

УДК 694.1

© И. А. Ладных, аспирант  
(Белорусский национальный технический  
университет)  
E-mail: irenalad@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-2-60-65

© I. A. Ladnykh, post-graduate student  
(Belarusian National Technical University)  
E-mail: irenalad@yandex.ru

## К ВОПРОСУ РАСЧЕТА КОМПОЗИТНЫХ УСИЛИВАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

### TO THE PROBLEM OF CALCULATING THE COMPOSITE REINFORCING MEMBERS

Предложен новый тип соединения деревянных элементов с использованием композитных материалов — однонаправленных углеродволоконных лент на эпоксидной матрице, который может быть применен для усиления деревянных конструкций. Рассматривается теория составных стержней А. Р. Ржаницына к расчету обойм из однонаправленных углеродволоконных лент и эпоксидной матрицы (УВ-обойм), а также экспериментально определяются коэффициент жесткости связей сдвига, фактическая несущая способность, сопротивление соединения сдвига по площади среза и погонное.

*Ключевые слова:* усиление конструкций, УВ-обойма, обследование.

The article suggests a new way of joining wooden elements using composite materials — unidirectional carbon fiber tapes on epoxy matrix, which can be applied for reinforcing wooden structures. The theory of composite rods of A. R. Rzhantsin to the calculation of clips from unidirectional carbon fiber tapes and epoxy matrix (HC-clips), as well as the experimentally determined stiffness coefficient of shear ties, the actual bearing capacity, the resistance of the connection shear area for the square cut and the linear joint is considered.

*Keywords:* reinforcement of structures, UV-clip, survey.

Усиление деревянных конструкций — одна из важных задач последних десятилетий. На протяжении многих веков во всем мире возводили различные здания, в которых основными несущими элементами служили деревянные конструкции. Однако с течением времени возникает необходимость в усилении конструкций. На сегодняшний день существуют различные способы усиления [1].

В середине прошлого столетия появились новые материалы — композитные, в их основу легли арамидные, боровые, стекло- и углеродные волокна. Они обладали достаточно высокими прочностными характеристиками, но были очень дорогостоящими, поэтому применяли их исключительно в области авиастроения. С течением времени их стоимость снижалась, и уже к концу прошлого столетия начали изучать возможность применения композитных материалов для усиления существующих железобетонных конструкций, а потом и внедрять их в общую практику строительства.

Следующим этапом было исследование различных вариантов усиления деревянных кон-

струкций, в основном исторических зданий. Первые попытки в исследовании усиливающих элементов предпринял Ежи Ясинько [2], который предложил наклеивать на эпоксидную матрицу стальные пластины. В своих работах он установил эффективную толщину стальной пластины, которая должна была колебаться в пределах 2–5 мм для обеспечения совместной работы. Позже его ученик Томаш Новак изучал несущую способность и деформативность деревянных изгибаемых балок с усиленными элементами в виде вклеенных внутрь балки углеродволоконных элементов. Исследования показали, что при таком усилении несущая способность увеличивается на 21–79,3 %. При сравнении прогибов при нагрузке в 25 кН было установлено, что для балок из старой древесины величина прогиба уменьшается на 15,72–23,64 % по сравнению с неусиленной балкой из старой древесины [3]. Кроме того, проводились исследования усиленных деревянных балок с приклейкой снизу углеродволоконных ламелей как без предварительного натяжения, так и с ним. В США испытывались на огнестойкость клееные деревянные бал-

ки, усиленные при помощи углеродволоконных и стекловолоконных ламелей [4].

В России Н. В. Линьковым [5] были предложены и исследованы два вида соединения деревянных элементов на основе стеклоткани и эпоксидной матрицы — «КМ-обклейка» и «КМ-вкладыш». В результате испытаний было установлено, что «КМ-обклейка» позволяла увеличить прочность балки в 2,8–3,9 раза по сравнению с балками без связей и увеличить жесткость в среднем в 2,5 раза.

В ТГАСУ под руководством Д. Г. Копаницы были начаты исследования деревянных клееных балок, усиленных углеродволоконной тканью FibARMТаре 230/300 на эпоксидной смоле с использованием оптической системы нового поколения [6].

В настоящий момент в рамках научно-исследовательских работ на базе Центрального НИИ строительных конструкций научно-исследовательской части (ЦНИИСК НИЧ) Белорусского научно-технического университета (БНТУ) проводятся комплексные исследования несущей способности и деформативности соединений деревянных элементов с использованием углеродволоконных однонаправленных лент. Исследуемое соединение представляет собой обойму из однонаправленных углеродволоконных лент и эпоксидной матрицы (далее — УВ-обойма). Предлагается применять данное соединение в усилении деревянных сжатых изгибаемых конструкций совместно с другими методами. На сегодняшний день сотрудниками кафедры металлических и деревянных конструкций БНТУ уже применено подобное усиление на значимых объектах строительства (рис. 1).

Первым этапом в исследовании соединений деревянных элементов при помощи композитных материалов является изучение несущей способности и деформативности малых образцов с УВ-обоймами.

Цель работы — оценить несущую способность и деформативность малых образцов (рис. 2).

На основании поставленной цели решались следующие задачи:

- разработать конструктивное решение образца и методику проведения испытаний;
- изготовить образцы, исходя из выбранного метода испытаний;

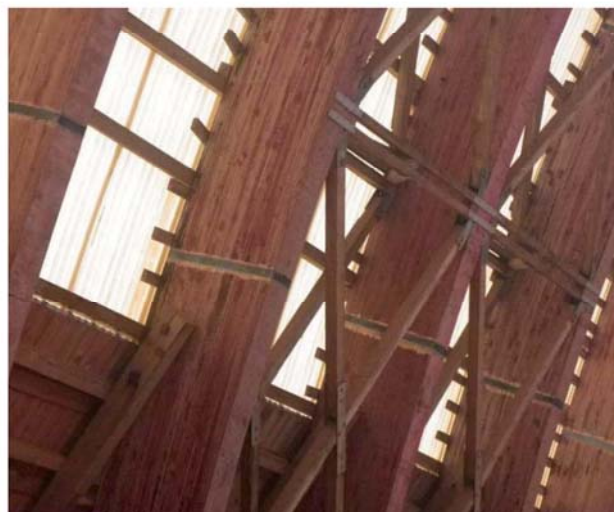


Рис. 1. Общий вид усиления с использованием углеродволоконных лент

- определить фактическую разрушающую нагрузку образца, его деформации, а также напряжения в УВ-обойме;
- вычислить коэффициент жесткости связей сдвига;
- провести сравнительный анализ полученных результатов.

Многие десятилетия в деревянном строительстве применяют соединения на податливых связях (на болтах, нагелях и другие) и клеевые. Соединение деревянных элементов между собой при помощи углеродволоконной ленты можно отнести к клеевым соединениям<sup>1</sup> [7]. Исходя из анализа требований нормативных документов и справочной литературы по испытаниям клеевых соединений автором статьи была изготовлена одна серия (количество — 4 шт.) симметричных двухсрезных образцов (см. рис. 2) для определения коэффициента жесткости. Образец состоял из трех одинаковых деревянных элементов размерами 40×100×250 мм каждый, из древесины 2-го сорта влажностью 12 ± 2.

Для устранения сил трения между деревянными элементами и установления фактических характеристик обойм из углеродволоконных лент в образцах были установлены фторопластовые прокладки толщиной 1,0 мм.

В качестве УВ-обоймы принималась углеродволоконная лента FibArm 230/300 на эпок-

<sup>1</sup> СТБ 2094–2010. Конструкции деревянные. Метод определения прочности и деформаций соединений.



сидной смоле FibArm Resin 230+ с расходом 1000 г/м<sup>2</sup> российского производства. Для отверждения УВ-обоймы и формирования адгезионных связей образцы выдерживали в столярных струбцинах в течение 24 ч. Образцы изготавливались и твердели в помещении при постоянной температуре 18,5...20,1 °С. Температура контролировалась при помощи поверенного термогигрометра три раза в день. Подготовленные образцы испытывались на 5-е сутки.

Испытания образцов проводились на базе ЦНИИСК НИЧ БНТУ на поверенном/калиброванном оборудовании. Образцы нагружали сжимающей нагрузкой на испытательной универсальной машине QUASAR 25 при шкале силоизмерителя 25 кН. Нагружение проводили в автоматическом режиме ступенями по 1 кН с постоянной скоростью без разгрузки. На всех образцах измеряли деформации взаимного сдвига соединяемых элементов двумя индикаторами часового типа ИЧ-1 с ценой деления 0,01 мм, а также машинным способом при помощи программного комплекса. Индикаторы устанавливали симметрично с противоположных сторон образца. В процессе нагружения образцы работали согласно определению [8] как соединения первой группы — с линейной зависимостью раз-

ности полных деформаций от усилий в пределах упругой работы соединения. Разрушение образцов носило хрупкий характер и происходило по углеродволоконной обклейке. Общий вид образца в процессе испытания представлен на рис. 3. После испытаний определяли влажность деревянных элементов каждого образца электровлажгомером ИВ1-1.

На стадии, предшествующей разрушению, наблюдался активный рост деформаций, а затем мгновенное хрупкое разрушение УВ-обоймы, характерное для соединения деревянных элементов с применением клея. Разрушение происходило в результате разрыва продольных нитей и их смещения с практически одновременным нарушением адгезионных связей между деревянным элементом и УВ-обоймой, что приводило к ее смещению в районе шва. Вид разрушенных образцов представлен на рис. 4, результаты испытаний образцов — на рис. 5.

Обработку результатов испытаний серии образцов проводили в соответствии с требованиями действующих нормативных документов по СТБ 2094–2010, методике ЦНИИСК по испытанию соединений [8] и Еврокоду 1990, Приложение Д<sup>2</sup>.

Расчетная несущая способность соединения с применением УВ-обоймы определялась по формуле

$$\frac{F_{\max}}{\text{к.б.}} = R_{\text{sup.c}}, \quad (1)$$

где  $F_{\max}$  — среднее арифметическое значение разрушающей нагрузки, кН;

$$\text{к.б.} = \beta \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3, \quad (2)$$

где  $\beta$  — соотношение фактической нагрузки к предельно допустимой,  $\beta = 0,8$ ;  $K_1$  — коэффициент, учитывающий длительность действия нагрузки и зависящий от времени приложения нагрузки,  $K_1 = 1,97 - 0,119 \lg t$ ;  $t$  — время, приведенное к неизменному действию нагрузки,  $s$ ,  $t = t_1/38,2$ ;  $t_1$  — время доведения нагрузки до разрушающей величины  $F_{\max}$ ,  $s$ ;  $K_2$  — коэффициент (рассчитывается по методике, изложенной в Еврокоде 1990, Приложение Д<sup>3</sup>);  $K_3$  — коэффициент для хрупкого разрушения образца,  $K_3 = 1,3$ .

Сопротивление соединения сдвигающему усилию вычислялось по формуле

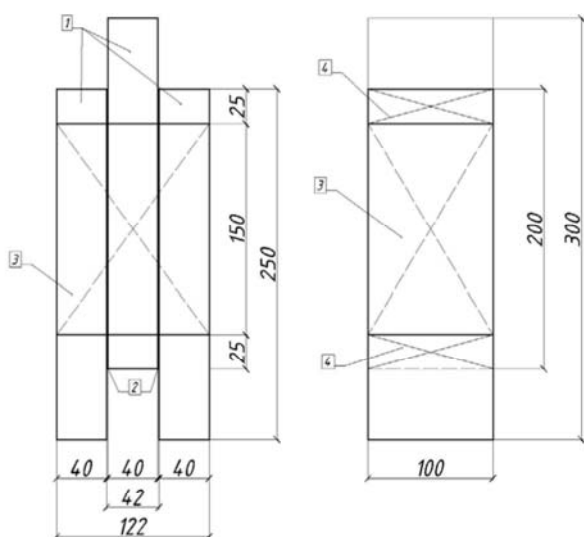


Рис. 2. Конструкция и размеры образца «УВ-обойма» для сравнительных испытаний: 1 — деревянные элементы 40×100×200 мм; 2 — шов сплавления  $t = 1$  мм; 3 — зона обклейки в соединении; 4 — временные связи, удаляемые после полимеризации эпоксидной матрицы

<sup>2</sup> ТКП EN 1990–2011. Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций.

<sup>3</sup> Там же.

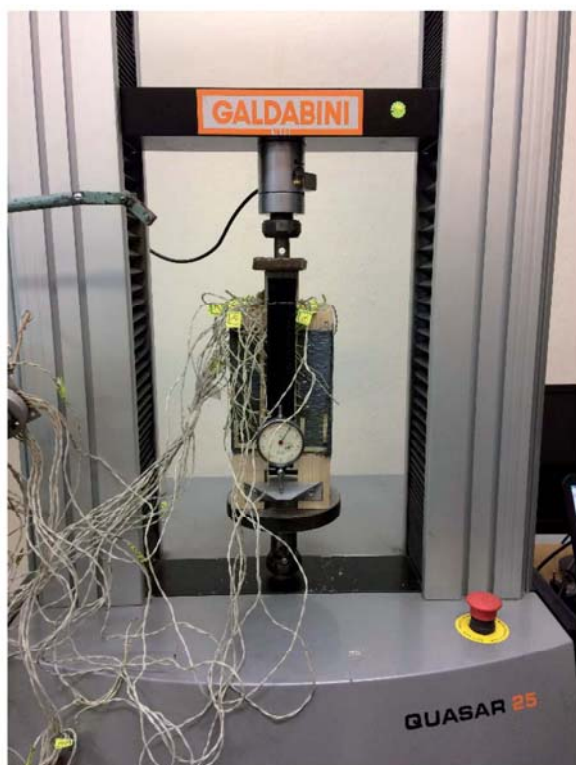


Рис. 3. Общий вид образца в процессе испытаний

$$R_{YB} = \frac{R_{sup,c}}{n_{cp} \cdot L_{шва} \cdot t_{км}}, \quad (3)$$

где  $n_{cp}$  — количество срезов композитного материала,  $n_{cp} = 4$ ;  $L_{шва}$  — длина шва в образце,  $L_{шва} = 15$  см;  $t_{км}$  — толщина композитного материала.

Погонная несущая способность соединения на 1 мм длины шва вычислялась по формуле

$$T_{YB} = \frac{R_{sup,c}}{n_{cp} \cdot L_{шва}}. \quad (4)$$

Коэффициент жесткости связи сдвига рассчитывался по формуле

$$\varepsilon = \frac{T_c \cdot m}{\delta_c}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  — коэффициент жесткости, кН/мм<sup>2</sup>;  $m$  — число связей, приходящееся на единицу длины шва, 1/мм;  $\delta_c$  — деформации взаимного сдвига смежных волокон двух соседних стержней, соединенных связями сдвига, мм.

Результаты испытаний и расчетов представлены в таблице.

Определение значения коэффициента жесткости связей сдвига позволит в дальнейшем про-



Рис. 4. Образец после испытания

извести расчет составных деревянных элементов с применением теории составных стержней А. Р. Ржаницына. Согласно теории А. Р. Ржаницына, составной стержень — это стержень, поперечное сечение которого состоит из нескольких отдельных частей [9]. Эти части соединены между собой при помощи податливых связей.

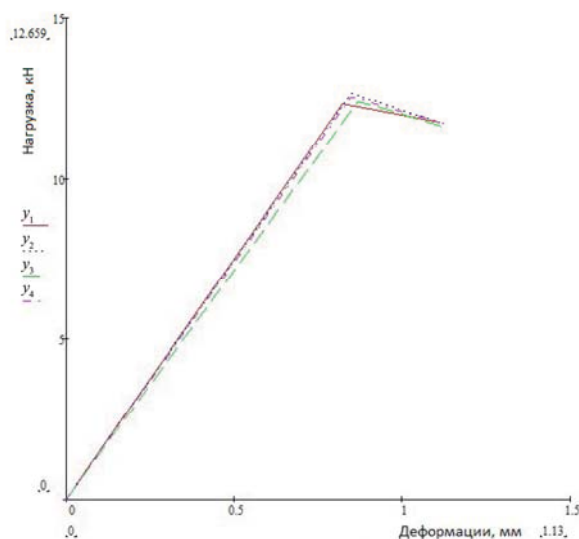


Рис. 5. График полных деформаций образцов соединения УВ-обойм по результатам испытаний образцов



**Результаты испытаний образцов соединения «УВ-обойма»**

Тип образца	№ образца	$F_{разруш},$ кН	$R_{свр,с}$ кН	Деформация образцов $D_{п, F_{max}},$ мм	Интенсивность роста деформаций $N_p,$ мм/кН	Сопротивление соединения «УВ-обклейки» сдвигу		Коэффициент связей сдвига $\epsilon,$ кН/мм <sup>2</sup>
						по площади среза УВ-обоймы, Па	погонное, Н/мм	
1	1-1	12,315	–	0,82	0,067	–	–	–
	1-2	12,659	–	0,85	0,067	–	–	–
	1-3	12,436	–	0,87	0,070	–	–	–
	1-4	12,554	–	0,85	0,068	–	–	–
Среднее		12,491	5,43	0,85	0,068	9,05	9,05	0,073

К составным стержням относят пакеты из досок, сплоченные нагелями (гвоздями, болтами, шпонками и т. д.). Отдельные стержни соединяются между собой продольными (сдвиговыми) и поперечными связями. Поперечные связи препятствуют отрыву друг от друга или прижатию друг к другу отдельных слоев. Связи сдвига воспринимают сдвигающие усилия, которые возникают в швах составного стержня [9].

Рассмотрим задачу сжато-изгибаемого составного стержня. Введем следующие условия: связи расположены равномерно по всей длине стержня; изменение поперечного сечения может быть только ступенчатым; осевые силы действуют на составной стержень постоянно по всей длине; поперечная нагрузка  $q = f(x)$ . Предположим, что поперечные связи абсолютно жесткие, а связями сдвига являются обоймы из углерод-волоконных лент.

Запишем систему дифференциальных уравнений для определения сдвиговых усилий в  $i$ -м шве составного стержня:

$$\begin{cases} \frac{T_i''}{\epsilon_i} = T_1 \cdot \Delta k_1 + T_2 \cdot \Delta k_2 + \dots + \\ + T_n \cdot \Delta k_n + y \cdot \Delta k_y + \Delta k_0; \\ \sum N_0 \cdot y'' = T_1 \cdot \Delta y_1 + T_2 \cdot \Delta y_2 + \dots + \\ + T_n \cdot \Delta y_n + y \cdot \Delta y_y + \Delta y_0, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\epsilon$  — коэффициент жесткости, кН/мм<sup>2</sup>;  $T_i$  — сдвигающее усилие, возникающее в  $i$ -ом слое;  $\Delta k_i$  — приращение сдвигов от единичных суммарных сдвигающих усилий, возникающее в  $i$ -ом слое;  $\Delta k_0$  — приращение сдвигов от внешней нагрузки;  $y$  — прогиб, мм;  $\sum N_0$  — суммарное сжимающее усилие, Н;  $\Delta y_i = \Delta k_y$  — приращение сдвигов от прогиба, возникающее в  $i$ -ом слое;  $\Delta y_y$  —

приращение сдвигов от сжимающей нагрузки;  $\Delta y_0$  — приращение сдвигов от внешней нагрузки.

Также справедливы зависимости:

$$T_i' = \frac{dT_i}{dx}; \quad (7)$$

$$T_i = \int_0^x \tau_i dx; \quad (8)$$

$$\tau_i = T_i'. \quad (9)$$

Определив коэффициент жесткости связей сдвига, а также другие параметры УВ-обоймы, можно решить систему дифференциальных уравнений (6). Однако необходимо экспериментально подтвердить применимость теории А. Р. Ржаницына к расчету сжато-изгибаемых элементов с податливыми связями в виде УВ-обойм.

На основании проведенных испытаний и выполненных расчетов сделаны следующие выводы:

1. Изготовлена серия двухсрезных образцов для определения несущей способности и деформативности соединений деревянных элементов с применением УВ-обойм.

2. В результате испытаний установлена фактическая работа соединений с линейной зависимостью деформаций.

3. Характер разрушения образцов — хрупкий, характерный для соединений деревянных элементов с применением клея.

4. Разрушение образцов происходило в результате разрыва продольных нитей и их смещения практически с одновременным нарушением адгезионных связей.

5. Сопротивление соединения УВ-обоймы сдвигу по площади среза составило 9,05 Па для одного среза.

6. Для применения данных УВ-обойм в реальных конструкциях необходимо исследовать фактическую работу сжато-изогнутого составного элемента на податливых связях в виде УВ-обойм натуральных размеров или приближенных к натуральным и сравнить результаты с теоретическими расчетами по теории составных стержней А. Р. Ржаницына с учетом коэффициента жесткости связей сдвига, который составляет 0,073 Н/мм<sup>2</sup>.

### Библиографический список

1. Калугин А. В. Деревянные конструкции: учеб. пособие (конспект лекций). М.: АСВ, 2003. 224 с.
2. Jasięko J. Połączenia klejowe i inżynierskie w naprawie, konserwacji i wzmacnianiu zabytkowych konstrukcji drewnianych. Вр.: Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2003. 120 s.
3. Nowak T. Wzmacnianie drewnianych konstrukcji zabytkowych przy użyciu taśm węglowych // Wiadomości Konserwatorskie. 2003. № 14. S. 21–27.
4. Martin Z., Tingley D. A. Fire resistance of FRP reinforced glulam beams // World Conference on Timber Engineering, Whistler Resort, British Columbia (Canada, July 31 — August 3, 2000). Pp. 118–125.
5. Лин'ков Н. В. Соединение деревянных конструкций композиционным материалом на основе эпоксидной матрицы и стеклоткани. М.: МГСУ, 2012. 196 с.
6. Копаница Д. Г., Лоскутова Д. В., Данильсон А. И. Исследование деформаций клееной балки из древесины, усиленной углеродным волокном с использованием цифровой оптической системы Vic3D // Вестник ТГАСУ. 2015. № 4 (51). С. 135–142.
7. Коченов В. М. Экспериментально-теоретические исследования деревянных конструкций: по материалам лаборатории деревянных конструкций. М.: Главная редакция строительной литературы, 1938. 239 с.
8. Рекомендации по испытанию соединений деревянных конструкций / ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. М.: ЦНИИПромзданий, 1984. 36 с.
9. Ржаницын А. Р. Теория составных стержней строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1948. 192 с.

### References

1. Kalugin A. V. *Derevyannye konstruksii. Ucheb. posobie (konspekt lektsiy)* [Wooden structures. Teaching manual (lecture notes)]. Moscow, ASB Publ., 2003, 224 p.
2. Jasięko J. *Połączenia klejowe i inżynierskie w naprawie, konserwacji i wzmacnianiu zabytkowych konstrukcji drewnianych*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2003, 120 p.
3. Nowak T. *Wzmacnianie drewnianych konstrukcji zabytkowych przy użyciu taśm węglowych*. Wiadomości Konserwatorskie, 2003, no. 14, pp. 21–27.
4. Martin Z., Tingley D. A. *Fire resistance of FRP reinforced glulam beams*. World Conference on Timber Engineering, Whistler Resort, British Columbia (Canada, July 31 — August 3, 2000), pp. 118–125.
5. Lin'kov N. V. *Soedinenie derevyannykh konstruksiy kompozitsionnym materialom na osnove ehpoksidnoy matritsy i steklotkani* [Connection of wooden structures with composite materials based on epoxy matrix and fiberglass]. Moscow, MGSU Publ., 2012, 196 p.
6. Kopanitsa D. G., Loskutova D. V., Danil'son A. I. *Issledovanie deformatsiy kleenoy balki iz drevesiny, usilennoy uglerodnym voloknom s ispol'zovaniem tsifrovoy opticheskoy sistemy Vic3D* [Study of deformations of glued laminated timber reinforced with carbon fiber using digital optical system Vic3D]. *Vestnik TGASU – Bulletin of TGASU*, 2015, no. 4 (51), pp. 135–142.
7. Kochenov V. M. *Ehksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya derevyannykh konstruksiy: po materialam laboratorii derevyannykh konstruksiy* [Experimental and theoretical studies of wooden structures: on the materials of the laboratory of wooden structures]. Moscow, Glavnaya redaktsiya stroitel'noy literatury Publ., 1938, 239 p.
8. *Rekomendatsii po ispytaniyu soedineniy derevyannykh konstruksiy* [Guidelines for testing joints of wooden structures]. Moscow, TsNIIPromzdaniy Publ., 1984, 36 p.
9. Rzhantsyn A. R. *Teoriya sostavnykh sterzhney stroitel'nykh konstruksiy* [Theory of composite rods of building structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1948, 192 p.