

А.О. ЛУКИН
В.Ю. АЛПАТОВ
Д.Д. ЧЕРНЫШЕВ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНОГО РЕШЕНИЯ БАЛКИ С ГОФРИРОВАННОЙ СТЕНКОЙ

IMPROVING CONSTRUCTIVE SOLUTION OF BEAM WITH CORRUGATED WALL

Выполнен анализ путей совершенствования для несущих конструкций – металлических балок с гофрированной стенкой. Определены «слабые» места, ограничивающие их несущую способность. Установлено, что критерием, определяющим несущую способность тонкостенной гофрированной балки, является ее местная устойчивость. Предложено авторское решение по повышению устойчивости гофрированной стенки балки, заключающееся в придании гофрированной стенке дополнительно штампованного профиля различной геометрии. Установлено влияние формы и размеров штамповки стенки на несущую способность гофрированной балки. Выполнены исследования, подтверждающие эффективность предложенного конструктивного решения повышения устойчивости гофрированной стенки. Получена предварительная оценка степени повышения несущей способности балки со штамповкой ее стенки.

Ключевые слова: балка с гофрированной стенкой, штамповка, потеря устойчивости, прогиб, напряженно-деформированное состояние, материалоемкость, экономичность, жесткость

Существует мнение, что самым универсальным конструктивным элементом для организации перекрытия является балка. Несмотря на ее универсальность и широкое применение, задача снижения материалоемкости стальных балок весьма актуальна.

Задача эффективного использования материала может быть обеспечена за счет совершенствования конструктивных решений традиционных строительных конструкций. Одним из известных эффективных направлений уменьшения материалоемкости стальных балок является снижение расхода металла

The analysis of improving ways to test for load-bearing structures - metal beams with corrugated wall was conducted. «Weak» places, limiting their load-bearing capacity were determined. It was found that the criterion for determining the carrying capacity of thin-walled corrugated beam is its local resistance. The author's solution to increase the local stability of the corrugated wall beams was suggested. Author's solution is to give the corrugated wall of further extruded profile of different geometry. The influence of the shape and size of punching the wall on the carrying capacity of corrugated beams was determined. The studies confirming the effectiveness of the proposed constructive solutions increase the stability of the corrugated wall are conducted. Preliminary assessment of the degree of increase of the bearing capacity of the beam by punching its wall is obtained.

Keywords: beam with corrugated wall, stamping, buckling, deflection, stress-strained state, consumption of materials, economy, rigidity

на стенку [1-3]. Использование локального [4, 5] или полного гофрирования листа стенки [6-9] позволяет повысить несущую способность балки за счёт повышения устойчивости стенки. В настоящее время изучение влияния способов гофрирования стенки на повышение её устойчивости является одним из перспективных направлений для изучения [10-17].

Современные технологии изготовления позволяют произвести синусоидальные гофрированные стенки толщиной 2-3 мм, трапециевидальные – 3-5 мм, треугольные – 2-8 мм. Известно, что при загрузении

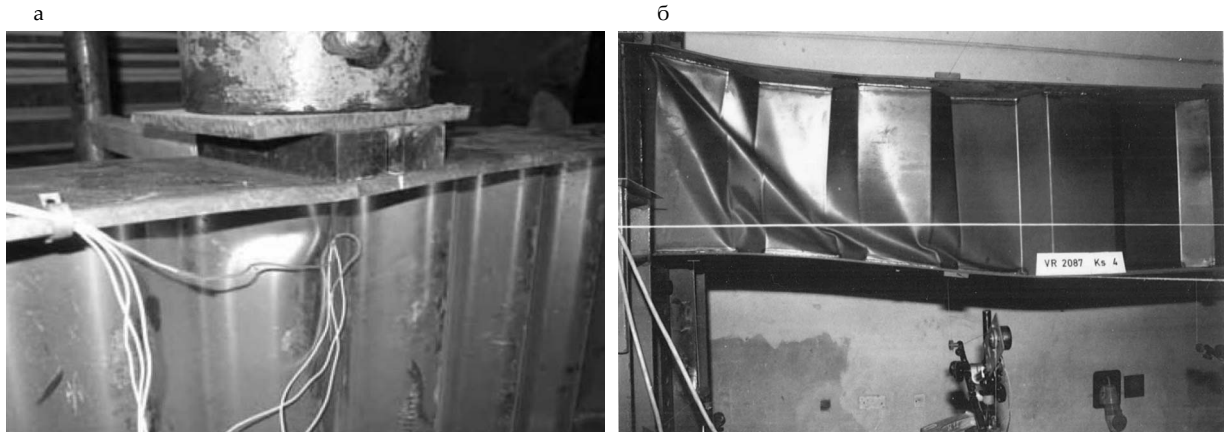


Рис. 1. Потеря устойчивости гофрированной стенки:
а – потеря устойчивости гофра под сосредоточенной силой; б – потеря устойчивости стенки около опоры

гофрированной балки сосредоточенной нагрузкой толщина тонкой гофрированной стенки определяет несущую способность балки в целом [18]. Потеря несущей способности гофрированной балки происходит в результате потери местной устойчивости стенки. Потеря устойчивости стенки наблюдается либо в месте приложения сосредоточенной силы (рис. 1, а), либо в опорной зоне балки (рис. 1, б). Таким образом, потеря устойчивости гофров стенки возникает на локальных участках с проявлением значительной поперечной силы в стенке [19]. При этом вся остальная балка, за исключением указанных участков, находится в состоянии, способном к восприятию дополнительной нагрузки. Из этого следует необходимость придания большей устойчивости гофрам в местах возникновения большой поперечной силы. Повысить местную устойчивость стенки можно конструктивными мероприятиями.

Цель работы заключается в усовершенствовании конструкции стальной балки с гофрированной стенкой, направленном на повышение местной устойчивости гофрированной стенки.

Для достижения поставленной цели авторы предлагают:

- 1) повысить местную устойчивость тонкой гофрированной стенки штамповкой на ее поверхности полых тел различной геометрии;
- 2) выполнить исследования напряженно-деформированного состояния усовершенствованной балки, общей устойчивости балки и местной устойчивости ее стенки;
- 3) провести сравнительный анализ жесткостных и прочностных характеристик предложенной балки и известного аналога (подобной гофробалки без штамповки на стенке).

Наличие выштампованных полых тел в стальном плоском листе повышает его жесткость и сопротивление местной потере устойчивости [20]. Для гофрированного листа штамповка полых тел на его поверхности дает возможность существенно уменьшить отношение высоты гофров к их шагу либо позволяет уменьшить толщину стенки при сохранении параметров гофров. Данное обстоятельство приводит к тому, что за счет увеличения местной и локальной устойчивости стенки повышается несущая способность балки и снижается ее материалоемкость.

Для балки заявленной конструкции отсутствует методика расчета и данные о ее фактической работе. Поэтому авторами выполнены численные исследования виртуальных моделей балок методом конечных элементов (МКЭ). В результате проведенных численных экспериментов устанавливалось напряженно-деформированное состояние балки и рассчитывались коэффициенты запаса устойчивости. Исследования проводились для трех вариантов балок одновременно: традиционная гофробалка; гофробалка со штамповкой в зоне повышенных поперечных сил; гофробалка со сплошной штамповкой по всей длине балки. Методика исследований различных вариантов гофрированных балок заключалась в сравнении полученных расчётным путём деформаций, напряжений и коэффициентов запаса устойчивости стенки. Для численного эксперимента было выбрано три балки с разными профилями гофров: треугольный, трапециевидный, прямоугольный (рис. 2).

В качестве расчетной схемы принята простая балка на двух опорах, нагруженная равномерно распределенной нагрузкой (рис. 3, а).

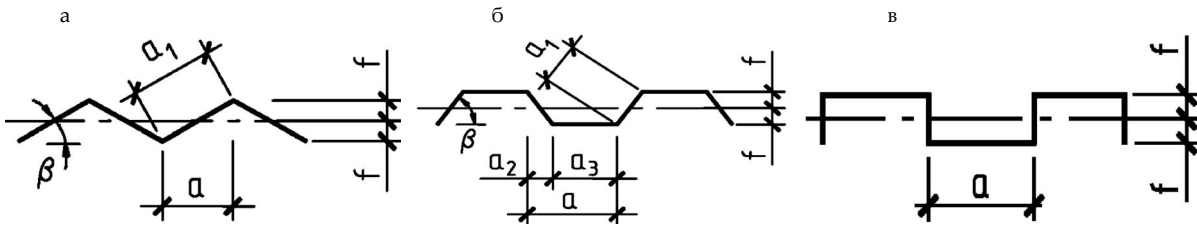


Рис. 2. Профиль гофрированной стенки: а – треугольный; б – трапециевидальный; в – прямоугольный; β – угол наклона панели гофра; a – длина полуволны; a_1 – длина наклонной грани; a_2 – длина проекции наклонной грани; a_3 – длина плоской грани; f – высота полуволны

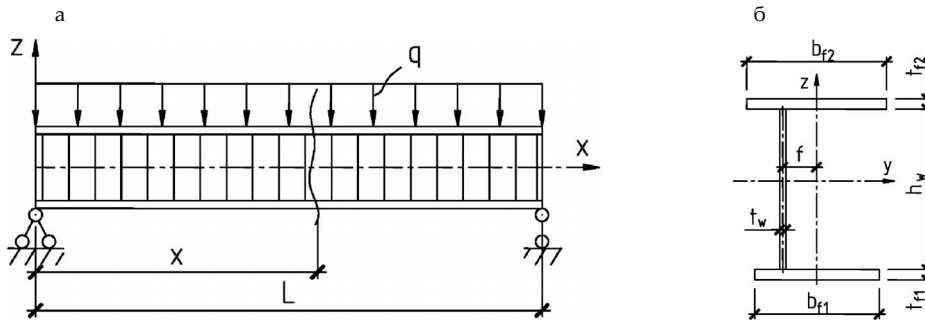


Рис. 3. К расчету балки с гофрированной стенкой: а – расчетная схема; б – поперечное сечение; x – расстояние до рассматриваемого сечения; L – пролет балки; q – равномерно распределенная нагрузка; b_{f1}, t_{f1} – ширина и толщина нижней полки; b_{f2}, t_{f2} – ширина и толщина верхней полки; h_w, t_w – высота и толщина стенки; f – высота полуволны

При расчете на устойчивость связи на балку промоделированы таким образом, чтобы не происходила потеря устойчивости плоской формы деформирования.

Геометрия сечения была принята симметричной (рис. 3, б), т.е. $t_{f1} = t_{f2} = t_f$ и $b_{f1} = b_{f2} = b_f$. Физические характеристики конечных элементов соответствуют стали С255. Принятые в численных исследованиях размеры балок с гофрированными стенками (БГС) и профили гофров приведены в табл. 1. При анализе результатов за расчетное сечение для эпюр напряжений принято сечение, расположенное на расстоянии $x = L/4$ от опоры; для прогибов – на расстоянии $x = L/2$.

Для каждого профиля гофров рассмотрено три типа балки в зависимости от расположения выштампованных полых тел: тип 1 – традиционная БГС (рис. 4, а); тип 2 – БГС с выштампованными полыми телами в опорной зоне (рис. 4, б); тип 3 – БГС

с выштампованными полыми телами по всей длине стенки (рис. 4, в).

Авторами созданы расчетные модели для исследования по МКЭ и проведен ряд вычислительных экспериментов с использованием программного комплекса (ПК) «Лира». Расчетная модель основана на использовании треугольных и четырехугольных конечных элементов универсального оболочечного типа, имеющих шесть степеней свободы. Расчет осуществлялся в упругой стадии.

При сравнении результатов, полученных для балок известной и предложенной конструкций (табл. 2), видно, что максимальные значения напряжений в сечении практически не меняются от количества и места расположения выштампованных тел. При этом максимальные значения нормальных напряжений различаются не более 0,5 %, а касательные напряжения уменьшаются на 2–15 %. Деформативность балок увеличивается с повышением количества

Таблица 1

Параметры гофрированных балок

№ балки	L , м	h_w , мм	t_w , мм	$b_{f1}=b_{f2}$, мм	$t_{f1}=t_{f2}$, мм	a , мм	f , мм	β	fa	Эскиз гофра
БГС1	1.4	220	2	120	12	70	12,5	19,65	0,18	/\ /\ /\
БГС2	7.2	566	3	320	20.5	360	80	45	0,22	_/_/_
БГС3	6	500	3	200	20	150	40	-	0,27	Г_Г

выштампованных полых тел. В балках с выштампованными телами только в опорных зонах прогибы увеличиваются на 3–5 %, а в балках со штамповкой по всей длине стенки – на 8–15 %.

Для расчета на устойчивость использован расчетный модуль «Устойчивость», входящий в состав

ПК «Ли́ра», который позволяет произвести проверку общей устойчивости рассчитываемой конструкции с определением коэффициента запаса и формы потери устойчивости. В процессе счета для нагружения определяется форма потери устойчивости и соответствующий ей коэффициент запаса.

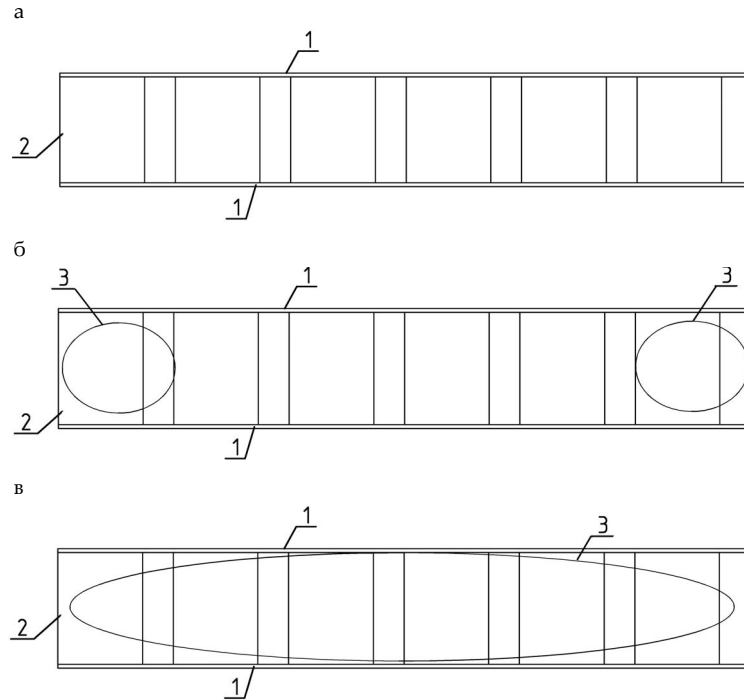


Рис. 4. Типы балок в зависимости от расположения выштампованных тел:
1 – полка балки; 2 – гофрированная стенка; 3 – зона выштамповки

Таблица 2

Результаты расчета МКЭ для балок с гофрированной стенкой

№ балки	Тип балки	Нагрузка q, кН/м	Напряжения в сечении x = L/4, кН/см ²		Прогибы y, мм, в сечении x = L/2	Коэфф. запаса k	δ ₁ , %	δ ₂ , %	δ ₃ , %	δ ₄ , %
			σ _{x,max}	τ _{xy,max}						
БГС1	1	200	11,472	16,04	2,88	2,92	0	0	0	0
	2		11,476	16,02	2,97	3,28	0,1	-0,2	3,2	12,4
	3		11,495	15,66	3,13	4,36	0,3	-2,4	8,7	49,4
БГС2	1	160	22,36	16,33	21,91	2,64	0	0	0	0
	2		22,36	16,33	22,56	2,91	0	0	3	10,3
	3		22,39	14,3	25	4,79	0,2	-12,5	14,2	81,5
БГС3	1	100	15,43	10,34	35,35	0,71	0	0	0	0
	2		15,41	10,33	36,92	0,89	-0,2	-0,1	4,5	25,4
	3		15,44	8,86	39,62	1,15	0,1	-14,4	12,1	62

Примечание. δ₁, δ₂, δ₃, δ₄ – разность результатов в БГС с выштампованными полыми телами к результатам в традиционной БГС для нормальных напряжений, касательных напряжений, прогибов и коэффициентов запаса соответственно:

$$\delta_1 = \frac{\sigma_i - \sigma_{тип1}}{\sigma_{тип1}} \cdot 100\%; \quad \delta_2 = \frac{\tau_i - \tau_{тип1}}{\tau_{тип1}} \cdot 100\%; \quad \delta_3 = \frac{y_i - y_{тип1}}{y_{тип1}} \cdot 100\%; \quad \delta_4 = \frac{k_i - k_{тип1}}{k_{тип1}} \cdot 100\%.$$

Коэффициент запаса k представляет собой отношение критического напряжения $\sigma_{кр}$ к расчетному напряжению в элементе σ :

$$k = \frac{\sigma_{кр}}{\sigma}.$$

Для рассматриваемых балок была определена первая форма потери устойчивости и соответствующий ей коэффициент запаса (см. табл. 2).

В результате расчета было установлено, что у балки с гофрированной стенкой, имеющей выштампованные полые тела, коэффициент запаса устойчивости повышается с увеличением количества граней, на которых выполнены штампованные тела. При наличии выштампованных полых тел устойчивость балки повышается в 1,1–1,8 раза (10–80 %).

Выводы. 1. Установлено, что устойчивость плоских участков гофрированной стенки повышается, если на них имеются выштампованные полые тела, при этом форма потери не изменяется, а лишь смещается на плоские участки без дополнительных элементов жесткости. При наличии выштампованных полых тел устойчивость балки повышается в 1,1–1,8 раза.

2. Эпюры нормальных и касательных напряжений в стенке практически не изменяются с появлением на стенке выштампованных полых тел, при этом значения нормальных напряжений не изменяются, а касательных уменьшаются на 12–15 %.

3. Деформативность балок повышается на 3–15 %.

4. Форма, размер и ориентация штампованных тел влияют на устойчивость граней, а следовательно, оптимальное расположение штампованных тел и их количество требует дополнительных исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пименов А.С., Холопов И.С., Соловьев А.В. Оптимальное проектирование перфорированных балок // Вестник транспорта Поволжья. 2009. №1. С. 69–74.
2. Соловьев А.В., Васюков И.А. Анализ жесткостных характеристик перфорированных балок с круглой перфорацией стенки // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 3. С. 36–37.
3. Козырев П.Н., Холопов И.С., Емец В.Н. Экспериментальное определение прогибов балок с гофрированной стенкой методом муаровых полос // Международный студенческий научный вестник. 2015. № 3–1. С. 150–152.
4. Кузнецов И.Л., Актуганов А.А., Трофимов А.П. Разработка и исследование металлодеревянной двутавровой балки // Известия КГАСУ. 2010. №1 (13). С. 117–121.
5. Полторацнев А.С. Вариация прочности отсеков при проектировании балок с плоской и гофрированной тонкой стенкой // Вестник гражданских инженеров

СПбГАСУ. Архитектура. Строительство. Транспорт. 2012. №4. с. 175–179.

6. Крылов И.И., Крестинин А.Н. Эффективные балки из тонкостенных профилей // Известия вузов. Строительство. 2005. №6. С. 11–14.

7. Егоров П.И., Степаненко А.Н. Обеспечение прочности и жесткости стальных двутавровых стержней с тонкой гофрированной стенкой // Строительство и Реконструкция. 2010. № 2. С. 46–50.

8. Пичугин С.Ф., Чичулин В.П., Чичулина К.В. Предложения расчета балок с гофрированной стенкой // Научные труды SWorld. 2013. Т. 49. № 3. С. 80–85.

9. Abbas H.H., Sause R., Driver R.G. Behavior of Corrugated Web I-Girders under In-Plane Loads. Journal of Engineering Mechanics. Vol. 132, Issue 8, August 2006, pp. 806–814.

10. Соловьев А.В., Лукин А.О., Алпатов В.Ю. Анализ эффективности применения двутаврового элемента с гофрированной стенкой при работе в сложном напряженно-деформированном состоянии // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 6. С. 27–30.

11. Соловьев А.В., Лукин А.О., Алпатов В.Ю., Севастьянов В.Н. Учет особенностей работы балок с гофрированной стенкой в расчетах на стесненное кручение // Вестник МГСУ. 2012. №11. С. 105–112.

12. Лукин А.О. Определение прогибов балок с гофрированной стенкой с учетом сдвиговых деформаций // Инженерный Вестник Дона: электронный журнал. №1. 2013. ISSN 2073-8633. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1496> (дата обращения: 20.11.2015).

13. Соловьев А.В., Лукин А.О. Оценка влияния стесненного кручения на работу балки с гофрированной стенкой // Изв. Вузов. Строительство. 2012. № 6. С. 112–118.

14. Лукин А.О. К уточненному расчету напряженно-деформированного состояния балок с гофрированной стенкой // Строительная механика и расчет сооружений. 2013. № 5. С. 10–17.

15. Бальзанников М.И., Холопов И.С., Соловьев А.В., Лукин А.О. Применение стальных балок с гофрированной стенкой в гидротехнических сооружениях // Вестник МГСУ. 2013. № 11. С. 34–41.

16. Лукин А.О., Холопов И.С., Соловьев А.В. Распределение напряжений в опорном сечении ригеля с гофрированной стенкой // Вестник транспорта Поволжья. 2008. №4. С. 96–100.

17. Balzannikov I.M., Kholopov I.S., Alpatov V.Yu., Lukin A.O. Stress and strain state in beams with corrugated web and their use in hydraulic engineering structures. Procedia Engineering. Vol. 111, 2015. Pp. 74–81.

18. Зубков В.А., Лукин А.О. Экспериментальные исследования влияния технологических и конструктивных параметров на несущую способность металлических балок с гофрированной стенкой // Вестник МГСУ. 2013. № 2. С. 37–46.

19. Lindner J., Aschinger R. Biegetragfähigkeit von I-Trägern mit trapezförmig profilierten Stegen (Trapezstegträger). Stuttgart. IRB Verlag. 1988. 202 S.

20. Bartholomé S., Pasternak H. Girders with structured web-ongoing research Annual Stability Conference Structural Stability Research Council St. Louis, Missouri, April 16–20, 2013. Pp. 1–11.

Об авторах:

ЛУКИН Алексей Олегович

ассистент кафедры сопротивления материалов и строительной механики
Самарский государственный архитектурно-строительный университет
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194,
тел. (846) 339-14-48
E-mail: a.o.lukin@rambler.ru

LUKIN Aleksey O.

Assistant of the Department of Strength of Materials and Structural Mechanics
Samara State University of Architecture and Civil Engineering
443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194,
tel. 8(846) 339-14-48
E-mail: a.o.lukin@rambler.ru

АЛПАТОВ Вадим Юрьевич

кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций
Самарский государственный архитектурно-строительный университет
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194,
тел. (846) 339-09-36
E-mail: avu75@mail.ru

ALPATOV Vadim Yu.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Steel and Timber Structures
Samara State University of Architecture and Civil Engineering
443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194,
tel. 8(846) 339-09-36
E-mail: avu75@mail.ru

ЧЕРНЫШЕВ Дмитрий Давидович

кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций
Самарский государственный архитектурно-строительный университет
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194,
тел. (846) 339-06-36
E-mail: chern11@rambler.ru

CHERNYSHEV Dmitriy D.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Steel and Timber Structures
Samara State University of Architecture and Civil Engineering
443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194,
tel. 8(846) 339-06-36
E-mail: chern11@rambler.ru

Для цитирования: Лукин А.О., Алпатов В.Ю., Чернышев Д.Д. Совершенствование конструктивного решения балки с гофрированной стенкой // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2016. №2(23). С. 4-9. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.02.1. For citation: Lukin A.O., Alpatov V.Yu., Chernyshev D.D. Improving constructive solution of beam with corrugated // Vestnik SGASU. Town Planning and Architecture. 2016. №2(23). Pp. 4-9. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.02.1.



Ф Г Б О У В О «Самарский государственный архитектурно-строительный университет»

ЦЕНТР «ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ»

Основные виды деятельности:

- теплотехническое обследование состояния объектов строительства с выдачей технического заключения;
- оценка энергетической эффективности зданий и сооружений с разработкой «Энергетического паспорта» объекта строительства или реконструкции;
- экспериментальное исследование характеристик строительных материалов.

*По вопросам сотрудничества обращаться по адресу:
443001, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194
тел./факс: 8(846)333-59-00
E-mail: uhdnir@samgasu.ru*