розкриття шва між конструктивними елементами системи, яке носить дискретний характер.

Розглянуто проблеми та особливості прогресуючого обвалення. Виконаний аналіз демонструє недостатність вивчення напружено-деформованого стану досліджуваних систем, які є, по суті, складеними металевими оболонками, дозволив визначити коло невирішених проблем як теоретичного, так і експериментального характеру. В цілому, існуючі дослідження розглядають або окремо взяті конструктивні елементи – аркові профілі (або їх частини), або фрагменти, що складаються з незначної кількості профілів, що, в цілому, не відображає просторову роботу зазначених конструкцій. Питання стійкості і прогресуючого (лавиноподібного) обвалення розглянутих конструкцій, виходячи з аналізу аварійних ситуацій, що виникають при експлуатації означених систем, є маловивченими. У зв'язку з чим, сформульовані основні завдання цього дослідження.

У **другому розділі** аргументовано доцільність дослідження аркових покриттів спеціального виду, основою яких є профіль «U»-типу. Зважаючи на складність поперечного перерізу (технологічне гофрування) зазначеного аркового профілю, та виходячи з необхідності верифікації підходу встановлення його геометричних характеристик, було проведено лабораторне дослідження (на натурному зразку) з визначення згинальної жорсткості (щодо горизонтальної осі) фрагмента аркового профілю, задля подальшої верифікації геометричних характеристик, отриманих за допомогою розрахункових комплексів. Були досліджені три типи розрахункових моделей досліджуваних конструкцій: модель у вигляді плоскої арки (відповідно до рекомендацій нормативної документації), модель гладкої оболонки (що відображала конструктивну ортотропію), модель у вигляді ребристої оболонки (що відображала геометричну нелінійність). Алгоритм (рекомендований нормативно-технічною документацією) дослідження напружено-

деформованого стану (НДС) конструкцій спеціального виду доповнений аналізом стійкості, при цьому, враховано не тільки стійкість плоскої форми вигину, а й згинально-крутильну форму втрати стійкості. За результатами аналізу НДС, на базі просторових оболонкових моделей, доведено позитивний вплив наявності торцевих і проміжних діафрагм на НДС і стійкість оболонок спеціального виду, і як наслідок, зроблено висновок про їх конструкційну необхідність. Наявність діафрагм жорсткості призводить до падіння головних стискаючих і розтягуючих напружень, в середньому на 50-70%, в залежності від довжини оболонки, а також до зменшення вертикальних переміщень, в середньому на 63%, підвищення коефіцієнта запасу стійкості.

Відсутність можливості врахування прогресуючого обвалення розглянутих систем, спонукала необхідність подальшого удосконалення розрахункових моделей.

У зв'язку з чим, у **третьому розділі** було розглянуто модель підвищеної коректності оболонки спеціального виду. Скінченно-елементна (СЕ) модель відображала віртуальну недосконалість у вигляді розкриття шва між суміжними арковими елементами, при припущенні максимального відхилення кута полиць конструктивного елемента від вертикалі на $\sim 3^\circ$, згідно технології виробництва.

Обумовлена СЕ модель, враховувала аналіз деформованої схеми та відображали фактичну роботу вальцевого з'єднання. Вищезазначені особливості вдалося реалізувати за допомогою застосування спеціальних скінченних елементів, а саме геометрично нелінійного скінченного елемента оболонки та двовузлового скінченного елемента пружної в'язі з урахуванням граничного зусилля. Для оцінки жорсткості вальцевого з'єднання, була побудована аналітична модель двох аркових конструктивних елементів, які об'єднані між собою вальцевий з'єднанням. Проведено ідентифікацію контактної пари, тобто, позначені зони, в яких під час деформування має відбуватися контакт. Призначено коефіцієнт взаємодії, в даному випадку, коефіцієнт тертя «сталь по сталі» рівний 0.8. Проведено аналіз НДС

зазначеного фрагмента, при якому визначено нормальні напруження, що виникають у вальцевому з'єднанні, і отримано данні погонної жорсткості, яка призначається скінченим елементам однобічної в'язі у зазначеній просторовій SE моделі оболонки.

Для оцінки можливості виникнення прогресуючого обвалення оболонок спеціального виду імплементовано енергетичний підхід. Цей підхід передбачає ітераційний процес, на кожному кроці якого визначаються компоненти НДС, потенційної енергії деформації (ПЕД) та, як результат, будується енергетичний портрет конструкції (просторова діаграма поля щільності потенційної енергії деформації (ЩПЕД) системи, відповідно до якої в подальшому відбувається виявлення концентраторів ЩПЕД — місць майбутнього колапсу). При цьому, на кожному етапі розрахунку послідовно збільшується навантаження і враховується зміна жорсткості системи (вальцевого з'єднання), в припущенні про існування значення ПЕД: $U = \sup U$, після визначення якого, на наступній ітерації відбувається віртуальний колапс.

Імплементуючи вказаний алгоритм, в ході ітераційного розрахунку в ПК «Ліра», були визначені і проаналізовані компоненти НДС, а також енергетичний портрет оболонки спеціального виду. Відзначено місця концентрації щільності потенційної енергії деформації (ЩПЕД) і зростання її значень на кожному кроці розрахунку.

З проведеного аналізу зазначається, що на останньому кроці розрахунку відзначено наростання значення ПЕД. Це підтверджується наростанням вертикальних переміщень (прогинів) даної системи, і досягненням все в більшій кількості двовузлових скінчених елементах однобічної в'язі граничного зусилля, в наслідок чого відбувається виключення їх з роботи. Тобто, відбувається так зване лавиноподібне усунення в'язів, аж до граничного стану, віртуального колапсу, ПЕД зростає і досягає верхньої межі $U = \sup U$, коли на наступному кроці система перетворюється в механізм, що підтверджує принципи, покладені раніше.

Також, в поточному розділі, запропоновано заходи конструктивної модернізації вузлів з'єднання досліджуваних конструкцій, що дозволяють уникнути прогресуючого обвалення. Для цього, в рамках зазначених принципів, потрібно досягти більш рівномірного (природного) розподілу полів ЩПЕД, і мінімізувати ПЕД системи в цілому. Сказане спонукає необхідність забезпечення адекватної спільності роботи аркових конструктивних елементів. Запропонована конструктивна модернізація передбачає встановлення болтових з'єднань з заданим кроком (самонарізних шурупів з шайбою Гройвера або заклепок з шайбою). Ця модернізація дозволяє забезпечити спільність деформацій і трансформувати НДС оболонки спеціального виду в НДС конструкції близької до суцільної ребристої оболонки, отримавши тим самим дискретно-континуальну систему.

Четвертий розділ роботи присвячено верифікації (в ході проведення повнорозмірного натурного експерименту) розрахункових моделей оболонок спеціального виду, з урахуванням послідовності зведення (при роботі конструкції до і після проведення конструктивної модернізації).

Проведено зіставлення даних переміщень досліджуваних точок конструкції від дії зосередженого навантаження до і після проведення конструктивної модернізації. Проведено зіставлення отриманих експериментальних даних з теоретичними.

З отриманих результатів порівняння переміщень конструкції до і після модернізації, відзначається значне зниження переміщень в середньому на 71,21%, що наочно свідчить про поліпшення характеристик жорсткості досліджуваної системи.

Різниця між теоретичними і експериментальними значеннями переміщень склала, в середньому, 10,74%, що дає право вважати верифікацію успішною.

П'ятий розділ представляє результати впровадження наукового дослідження в ТОВ «СТРОЙ ІНЖИНІРИНГ ДЕВЕЛОПМЕНТ», при проектуванні і будівництві стандартних фізкультурно-оздоровчих комплексів.

Ключові слова: оболонка спеціального виду, стійкість, прогресуюче обвалення, напружено-деформований стан.

ABSTRACT

Roman V. Koreniev. Analysis of the possibility of progressive collapse of metal shells of a special kind. – Qualification scientific paper, manuscript.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences (doctor of philosophy) in the specialty 05.23.01 "Building constructions, buildings and structures" (19 - Architecture and construction). - Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, 2020

The dissertation is devoted to the development of principles of a qualitative and quantitative assessment of the possibility of the onset of progressive collapse of metal shells of a special kind.

The content of the dissertation. The **introduction** substantiates the relevance of the topic of the dissertation, formulates the goals and objectives of the study, presents the novelty and practical significance of the results. The information on the testing of the main results of the dissertation, the number of publications, the structure and volume of work is given.

The **first section** presents an analysis of retrospectives and the current state of development of metal shells of a special kind. The fundamental technological features of production and installation are considered and the analysis of design solutions is carried out. The works of authors involved in theoretical and experimental studies of metal shells of a special kind are considered. It is noted that anomalies and collapses of the shells occurring during the operation are of significant scientific interest, are being investigated.

The analysis of emergencies and collapse of frameless arch structures, and noted that there is a loss of stability of the shell, based on the nature and speed of collapse, there is a so-called "progressive", or "avalanche" collapse.

In the course of the analysis of several existing buildings and objects, built based on which arch systems are considered, it was found that at the production and

installation stage various imperfections arise, the accumulation of which may, as a result, contribute to this collapse. The most significant of these virtual imperfections is the opening of the seam between the structural elements of the system, which is discrete.

The problems and features of progressive caving are considered. The performed analysis shows the inadequacy of studying the stress-strain state of the systems under study, which is, in fact, folded metal shells, also made it possible to determine the range of unresolved problems of both theoretical and experimental nature. In general, existing studies consider either individual structural elements - arch profiles (or parts thereof), or fragments consisting of a small number of profiles, which, in general, reflects the spatial work of these structures. The issue of stability and progressive (avalanche-like) collapse of the considered structures, based on the analysis of emergencies arising from the operation of these systems, are poorly understood. In this connection, and formulated the main objectives of this study.

The **second section** argues the feasibility of studying arched coatings of a special type, the basis of which is the profile of the “U” type. Due to the complexity of the cross-section (technological corrugation) of the specified arch profile, and based on the need to verify the approach to establish its geometric characteristics, a laboratory study (on a full-scale sample) was carried out to determine the bending stiffness (relative to the horizontal axis) of the fragment of the arch profile, for further verification of geometric characteristics obtained using settlement systems. Three types of design models of the structures under study were investigated: a model in the form of a flat arch (according to the recommendations of normative documentation), a model of a smooth shell (reflecting structural orthotropy), a model in the form of a ribbed shell (reflecting geometric nonlinearity). The algorithm (recommended by the normative and technical documentation) for studying the stress-strain state (SSS) of special-type structures is supplemented by a stability analysis while taking into account not only the stability of a flat bending shape but also the bending-torsional form of buckling. According to the results of the SSS analysis, based on spatial shell models, the positive effect of the presence of end and

intermediate diaphragms on the SSS and the stability of the shells of a special type is proved, and as a result, a conclusion is made about their structural necessity. The presence of stiffness diaphragms leads to a decrease in the main compressive and tensile stresses, on average, by 50-70%, depending on the length of the shell, as well as to a decrease in vertical displacements, on average, by 63% and an increase in the safety factor.

The inability to take into account the progressive collapse of the considered systems has prompted the need for further improvement of the calculation models.

In this connection, in the **third section**, a model of increased correctness of a shell of a special type was considered. The finite element (FE) model reflected virtual imperfection in the form of opening a seam between adjacent arched elements, assuming the maximum deviation of the angle of the shelves of the structural element from the vertical, by $\sim 3^\circ$, according to the production technology. When constructing the indicated FE model, it was assumed that a geometrically nonlinear finite element of the shell was used to take into account the deformed scheme, and to display the stiffness of the roller connection, using two-node finite elements of elastic ties taking into account the ultimate force intended for modeling the bond that perceives tension or compression. To assign stiffness to the finite elements of the elastic ligature, in the "Ansys Student", an analytical model of two arched structural elements was built that are connected by a roll joint. The identification of the contact pair was carried out, that is, the zones in which contact occurred during deformation were identified. The interaction coefficient is assigned, in this case, the coefficient of friction "steel on steel" equal to 0.8. An analysis of the SSS of the indicated fragment was carried out, at which the normal stresses arising in the rolling joint were established, and they switched from them to linear stiffness, which is assigned to the finite elements of the one-sided model connection in the "Lira" PC.

An energy approach is proposed to assess the possibility of progressive caving of shells of a special type. The proposed approach provides for, at each step of the iterative process, the determination of the components of the SSS, potential strain

energy (PSE) and, as a result, the construction of an energy portrait of the structure (spatial diagram of the field of the density of potential strain energy (DPSE) of the system, following which DPSE concentrators are subsequently identified — places of future collapse). At the same time, at each stage of the calculation, the load increases sequentially and the change in the system stiffness (roll connection) is taken into account, assuming the existence of a PSE value: $U = \sup U$, after which, at the next iteration, a virtual collapse occurs.

Implementing the indicated algorithm, during the iterative calculation in the "Lira" PC, the components of the SSS were determined and analyzed, as well as the energy portrait of the shell of a special kind. The places of concentration of the DPSE and the growth of its values at each step of the calculation are noted.

From the analysis, it is noted that at the last step of the calculation, an increase in the PSE value is noted. This is confirmed by the increase in vertical displacements (deflections) of this system and the achievement of an increasing number of two-node finite elements of the one-sided ligament of ultimate force and their exclusion from the "work". That is, the so-called avalanche-like elimination of elms takes place, up to the limit state, virtual collapse, the PSE increases and reaches the upper limit $U_u = \sup U$, when the system turns into a mechanism in the next step, the principles laid down earlier are confirmed.

Also, in the current section, the proposed measures for constructive modernization of the connection nodes of the studied structures, which allow avoiding progressive collapse. To do this, within the framework of these principles, it is necessary to achieve a more uniform (natural) distribution of the fields of the DPSE and minimize the PSE of the system as a whole. To do this, it is necessary to ensure adequate commonality of the work of arched structural elements. The proposed constructive modernization provides for the installation of bolted joints (self-tapping screws with a Grover washer or rivets with a washer) with a given step. This modernization makes it possible to ensure a common deformation, and to transform the stress-strain state of a special-type shell into a stress-strain state close to a continuous ribbed shell, thereby obtaining a discrete-continuous ribbed shell.

The **fourth section** of the work is devoted to verification (during a full-size full-scale experiment) of design models of shells of a special type, taking into account the sequence of construction (during construction work before and after constructive modernization).

A comparison of the data of the displacements of the studied structural points from the action of the concentrated load, before and after the structural modernization was carried out. Also, in turn, the obtained experimental data were compared with theoretical ones.

From the results of comparing the displacements of the structure before and after modernization, a significant decrease in displacements by an average of 71.21% is noted, which indicates an improvement in the stiffness characteristics of the system under study.

The difference between the theoretical and experimental values of the displacements averaged 10.74%, which gives the right to consider verification successful.

The **fifth section** presents the results of the implementation of scientific research in LLC “STROY ENGINEERING DEVELOPMENT”, during the design and construction of standard sports and fitness complexes.

Key words: a shell of a special type, stability, progressive collapse, stress-strain state.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Коренєв Р. В., Резнік П. А. Особливості використання ефективних оболонкових систем у промисловому та цивільному будівництві. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. Збірник наукових праць*. 2018. №35. С. 123–128.

(Особистий внесок: виконано аналіз використання металевих оболонок спеціального виду у промисловому будівництві)

2. Коренєв Р. В., Резнік П. А. Розрахунок та аналіз безкаркасних аркових систем, виконаних із тонкостінних холоднодеформованих профілів. *Наука та будівництво*. 2018. №1. С. 100–110.

(Особистий внесок: виконано дослідження геометричних характеристик конструктивних елементів металевої оболонки, виконано оцінку стійкості рівноваги систем, що досліджували)

3. Коренєв Р. В., Резнік П. А. Вплив конструктивних особливостей на напружено-деформований стан спеціальних оболонкових систем. *Науковий вісник будівництва*. 2018. Том 91, №1. С. 317–325.

(Особистий внесок: виконано скінчено-елементне моделювання просторових моделей оболонок спеціального виду, проведено експериментальну верифікацію)

4. Коренєв Р. В. Вплив віртуальних недосконалостей на напружено-деформований стан і стійкість спеціальних оболонкових систем. *Комунальне господарство міст*. 2018. Вип. 140. С. 109–119.

5. Коренєв Р. В. Вплив діафрагм на напружено-деформований стан та стійкість аркових систем спеціального типу. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія : Теорія і практика будівництва. 2019. Вип. 912. С.75–83.

6. Коренєв Р. В., Гапонова Л. В., Гребінчук С. С. До визначення характеристик жорсткості вальцьового з'єднання металевих оболонок спеціального виду. *Вісник національного університету водного господарства та природокористування. Технічні науки*. 2019. Вип. 1(85). С. 196–177.

(Особистий внесок – виконано розробку просторових 3D-моделей конструктивних елементів оболонки спеціального виду).

Статті у міжнародних виданнях та збірниках наукових праць, що включені до міжнародних наукометричних баз

7. Коренєв Р. В., Резнік П. А. Особливості деформування споруди оболонкового типу в умовах динамічного навантаження. *Збірник наукових праць*

Українського державного університету залізничного транспорту. 2018. Вип. 178. С.78–88.

(Особистий внесок – виконано натурне дослідження амплітудно-частотних характеристик споруди оболонкового типу в умовах динамічного навантаження).

8. Koreniev R., Reznik P., Grebenchuk S., Bondarenko V. Research of the specific steel shells progressive collapse prevention. *Academic journal Series: Industrial machine building, civil engineering*. 2019. Issue 1(52). P. 58–64.

(Особистий внесок – виконано розробку конструктивної модернізації задля попередження прогресуючого обвалення)

9. Резнік П.А., Гапонова Л. В., Гребінчук С. С., Коренєв Р.В.

Експериментально-теоретичні випробування ефективності конструктивних заходів щодо запобігання прогресуючого обвалення металевих оболонок спеціального виду. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2019. Вип. 185. С. 71–81.*

(Особистий внесок – виконано розробку алгоритму обчислення НДС металевих оболонок спеціального виду з можливістю відображення прогресуючого обвалення, розробку скінченно-елементних моделей оболонок за зазначеним алгоритмом)

Публікації апробаційного характеру:

1. Резнік П. А., Коренєв Р. В. Особливості використання ефективних оболонкових систем у промисловому та цивільному будівництві. *Ефективні технології в будівництві: зб. Матеріалів доп. учасн. Міжнар. наук.-практ. конф., 28–29 березня 2018 р. Київ : КНУБА, 2019. С. 109–110. (Особистий внесок: виконано аналіз використання металевих оболонок спеціального виду у промисловому будівництві)*

ЗМІСТ	
ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ, МЕТОДІВ І РЕЗУЛЬТАТІВ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ МЕТАЛЕВИХ ОБОЛОНОК СПЕЦІАЛЬНОГО ВИДУ	20
Технологічні особливості виробництва і монтажу, аналіз конструктивних рішень.....	20
Огляд теоретичних і експериментальних досліджень конструкцій з тонкостінних холоднодеформованих профілів.....	24
Аналіз аварійних ситуацій і обвалень металевих оболонок спеціального виду.....	33
Прогресуюче обвалення: огляд досліджень і історія напрямку	39
Висновки по розділу 1 і завдання подальшого дослідження	44
РОЗДІЛ 2. ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ РОЗРАХУНКОВИХ МОДЕЛЕЙ МЕТАЛЕВИХ ОБОЛОНОК СПЕЦІАЛЬНОГО ВИДУ	46
Експериментальне уточнення геометричних характеристик основного конструктивного елемента металевої оболонки	46
Визначення фізико-механічних характеристик сталі конструктивного елементу.....	49
Дослідження розрахункової моделі стержньової плоскої арки	51
Принципи побудови континуальних оболонкових розрахункових моделей	61
Гладка конструктивно-ортотропна оболонка.....	62
Ребриста континуальна оболонка	70
Висновки по розділу 2.....	76
РОЗДІЛ 3. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНКИ ПРОГРЕСУЮЧОГО ОБВАЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ОБОЛОНОК СПЕЦІАЛЬНОГО ВИДУ	78
Загальні передумови та положення	79
Принципи побудови моделі підвищеної коректності, з урахуванням геометричної та конструкційної нелінійностей, з імплементацією енергетичного підходу в аналізі настання прогресуючого обвалення.....	82
Експериментальне визначення характеристик жорсткості вальцьованого з'єднання	85
Обчислювальні аспекти дослідження дискретно-континуальної моделі оболонки, з урахуванням геометричної та конструкційної нелінійностей.....	89

	15
Спосіб запобігання прогресуючого обвалення	92
Висновки по розділу 3.....	101
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ВЕРИФІКАЦІЯ РОЗРОБЛЕНОЇ ЧИСЕЛЬНОЇ МОДЕЛІ ПІДВИЩЕНОЇ КОРЕКТНОСТІ.....	102
Мета, об'єкт і предмет дослідження	102
Дослідження деформованого стану металевої оболонки спеціального виду від дії зосередженого навантаження.....	102
Система навантаження	104
Система вимірювання.....	106
Послідовність проведення експериментальних досліджень	107
Аналіз та верифікація отриманих результатів	108
4. 3. Висновки по розділу 4.....	123
РОЗДІЛ 5. ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ	124
Особливості архітектурно-конструкторських рішень та аналіз напружено-деформованого стану стандартного ФОКа.....	125
Аналіз техніко-економічних показників впровадження конструктивної модернізації	131
Висновки по розділу 5.....	132
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	133
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	134
ДОДАТКИ	148
ДОДАТОК «А». ІЗОПОЛЯ КОМПОНЕНТІВ НДС ГЛАДКИХ КОНСТРУКТИВНО-ОРТОТРОПНИХ ОБОЛОНКОВИХ МОДЕЛЕЙ	149
ДОДАТОК «Б» . ІЗОПОЛЯ КОМПОНЕНТІВ НДС РЕБРИСТИХ КОНТИНУАЛЬНИХ ОБОЛОНКОВИХ МОДЕЛЕЙ	168
ДОДАТОК «В». ІЗОПОЛЯ ПЕРЕМІЩЕНЬ ДЛЯ ПЕРШИХ ТРЬОХ ФОРМ ВЛАСНИХ КОЛИВАНЬ ДОСЛІДЖУЄМИХ МОДЕЛЕЙ	184
ДОДАТОК «Г». РЕСУРСНА ВІДОМІСТЬ ДЛЯ ВЛАШТУВАННЯ СТАНДАРТНОГО ФОКА (ВАРІАНТНЕ ПРОЕКТУВАННЯ).....	189
ДОДАТОК «Д». АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	195
ДОДАТОК «Є». СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	196

ВСТУП

Наразі в Україні досить часто використовуються металеві оболонки спеціального виду, в основі яких є металевий арковий тонкостінний холодногнутий профіль. Зазначені конструкції можуть застосовуватися як в якості остову, так і в якості покриття будівель і споруд.

Актуальність роботи. Суттєвий інтерес до металевих оболонок спеціального виду обумовлений їх низькою вартістю, можливістю швидкого зведення і виготовлення основних аркових конструктивних елементів в умовах будівельного майданчика, а також можливістю їх застосування у різних архітектурно-планувальних рішеннях промислового і цивільного будівництва.

Незважаючи на велику кількість вже зведених об'єктів та таких, що знаходяться в процесі будівництва, в діючих нормативних документах України чіткі рекомендації щодо розрахунку подібного виду металевих оболонок відсутні. Нормативна база з проектування розглянутих безкаркасних покриттів відсутня також і за кордоном, в нормах країн Європи та Північної Америки є методики розрахунку традиційних конструкцій з тонкостінних холодногнутих профілів, але на безкаркасні аркові конструкції вони не поширюються. Враховуючи зазначене вище, в повній мірі застосовувати зарубіжні стандарти для розрахунку безкаркасних аркових покриттів із сталевих тонкостінних холодногнутих профілів з поперечно-гофрованими гранями не виявляється можливим. Науковий інтерес викликає НДС зазначених конструкцій та формування нормативних рекомендацій щодо їх розрахунку.

Зважаючи на використання зазначених конструкцій в сфері цивільного будівництва, варто відзначити характерну високу ступінь соціальної значущості і відповідальності при їх експлуатації, що пов'язана з можливим масовим скупченням людей при проведенні тих чи інших суспільних заходів. Тож актуальним є й питання прогресуючого обвалення і, відповідно, заходів та методів його запобігання. Перераховане, в сукупності з даними про аномалії та аварійні ситуації протягом експлуатації зазначених конструкцій, підтверджує актуальність і свідчить про доцільність досліджень в означеному напрямку.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана в рамках тематики кафедри будівельних конструкцій ХНУГХ імені О.М. Бекетова за 2014–2019 рр.: «Нові ефективні конструктивні системи з раціональними параметрами» - № ДР 0114U002999; «Сталобетонні конструкції з раціональними параметрами» - № ДР 0117U000662; та є частиною досліджень наукової школи ХНУМГ імені О.М. Бекетова «Конструкції і матеріали для житлових і громадських будівель».

Мета роботи полягає в розробці принципів якісної і кількісної оцінки можливості настання прогресуючого обвалення металевих оболонок спеціального виду.

Наукова гіпотеза – удосконалення конструкцій сучасних металевих оболонкових покриттів спеціального виду, шляхом надання необхідного ресурсу при сприйнятті нормальних і аномальних впливів.

Завдання дослідження:

- провести послідовний аналіз напружено-деформованого стану та стійкості металевих оболонок спеціального виду, з імплементацією різних підходів моделювання;
- розробити алгоритм моделювання оболонок спеціального виду, з відображенням конструкційної нелінійності та впровадженням нового енергетичного підходу до оцінки можливості настання прогресуючого обвалення;
- побудувати й верифікувати скінченно-елементні моделі оболонок спеціального виду, з можливістю відображення настання прогресуючого обвалення, імплементуючи розроблений алгоритм;
- розробити конструктивні заходи, що попереджують настання прогресуючого обвалення, й верифікувати запропоновану конструктивну модернізацію повнорозмірним натурним експериментом;

Об'єкт дослідження – особливості деформування металевих оболонок спеціального виду.

Предмет дослідження – флуктуації деформування конструкцій що досліджуються, які можуть привести до прогресуючого обвалення.

Методи дослідження. В роботі використані аналітичні та чисельні методи механіки деформованого твердого тіла, зокрема, метод скінченних елементів. Побудову конструктивних рішень реалізовано на основі експлуатації алгоритмів, що реалізують управління якісними і кількісними характеристиками НДС, що виникає в конструкції. Експериментальне дослідження існуючих і запропонованого конструктивних рішень металевих оболонок спеціального виду проводилося на лабораторних і натурних зразках з використанням елементів автоматизованої системи наукових досліджень, що базується на сучасному технічному і інформаційному забезпеченні.

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше :

- розроблено підхід формування розрахункової моделі оболонок спеціального виду з урахуванням конструкційної нелінійності і з можливістю відображення настання прогресуючого обвалення;
- реалізована імплементація нового енергетичного підходу для якісної і кількісної оцінки можливості настання прогресуючого обвалення зазначених конструктивних систем;
- отримано нові результати експериментальних натурних досліджень деформативності металевих оболонок спеціального виду.

Набуло подальшого розвитку:

- скінченно-елементне моделювання напружено-деформованого стану оболонок спеціального виду й встановлення особливостей їх деформування;

Практичне значення отриманих результатів полягає у:

- запропонованні способу конструктивної модернізації покриття спеціального виду, що забезпечує стійкість до прогресуючого обвалення.
- розробці алгоритму оцінки можливості настання прогресуючого обвалення металевих оболонок спеціального виду;

- впровадженні їх (результатів) в проектний і виробничий цикл підприємства ТОВ «СТРОЙ ІНЖИНІРИНГ ДЕВЕЛОПМЕНТ» при розробці стандартних фізкультурно-оздоровчих комплексів у Харківській області.

Особистий внесок здобувача. Всі основні наукові результати дисертаційної роботи отримані автором особисто. Окремі складові теоретичних та експериментальних досліджень виконані в співавторстві, що відзначено в наведеному переліку наукових публікацій.

Апробація роботи. Результати роботи доповідалися на III Міжнародній науково-технічній конференції «Ефективні технології в будівництві» в Київському національному університеті будівництва і архітектури (м.Київ, 28.03 – 29.03.2018р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Стратегія розвитку міст: молодь і майбутнє (інноваційний ліфт)» в Харківському національному університеті міського господарства імені О.М. Бекетова (м. Харків, 12.04 - 13.04.2018 р), на 83-й науково-технічній та науково-методичній конференції у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті (м. Харків 13.05-17.05.2019 р), на міжнародній науково-практичній конференції «Ефективні технології і конструкції в будівництві та архітектура села. Розробка інноваційних моделей екопоселень Прикарпаття та Карпат» (м. Дубляни 15.05-17.05.2019р); на XX міжнародному науково-практичному форумі «Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій» (м. Львів 17.09.-19.09. 2019р).

Публікації. Основні положення дисертації і результати досліджень опубліковані в 10 друкованих роботах, 9 з яких увійшли в видання, рекомендовані МОН України, в тому числі 3 в наукометричних збірниках, 1 стаття за матеріалами конференції.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Дисертація викладена на 198 сторінках і містить 118 - сторінок основного тексту, 25 - таблиць, 80 - рисунків, 153 - найменувань літератури, 6 додатків на 50 сторінках.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абовский Н.П., Енджиевский Л.В., Морозов С.В. Живучесть пространственных конструкций зданий и сооружений. Красноярск: КАСА, 2003. – 153с.
2. Авдонин А.С. Прикладные методы расчёта оболочек и тонкостенных конструкций. М.: Машиностроение, 1969. 402 с.
3. Айрумян Э.Л. Особенности расчета стальных конструкций из тонкостенных гнутых профилей. *Монтажные и специальные работы в строительстве*. 2008. №3. С. 2-7.
4. Айрумян Э.Л., Румянцева И.А. Прочность и надежность бескаркасных арочных зданий из стальных холодногнуто́тых профилей. *Монтажные и специальные работы в строительстве*. 1998. №7-8. С. 12-14.
5. Айрумян Э.Л., Федорова Н.А. Сборно-разборное инвентарное здание из гофрированных стальных листов. *Монтажные и специальные работы в строительстве*. 1990. №8. С. 13-15.
6. Айрумян Э.Л., Емелин Е.И., Барсков Д.П. Устойчивость оболочек из гофрированных стальных профилей. *Промышленное строительство*. 1990. № 10. С. 18-19.
7. Айрумян Э.Л., Каменщиков Н.И., Липленко М.А. Перспективы ЛСТК в России. *СтройПРОФИ*. 2013. № 10. С. 12-17.
8. Андреева Л.Е. Расчет гофрированных мембран, как анизотропных пластинок. *АН СССР, отделение технических наук, институт механики: Инженерный сборник*. М: АН СССР, 1955. том XXI. С. 128-141.
9. Андреева Л.Е. Расчет характеристик гофрированных мембран. *Приборостроение*. М: МАШГИЗ, 1956. №3. С. 11-17.
10. Арменский, М.Ю., Ведяков И.И., Еремеев П.Г. Исследования и проектирование бескаркасных арочных сводов из холодногнуто́тых стальных тонколистовых профилей. *Промышленное и гражданское строительство*. 2007. № 3. С. 16-18.
11. Арменский М.Ю. Опыт использования численных методов в исследованиях геометрических характеристик тонкостенных профилей. *Промышленное и гражданское строительство*. 2009. № 6. С.23-26.

12. Астахов, И.В. Пространственная устойчивость элементов конструкций из холодногнутых профилей: дис. ...канд. тех. наук: 05.23.01. СПб., 2006. 123с.
13. Атапин В.Г., Скиба В.Ю. Численное моделирование бескаркасных арочных покрытий. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2012. № 4 (57). С. 23-27.
14. Бабаєв В.М., Бугаєвський С.О., Євель С.М., Євзеров І.Д., Лантух-Лященко А.І., Шеветовський В.В., Шимановський О.В., Шмуклер В.С. Чисельні та експериментальні методи раціонального проектування та зведення констру-ктивних систем. – Київ: Видавництво “Сталь”, 2017. – 404 с.
15. Барабаш М.С., Мисливець К.М. Аналіз надійності висотної будівлі з урахуванням ризику прогресуючого обвалення. *Науково-виробничий журнал "Будівництво України"*, 2010. №5. С. 37 - 41.
16. Барсков Д.П. Разработка и внедрение системы оценки геометрии и деформативности строительных металлоконструкций на основе методов аналитической фотограмметрии: автореф. дис. ...канд. тех. наук: 05.23.01. М., 1992. 24 с.
17. Белкин В.П. Работа элементов палубных перекрытий после потери устойчивости Л.: Судпромгиз, 1956. 287 с.
18. Белый, Г.И. Пространственная работа и предельные состояния стержневых элементов металлических конструкций: дис. ...д-ра.тех. наук: 05.23.01. Ленинград, 1987. 464 с.
19. Блейх Ф. Устойчивость металлических конструкций. М.: Физматгиз, 1959. 544 С.
20. Борисов Е.В. Устойчивость окаймленных ребрами полок тонкостенных профилей. *Строительная механика и расчет сооружений*. 1965. №2. С. 39-44.
21. Броуде Б.М. Устойчивость пластинок в элементах стальных конструкций. М.: Машстройиздат, 1949.380 с.
22. Броуде Б.М., Моисеев В.И. Устойчивость прямоугольных пластинок с упругим защемлением продольных сторон. *Строительная механика и расчет сооружений*. 1982. №1. С. 39-42.
23. Брудка Я., Лубиньски М. Легкие металлические конструкции. М.: Стройиздат, 1974. 344 С.

24. Васильков Г.В., Маркин С.Г. Адаптационные методы определения энергетически равнопрочных пластин. *Известия вузов: машиностроение*. 2002. № 2. С. 19-27.
25. Веселев Ю.А., Карабутов М.С. Экспериментальное изучение поведения свода из вальцованных металлических тонкостенных профилей при действии ветра и сравнение полученных результатов с результатами компьютерного моделирования обдувания свода ветром. *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2012. №2. С. 72-76.
26. Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни. М.: Физматгиз, 1959. 566 с.
27. Вольмир А.С. Гибкие пластинки и оболочки. М: Гостехиздат, 1956. 418 с.
28. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. М: Физматгиз, 1967. 984 с.
29. Гапонова Л. В., Коренев Р. В., Гребінчук С. С. До визначення характеристик жорсткості вальцьового з'єднання металевих оболонок спеціального виду. *Вісник національного університету водного господарства та природокористування. Технічні науки*. 2019. Вип. 1(85). С. 196–177.
30. Голенко Г.Г. Экспериментальные исследования сварных ферм пролетом 30м и сжатых стержней из гнутых профилей. *Исследования по стальным конструкциям: Сборник статей*. М: Госстройиздат, 1962. С. 214-231.
31. Городецкий О.С., Барабаш М.С. Исследование вопросов живучести строительных конструкций при аварийных воздействиях. *Науково-технічний журнал: Нові технології в будівництві*, 2010. №2(20). С.19-23.
32. Городецкий А.С., Шмуклер В.С., Бондарев А.В. Информационные технологии расчета и проектирования строительных конструкций. Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. 889 с.
33. ДБН В.1.2-14-2018 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд.[На заміну ДБН В. В.1.2-14-2009; чинний від 2019-01-01]. К.: Мінрегіон України, 2018. – 29 с. – (Державні будівельні норми України)

34. ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування.[чинний від 2015-01-01]. К.: Мінрегіон України, 2014. – 198 с. – (Державні будівельні норми України)
35. ДСТУ-Н Б В.2.6-87:2009 Настанова з проектування конструкцій будинків із застосуванням сталевих тонкостінних профілів.[чинний від 2010-08-01]. К.: Мінрегіон України, 2010. – 55 с. – (Національний стандарт України)
36. ДБН В.1.2-2:2006 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. № 1. [На заміну СНиП 2.01.07-85; чинний від 2007-10-01]. К.: Мінрегіон України, 2006. – 75 с. – (Державні будівельні норми України)
37. Енджиевский Л.В., Тарасов А.В. Численные и экспериментальные исследования рамы каркаса здания из тонколистовой оцинкованной стали. *Промышленное и гражданское строительство*. 2012. №10. С. 52-54.
38. Еремеев П.Г., Киселев Д.Б., Аременский М.Ю., Бурлай С.И. Натурные испытания фрагмента арочного свода из холодногнутого тонколистового стального профиля. *Монтажные и специальные работы в строительстве*. 2004. № 12. С. 5-8.
39. Еремеев П.Г., Киселев Д.Б., Аременский М.Ю., Бурлай С.И. Натурные испытания фрагментов панелей из холодногнутого тонколистового стального профиля для арочных сводов. *Монтажные и специальные работы в строительстве*. 2004. № 9. С. 10-13.
40. Еремеев П.Г. Особенности проектирования уникальных большепролетных зданий и сооружений. *Строительная механика и расчет сооружений*. 2005. № 1.
41. Еремеев П.Г. Предотвращение лавинообразного (прогрессирующего) обрушения несущих конструкций уникальных большепролетных сооружений при аварийных воздействиях. *Строительная механика и расчет сооружений*. 2006. № 2.
42. Жабинский А.Н., Старовойтов А.Ф. Моделирование арочных покрытий из тонкостенных холодногнутого профиля. *Техническое нормирование, стандартизация и сертификация в строительстве*. 2012. № 4. С. 20-21.
43. Жидков, В.Д. Исследование работы алюминиевого складчатого свода из ромбовидных элементов: дис. ...канд. тех. наук: 05.23.01. М., 1965. 157 с.

44. Жидков, К.Е. Разработка и исследование арочных конструкций с листовой пространственной решеткой: дис. ...канд. тех. наук: 05.23.01. Липецк, 1999. 173 с.
45. Зверев В.В., Жидков К.Е., Салдаев А.Ю. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния элементов покрытия бескаркасного складчатого здания типа «Эксергия». *Научный вестник воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Стр. и архитектура*. Воронеж: ВГАСУ, 2012. №2. С. 9-15.
46. Зверев В.В. Эффективные строительные металлоконструкции на основе объемно-формованного тонколистового проката: дис. ...д-ра. тех. наук: 05.23.01. Л., 2000. 396 с.
47. Карманов И. В., Зверев В.В., Жидков К.Е., Подзоров А.В. Конструктивные решения бескаркасных арочных зданий. Современное состояние и перспективы развития. *Строительная механика и расчет сооружений*. 2015. №5. С. 58-62.
48. Каспэ И.Б., Тарасов А.М., Голенкин В.В., Айрумян Э.Л., Федорова Н.А., Линник С.Д. Волна– 360: быстромонтируемое многоцелевое здание *Транспортное строительство*. 1990. №11. С. 37-39.
49. Кашеварова Г.Г., Пепеляев А.В. Исследование проблемы защиты типовых жилых зданий от прогрессирующего разрушения *International journal for computational civil and structural engineering*. М. 2008. Vol. 4, Issue 2. С. 69 - 70.
50. Каширина, О.В. Предельные гибкости сжатых пластинчатых элементов составных балок и колонн: дис. ...канд. тех. наук: 01.02.03, 05.23.01. Ростов-на-Дону, 1983. 169 с.
51. Копаница Д.Г., Мелёхин Е.А. Методика экспериментальных исследований узлов бескаркасных покрытий цилиндрических оболочек из гнуто-листовых тонкостенных профилей. *Вестник ТГАСУ*. Томск: ФГБОУ ВПО ТГАСУ, 2015. №1. С. 102-114.
52. Коренев Р. В. Вплив віртуальних недосконалостей на напружено-деформований стан і стійкість спеціальних оболонкових систем. *Комунальне господарство міст*. 2018. Вип. 140. С. 109–119.
53. Коренев Р. В. Вплив діафрагм на напружено-деформований стан та стійкість аркових систем спеціального типу. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія : Теорія і практика будівництва. 2019. Вип. 912. С. 75–83.

54. Красотина, Л.В. Выбор параметров сборных профилированных несущих оболочек по критериям прочности и жесткости: дис. канд. тех. наук: 01.02.06. Омск, 2014. 143 с.
55. Кудрявцев В.А. Предельные состояния гофрированных пластин в конструкциях пролетных строений цельнометаллических транспортных галерей: дис. ...канд. тех. наук: 05.23.01. Ленинград, 1984. 167 с.
56. Кузнецов И.Л., Исаев А.В., Гимранов Л.Р., Причины обрушения бескаркасного арочного сооружения пролетом 30 м. *Известия КазГАСУ*. 2011. №4. С.166–170.
57. Кунин Ю.С., Колесов А.И., Ямбаев И.А., Морозов Д.А. Усиление и расчет стальных конструкций из тонкостенных холодногнутых профилей с учетом податливости узловых соединений. *Вестник МГСУ*. 2012. №11. С. 74-81.
58. Кущенко В.Н. Основные принципы обеспечения безопасности строительных конструкций. *Металлические конструкции*. Макеевка: ДонНАСА. 2009. № 2. С. 147 - 155.
59. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука, 1965. 202с.
60. Лантух–Лященко А. И. Оценка надежности сооружения по модели марковского случайного процесса с дискретными состояниями // *Автомобильные дороги и дорожное строительство*. 1999, вып. 57. С. 183–188.
61. Лехницкий С. Г. Анизотропные пластинки. Ленинград: ОГИЗ, 1947. 355 с.
62. Липленко М.А., Кунин Ю.С. Механические характеристики стали тонкостенных холодногнутых профилей бескаркасных зданий. *«Заводская лаборатория. Диагностика материалов»*. 2016. № 4, том 82. С.47-52.
63. Липленко М.А., Айрумян Э.Л. Особенности работы бескаркасных арочных покрытий из стальных холодногнутых профилей. *Промышленное и гражданское строительство*. 2011. №6. С. 42-44.
64. Лукин А.О. К уточненному расчету напряженно-деформированного состояния балок с гофрированной стенкой. *Строительная механика и расчет сооружений*. 2013. №5. С. 10-17.
65. Марцинкевич Д.В. Исследования прочности, жесткости и местной устойчивости вальцованных профилированных листов с поперечно

- рифленными гранями: дис. ...канд. тех. наук: 05.23.01. Екатеринбург, 1995. 194 с.
66. Моисеев, В.И. Расчет устойчивости пластинок в металлических конструкциях за пределом упругости на основе принципа равноустойчивости стержня и элементов поперечного сечения: автореф. дис. ...д-ра. тех. наук: 05.23.01. М., 1989. 42 с.
67. Назаров Ю.П., Городецкий А.С., Симбиркин В.Н. К проблеме обеспечения живучести строительных конструкций при аварийных воздействиях. *Строительная механика и расчет сооружений*. 2009. № 4. С. 5 - 9.
68. Натурные испытания деформативности бескаркасной оболочки пролетом 15 м. Расчет бескаркасных оболочек с учетом результатов испытаний: отчет о НИР / Айрумян Э.Л. Москва: ЦНИИПСК им. Мельникова, 1993. 16 с.
69. Новиков, Р.М. О несущей способности гофрированных листов. *Строительная механика и расчет сооружений*. 1973. №4. С. 45-48.
70. Огневой В.Г. Исследование работы стальных колонн одноэтажных промышленных зданий с тонкой гофрированной стенкой: автореф. дис. ...канд. тех. наук: 05.23.01. В., 1994. 18 с.
71. Ольков Я.И., Степаненко А.Н. О расчете металлических балок с тонкой гофрированной стенкой. *Известия вузов. Строительство и архитектура*. 1972. №10. С. 12-15.
72. Остриков Г.М., Максимов Ю.С., Долинский В.В. Исследование несущей способности стальных двутавровых балок с вертикально-гофрированной стенкой. *Строительная механика и расчет сооружений*. 1983. №1. С. 68-70.
73. Перельмутер А.В. Об оценке живучести несущих конструкций. *Металлические конструкции. Работы школы проф. Н. С. Стрелецкого*. М.: МГСУ, 1995. С. 62–68.
74. Перельмутер, А.В. О нормировании уровня риска. *Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт*. № 2/14(530) апрель-июнь, 2007. С. 160-169.
75. Першаков В. М., Барабаш М.С., Белятинський А.О., Лисницька К.М. Проблеми протидії конструкцій прогресуючому обваленню будівель та споруд : монографія. К. : НАУ, 2015. 456 с.

76. Петрова Е.А. Напряженно-деформированное состояние и рационализация параметров трехслойных панелей: дис. ...канд. тех. наук: 05.23.01. Харьков, 2015. 228 с..
77. Пичугин С. Ф. Развитие расчёта надёжности – важное направление совершенствования металлоконструкций. *Теория и практика металлических конструкций: Сб. науч. трудов*. Макеевка, 1997. Т.2. С. 3–6
78. Пічугін С.Ф., Ключко Л.А. Питання прогресуючого руйнування будівель і споруд. *Проблеми й перспективи розвитку академічної та університетської науки* : зб. наук. пр. за матеріалами XI Міжнар. наук.-практ. конф., 20 – 21 груд. 2018 р. Полтава : ПолтНТУ, 2018. С. 213–216.
79. Популова Г.Ю. Исследование работы длинных цилиндрических оболочек из стальных вальцованных профилированных листов: дис. ...канд. тех. наук: 05.23.01. Екатеринбург, 1999. 188с.
80. Пособие по проектированию жилых зданий. Вып. 3. Конструкции жилых зданий (к СНиП 2.08.01-85). – ЦНИИЭП жилища. – М. – 1986. – 305с.
81. Прицкер А. Я., Аденський В.А., Фрідман М.С. Бескаркасные складчатые конструкции. Киев: Будівельник, 1991. 88 с.
82. Провести натурные испытания металлических конструкций хранилища арочного типа и разработать рекомендации по их расчету и применению с учетом результатов испытаний: отчет о НИР / Айрумян Э.Л. Москва: ЦНИИПСК им. Мельникова, 1987. 88 с.
83. Прочность, устойчивость, колебания: справочник в 3 т./ «МАШИНОСТРОЕНИЕ»: 1968. Т.3 / общ. ред. И.А. Биргер, Я.Г. Пановко. 568 с.
84. Пятикрестовский К.П., Лебедева И.В. Исследование живучести панели и цилиндрических оболочек из дерева на статические и динамические запроектные воздействия. *Строительная механика и расчет сооружений*. – 2007. № 2. С. 56 - 61.
85. Разработать методику расчета и подготовить методику и программу испытаний хранилища арочного типа из тонколистовой стали под нагрузку четвертого снегового района: отчет о НИР / Чулков П.П. Москва: ЦНИИПСК им. Мельникова, 1986. 61 с.
86. Резнік П.А., Коренєв Р.В. Особливості використання ефективних оболонкових систем у промисловому та цивільному будівництві. *Шляхи*

- підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. Збірник наукових праць. 2018. №35. С. 123–128.*
87. Резнік П.А., Коренев Р.В. Розрахунок та аналіз безкаркасних аркових систем, виконаних із тонкостінних холоднодеформованих профілів. *Наука та будівництво. 2018. №1. С. 100–110.*
88. Резнік П.А., Коренев Р.В. Вплив конструктивних особливостей на напружено-деформований стан спеціальних оболонкових систем. *Науковий вісник будівництва. 2018. Том 91, №1. С. 317–325*
89. Резнік П.А., Коренев Р.В. Особливості деформування споруди оболонкового типу в умовах динамічного навантаження. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2018. Вип. 178. С.78–88.*
90. Резнік П.А., Гапонова Л.В., Гребінчук С.С., Коренев Р.В. Експериментально-теоретичні випробування ефективності конструктивних заходів щодо запобігання прогресуючого обвалення металевих оболонок спеціального виду. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2019. Вип. 185. С. 71–81.*
91. Решение от 22 декабря 2014 г. по делу № А08-7248/2013. Судебные и нормативные акты РФ (СудАкт) : веб-сайт. URL : <https://sudact.ru/arbitral/doc/hNCSFj8JaTbG/> (дата звернення: 12.03.2018).
92. Романюк В.В., Василенко В.Б., Супрунюк В.В. Несуча здатність перфорованих прогонів Z-подібного профілю за косоного згину: монографія. Рівне: НУВГП, 2017. 206 с.
93. Романюк В.В., Супрунюк В.В., Особливості розрахунку прольотних конструкцій з перфорованих елементів за складного напружено-деформованого стану. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. Харків: УкрДУЗТ, 2018. Вип. 175. С. 98 – 108.*
94. Романюк В.В., Супрунюк В.В. Експериментальні дослідження прольотних конструкцій з перфорованих елементів за складного напружено-деформованого стану. *Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірник. К.: КНУБА, 2019, Вип. 103. С. 189 – 200.*
95. Ростовцев, Г.Г. Строительная механика самолета. Часть 2. Л.: ОНТИ, 1936. 578 С.
96. Соколов П.А. О напряжениях в сжатых пластинках после потери устойчивости. *Труды НИИ судостроения. 1932. Вып. 7. 68 с.*

97. Степаненко А. Н. Стальные двутавровые стержни с волнистой стенкой. Хабаровск: ХГТУ, 1999. 119 с.
98. СТО 82866678-2-06-2016 Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых профилей и гофрированных листов. Правила расчета и проектирования. – Москва: ЦНИИПСК им. Мельникова, 2016. – 118 с.
99. СТО 36554501-014-2008 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. М.: ФГУП «НИЦ «Строительство». – 2008. – 16 с.
100. Тамплон Ф.Ф. Металлические ограждающие конструкции промышленных зданий для районов с суровым климатом: дис. ...д-ра. тех. наук: 05.23.01. Свердловск, 1991. 565 с.
101. Тамразян А.Г., Мкртычев О.В., Расторгуев Б.С. и др. Разработка методики расчета на живучесть зданий и сооружений при техногенном воздействии. Часть 7. Договор № 19-с/04. 2005.
102. Тамразян А.Г., Степанов А.Ю. Безопасность конструкций на основе анализа рисков. Обеспечение устойчивости элементов зданий. *Безопасность строительных конструкций*. 2008. С. 34 - 36.
103. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. М.: Наука, 1966. 636 с.
104. Тимошенко С.П. Устойчивость упругих систем. М.: ГИТТЛ, 1955. 568 с.
105. Трофимов, В. И. Многогранный алюминиевый свод из ромбических элементов. *Строительная механика и расчет сооружений*. 1967. №5. С. 21-24.
106. Тугаев А.С. Устойчивость пластин и тонкостенных стержней: дис. ...канд. тех. наук: 01.02.03. Харьков, 1984. – 49 с.
107. Тур В.В. Проектные стратегии защиты конструктивных систем от прогрессирующего обрушения в рамках требований международных нормативных документов. *Сб. науч. тредов междунар. Симпозиума «Современные металлические и деревянные конструкции (нормирование, проектирование и строительство)»*. Брест. 2009. С. 302 - 314.
108. Туснин А.Р. Расчет и проектирование конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля: дис. ...д-ра. тех. наук: 05.23.01. Москва, 2003. 427 с.

109. Усовершенствование и применение фотограмметрических и оптикомеханических методов и средств измерений для дистанционного исследования деформаций при испытаниях строительных конструкций: отчет о НИР / Барсков Д.П. Москва: ЦНИИПСК им. Мельникова, 1989. 340 с.
110. Экспериментальное исследование в натуральных условиях работы конструкции складчатого здания массового применения: отчет о НИР / Осокина С.К. Москва, Киев: Проектстальконструкция, 1978. – 102 с.
111. Шкинев А.Н. Аварии в строительстве. – 4-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат. 1984. 320 с.
112. Шмуклер В.С., Климов Ю.А., Бурак Н.П. Каркасные системы облегченного типа: монография Х.: Золотые страницы, 2008. 335 с.
113. Шмуклер В.С. Оптимизация параметров строительных конструкций в условиях регулирования их напряженно-деформированным состоянием. *Коммунальное хозяйство городов: науч.-техн. сб.* К: Техніка, 1997. Вип. 8. С. 3-14.
114. Шмуклер В.С., Какшар Ф., Вассим И. Рационализация параметров неодносвязной балки-стенки. *Науковий вісник будівництва. – Харьков: ХО АСУ, 2004. С. 202-213.*
115. Шмуклер В.С., Лугченко О.І., Петрова О.О. Експериментальні дослідження стінових та покрівельних сендвіч-панелей серії Алюотерм. *Комунальне господарство міст. Сер.: Технічні науки та архітектури, 2014. С. 11 – 20.*
116. Шимановський О.В. Методи та практичні заходи з ослаблення наростаючого руйнування сталевих конструкцій. *Промислове будівництво та інженерні споруди. 2019. №1. С.2-14.*
117. Шимановський О.В., Гордеев В.М., Корольов В.П., Оглобля О.І. Забезпечення надійності й безпечної експлуатації будівельних металоконструкцій. *Будівництво України. 2004. №2. С. 15–18.*
118. Шимановський А.В., Гордеев В.М., Королев В.П., Оглобля А.И., Перельмутер А.В. Нормативное обеспечение безопасности зданий и сооружений при оценке остаточного ресурса металлоконструкций. *Металлические конструкции. Взгляд в прошлое и будущее : сб. труд. VIII Укр. науч.-технич. конф. К.,2004. С. 417–428*

119. Abovskiy N.P. Energy principle and its application for the creation of controlled structures. *Spatial structures in new and renovation projects of Buildings and construction*. Proceeding international congress ICSS-98 / June 22-26, Moscow. Russia, 1998. P. 307-313.
120. AISI S100-2012. North American Specification for the Design of ColdFormed Steel Structural Members, 2012 Edition. American Iron and Steel Institute (AISI), Washington, DC.
121. ANSYS, Inc., “ANSYS 15 Help”, 2014.
122. Building Regulations. Disproportional collapse // *The Structural Engineer*. – 1993. – Vol. 71, № 23.
123. Babaev V., Ievzerov I., Evel S., Lantoukh-Liashchenko A., Shevetovsky V., Shimanovskiy O., Shmukler V., Sukhonos M. Rational Design of Structural Building Systems. Berlin, Germany. 2019. 384p. ISBN 978-3-86922-733-7.
124. Canisius T.D. Robustness of structural systems – a new focus for the joint committee on structural safety (JCSS). *Applications of statistics and probability in civil engineering*, London. 2007. 8 p.
125. Crawford J.E. Retrofit methods to resist progressive collapse. USA. 2002. 56 p.
126. Crowder B. Definition of progressive collapse. *Navfac*. 2005. 10 p.
127. Crowder B. Devil in details. *Navfac*. 2005. 12 p.
128. Dusenberry D. Review of existing guidelines and provisions related to progressive collapse. *Multihazard Mitigation Council of the National Institute of Building Standards*, Washington. 2003. P. 1 - 31.
129. Ellingwood B., Smilowitz R., Dusenberry D., Lew H. Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings. *National institute of standards and technology*. – 2008.
130. Ellingwood, B. R. Load and Resistance Factor Criteria for Progressive Collapse Design. *Georgia Institute of technology*, Atlanta, USA, 2005
131. Ellingwood B., Leyendecker E. Approaches for design against progressive collapse. *J. Struct. Div. ASCE 104(3)*. 1978. P. 413 - 423.
132. Ellingwood B. Acceptable risk bases for design of structures. *Progress in Struct. Eng. and Mat.* 3(2). 2001. P. 170 - 179.

133. EN 1993-1-3:2006. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-3: General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. CEN, Brussels.
134. Gross J., McGuire W. Progressive collapse resistant design. *Journal of structural engineering*. 1983. Vol. 109, № 1. P. 1 - 15.
135. JCSS and IABSE. Robustness of Structures. Workshop, Building Research Establishment, Watford, UK. 2005.
136. Koreniev R., Reznik P., Grebenchuk S., Bondarenko V. Research of the specific steel shells progressive collapse prevention. *Academic journal Series: Industrial machine building, civil engineering*. 2019. Issue 1(52). P. 58–64.
137. Karman T., Sechler E.E., Donnell L.H. The strength of thin plates in compression. *Transactions, ASME*. 1932. V. 54. P. 53-57.
138. Makelainen P., Hyvarinen J. Stability of arched roof made of profiled steel sheeting. *Proceedings of the Tenth International Specialty Conference on Cold-formed Steel Structures*. St. Louis, Missouri, 1990. pp. 131-148.
139. Piekarczyk A., Malowany K., Wiech P., Kujawinska M., Sulik P. Stability and bearing capacity of arch-shaped corrugated shell elements: experimental and numerical study. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. 2015. V. 63, №1. P. 113–123.
140. Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects. GSA. USA. 2003. 125 p.
141. Stewart M.G., Melchers R.E. Probabilistic risk assessment of engineering systems // Chapman & Hall, London. – 1997.
142. Structural analysis software for the automatic building machine: user guide. Reston: M.I.C. Industries, Inc., 2009. – 75 pp.
143. Sweeney S., Briassoulis D., Kao A. Evaluation of K-Span as a rapidly erectable lightweight mobilization structure. *US Army Corps of Engineers Construction Engineering Research Laboratory, Technical Report M-91/06*, 1991. 64 pp.
144. The avoidance of progressive collapse: regulatory approaches to the problem. National Bureau of Standards Washington, Report number DC 20234 - GCR. 1975. P. 75 - 78.
145. Taylor D.A. Progressive Collapse. *Canadian journal of civil engineering*. 1975. Vol. 2, № 4.

146. Walentynski R., Cybulski R., Koziel K. Achilles heel of the ABM 120 double corrugated profiles. *Proceedings of the 9th International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings*. Bratislava: Faculty of Civil Engineering STU Bratislava Slovak Society of Mechanics SAS, 2011.
147. Wei-Wen Yu, Roger A. LaBoube. Cold-formed steel Design. N.Y.: John Wiley & Sons, 2010. 489 pp.
148. Weisberg M. Robustness Analysis. University of Pennsylvania, 2005.
149. Wimsatt W.C. Robustness, reliability, and over determination. *Scientific inquiry and the social sciences*. San Francisco: Jossey-Bass. 1981. P. 124 - 163.
150. Winter G. Strength of thin steel compression flanges. *Transactions*. 1947.V. 112
151. Wu Li-Li, Xuan-Neng Gao, Yong-Jiu Shi, YuanQing Wang Theoretical and experimental study on interactive local buckling of arch-shaped corrugated steel roof. *Steel Structures*. 2006. №6. P. 45-54.
152. Xiliang L., Yong Zh., Fuhai Zh., Experimental Study on Full-sized Models of Arched Corrugated Metal Roof. *Tianjin: Department of Civil Engineering Tianjin University*, 2000.
153. Yagodich, J.Y. Numerical evaluation of thin-shelled structural panels: Master of Science in Mechanical Engineering/University of Pittsburgh, 2003. 55 pp