

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 624.074.421

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-2-104-111

*Н.Л. ТИШКОВ, А.Н. СТЕПАНЕНКО, И.Л. ШИПЕЛЕВ, М.Б. УСТИМЕНКО,  
Тихоокеанский государственный университет*

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ СТАЛЬНОЙ ДВУТАВРОВОЙ БАЛКИ С ТОНКОЙ ПОПЕРЕЧНО-ГОФРИРОВАННОЙ СТЕНКОЙ

В статье рассмотрен способ повышения устойчивости поперечно-гофрированной стенки за счет применения двойного профиля гофрирования (мультигофрирование). Выполнен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния работы моделей балок с поперечно-гофрированными стенками с различными типами профилей, включая двойной профиль гофрирования. Проведены численные эксперименты с заданными расчетными схемами гофрированных балок с одинаковыми пролетами, граничными условиями, нагрузками и характеристиками материалов. Для рассматриваемых моделей балок в программном комплексе ЛИРА-САПР получены формы потери устойчивости гофрированных стенок с коэффициентами запаса, деформированные схемы и изополя распределения нормальных и касательных напряжений.

**Ключевые слова:** треугольный профиль гофра; синусоидальный профиль гофра; двойной профиль гофрирования; мультигофрирование; устойчивость.

**Для цитирования:** Тишков Н.Л., Степаненко А.Н., Шипелев И.Л., Устименко М.Б. Совершенствование конструкции стальной двутавровой балки с тонкой поперечно-гофрированной стенкой // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 2. С. 104–111.  
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-2-104-111

*N.L. TISHKOV, A.N. STEPANENKO, I.L. SHIPELEV, M.B. USTIMENKO,  
Pacific National University*

## STRUCTURAL IMPROVEMENT OF STEEL I-BEAM WITH THIN TRANSVERSELY CORRUGATED WALL

The article describes the stability improvement of a transversely corrugated wall by using a double profile of corrugation (multi-corrugation). A comparative analysis is performed for the stress-strain state of the transversely corrugated beams with different profile, including the double profile corrugation. Numerical experiments are carried out with predetermined design patterns for corrugated beams with the similar spans, boundary conditions, loads and material properties. The loss of stability of the corrugated walls with safety factors, deformation patterns and

isofields of the normal and tangential stress distribution are obtained for the considered beam models constructed in LIRA-CAD building design and calculation program.

**Keywords:** triangular profile; sine profile; double profile; multi-corrugation; stability.

**For citation:** Tishkov N.L., Stepanenko A.N., Shipilev I.L., Ustimenko M.B. Sovershenstvovanie konstruktssii stal'noi dvutavrovoy balki s tonkoi poperechno-gofrirovannoi stenкой [Structural improvement of steel I-beam with thin transversely corrugated wall]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturo-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 2. Pp. 104–111. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-2-104-111

В настоящее время наиболее распространённым конструктивным элементом для конструирования элементов перекрытия являются стальные двутавровые прокатные и сварные балки. Перед инженерами ставится главная задача – максимально эффективно использовать материал для конструкции, а также по возможности уменьшить расходы на ее изготовление и монтаж. Наиболее перспективным направлением понижения материалоемкости стальных строительных конструкций является применение тонколистовых элементов пространственной формы. Одним из наиболее ярких примеров является сварная балка с тонкой поперечно-гофрированной стенкой, в которой избежать потерю устойчивости стенки и снизить расход стали позволяет применение тонкой поперечно-гофрированной стенки [1–13].

### Цели и задачи

Целью настоящей работы является усовершенствование конструкции стальной двутавровой балки с тонкой поперечно-гофрированной стенкой для повышения местной устойчивости стенки.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- повысить местную устойчивость гофрированной стенки за счет применения двойного профиля гофрирования;
- оценить напряженно-деформированное состояние (НДС) балок с классическим гофрированием стенки и двойным профилем гофрирования стенки;
- оценить устойчивость гофрированных стенок посредством программного комплекса ПК ЛИРА-САПР;
- провести сравнительный анализ полученных результатов исследования.

Повысить устойчивость гофрированной стенки двутавровой балки предлагается за счет применения двойного профиля гофрирования. По [13] толщина гофрированной стенки назначается по условиям прочности (на срез или местное сжатие), а ее устойчивость обеспечивается размерами гофров, при этом возможны два вида потери устойчивости:

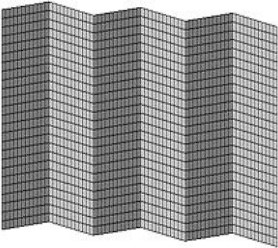
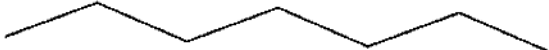
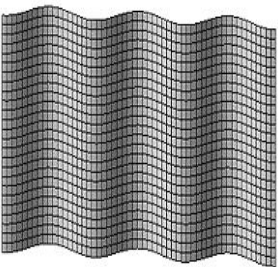

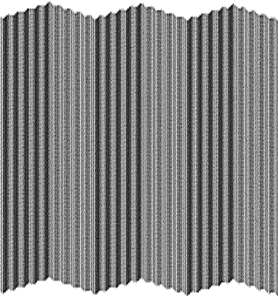

- потеря «общей» устойчивости стенки, сопровождается выпучиванием гофрированной стенки на всей ее высоте как плоской или выпучиванием нескольких гофров (наблюдается на опорных участках при значительных поперечных усилиях);
- потеря «местной» устойчивости стенки, сопровождается выпучиванием отдельных участков гофров (наблюдается при значительных сосредоточенных силах).

Оценка НДС гофрированных балок с различными вариантами поперечных гофров (треугольный, синусоидальный и синусоидальный по треугольной образующей) выполнялась в программном комплексе ЛИРА-САПР.

Рассматриваемые варианты поперечного гофрирования стенки представлены в табл. 1.

Таблица 1

Варианты поперечного гофрирования стенки балки

	Пространственная модель	Тип профиля стенки
Треугольный		
Синусоидальный		
Синусоидальный по треугольной образующей		

### Моделирование работы сварных балок двутаврового сечения с тонкими поперечно-гофрированными стенками

Моделирование балок с поперечно-гофрированными стенками выполнялось пластинчатыми трехузловыми конечными элементами типа КЭ-42 и четырехузловыми конечными элементами типа КЭ-44 с постоянными (одинаковыми) во всех направлениях параметрами упругости: модулем упругости материала  $E = 2 \cdot 10^4$  кН/см<sup>2</sup>, коэффициентом Пуассона  $\nu = 0,3$ . Разбивка поясов и стенки задавалась в соответствии с ломаной геометрией стенки мелкой

узловой сеткой. Фрагменты рассматриваемых конечно-элементных моделей представлены на рис. 1.

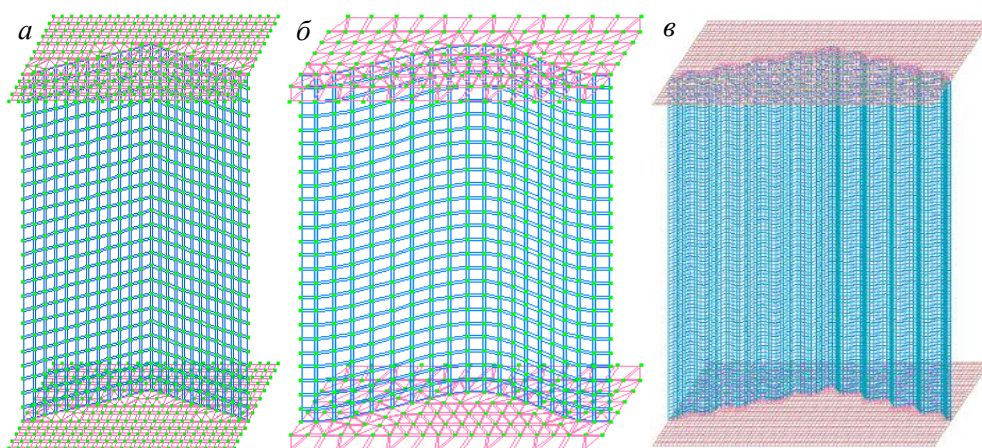


Рис. 1. Фрагменты конечно-элементных моделей балок:

*a* – стенка с треугольным профилем гофров; *б* – стенка с синусоидальным профилем гофров; *в* – стенка с синусоидальным по треугольной образующей профилем гофров

В ПК ЛИРА реализован способ оценки устойчивости при условии работы системы в упругой области [14]. Основная задача расчета на устойчивость – определение критического параметра  $k$ . Физический смысл критического параметра потери устойчивости конструкции состоит в том, что если увеличить нагрузки, действующие на конструкцию в  $k$  раз, то система потеряет устойчивость. В ПК ЛИРА-САПР предполагается, что распределение усилий (напряжений) известно из решения линейной статической задачи, при этом все нагрузки, приложенные к системе, растут пропорционально параметру  $k$ . Решением задачи является определение числового параметра  $k$ , при котором произойдет потеря устойчивости.

В рамках научной работы были проведены численные эксперименты с заданными расчетными схемами гофрированных балок с одинаковыми пролетами (3,6 м), граничными условиями (шарнирно-опертая балка), нагрузками и характеристиками материалов. Во всех рассматриваемых вариантах были применены одинаковые геометрические параметры сечения (поояса 170×6 мм, стенка 500×15 мм) и гофрирования: длина полуволны 180 мм, высота 30 мм.

Нагрузка к балкам прикладывалась двух вариантов:

- равномерно распределенная величиной в 3,05 т/м для оценки НДС балок и «общей» устойчивости стенок;
- сосредоточенная величиной 2,75 т (с условной длиной распределения в 100 мм) с шагом 0,9 м для оценки НДС балок и «местной» устойчивости стенок.

Основные результаты расчета от равномерно распределенной нагрузки для трех вариантов поперечного гофрирования стенок балок представлены в табл. 2.

Основные результаты расчета от сосредоточенных нагрузок для трех вариантов поперечного гофрирования стенок балок представлены в табл. 3.

Таблица 2

## Результаты расчета балок от равномерно распределенной нагрузки

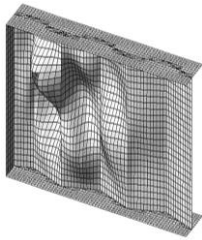
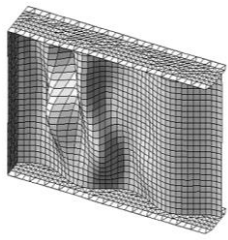
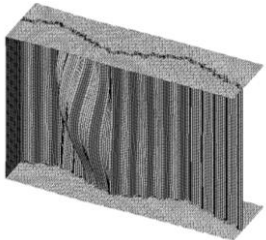
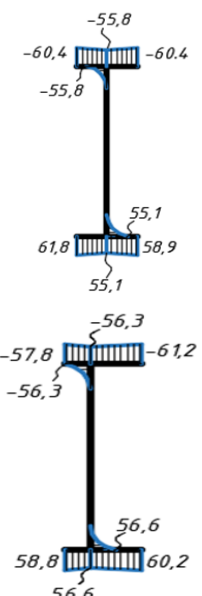
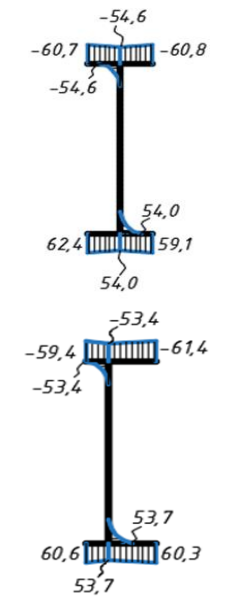
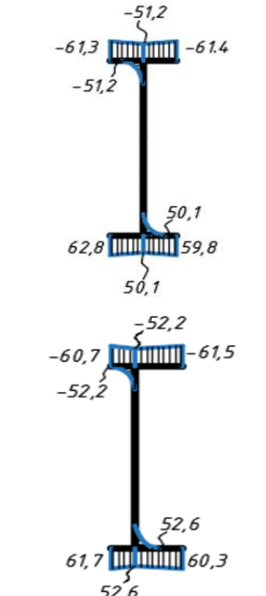
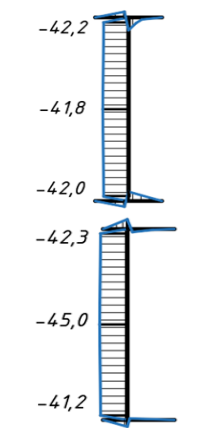
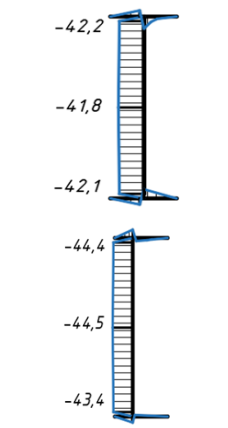
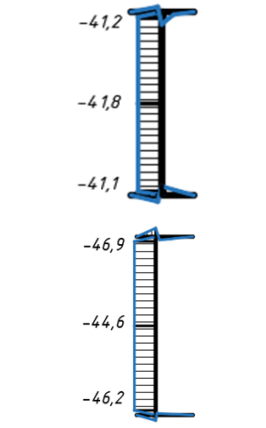
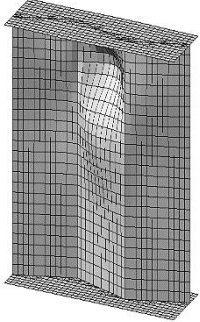
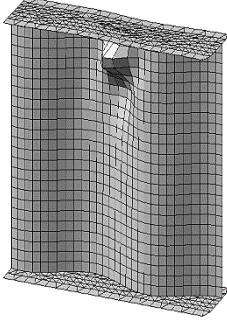
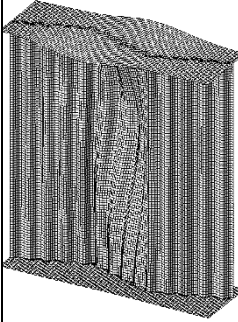
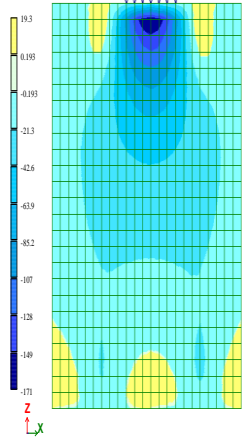
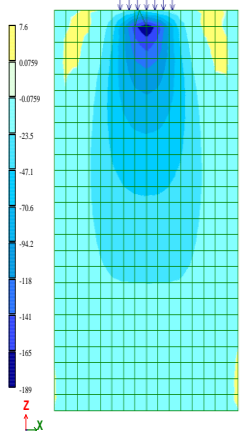
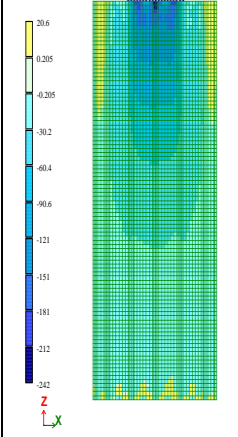
Вариант гофрирования	Треугольный	Синусоидальный	Синусоидальный по треугольной образующей
Форма потери устойчивости			
$k$	1,78601	5,22287	7,31829
Прогиб в середине пролета, мм	2,31	2,37	2,39
Нормальные напряжения в середине пролета, МПа (сверху – для симметричного сечения, снизу – для асимметричного сечения)	 <p>Values: -55,8, -60,4, -55,8, 55,1, 61,8, 58,9, 55,1, -57,8, -56,3, -61,2, -56,3, 58,8, 60,2, 56,6, 56,6</p>	 <p>Values: -54,6, -60,7, -54,6, 54,0, 62,4, 59,1, 54,0, -59,4, -53,4, -61,4, -53,4, 60,6, 60,3, 53,7, 53,7</p>	 <p>Values: -51,2, -61,3, -51,2, 50,1, 62,8, 59,8, 50,1, -60,7, -52,2, -61,5, -52,2, 61,7, 60,3, 52,6, 52,6</p>
Касательные напряжения на припорном участке, МПа (сверху – для симметричного сечения, снизу – для асимметричного сечения)	 <p>Values: -42,2, -41,8, -42,0, -42,3, -45,0, -41,2</p>	 <p>Values: -42,2, -41,8, -42,1, -44,4, -44,5, -43,4</p>	 <p>Values: -41,2, -41,8, -41,1, -46,9, -44,6, -46,2</p>

Таблица 3

## Результаты расчета балок от сосредоточенных нагрузок

Вариант гофрирования	Треугольный	Синусоидальный	Синусоидальный по треугольной образующей
Форма потери устойчивости			
$k$	0,964579	2,27909	5,18362
Прогиб в середине пролета, мм	3,43	3,53	3,57
Изополя нормальных напряжений в стенке под сосредоточенной силой, МПа			

На основании анализа полученных данных можно сделать следующие выводы:

– гофрированная стенка с синусоидальным по треугольной образующей типом гофров имеет самые высокие коэффициенты потери устойчивости из рассматриваемых вариантов,  $k = 7,31829$  – при потере «общей» устойчивости и  $k = 5,18362$  – при потере «местной» устойчивости;

– балка с треугольным профилем гофров является наименее деформативной из рассматриваемых вариантов, что вызвано более интенсивным вовлечением стенки (участков стенки) в работу на продольные усилия;

- распределение нормальных напряжений в поясах балок отличается незначительно, но при этом во всех вариантах напряжения распределяются неравномерно, что вызвано периодическим смещением стенки с оси стержня [15];
- распределение касательных напряжений по стенкам носит равномерный характер.

### Выводы

В ходе проведенного численного эксперимента установлено, что применение двойного профиля гофрирования существенно повышает «общую» и «местную» устойчивость гофрированной стенки двутавровой балки, что обеспечивает более рациональное использование ее материала.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горнов В.Н. Несущие металлические конструкции на основе тонколистового проката // Проект и стандарт. 1937. № 3. С. 25–28.
2. Ажермачев Г.А. Исследование сварных стальных балок с волнистыми стенками : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.01 / Ажермачев Геннадий Арсентьевич. Новосибирск : НИСИ, 1969. 16 с.
3. Степаненко А.Н. Прочность и устойчивость конструкций из двутавра с волнистой стенкой : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.01 / Степаненко Анатолий Николаевич. Хабаровск, 2001. 48 с.
4. 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.
5. Chan C.L., Khalid, Y.A., Sahari B.B., Hamouda A.M.S. Finite element analysis of corrugated web beams under bending // J. Constr. Steel Res. 2002. № 58 (11). P. 1391–1406.
6. Denan F., Osman M.H., Saad S. The study of lateral torsional buckling behaviour of beam with trapezoid web steel section by experimental and finite element analysis // Int. J. Res. Rev. Appl. 2010. Sci. 2(2). P. 232.
7. Elgaaly M., Seshadri A. Steel built-up girders with trapezoidally corrugated webs // Engineering journal, st.Quarter, London : AISC, 1988.
8. Johnson R.P., Caffola J. Local flange buckling in plate girders with corrugated webs // Proceeding Instn Civil Engineering Structures and Buildings. 1997.
9. Khalid Y.A., Chan C.L., Sahari B.B., Hamouda A.M.S. Bending behaviour of corrugated web beams // J. Mater. Process. Technol. 2004. № 150 (3). P. 242–254.
10. Kovesdi B., Braun B., Kuhlmann U., Dunai L. Patch loading resistance of girders with corrugated webs // J. Constr. Steel Res. 2010. № 66 (12). P. 1445–1454.
11. De'nan F., Shoong K.K., Hashim N.S., Ken C.W. Nonlinear analysis of triangular web profile steel section under bending behavior // Lecture Notes in Civil Engineering. 2019. № 9. P. 463–472.
12. Osman M.H. Shear buckling of trapezoid web profile section // International Conference on Numerical Method in Structural Engineering. Indonesia, 2001.
13. Степаненко А.Н. Стальные двутавровые стержни с волнистой стенкой. Хабаровск : Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 1999. 115 с.
14. ЛИРА-САПР. Верификационный отчет. Том I. Москва, 2015. 51 с.
15. Степаненко А.Н., Тишков Н.Л. О дополнительных усилиях в поясах стальных балок с тонкими поперечно-гофрированными стенками // Вестник ТОГУ. 2014. № 4 (35). С. 49–52.

### REFERENCES

1. Gornov V.N. Nesushchie metallicheskie konstruksii na osnove tonkolistovogo prokata [Bearing metal structures based on sheet metal]. *Proekt i standart*. 1937. No. 3. Pp. 25–28. (rus)
2. Azhermachev G.A. Issledovanie svarnykh stal'nykh balok s volnistymi stenkami: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Welded steel beams with corrugated walls. PhD Abstract]. Novosibirsk: NISI, 1969. 16 p. (rus)



3. Stepanenko A.N. Prochnost' i ustoichivost' konstruksii iz dvutavra s volnistoi stenкой: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Structural stability of I-beams with corrugated walls. PhD Abstract]. Khabarovsk, 2001. 48 p. (rus)
4. Ostrikov G.M., Maksimov Yu.S., Dolinskii V.V. Issledovanie nesushchei sposobnosti stal'nykh dvutavrovyykh balok s vertikal'no gofrirovannoi stenкой [Bearing capacity of steel I-beams with vertical corrugated walls]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 1983. No. 1. Pp. 68–70. (rus)
5. Chan C.L., Khalid, Y.A., Sahari B.B., Hamouda A.M.S. Finite element analysis of corrugated web beams under bending. *Journal of Constructional Steel Research*. 2002. No. 58 (11). Pp. 1391–1406. (rus)
6. Denan F., Osman M.H., Saad S. The study of lateral torsional buckling behaviour of beam with trapezoid web steel section by experimental and finite element analysis. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2010. No. 2 (2). Pp. 232. (rus)
7. Elgaaly M., Seshadri A. Steel built-up girders with trapezoidally corrugated webs. *Engineering Journal*. London: AISC, 1988.
8. Johnson R.P., Caffola J. Local flange buckling in plate girders with corrugated webs. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings. 1997.
9. Khalid Y.A., Chan C.L., Sahari B.B., Hamouda A.M.S. Bending behaviour of corrugated web beams. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. No. 150 (3). Pp. 242–254.
10. Kovesdi B., Braun B., Kuhlmann U., Dunai L. Patch loading resistance of girders with corrugated webs. *Journal of Constructional Steel Research*. 2010. No. 66 (12). Pp. 1445–1454.
11. De'nan F., Shoong K.K., Hashim N.S., Ken C.W. Nonlinear analysis of triangular web profile steel section under bending behavior. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2019. No. 9. Pp. 463–472.
12. Osman M.H. Shear buckling of trapezoid web profile section. *Proc. Int. Conf. 'Numerical Method in Structural Engineering'*. Indonesia, 2001.
13. Stepanenko A.N. Stal'nye dvutavrovyye sterzhni s volnistoi stenкой [Steel I-rods with wavy walls]. Khabarovsk, 1999. 115 p. (rus)
14. LIRA-SAPR. Verifikatsionnyi otchet [LIRA-CAD. Verification report]. Vol. I. Moscow, 2015. 51 p. (rus)
15. Stepanenko A.N., Tishkov N.L. O dopolnitel'nykh usiliyakh v poyasakh stal'nykh balok s tonkimi poperechno-gofrirovannymi stenkami [Additional loads on steel beams with thin transverse corrugated walls]. *Vestnik TOGU*. 2014. No. 4 (35). Pp. 49–52. (rus)

#### Сведения об авторах

Тишков Николай Леонидович, канд. техн. наук, Тихоокеанский государственный университет, 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, n.tishkov87@gmail.com

Степаненко Анатолий Николаевич, докт. техн. наук, профессор, Тихоокеанский государственный университет, 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, stepanenko1941@mail.ru

Шипелев Иван Леонидович, преподаватель, Тихоокеанский государственный университет, 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, iva-shipelev@mail.ru

Устименко Мария Борисовна, преподаватель, Тихоокеанский государственный университет, 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, mariyabelyakova1991@mail.ru

#### Authors Details

Nikolay L. Tishkov, PhD, Pacific National University, 136, Tikhookeanskaya Str., 680035, Khabarovsk, Russia, n.tishkov87@gmail.com

Anatoly N. Stepanenko, DSc Engineering, Professor, Pacific National University, 136, Tikhookeanskaya Str., 680035, Khabarovsk, Russia, stepanenko1941@mail.ru

Ivan L. Shipelev, Lecturer, Pacific National University, 136, Tikhookeanskaya Str., 680035, Khabarovsk, Russia, iva-shipelev@mail.ru

Maria B. Ustimenko, Lecturer, Pacific National University, 136, Tikhookeanskaya Str., 680035, Khabarovsk, Russia, mariyabelyakova1991@mail.ru