

На правах рукописи



Лаврова Анна Сергеевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА
ПЕРФОРИРОВАННЫХ БАЛОК С КРУГЛЫМИ ВЫРЕЗАМИ
С ПОМОЩЬЮ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА И
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Калининград – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Калининградский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «КГТУ»)

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент

Притыкин Алексей Игоревич

Официальные оппоненты:

Туснин Александр Романович

доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), профессор кафедры «Металлические и деревянные конструкции»

Языев Батыр Меретович

советник РААСН, доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (ДГТУ), профессор кафедры «Соппротивление материалов»

Ведущая организация:

Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий»
(АО «ЦНИИПромзданий»)

Защита состоится «03» октября 2018 г. в 12:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета Д 303.020.02, созданного на базе АО «НИЦ «Строительство» по адресу: 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., 6, корпус 5 (конференц-зал НИИЖБ им. А.А. Гвоздева).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке по адресу: 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., 6 и на сайте www.cstroy.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Шулятьев Станислав Олегович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Перфорированные балки широко применяются в самых различных сооружениях – таких, как многоярусные гаражи, мосты, многоэтажные здания, каркасы складских помещений. Имеет место тенденция к увеличению размеров вырезов в стенке и уменьшению ширины перемычек, т.е. к более рациональному использованию материала (рисунок 1). Отметим, что ежегодное применение только перфорированных балок с круглыми вырезами (БКВ) в мировом масштабе приближается к 50000т. Однако пока в отечественных строительных нормах не содержится четких требований к конструктивному оформлению перфорированных БКВ или к оценке их прогибов и напряженного состояния. Поэтому исследования напряженно-деформированного состояния и устойчивости перфорированных БКВ и разработка инженерных методов их расчета представляются актуальными.



а)



б)

Рисунок 1 – Перфорированные балки с разной шириной перемычек:

а) $c/d = 0,5$; б) $c/d = 0,15$

Степень разработанности темы. Вопросам исследования напряженно-деформированного состояния и устойчивости перфорированных балок посвящены работы Я.И. Олькова, И.И. Ведякова, А.И. Складнева, А.И. Притыкина, В.В. Бирюлева, М.М. Копытова, В.М. Добрачева, Е.В. Литвинова и др. Среди зарубежных авторов, рассматривавших эти вопросы, можно отметить работы R.G. Redwood, J.E. Gibson, H.J. Johnson, M.U. Hosain, N.J. Gardner, M.M. Hrabok, J.E. Bower, W. Kanning, S. Demirdjian, I.G. Raftoyiannis и др.

Краткий обзор позволяет заключить, что ни в отечественной, ни в мировой практике пока нет зависимостей, позволяющих надежно оценивать напряженно-деформированное состояние и устойчивость перфорированных балок с круглыми вырезами. В настоящее время такая оценка, в основном, производится расчетами МКЭ. Разработка же инженерных зависимостей для оценки прогибов, уровня напряжений и критических нагрузок важна для совершенствования проектирования перфорированных балок.

Научная гипотеза – напряженное состояние перфорированной балки в районе вырезов определяется, в основном, характером изменения изгибающего момента от внешней нагрузки.

Цель исследований – разработка инженерных методов расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) и устойчивости перфорированных балок с круглыми вырезами при поперечном изгибе при разных параметрах перфорации.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи диссертационной работы**:

- проведение анализа отечественных и зарубежных исследований напряженно-деформированного состояния и устойчивости перфорированных БКВ, а также технологии их изготовления;
- разработка на языке APDL программ создания расчетных моделей БКВ;
- исследование численным методом напряженного состояния балок с перфорированной стенкой при поперечном и чистом изгибе;
- разработка инженерной зависимости для оценки максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу в перфорированной балке вблизи контуров круглых вырезов с учетом различных параметров перфорации при поперечном и чистом изгибе;
- исследование влияния конструктивного оформления консольных выпусков на напряженно-деформированное состояние БКВ;
- разработка аналитической зависимости для оценки прогибов БКВ на основе теории составных стержней;
- исследование устойчивости плоской формы изгиба перфорированных БКВ;

- разработка инженерной зависимости для оценки местной устойчивости БКВ под действием сосредоточенной силы;
- исследование области применения предлагаемых зависимостей;
- применение теории моделирования для экспериментального исследования НДС и местной устойчивости БКВ на натурной конструкции и маломасштабных моделях из стали.

Научная новизна работы:

- разработан инженерный метод расчета эквивалентных напряжений по Мизесу и получены величины коэффициентов концентрации эквивалентных напряжений в БКВ при поперечном и чистом изгибе;
- получены данные о влиянии конструктивного оформления консольных выпусков на напряженное состояние перфорированных БКВ;
- разработан инженерный метод расчета прогибов БКВ при разных параметрах перфорации;
- получена эмпирическая зависимость для оценки критической нагрузки, определяющей местную устойчивость перемычек БКВ при сдвиге.

Теоретическая значимость работы заключается в

- установлении закономерностей распределения эквивалентных напряжений вблизи контуров вырезов при поперечном изгибе в зависимости от параметров перфорации и размеров сечения БКВ;
- исследовании влияния конструктивного оформления консольных выпусков на уровень напряжений в БКВ;
- разработке аналитической зависимости для оценки прогибов перфорированных БКВ по теории составных стержней;
- установлении влияния параметров балки на критическую нагрузку, соответствующую потере местной устойчивости;
- исследовании напряженно-деформированного состояния и местной устойчивости натурной конструкции и маломасштабных моделей.

Практическая значимость работы состоит в

- получении инженерной зависимости для оценки эквивалентных напряжений по Мизесу в БКВ при линейном характере изменения изгибающего момента;
- получении величин коэффициентов концентрации напряжений при поперечном и чистом изгибе БКВ;
- получении аналитической зависимости для оценки прогибов БКВ при разных параметрах перфорации;
- получении эмпирической зависимости для расчета критической нагрузки, соответствующей потере местной устойчивости перемычек от сдвига;
- оценке возможности моделирования устойчивости перфорированных балок на маломасштабных моделях.

Методы исследования. Исследования проводились методами строительной механики, теории составных стержней, численного анализа с помощью метода конечных элементов и использованием табличного редактора Excel. Применялись экспериментальные методы и теория моделирования при исследовании напряженно-деформированного состояния и местной устойчивости перфорированных балок.

Личный вклад автора:

- выполнение анализа отечественных и зарубежных исследований напряженного состояния, деформаций, устойчивости и технологии изготовления перфорированных БКВ;
- разработка программ создания расчетных моделей перфорированных БКВ на языке APDL, выполнение расчетов методом конечных элементов их напряженного состояния, прогибов и устойчивости и анализ полученных результатов;
- разработка зависимостей для оценки максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу, прогибов и критической нагрузки, соответствующей потере местной устойчивости БКВ, а также исследование их области применения;

- проведение экспериментальных исследований напряженного состояния, прогибов и местной устойчивости перфорированных БКВ на натурной конструкции и маломасштабных моделях.

Основные положения, выносимые на защиту:

- инженерный метод расчета напряженного состояния перфорированных балок с круглыми вырезами при линейном характере изменения изгибающего момента;
- метод оценки коэффициента концентрации напряжений в перфорированных балках с круглыми вырезами;
- аналитический метод расчета прогибов перфорированных балок с круглыми вырезами в упругой стадии нагружения;
- эмпирический метод расчета критической нагрузки, соответствующей потере местной устойчивости перемычек от сдвига;
- зависимость для пересчета критической нагрузки, полученной в результате испытания модели, на критическую нагрузку натурной конструкции с учетом геометрического подобия при разных материалах модели и натуре.

Достоверность приведенных в работе теоретических и эмпирических результатов подтверждается удовлетворительной их корреляцией с данными, полученными путем численных расчетов методом конечных элементов, а также с данными экспериментальных исследований прогибов, уровня напряжений и критических нагрузок, полученными как самим автором в результате испытания натуральных и маломасштабных моделей, так и зарубежными исследователями.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на: 19-ой международной конференции «Mechanika-2014», (г. Каунас (Литва), 2014); XII международной научной конференции «Инновации в науке, образовании и бизнесе – 2014» (г. Калининград, 2014); XVIII Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (г. Москва, 2015); III Балтийском морском форуме: Международной научной конференции «Прогрессивные технологии, машины и

механизмы в машиностроении и строительстве» (г. Калининград, 2015); IV Международном Балтийском морском форуме: II Международной научной конференции «Прогрессивные технологии, машины и механизмы в машиностроении и строительстве» (г. Калининград, 2016); V Международном Балтийском морском форуме: V Международной научной конференции «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии» (г. Калининград, 2017).

Внедрение работы. Результаты исследований использованы:

- в учебном процессе ФГБОУ ВО «КГТУ» при выполнении расчетно-графических работ по дисциплинам строительная механика, металлические конструкции и сварка, выпускных квалификационных работ, индивидуальных заданий при подготовке студентов и аспирантов по направлениям подготовки 08.03.01 – Строительство (профиль – Промышленное и гражданское строительство) и 08.06.01 – Техника и технология строительства);

- в учебном процессе ФГАОУ ВО «БФУ им. И. Канта» при подготовке бакалавров по направлению подготовки 08.03.01 – Строительство;

- при проектировании перфорированных балок в несущих конструкциях покрытий общественных и промышленных зданий в «КМПИ – филиал «31 ГПИСС».

Публикации. Материалы исследований опубликованы в 18 печатных работах (автора – 5,04 печатных листа, из них без соавторства – 1,5 печатных листа), включая 4 статьи в журналах входящих в перечень рецензируемых научных изданий по списку ВАК, общим объемом 2,7 печатных листа, из них автора – 1,36 печатных листа. Получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка условных обозначений и сокращений, списка литературы (107 наименований), приложений и содержит 167 страниц, включая 58 рисунков и 20 таблиц.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цели и задачи исследования, указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимости диссертации.

В первой главе рассмотрено применение перфорированных балок в строительстве, а так же приведен обзор работ, посвященных экспериментальным и теоретическим исследованиям напряженного состояния, деформаций и устойчивости различных типов перфорированных балок с анализом методов их расчета.

Проанализированы требования к проектированию перфорированных балок разных строительных норм и правил, таких как строительные нормы РФ – СП 294.1325800.2017, Европейские нормы – EN 1993-1-5:2006 и Британский стандарт – BS 5950-1:2000.

В этой же главе описана технология изготовления перфорированных БКВ, позволяющая понять возможности конструктивных решений.

На основании выполненного обзора сделан вывод, что обширное количество работ посвящено исследованию напряженного состояния, устойчивости и жесткости перфорированных балок с шестиугольными вырезами, а зависимостей, позволяющих надежно оценивать напряженно-деформированное состояние и устойчивость балок с круглыми вырезами, пока нет. Связано это, прежде всего, со сложной геометрией перфорированных балок.

Выполненный обзор работ свидетельствует о наличии значительного разнообразия форм вырезов в стенках перфорированных балок, включая круглые, шестиугольные, восьмиугольные, овальные и даже синусоидальные. Причем в отдельных случаях контуры вырезов могут иметь подкрепления в виде поясков или ребер жесткости над вырезами, цель которых сводится к снижению уровня напряжений. Для выбора наиболее рационального конструктивного оформления следует проанализировать влияние размеров вырезов и параметров перфорации на устойчивость и напряженно-деформированное состояние таких балок.

При проектировании перфорированных балок требуется уметь определять нормируемые величины: уровень максимальных напряжений в балке, величину

прогиба и критическую нагрузку, вызывающую потерю местной устойчивости. Именно решению этих задач посвящена работа.

В главе 2 было проведено исследование распределения напряжений в районе контуров вырезов по длине при нагружении балки, обеспечивающим постоянство поперечной силы по ее длине и при деформации чистого изгиба. Знание уровня максимальных напряжений позволило также оценить концентрацию напряжений в перфорированных балках с круглыми вырезами при указанных видах нагружения.

Перфорацию стенки можно характеризовать двумя параметрами: шириной перемычек c и диаметром вырезов d (рисунок 2). Компактно обозначить размеры балки можно в следующем виде: $l - H - t_w - b_f - t_f \text{ см} - \beta - \xi$, где l и H – длина и высота балки, t_w – толщина стенки, b_f и t_f – ширина и толщина полок, $\beta = d/H$ – относительная высота вырезов, $\xi = c/d$ – относительная ширина перемычек. При численных обозначениях размеры балки указываются в сантиметрах.

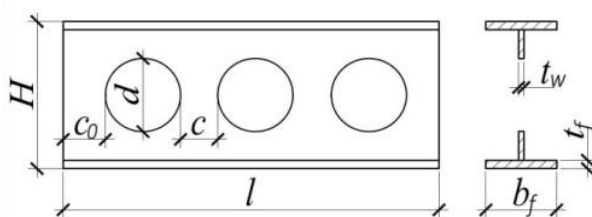


Рисунок 2 – Параметры перфорированной балки

Программа расчета состояла в исследовании влияния на величину $\sigma_{\max}^{\text{экв}}$ относительной ширины перемычек ξ в диапазоне $0,15 \leq \xi \leq 0,5$ (рисунок 1) и относительной высоты вырезов β в пределах $0,667 \leq \beta \leq 0,75$. Указанные диапазоны включают практически все варианты перфорации балок с круглыми вырезами.

Основанием для вывода зависимости для эквивалентных напряжений послужили результаты анализа расчетов перфорированных балок, выполненных методом конечных элементов (МКЭ).

В технической теории изгиба балок напряженное состояние стенки описывается только двумя составляющими σ_x и τ_{xy} , но при наличии перфорации кроме указанных компонент в районе контуров вырезов существенными становятся и нормальные напряжения σ_y , которыми в балках со сплошной стенкой можно было пренебречь.

Таким образом, характеризовать сложное напряженное состояние в районе вырезов можно с помощью такого интегрального параметра как эквивалентные напряжения по Мизесу $\sigma_{\max}^{\text{экв}}$. В случае совместного действия всех трех компонент σ_x , σ_y и τ_{xy} , напряжения $\sigma_{\max}^{\text{экв}}$ определяются как

$$\sigma_{\max}^{\text{экв}} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2}. \quad (1)$$

Поскольку при поперечном изгибе на величину $\sigma_{\max}^{\text{экв}}$ влияют как поперечная сила V , так и изгибающий момент M , представим $\sigma_{\max}^{\text{экв}}$ в виде суммы двух слагаемых

$$\sigma_{\max}^{\text{экв}} = \alpha_V \frac{V}{Ht_w} + \alpha_M \frac{M}{W}, \quad (2)$$

где α_V и α_M – числовые коэффициенты, определяемые из расчетов МКЭ;

$W = b_f t_f H + H^2 t_w / 6$ – момент сопротивления поперечного сечения балки.

Величина изгибающего момента M для n -го выреза записывается в форме

$$M = Vx = V(n-1)s, \quad (3)$$

где n – порядковый номер выреза, у контура которого определяются эквивалентные напряжения $\sigma_{\max}^{\text{экв}}$; s – шаг вырезов.

В общем случае шаг вырезов с учетом того, что $d = \beta H$, а $c = \xi d$ может быть записан как

$$s = (1 + \xi)\beta H. \quad (4)$$

Подстановка (3) и (4) в (2) после несложных преобразований приводит к зависимости

$$\sigma_{\max}^{\text{экв}} = \left(\alpha_V + \alpha_M \frac{(n-1)(1+\xi)\beta}{6b_f t_f / Ht_w + 1} \right) \frac{V}{Ht_w}. \quad (5)$$

Зависимость (5) позволяет определять максимальные напряжения в зоне вырезов при постоянстве поперечной силы.

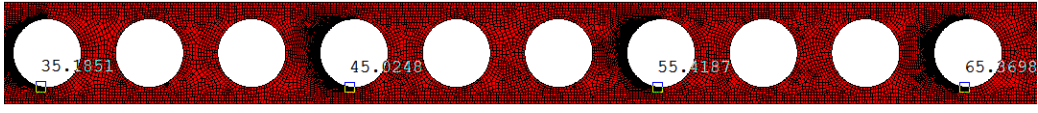
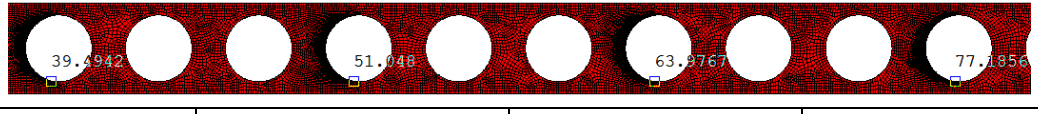
Для вычисления $\sigma_{\max}^{\text{экв}}$ числовые коэффициенты α_V и α_M определялись на основании результатов расчетов балок МКЭ.

Результаты расчета МКЭ балок, полученных из двутавра №55Б1, при постоянной поперечной силе $V = 10$ кН приведены в таблице 1.

Проведенный анализ показал, что коэффициенты α_V и α_M входящие в выра-

жение (5), не являются константами, а зависят от обоих параметров перфорации β и ξ . При постоянной ширине перемычек ξ в диапазоне $0,15 \leq \xi \leq 0,5$ оба коэффициента удовлетворительно аппроксимируются линейной функцией от относительной высоты вырезов β . Эти зависимости графически представлены на рисунке 3.

Таблица 1 – Напряжения $\sigma_{\max}^{экв}$ в балках 3060–76,5– 0,95–22–1,35см– β -0,5 при разных β

$\beta = 0,667$ $n = 9,12,15,18$				
$\sigma_{\max}^{МКЭ} / \sigma_{\max}^{(5)}$	35,2/34,8	45,0/45,1	55,4/55,3	65,4/65,6
$\beta = 0,73$ $n = 7,10,13,16$				
$\sigma_{\max}^{МКЭ} / \sigma_{\max}^{(5)}$	39,5/37,1	51,0/50,7	64,0/64,3	77,2/77,9

Судя по характеру их изменения, можно утверждать, что с уменьшением относительной ширины перемычек ξ , как и с уменьшением относительной высоты вырезов β , наблюдается снижение уровня максимальных напряжений вблизи контуров вырезов. Это дает основание утверждать, что уменьшение ширины перемычек благоприятно сказывается на напряженном состоянии, а следовательно, и на прочности перфорированной балки.

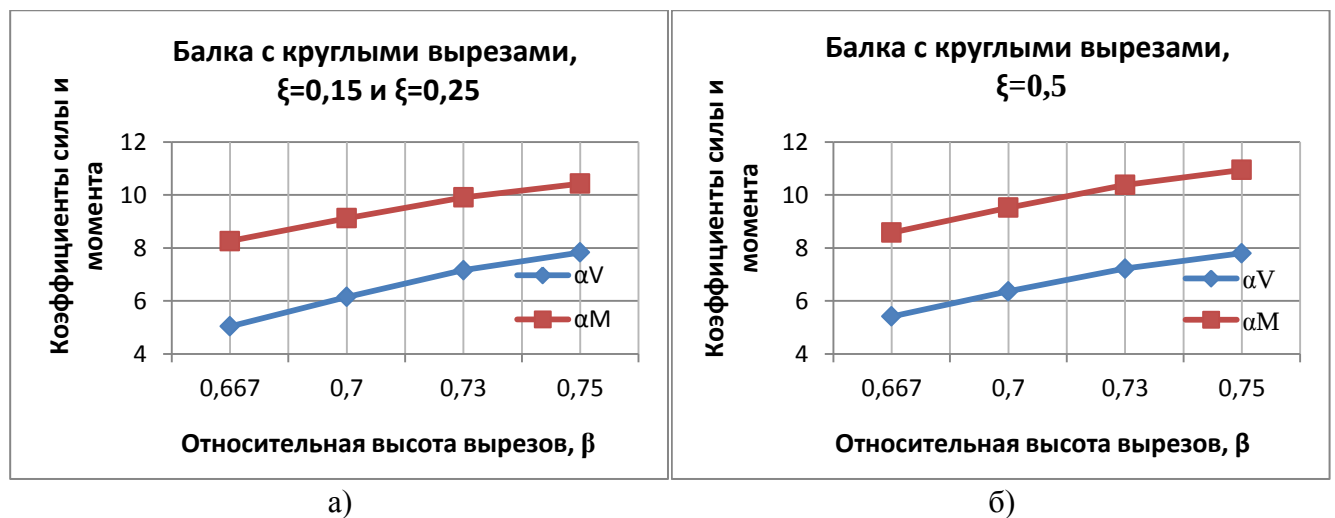


Рисунок 3 – Зависимость коэффициентов силы α_V и момента α_M от β :

а) при $\xi = 0,15$ и $\xi = 0,25$; б) при $\xi = 0,5$

Подсчет величин эквивалентных напряжений $\sigma_{\max}^{(5)}$ по зависимости (5) с учетом соотношений α_V и α_M , указанных в таблице 2, подтвердил приемлемую точность расчетов напряжений в перфорированной балке.

Применение приведенных в таблице 2 значений α_V и α_M при расчете балки с параметрами 3888–97,2–1,2–26–1,55см–0,667–0,5, изготовленной из прокатного двутавра №60Б1, также подтвердило применимость полученных зависимостей.

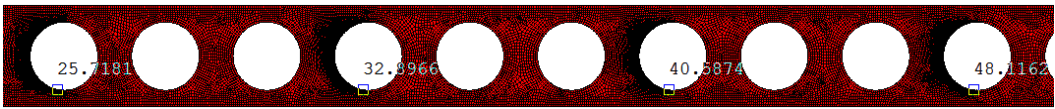
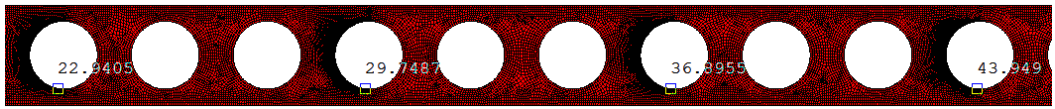
Таблица 2 – Зависимости α_V и α_M от относительной высоты вырезов β для трех вариантов относительной ширины перемычек ξ

$\xi = 0,15$	$\xi = 0,25$	$\xi = 0,5$
$\alpha_M = 26,2\beta - 9,22$		$\alpha_M = 28,6\beta - 10,5$
$\alpha_V = 33,5\beta - 17,3$		$\alpha_V = 28,8\beta - 13,8$

Исследование влияния толщины стенки, проведенное на балках размерами 3888–97,2– t_w –26–1,55см–0,667–0,5 при толщинах $t_w = 1,02$ см и 1,38 см и той же поперечной силе $V = 10$ кН, привело к значениям напряжений, показанным в таблице 3.

Как видно из приведенных в таблице 3 результатов, расхождение в величинах $\sigma_{\max}^{\text{МКЭ}}$, вычисленных МКЭ и по (5) с применением коэффициентов α_M и α_V , взятых из таблицы 2 для $\xi = 0,5$, лишь незначительно превышает 2,5%.

Таблица 3 – Напряжения $\sigma_{\max}^{\text{МКЭ}}$ в балке 3888–97,2– t_w –26–1,55см–0,667–0,5 при разных t_w

$t_w = 1,02$ см $n = 9,12,15,18$				
$\sigma_{\max}^{\text{МКЭ}}/\sigma_{\max}^{(5)}$	25,7/25,6	32,9/33,2	40,6/40,7	48,1/48,3
$t_w = 1,38$ см $n = 9,12,15,18$				
$\sigma_{\max}^{\text{МКЭ}}/\sigma_{\max}^{(5)}$	22,9/22,3	29,7/29,2	36,9/36,0	43,9/42,9

Обработка данных МКЭ о величинах напряжений при варьировании ширины полок b_f также привела к удовлетворительным результатам.

В итоге можно констатировать, что погрешность расчета по зависимости (5) по сравнению с МКЭ для большинства вариантов перфорации балки не превышает 2,5%.

Исследование МКЭ напряженного состояния стенки балки показало, что при постоянстве поперечной силой V напряжения изменяются пропорционально номеру выреза (рисунок 4). Отметим, что зависимость (5) при постоянстве силы V справедлива для балки любой длины l .

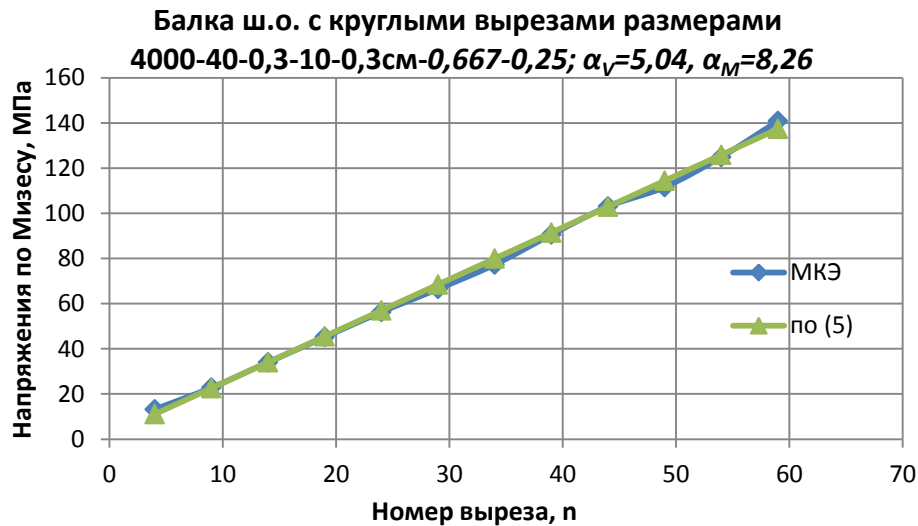


Рисунок 4 – Распределение напряжений $\sigma_{\max}^{\text{экв}}$, определяемое расчетами МКЭ и по (5)

При оценке эффективности того или иного конструктивного решения балок с разной перфорацией удобно использовать величину коэффициента концентрации напряжений α_σ , который можно вычислять по соотношению

$$\alpha_\sigma = \sigma_{\max}^{\text{экв}} / \sigma_{\max}^{TT}, \quad (6)$$

где $\sigma_{\max}^{TT}$ – максимальные напряжения в полке балки со сплошной стенкой, определяемые по технической теории изгиба, в том же сечении, в котором вычисляются эквивалентные напряжения $\sigma_{\max}^{\text{экв}}$.

Величина напряжений $\sigma_{\max}^{TT}$ вычисляется как

$$\sigma_{\max}^{TT} = \frac{Vx}{b_f t_f H + H^2 t_w / 6}. \quad (7)$$

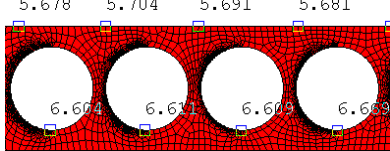
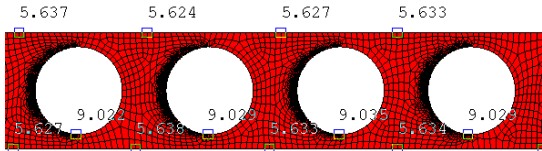
Проведенные исследования показали, что для балки с круглыми вырезами при поперечном изгибе уровень концентрации напряжений с увеличением относительной высоты вырезов β повышается, достигая максимальной величины $\alpha_\sigma = 1,70$ при $\beta = 0,75$.

Проведенные наряду с поперечным изгибом исследования уровня концентрации напряжений при чистом изгибе показали, что при одной и той же ширине перемычек с увеличением относительной высоты вырезов с $\beta = 0,667$ до $\beta = 0,75$ уровень $\sigma_{\max}^{\text{экв}}$ повышается согласно линейному закону примерно на 25%, а при постоянной высоте вырезов уменьшение ширины перемычек с $\xi = 0,5$ до $\xi = 0,15$ благоприятно сказывается на напряженном состоянии перфорированных балок,

приводя к снижению $\sigma_{\max}^{\text{экв}}$ примерно на 10% (таблица 4).

Оценка величины ККН для чистого изгиба в зависимости от параметра перфорации стенки ξ показывает, что уменьшение ширины перемычек с $\xi = 0,5$ до $\xi = 0,15$ приводит к снижению α_σ с 1,46 до 1,32 при параметре $\beta = 0,667$.

Таблица 4 – Напряжения в балках размерами 800–40–0,3–10–0,3см– β – ξ при чистом изгибе

 $\beta = 0,667; \xi = 0,15 \quad \alpha_\sigma = 6,6/5 = 1,32$	 $\beta = 0,75; \xi = 0,5 \quad \alpha_\sigma = 9,0/5 = 1,80$
--	---

Наряду с классической конструктивной формой шарнирного сопряжения балок (рисунок 5,а) было исследовано напряженное состояние балок с консольными выпусками (рисунок 5,б). Конструктивное оформление консольных выпусков осуществляется по-разному. Как правило, нижний пояс балки подрезается на необходимую высоту, а площадь поперечного сечения ее компенсируется путем подварки с двух сторон прокатных уголков или швеллеров или ребер жесткости (рисунок 5,б), образующих опорную плоскость.

В работе исследовано влияние на распределение напряжений в перфорированных балках наличие консольного выпуска при разных конструктивных оформлениях его.



а)



б)

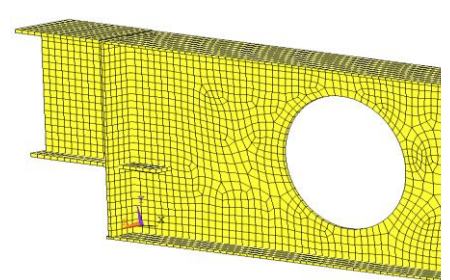


Рисунок 5 – Шарнирное сопряжение перфорированных балок:
а) опирание сверху б) с «подрезкой» (консольным выпуском)

Расчет МКЭ показал, что наличие вертикального ребра в зоне перехода консольного выпуска оказывает незначительное влияние на распределение напряжений в перфорированной балке, приводя к снижению их только в зоне близкой к расположению ребра. Концентрация напряжений в зоне консольного выпуска в

районе пересечения ребер значительно ниже, чем в районе вырезов.

В главе 3 изложен эффективный метод расчета деформаций перфорированных балок основанный на теории составных стержней (ТСС), в котором балка представляется в виде двух тавровых поясов и упругого слоя, образованного перемычками. Согласно подходу А.И. Притыкина решение выполнялось путем интегрирования дифференциального уравнения с помощью рядов Фурье, что позволило получить аналитическую зависимость для прогибов таких балок в компактной форме. Не останавливаясь на выводе формулы, приведем лишь ее окончательный вид

$$w_{\text{перф}}^{TCC} = w^{TT} (1 + 1,3\pi^2 \beta H f \chi(\xi) / (t_w l^2)). \quad (8)$$

Здесь $w^{TT} = 5ql^4 / (384EI_x)$ – вычисляемый по технической теории изгиба прогиб монолитной балки с моментом инерции $I_x \approx b_f t_f H^2 / 2 + t_w H^3 (1 - \beta^3) / 12$; f – площадь таврового пояса

$$f = t_f b_f + t_w (0,5(H - h) - t_f). \quad (9)$$

Для наиболее распространенной перфорации с высотой вырезов $h = 0,667H$ зависимость коэффициента $\chi(\xi)$ от относительной ширины перемычки ξ в случае шарнирного опирания балки можно аппроксимировать полиномом 2-ой степени

$$\chi(\xi) = 60,2\xi^2 - 56,7\xi + 24,5. \quad (10)$$

Выражение (8) позволяет с инженерной точностью определять прогибы перфорированных БКВ в широком диапазоне параметров перфорации при $0,15 \leq \xi \leq 0,5$ и относительных длин вырезов $10 \leq l/H \leq 27$. Погрешность расчетов при этом обычно не превышает 2 – 4%, а с увеличением относительной длины балок она уменьшается, так как снижается влияние сдвига на полный прогиб балки.

Как для балок с широкими ($\xi = 0,5$), так и для балок с узкими перемычками при $\xi = 0,25$ и $\xi = 0,15$ данные по прогибам, подсчитанные по (8) в таблице 5, показывают вполне приемлемую точность.

Сравнение прогибов, приведенных в таблице 5, показывает, что уменьшение относительной ширины перемычек с $\xi = 0,5$ до $\xi = 0,15$ приводит к увеличению

прогибов балки примерно на 19% для коротких балок, а для длинных влияние перемычек снижается до 6%.

Таблица 5 – Величины прогибов (мм) ш. о. перфорированных балок с круглыми вырезами при равномерно распределенной нагрузке $q = 10 \text{ кН/м}$

Относительная длина, l/H	10	15	20	27	10	15	20	27
Параметры балки	$l-75-1-17-1,52\text{см}-0,667-0,5$				$l-75-1-17-1,52\text{см}-0,667-0,15$			
МКЭ	2,85	12,05	35,7	113,0	3,38	13,8	38,9	119,7
По ТСС, (8)	2,96	12,3	36,0	113,9	3,48	13,5	38,1	117,7
Расхождение δ , %	3,72	2,03	0,83	0,79	2,87	2,22	2,10	1,70

Изгибная жесткость перфорированных балок с относительной шириной перемычек $\xi = 0,5$ снижается примерно на 35 – 40% по сравнению с жесткостью такой же балки со сплошной стенкой. С уменьшением ширины перемычек до $\xi = 0,15$ прогибы перфорированных балок примерно на 70% превышают прогибы балок таких же размеров со сплошной стенкой.

В главе 4 приведены результаты исследований общей и местной устойчивости перфорированных балок с круглыми вырезами МКЭ и с помощью экспериментов на маломасштабных моделях и на натурной конструкции.

Форма потери общей устойчивости перфорированных балок практически ничем не отличается от таковой балок со сплошной стенкой.

Отмечено, что критическая нагрузка, соответствующая общей потере устойчивости перфорированной двутавровой балки, в случае шарнирно опирания может уменьшиться на 4 – 14%, а при жесткой заделке может снизиться почти на 15 – 40% по сравнению с критической нагрузкой балки со сплошной стенкой в зависимости от параметров перфорации и размеров балки. При этом степень снижения слабо зависит от характера нагружения – будет ли это равномерно распределенная нагрузка или сосредоточенная сила.

Хотя изучением устойчивости балок с регулярно расположенными вырезами занимается немало исследователей как в России, так и за рубежом, пока вопрос местной устойчивости далек от окончательного решения.

Приближенную оценку местной устойчивости шарнирно опертых балок с

круглыми вырезами под действием сосредоточенной силы P удалось получить, проведя структурный анализ. Указанный подход дал возможность представить зависимость критической поперечной силы $V_{кр}$ от параметров перфорации балки в удобной для инженерных расчетов форме. Поскольку задача устойчивости решалась в линейной постановке, в работе было принято допущение о независимости влияния параметров перфорации на величину критической силы.

Выполненный анализ позволил установить, что критическая нагрузка, соответствующая местной потере устойчивости перемычки от сдвига, двутавровой шарнирно опертой перфорированной БКВ, нагруженной сосредоточенной силой V , обратно пропорциональна ее высоте H , пропорциональна t_w^3 и линейно зависит от величин β и ξ . Влияние размеров полки для балок, изготовленных из прокатного профиля, сказывается незначительно. Указанная зависимость может быть представлена в виде

$$V_{кр}^{перф} = 1,39(\xi + 1,16)(1 - 0,61\beta)t_w^3 E/H. \quad (11)$$

Несмотря на надежность результатов МКЭ, эксперименты на натурных конструкциях или маломасштабных моделях используются для учета таких факторов, как начальные несовершенства, разброс толщин или влияние остаточных напряжений.

В работе верификация полученной эмпирической зависимости производилась испытаниями на местную устойчивость перфорированных балок двух типов: четырехметровых, учитывающих технологию изготовления натурной конструкции, и маломасштабных моделей из жести длиной около 300 мм и толщиной всего 0,19 мм.

Устойчивость стенки балки при деформации сдвига описывается дифференциальным уравнением

$$D\nabla^2 \nabla^2 w = 2\tau_{xy}t \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \quad (12)$$

Приводя указанное уравнение к безразмерному виду, опуская знаки дифференцирования, можно получить из (12) три критерия подобия. В случае геометрического подобия натурной конструкции и модели в плане три индикатора подобия сводятся к одному

$$\frac{C_E C_t^2}{C_{(1-\mu^2)} C_y^2 C_\tau} = 1. \quad (13)$$

Ввиду незначительного изменения коэффициента μ ($0,3 \leq \mu \leq 0,35$) константа подобия $C_{(1-\mu^2)}$ может быть принята равной единице. Тогда, выразив напряжения τ через V , можно выполнить пересчет нагрузки $V_{кр}$ с модели на натуру как

$$V_H^3 = \frac{C_E C_t^3}{C_y} V_M^3. \quad (14)$$

Вычисление критической нагрузки по (14) является несколько приближенным, так как не учитывает влияния полкок, но как показали расчеты МКЭ, их влиянием в практически значимом диапазоне можно пренебречь.

В работе местная устойчивость экспериментально исследовалась на мало-масштабных моделях, выполненных из жести (рисунок 6). Одна из моделей балки имела размеры $31,5 - 2,7 - 0,019 - 0,6 - 0,038\text{см} - 0,63 - 0,41$. Для предотвращения выпучивания стенки в зонах приложения внешних сил на концах модели были установлены двухсторонние ребра жесткости, равные ширине полки.



Рисунок 6 – Конструкции моделей перфорированных балок:

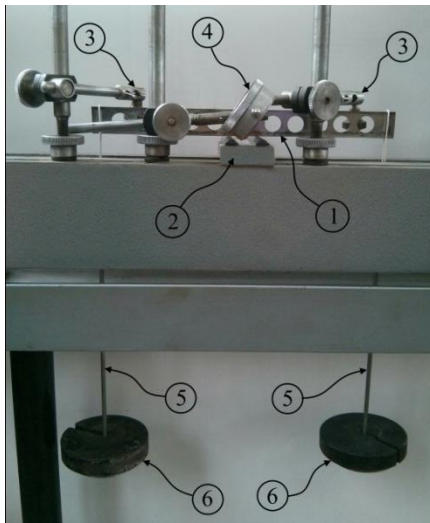
а) модель длиной 315 мм; б) модель длиной 200 мм

Местная устойчивость модели балки с круглыми вырезами (рисунок 7) исследовалась в варианте нагружения двухконсольной балки двумя сосредоточенными силами, приложенными на концах. При таком нагружении поперечная сила на каждой консоли была постоянной величиной.

Выпучивание перемычек фиксировалось индикаторами часового типа 4, позволяющими измерять перемещение с точностью до 0,01 мм (рисунок 7,а).

Критическая нагрузка, определенная экспериментально, оказалась равной $V_M^3 = 69,8$ Н. Характерно, что она же, по-существу, явилась и предельной нагрузкой, соответствующей несущей способности балки, поскольку вслед за первой пе-

ремычкой при небольшом росте нагрузки выпучились и остальные перемычки (рисунок 7,б).



а)



б)

Рисунок 7 – Испытание маломасштабной модели на устойчивость:

а) установка для испытаний на устойчивость; б) вид модели при потере устойчивости

Примечательно, что и конечно-элементный расчет дает такую же картину потери устойчивости перемычек.

Конечно-элементный расчет модели с помощью комплекса ANSYS привел к значению $V_M^3 = 65,87$ Н. Указанное расхождение порядка 6% может быть объяснено конструктивными особенностями модели.

Полученная выше зависимость (11) для оценки критической нагрузки перфорированных балок показала удовлетворительную точность при сопоставлении с результатами эксперимента на моделях из жести. Так, расчет модели размерами $315 - 27 - 0,19 - 6 - 0,38\text{мм} - 0,63 - 0,41$ по (11) дает

$$V_{\text{кр}}^{\text{перф}} = 1,39(0,41 + 1,16)(1 - 0,61 \cdot 0,63) \cdot 0,19^3 \cdot 2,1 \cdot 10^5 / 27 = 71,7 \text{ Н}.$$

Расхождение в величинах критических нагрузок, полученных экспериментально $V_M^3 = 69,8$ Н, и по эмпирической зависимости (11) не превысило 2,7%.

Кроме моделей малых масштабов порядка 1:20, были проведены испытания также натурной конструкции размерами $410 - 48 - 0,2 - 10 - 0,3\text{см} - 0,667 - 0,5$ (рисунок 8,а). При этом основная задача эксперимента заключалась в сопоставлении с расчетной критической нагрузкой балки МКЭ $V_{\text{кр}}^{\text{МКЭ}}$, что позволило бы оценить, существенно ли влияние некоторых несовершенств конструкции на величину

критической нагрузки.

Критическая нагрузка натурной конструкции, вызывающая потерю устойчивости ближайшей к опоре перемычки (рисунок 8,б), соответствующая нагружению балки двумя сосредоточенными силами получилась равной $V_{кр}^э = 4,9$ кН, а расчет МКЭ привел к значению $V_{кр}^{МКЭ} = 5,108$ кН, что приводит к расхождению примерно в 4%.



а)



б)

Рисунок 8 - Местная устойчивость балки: а) общий вид; б) потеря устойчивости перемычки

Применение эмпирической зависимости (11) к оценке критической нагрузки натурной конструкции приводит к значению

$$V_{кр}^{перф} = 1,39(0,5 + 1,16)(1 - 0,61 \cdot 0,667) \cdot 2^3 \cdot 2,1 \cdot 10^5 / 480 = 4,79 \text{ кН}.$$

Расхождение с экспериментом $V_{кр}^э = 4,9$ кН составляет 2,2%.

Проведенные эксперименты на натурной конструкции (рисунок 8,а), имеющей 8 вырезов диаметром 320 мм, показали, что расчеты МКЭ дают вполне надежные результаты. Они подтвердили справедливость зависимости (11) для определения критической нагрузки.

В работе также исследовалось влияние параметров балки, на критическую нагрузку, соответствующую местной потере устойчивости.

Полученная зависимость (13), позволяющая пересчитывать критическую нагрузку перфорированной балки с модели на натуру, была проверена соответствующими расчетами методом конечных элементов при варьировании разных параметров балки, таких как коэффициент Пуассона, толщина полок и стенки и модуль Юнга.

Проведенные исследования показали удовлетворительное согласование влияния рассмотренных параметров на критическую нагрузку перфорированной балки с круглыми вырезами.

Заключение

Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. На языке APDL разработаны программы создания расчетных моделей перфорированных балок с круглыми вырезами в стенке;
2. Установлено, что максимальные величины эквивалентных напряжений $\sigma_{\max}^{\text{экв}}$ вблизи контуров вырезов при нагружении сосредоточенной силой распределяются пропорционально изгибающему моменту;
3. Получена инженерная зависимость для оценки $\sigma_{\max}^{\text{экв}}$ в балках с круглыми вырезами при постоянной поперечной силе и разных параметрах перфорации;
4. Определены величины коэффициентов концентрации эквивалентных напряжений по Мизесу при поперечном и чистом изгибе в районе вырезов;
5. Установлено, что наличие консольного выпуска, как и его конструктивное оформление, не оказывает значительного влияния на характер распределения и уровень напряжений в перфорированной балке;
6. На основе теории составных стержней получена инженерная зависимость для оценки прогибов перфорированных балок с круглыми вырезами при разных параметрах перфорации;
7. Установлено, что наличие перфорации снижает критическую нагрузку, соответствующую общей потере устойчивости двутавровой балки на 14 – 40% в зависимости от условий опирания;
8. Получена инженерная зависимость для оценки критической нагрузки БКВ, соответствующей местной потере устойчивости стенки при сдвиге;
9. Получена зависимость для пересчета критической нагрузки, полученной в результате испытания модели, на критическую нагрузку натурной конструкции с учетом геометрического подобия при разных материалах модели и натуре;
10. Экспериментальные исследования натурной конструкции и маломасштабных моделей, подтвердили приемлемость предложенных в работе инженерных зависимостей.

В диссертации рассматривались задачи обеспечения общей и местной устойчивости перфорированных балок с круглыми вырезами, а также задача расчета напряженно-деформированного состояния их в упругой стадии для нескольких видов нагружения. В дальнейшем предполагается продолжить исследования напряженно-деформированного состояния и устойчивости перфорированных балок для других схем приложения нагрузки. В перспективе возможно изучение поведения перфорированных балок в закритической стадии работы после потери устойчивости части стенки, а также решение задачи оценки несущей способности перфорированных балок.

Такие исследования имеют важное прикладное значение, так как применение перфорированных балок в современном строительстве увеличивается с каждым годом.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Научные статьи, опубликованные в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованный ВАК РФ:

1. Притыкин А.И. Прогибы перфорированных балок с круглыми вырезами. / А.И. Притыкин, **А.С. Лаврова** // Вестник ТГАСУ. – 2015. – №3. – С. 94-102.
2. Притыкин А.И. Отечественный и зарубежный подходы к оценке прогибов перфорированных балок. / А.И. Притыкин, **А.С. Лаврова** // Строительная механика и расчет сооружений. – 2015. – №6. – С. 17-23.
3. Притыкин А.И. Распределение напряжений в перфорированных балках с круглыми вырезами при поперечном изгибе. / А.И. Притыкин, **А.С. Лаврова** // Промышленное и гражданское строительство. – 2017. – №2 – С. 81-85.
4. **Лаврова А.С.** Моделирование местной устойчивости перфорированных балок с круглыми вырезами: расчеты МКЭ и эксперименты на конструкциях из жести. / **А.С. Лаврова**, А.И. Притыкин // Вестник МГСУ.– 2017.– Т.12 – Вып.10(109). – С.1115-1124.

Научные статьи, опубликованные в других журналах и материалах конференций

5. Pritykin A. Stress-strain state and local buckling of perforated steel beams with different openings shapes. / A. Pritykin, **A. Lavrova** // Proceedings of the 19th international conference «Mechanika – 2014». (24-25.04.2014). Kaunas.: «Technologija» Lithuania, 2014. – P. 219-224.

6. Притыкин А.И. Касательные напряжения в перемычках перфорированных балок с круглыми вырезами. / А.И. Притыкин, **А.С. Лаврова** // Труды XII международной научной конференции «Инновации в науке, образовании и бизнесе – 2014» (15-17.10.2014). Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2014. – С. 313-315.

7. **Лаврова А.С.** Технология изготовления моделей перфорированных балок для испытания на устойчивость. / **А.С. Лаврова** // Сборник трудов XVIII Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (22-24.04.2015). М.; Изд-во ФГБОУ ВПО «МГСУ», 2015. – С. 260-263.

8. Притыкин А.И. К вопросу определения прогибов перфорированных балок с разной формой вырезов / А.И. Притыкин, **А.С. Лаврова** // III Международный Балтийский морской форум. Международная научная конференция «Прогрессивные технологии, машины и механизмы в машиностроении и строительстве» (24-30.05.2015): тез. докл. – V том. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2015. – С. 87-89.

9. Притыкин А.И. Напряженное состояние перфорированных балок с разной формой вырезов / А.И. Притыкин, **А.С. Лаврова** // III Международный Балтийский морской форум. Международная научная конференция «Прогрессивные технологии, машины и механизмы в машиностроении и строительстве» (24-30.05.2015): тез. докл. – V том. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2015. – С. 90-92.

10. **Лаврова А.С.** Технология изготовления перфорированных балок с круглыми вырезами в стенке / **А.С. Лаврова** // IV Международный Балтийский морской

форум: материалы Международного морского форума (22-28.05.2016) – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2016. – С. 1244-1248.

11. **Лаврова А.С.** Сравнительный анализ прогибов перфорированных балок с круглыми и шестиугольными вырезами / **А.С. Лаврова** // IV Международный Балтийский морской форум. II Международная научная конференция «Прогрессивные технологии, машины и механизмы в машиностроении и строительстве» (22-28.05.2016): тез. докл. – Ч.5 – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2016. – С. 86-89.

12. Притыкин А.И. Особенности расчета перфорированных балок МКЭ / А.И. Притыкин, **А.С. Лаврова**, А.Е. Мисник // Известия КГТУ – 2016. – №43. – С. 249-259.

13. Pritykin A.I. Prediction of the stress level and stress concentration in cellular beams with circular openings / A.I. Pritykin, **A.S. Lavrova** // *Mechanika*. – 2017. – Vol. 23(4). – P. 488-494.

14. Притыкин А.И. Исследование местной устойчивости флоров с круглыми вырезами на моделях из жести и МКЭ / А.И. Притыкин, **А.С. Лаврова**, А.В. Карпенко, А.М. Шинко // V Международный Балтийский морской форум. V Международная научная конференция «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии» (21-27.05.2017): тез. докл. – Ч.1 – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2017. – С. 86-88.

15. Притыкин А.И. Экспериментально-теоретическое исследование жесткости и устойчивости перфорированных балок с круглыми вырезами / А.И. Притыкин, **А.С. Лаврова** // Известия КГТУ – 2017. – №46. – С. 152-163.

Объекты интеллектуальной собственности

16. Притыкин А.И. Программа IB-CIRCLE создания расчетной модели перфорированной балки с круглыми вырезами. / А.И. Притыкин, **А.С. Лаврова** // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014614234 от 21.04.2014 г.

17. Притыкин А.И. Программа ARCH-CIRCLE создания расчетной модели перфорированной арки с круглыми вырезами. / А.И. Притыкин, **А.С. Лаврова** //

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014614625
от 29.04.2014 г.

18. Притыкин А.И. Программа BCIRCLE-CONSOLE создания расчетной модели перфорированной балки с двумя консолями. / А.И. Притыкин, **А.С. Лаврова** // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015613351
от 12.03.2015 г.

Лаврова Анна Сергеевна

Совершенствование методов расчета
перфорированных балок с круглыми вырезами
с помощью конечно-элементного анализа и моделирования

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук