

УДК 69.07

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПРОФИЛИРОВАННОГО НАСТИЛА

**В.Т. Бондарь, Т.В. Назмеева**

*ООО «НТП «СтройСофтКонсалтинг», г. Уфа (Российская Федерация)*

**Аннотация.** Статья посвящена особенностям различных методик определения несущей способности профилированного настила. Рассмотрены методики, описанные в нормативно-технической документации, экспериментальные методы и методы математического моделирования. В статье показаны особенности и достоинства и недостатки каждого метода определения несущей способности профилированного настила на конкретных примерах. В ходе анализа результатов определения несущей способности профилированного настила по разным методам было получено расхождение 20% - 30%, в качестве эталона для сравнения принята несущая способность, определенная в соответствии с экспериментом. Качественное схождение с экспериментом дают метод расчета по СП 260.1325800.2016 и МКЭ.

**Ключевые слова:** профилированный настил, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, несущая способность.

**Ссылка для цитирования:** Бондарь В.Т., Назмеева Т.В. Сравнительный анализ методов определения несущей способности профилированного настила // Инженерные исследования. 2023. №5 (15). С. 12-20. EDN: MUGFMH

## COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR DETERMINING THE BEARING CAPACITY OF PROFILED FLOORING

**V.T. Bondar, T.V. Nazmeeva**

*LLC NTP StroySoftConsulting, Ufa (Russian Federation)*

**Abstract.** The article is devoted to the peculiarities of various methods for determining the bearing capacity of profiled flooring. The methods described in the normative and technical documentation, experimental methods and methods of mathematical modeling are considered. The article shows the features and advantages and disadvantages of each method for determining the bearing capacity of profiled flooring using specific examples. During the analysis of the results of determining the bearing capacity of profiled flooring by different methods, a discrepancy of 20% - 30% was obtained, and the bearing capacity determined in accordance with the experiment was used as a reference for comparison. Qualitative convergence with the experiment is given by the calculation method according to SP 260.1325800.2016 and FEM.

**Keywords:** profiled flooring, stress-strain state, finite element method, bearing capacity.

**For citation:** Bondar V.T., Nazmeeva T.V. Comparative analysis of methods for determining the bearing capacity of profiled flooring // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2023. No.5 (15). Pp. 12-20. EDN: MUGFMH

## ВВЕДЕНИЕ

Согласно ГОСТ 24045-2016 «Профили стальные листовые гнутые с трапециевидными гофрами для строительства. Технические условия» профилированный настил (профлист, гофрированные листы) представляет собой холодногнутые листовые профили с трапециевидной формой гофра, изготовленные из тонколистового оцинкованного проката путем холодного профилирования на профилегибочных станках. Как правило профилированный настил используют в составе несущих и ограждающих конструкций - кровли и стен. Также данный вид изделий используется при устройстве монолитных железобетонных перекрытий в качестве несъемной опалубки и в составе сталежелезобетонных перекрытий как составная часть перекрытия. Из профилированного настила возводят также арочные конструкции [1, 2].

Для изготовления профилированного настила используют оцинкованный прокат по ГОСТ 14918-2020 «Прокат листовой горячеоцинкованный. Технические условия» толщиной от 0,4 до 1,5 мм с пределом текучести стали от 220 до 420 МПа при относительном удлинении от 14% до 22%.

Широкое применение профилированного настила обусловлено сочетанием в нем таких качеств как: небольшой вес квадратного метра, достаточно высокая жесткость, антикоррозионная стойкость, при условии сохранения цинкового покрытия, и несущая способность. При использовании в перекрытиях профилированный настил за счет геометрии гофров позволяет создать необходимый диск жесткости, обладая сам при этом малым весом, что отличает его от монолитных железобетонных перекрытий.

Как правило под определением несущей способности профилированного настила понимают определение предельной нагрузки ( $\text{Н/мм}^2$ ,  $\text{кг/м}^2$ ,  $\text{Н/м}^2$ ), которую сможет воспринять профлист в зависимости от типа профиля (геометрия гофра), шага опор и варианта укладки (однопролетная, двухпролетная или многопролетная схема), шаг опор может варьироваться от 1 до 6 м.

На данный момент существует три основных метода определения несущей способности профилированного настила: а) расчетный, расчет несущей способности по методикам, приведенным в действующих нормативно-технических документах; б) экспериментальный, определение несущей способности по результатам натурных испытаний, в) численный, определение несущей способности в результате моделирования при помощи программных комплексов.

В настоящее время методика расчета несущей способности профилированного настила (профнастил, профлист) описана в двух действующих сводах правил добровольного применения СП 260.1325800.2016 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования» (СП 260) и СП 294.1325800.2017 «Конструкции стальные. Правила проектирования» (СП 294). Оба нормативных документа равноправны по значению и выбор остается на стороне проектировщика.

В связи с тем, что профилированный настил изготавливают как правило толщиной не более 1,5 мм, конструкции из профнастила по напряженно-деформированному состоянию согласно СП 260.1325800 относят к 4-му классу НДС, когда потеря местной устойчивости элементов происходит раньше потери прочности. Поэтому конструкции из профнастила относят к тонкостенным конструкциям и расчет таких конструкций следует вести в соответствии с требованиями СП 260.1325800. Согласно методике СП 260 выполняется определение эффективных характеристик сечений путем редуцирования сечения за счет участков, теряющих местную устойчивость. Был разработан ГОСТ Р 58901-2020 «Профили стальные листовые гнутые с трапециевидными гофрами для строительства. Методика расчета несущей способности», который содержит пример расчета по методике СП 260.

Согласно методике СП 294 геометрические характеристики профнастила определяются с учетом особенностей работы тонколистовых конструкций в сжатых волокнах сечений, сжатые полки учитываются в расчете в значении  $60t$  при определении моментов инерции и  $40t$  при определении моментов сопротивления, где  $t$  - толщина листа. Получается, что определить несущую способность настила по данному документу возможно только для ограниченного количества типоразмеров настила.

Таким образом целью данного исследования является сравнение существующих на данный момент методов определения несущей способности профилированного листа. Соответственно необходимо описать используемые методы определения несущей способности, а также сравнить качественные и количественные результаты определения несущей способности по указанным выше методам друг с другом и с неким эталонным методом. В качестве результатов эталонного (точного) метода определения несущей способности примем результаты несущей способности профилированного листа, определенные экспериментальным путем.

## СРАВНЕНИЕ НОРМАТИВНЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПРОФИЛИРОВАННОГО НАСТИЛА

Авторами статьи проводится научно-исследовательская работа по сравнению и гармонизации методик определения несущей способности профнастила, выполняется сравнительный анализ результатов, полученных по разным методикам. В данной статье приводится часть результатов НИР.

Так, в ходе выполнения работы был проведен сравнительный анализ несущей способности профнастила марки СТ 144-860 российского производителя профлиста компании «Сталлин». Результаты расчета приведены в табл. 1 и табл. 2. По результатам расчета расхождение составило от 11 до 19%. Расхождение в результатах расчета для двухпролетной схемы профилированного настила марки СТ 144-860 стали С280 представлено в таблице 1. Длина пролета в схеме составляет 6 м, соответственно полная длина профилированного настила составляет 12 м. Отметим, что сравнивались результаты расчета несущей способности при расчете элементов на изгиб. Наибольший изгибающий момент наблюдается в опоре, а значит сравнивается результат расчета на изгибающий момент в опоре.

**Таблица 1.** Результаты расчета несущей способности по двум методикам СП 260 и СП 294 при расчете профилированных настилов на изгиб.

**Table 1.** The results of the calculation of the bearing capacity according to two methods SP 260 and SP 294 in the calculation of profiled flooring for bending

Профиль	Несущая способность, кПа, по:		Расхождение, %
	СП 260	СП 294	
СТ144-860-0,8	2,12	2,57	17,51
СТ144-860-0,9	2,67	2,88	7,29
СТ144-860-1,0	2,94	3,20	8,13
	Среднее:		10,97

Из табл. 1 можно заметить, что расхождение тем меньше, чем толще профлист и соответственно меньше редуция сечения.

Как было указано выше СП 294.1325800.2017 имеет ограниченный ряд рассчитываемых профилей. Так по СП 294 невозможен расчет стенки профлиста на устойчивость в опоре для данной конфигурации сечения профлиста. В СП 260.1325800.2016 такой расчет возможен, причем для большого количества профилированных настилов. В табл. 2 приведено сравнение несущей способности по п.23.3.2 СП 294.1325800.2017 и по п.7.7.12 СП 260.1325800.2016.

**Таблица 2.** Результаты расчета несущей способности по двум методикам по п.23.3.2 СП 294.1325800.2017 и по п.7.7.12 СП 260.1325800.2016.

**Table 2.** The results of the calculation of the bearing capacity according to two methods according to clause 23.3.2 of SP 294.13258.2017 and clause 7.12 of SP 260.1325800.2016.

Профиль	Несущая способность, кПа, по		Расхождение, %
	СП 260	СП 294	
СТ144-860-0,8	1,96	2,57	23,74
СТ144-860-0,9	2,39	2,88	17,01
СТ144-860-1,0	2,62	3,20	18,13
	Среднее:		19,62

## НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Не все изготавливаемые марки профилированных настилов подходят для решения возникающих задач в строительстве. Область применения конструктивных элементов с использованием профлиста растет [3]. Например, за последние 5 лет выросло использование профилированного настила в качестве

несъемной опалубки для перекрытий и покрытий. В таких перекрытиях и покрытиях профилированный настил укладывают по балкам, пролет которых может варьироваться, поэтому требуется увеличение жесткости настила и уменьшение высоты гофр. Большая эффективность таких решений достигается при условии, что жесткость настила достаточна и не требует установки телескопических стоек при монтаже. Поэтому производители профлиста разрабатывают новые, более эффективные решения, для внедрения которых предприятиям-изготовителям требуется подтвердить несущую способность их продукта. В данном случае расчетная методика не всегда оправдана и производитель использует метод натуральных испытаний. Правила проведения натуральных испытаний профилированного настила приведены в ГОСТ Р 58900-2020 «Профили стальные листовые гнутые с трапециевидными гофрами для строительства. Метод испытаний на несущую способность», в котором рассматривается шесть основных схем испытаний по разрезной и неразрезной схемам, от равномерной и сосредоточенной нагрузок. Описан подробно алгоритм испытаний и правила оценки результатов испытаний.

Для определения несущей способности нового типа профнастила компания «ЛИНО» (Россия) совместно с ЦНИИСК им В.А. Кучеренко в 2023 году провели согласно ГОСТ Р 58900-2020 испытания профилированного настила марки СТ с различной высотой гофры по двухпролетной схеме с одной неподвижной и двумя подвижными опорами, длина одного пролета 6 м. Конструкция загружалась равномерно распределенной нагрузкой посредством тарированных мешков с песком, (рис. 1.) Нагружение производилось поэтапно ступенями, показания приборов считывались в начале и конце каждой ступени. Потеря несущей способности профилированного настила в данном испытании характеризовалась двумя этапами: потеря устойчивости стенки гофрированного листа от местной нагрузки на средней опоре, (рис. 2) и потеря прочности гофрированного листа в середине пролета при увеличении нагрузки. Что подтверждает, что установка профлиста в конструкции по двухпролетной схеме является самой нежелательной, так как потеря устойчивости стенки профилированного настила на опоре происходит раньше, чем другие виды потери несущей способности, рекомендована однопролетная или многопролетная установка. Согласно п. 9.6 ГОСТ Р 58901-2020 рекомендуется применять неразрезную трехпролетную схему работы профлиста.



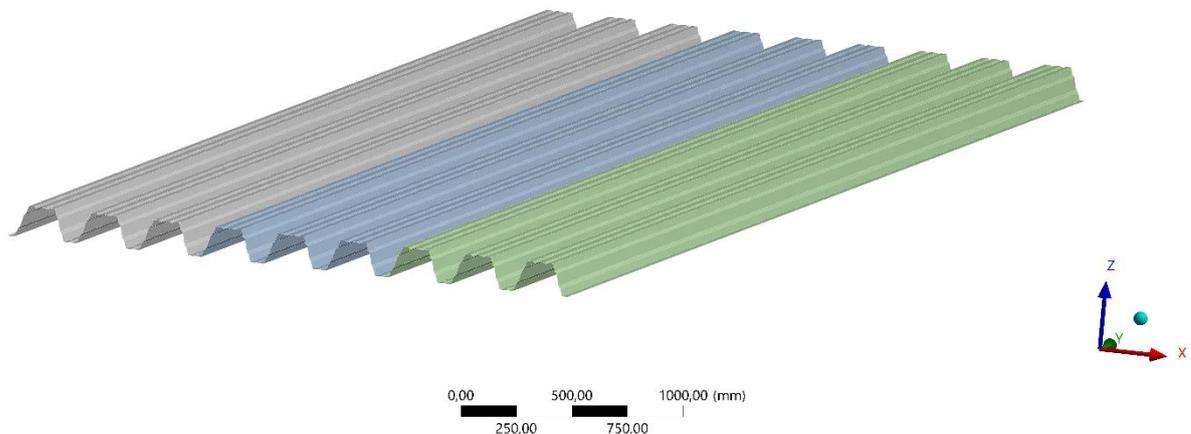
**Рис. 1.** Испытательный образец при определении несущей способности профилированного настила компании «ЛИНО» (Россия)

**Fig. 1.** A test sample for determining the bearing capacity of profiled flooring from LINO (Russia)



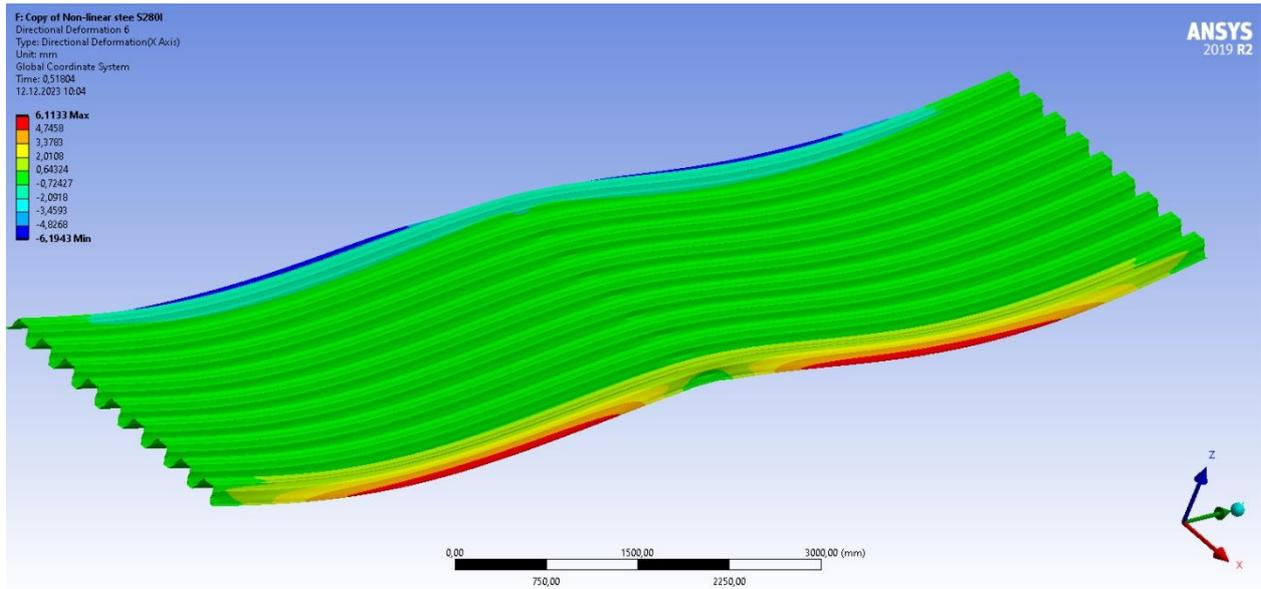
**Рис. 2.** Испытательный образец после локальной потери устойчивости на опоре  
**Fig. 2.** Test sample after local loss of stability on the support

В ходе выполнения работы авторами статьи проведен численный анализ и созданы численные модели для определения несущей способности профлиста. Численные модели выполнены в нелинейной постановке в ПК ANSYS для профилированного листа марки СТ144-860-1,0 из стали С280. На (рис.3.) представлена конечно-элементная (КЭ) схема исследуемого профилированного настила. Данная схема соответствует экспериментальному образцу (рис.1., рис.2).

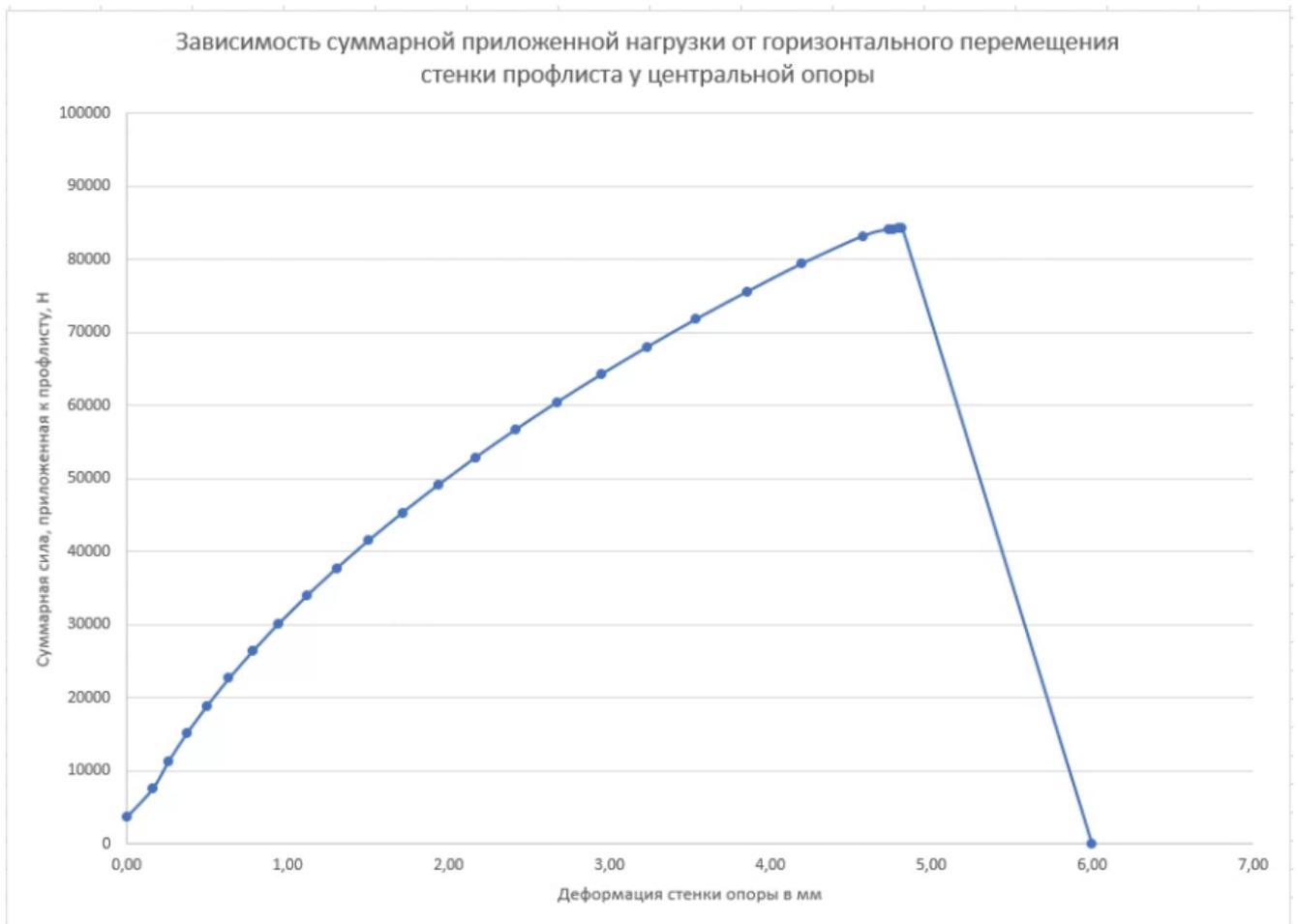


**Рис. 3.** Геометрия участка профилированного листа в ПК ANSYS  
**Fig. 3.** Geometry of the section of the profiled sheet in the ANSYS

В КЭ схеме разрушение образца происходит вследствие потери устойчивости стенки профилированного настила в средней опоре. Деформация стенки профилированного настила в средней опоре представлена на (рис.4). Данный факт подтверждается графиком зависимости суммарной приложенной нагрузки от перемещения элемента стенки в опоре (рис.5.)



**Рис. 4.** Перемещение в КЭ схеме вдоль оси X  
**Fig. 4.** Moving in the KE scheme along the X axis



**Рис. 5.** Зависимость суммарной приложенной нагрузки от горизонтального перемещения стенки профлиста у центральной опоры

**Fig. 5.** Dependence of the total applied load on the horizontal movement of the wall of the profiled sheet at the central support

На рис.4. Заметно, что при достижении определенной нагрузки, происходит потеря устойчивости образца. Так при задании общей нагрузки в 189000Н на 9 гофров расчет прерывается на нагрузке в

84300 Н, т.е. распределенной нагрузке в 7025 Н/м или 716,1 кг/м происходит потеря устойчивости в профилированном листе, а именно в стенке опоры. Для участка, состоящего из 3х листов профнастила с шириной каждого листа 0,86 м общая ширина составляет 2,58 м. Данная распределенная нагрузка в 716,1 кг/м соответствует нагрузке 277,6 кг/м<sup>2</sup> (2,73 кПа), что, на 5 % выше расчета по пособию, утверждающему, что  $p_2=266.7$  кг/м<sup>2</sup> (2,62 кПа).

В общем и целом, погрешность КЭ схемы и расчета по СП 260.1325800.2016 не существенная. Расхождение наблюдается со значениями, полученными экспериментальным путем. Указаны значения критической нагрузки, полученные по формулам СП 260, СП 294, МКЭ, экспериментом (табл. 3). Расхождение значений потери устойчивости эксперимента от значений, полученных по СП 260.1325800.2016 или от МКЭ, можно объяснить большим пределом текучести стали в эксперименте, а также раскреплением гофров профлиста, которое обеспечивается грузом через трение.

**Таблица 3.** Значения несущей способности профлиста с маркой стали С280

**Table 3.** The values of the bearing capacity of the profiled sheet with the C280 steel grade

Параметр	СП 260	СП 294	ПК ANSYS	Эксперимент
Распределенная нагрузка, при которой происходит разрушение образца кПа	2,62	3,73	2,73	3,93
Погрешность % с экспериментом	33,4	5,11	30,6	0

Основной недостаток экспериментального метода заключается в высокой стоимости натуральных испытаний, которые достаточно трудоемки и требуют больших площадей под испытательные стенды. Поэтому для минимизации расходов можно использовать метод численного моделирования. Также проблема заключается в том, что сложно гарантировать релевантность проведенных испытаний.

В строительном проектировании часто используют различные программные продукты, которые позволяют выполнить ряд исследований без проведения натуральных испытаний. В основном используется метод конечных элементов [8-13], но есть и ряд исследований, которые посвящены методу конечных разностей [14]. Так для расчета на прочность и анализа жесткости профилированного настила марки СТ1414-860 был составлен калькулятор в Excel. Основная сложность при создании данного калькулятора заключалась в определении редукиции и геометрических характеристик редуцированного сечения.

Проблема в данном случае заключается в составлении корректной численной модели, а также способе моделирования, например стержневая или оболочечная модель. Также при разработке расчетной схемы проектировщикам приходится принимать ряд допущений и идеализаций. Выбор вида и размеров конечных элементов, задача сходимости, закрепление профилированного настила очень сильно влияют на результат расчетов [14].

При исследовании сталежелезобетонных перекрытий с профлистом отдельно выделяются задачи сдвиговой жесткости, то есть каким образом обеспечивается передача горизонтальных усилий с перекрытия на балки, а также вопрос возможности сцепления бетона с оцинкованным профилированным настилом.

Отдельно выделяют применение машинного обучения в проектировании тонколистовых строительных конструкций [15]. Данный метод напрямую зависит от количества входной информации, которая используется для «обучения» алгоритма. Поэтому актуально его использовать именно для оценки несущей способности, но не ее точном определении.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчет по методикам, представленным в действующих технических документах, дает разные результаты, что в свою очередь влияет на обеспечение надежности профилированного настила, а также общей металлоемкости здания. Среднее отличие между расчетом по СП 260 и СП 294 составляет от 11 до 19%. Это обусловлено принципиально разными подходами в определении геометрических характеристик сечений.

В результате сравнения аналитических методов расчета и конечно-элементного метода расчета с экспериментальным выявлено соответствие способа разрушения конструкции двухпролетной схемы профилированного листа по СП 260.1325800.2016 с МКЭ и с экспериментом. Таким образом именно эти два способа расчета позволяют правильно определить причину потери несущей способности

профилированного листа. Также расчеты по СП 260.1325800.2016 и расчет МКЭ имеют схожие результаты значений критической распределенной нагрузки, при которой происходит разрушение образца, что также подтверждает сходжение с экспериментом. Отличие значений критической распределенной нагрузки, полученной в эксперименте, от нагрузки, полученной методом расчета с помощью конечных элементов и расчета по СП 260.1325800.2016, объясняется в первую очередь большим значением предела текучести испытуемого профилированного настила по сравнению с пределом текучести исследуемого профнастила. Другими словами, марка стали исследуемого профнастила – С280, в то время как его реальный предел текучести превышает значение в 280 МПа

Таким образом, необходимо гармонизировать нормативные документы в части определения несущей способности профнастила и автоматизировать расчет профилированного настила путем разработки сертифицированного программного продукта. При проведении натурных испытаний следует строго соответствовать требованиям нормативных документов для получения релевантного результата.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Носков А.С., Зелинский В.О., Макеев С.А. Исследование несущей способности трехслойных арочных бескаркасных покрытий на базе тонкостенного профилированного проката // Сборник материалов IV Международной научно-практической конференции. 2019. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2019. С. 418-421.
2. Красотина Л. В., Робра Й. Арочные своды из профилированного настила: частоты собственных колебаний // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 12. С. 18-24.
3. Тепин Н.В., Храбров В.А., Князев С.Н. Опыт изготовления и освоения профилегибочных станков для производства профнастила // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2021. Т. 24. № 4. С. 35-44.
4. Драган В.И., Люстибер В.В. Натурное испытание металлической структурной плиты покрытия ледовой арены в г. Пружаны // Вестник Брестского государственного технического университета. 2007. №1. С. 17-22.
5. Feyissa A., Kenea G. Performance of shear connector in composite slab and steel beam with reentrant and open trough profiled steel sheeting // Advances in Civil Engineering. 2022. Vol. 1. Pp. 1–14.
6. Rehman N., Lam D., Dai X., Ashour A. F. Experimental study on demountable shear connectors in composite slabs with profiled decking // Journal of Constructional Steel Research. 2016. Vol. 122. Pp. 178–189.
7. Кулешов В.В., Капырин Н.В., Попоудин Д.П. Натурные испытания стального профилированного настила, работающего по двухпролетной схеме, с усиленной опорной зоной на средней опоре // Вестник науки. 2023. №6(63). С. 481-488.
8. Бондарь В.Т., Назмеева Т.В. Сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния профилированных листов с-44-1.5, с-21-1.5, с1мс-d02-01a 1.6 // В сборнике: Неделя науки ИСИ. Материалы всероссийской конференции в 3-х частях. Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Санкт-Петербург, 2021. 2-я часть. С. 417-419.
9. Rybakov V.A. Conjugate approximation of thin-walled rods internal forces functions in bending torsion // Construction of Unique Buildings and Structures. 2022. № 5 (103). P.4. DOI: 10.4123/CUBS.103.4
10. Кинзябулатова Д.Ф., Порываев И.А., Недосеко И.В. Расчет устойчивости сжатых тонкостенных стержней С-образного сечения // Известия КГАСУ. 2022. №4(62). С.108-117. EDN: JLMWXF
11. Порываев И.А., Семенов А.А., Каравайченко М.Г. Поиск оптимальных геометрических параметров двухконических крыш вертикальных цилиндрических резервуаров при симметричной нагрузке // Нефтегазовое дело. 2016. №3. С. 100-105.
12. Hedaoo N., Raut N., Gupta L. Composite concrete slabs with profiled steel decking: comparison between experimental and simulation study // American Journal of Civil Engineering. 2015. №3(5). P. 250-261.
13. Bogdanic A., Casucci D., Ozbolt J. Numerical and experimental investigation of anchor channels subjected to shear load in composite slabs with profiled steel decking // Engineering Structures. 2021. No.240.
14. Макеев С. А., Комлев А. А., Макаров С.Е., Макарова И.Д. Расчет профилированного настила с использованием уравнения срединной поверхности ортотропной пластины // Материалы V Международной научно-технической конференции. Омск, 2021. 2021. С. 197-204.
15. Degtyarev V.V. Finite element modeling of cold-formed steel deck in bending // Magazine of Civil Engineering. 2020. №94(2). С. 129-144.

#### ОБ АВТОРАХ

**Владимир Тарасович Бондарь** – ведущий технический специалист. ООО «НТП «СтройСофтКонсалтинг». 450096, Россия, г. Уфа, ул. Шафиева, д. 44/1. E-mail: doodge1997@gmail.ru

**Татьяна Вильсовна Назмеева** – кандидат технических наук, доцент. Технический директор. ООО «НТП «СтройСофтКонсалтинг». 450096, Россия, г. Уфа, ул. Шафиева, д. 44/1. E-mail: naztv@mail.ru

#### ABOUT THE AUTHORS

**Vladimir T. Bondar** – Leading technical specialist. NTP StroySoftConsulting LLC. 450096, Russia, Ufa, Shafieva st., 44/1. E-mail: doodge1997@gmail.ru

**Tatiana V. Nazmeeva** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Technical Director. NTP StroySoftConsulting LLC. 450096, Russia, Ufa, Shafieva st., 44/1. E-mail: naztv@mail.ru