

Использование комплексного подхода к определению надежности и остаточного ресурса деревянных конструкций жилых зданий

УДК 69.059.18

Шутова М.Н.

Канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленное гражданское строительство, геотехника и фундаментостроение», ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (г. Новочеркасск); e-mail: Shutovapublish@mail.ru

Артюхов А.С.

Магистрант по направлению «Строительство», ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (г. Новочеркасск); e-mail: Eremenko.lyudmilka@yandex.ru

Евтушенко С.И.

Д-р техн. наук, профессор, почетный работник высшего образования Российской Федерации, советник РААСН, член РОМГиФ, профессор кафедры «Информационные системы, технология и автоматизация строительства», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (г. Москва); e-mail: evtushenkosi@mgsu.ru

Хлупин М.А.

Главный инженер, ООО «Научно-производственное предприятие “Эффективные строительные материалы и конструкции”» (г. Новочеркасск); e-mail: Mkhilupin@rambler.ru

Статья получена: 22.02.2020. Рассмотрена: 25.02.2020. Одобрена: 27.03.2020. Опубликована онлайн: 30.03.2020. ©РИОР

В сфере эксплуатации жилья в Российской Федерации остро стоит проблема определения надежности и технического состояния конструкций зданий, построенных несколько десятков лет назад с использованием материалов, которые в настоящее время применяются ред-

ко (саман, камень-известняк, необработанные деревянные конструкции или деревянные конструкции нетипичного сечения). Если новое строительство стропильных систем из дерева подразумевает использование готовых типовых узлов соединений и типоразмеров пиломате-

APPLICATION OF A COMPLEX APPROACH TO DETERMINING THE RELIABILITY AND RESIDUAL LIFE OF WOODEN STRUCTURES OF RESIDENTIAL BUILDINGS

Marina Shutova

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Industrial Civil Engineering, Geotechnics and Foundations, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk; e-mail: Shutovapublish@mail.ru

Aleksandr Artukhov

Master's Degree Student, Direction "Construction", Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk; e-mail: Eremenko.lyudmilka@yandex.ru

Sergey Evtushenko

Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Worker of Higher Education of Russia, Council of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Department "Information systems, technologies and construction automation", Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow; e-mail: evtushenkosi@mgsu.ru

Maksim Khlupin

Chief Engineer, Research and Production Enterprise Efficient Building Materials and Structures LLC, Novocherkassk; e-mail: Mkhilupin@rambler.ru

Manuscript received: 22.02.2020. **Revised:** 25.02.2020. **Accepted:** 27.03.2020. **Published online:** 30.03.2020. ©RIOR

Abstract. The article considers the problem of determining the reliability and residual life of roofs of residential buildings, taking into account an integrated approach, which includes determining the reliability of each element taking into account physical wear and tear and calculating the reliability of the "roof" system using graph theory. Five two-story residential buildings in the Ryazan region were selected as objects for evaluation: in the city of Skopin and in the city of Ryazan. When examining the roof structure, typical damage was revealed: the absence (including fragmentary) of the roof covering, biological damage to the wood by the bark beetle, rot, warping of the boards and others.

To assess these damages in determining physical deterioration (by external signs), departmental standards were used, the reliability of roof structures as a system of interconnected elements was determined on the basis of graph theory.

It has been established that the roofs of two of the five buildings have reached an inoperative state, and the residual life for the roofs of three buildings ranges from 1 to 14 years.

Keywords: wooden structures, physical deterioration, residual life, inspection of buildings and structures, technical condition of structures, graph theory.

риала, то здания, построенные на рубеже XIX–XX вв. или немногим позднее, представляют из себя редкие случаи, для каждого из которых необходимо проводить исследования и расчеты.

Нормативным документом для оценки состояния конструкций жилого фонда является ВСН 53-86(р) «Госгражданстрой. Правила оценки физического износа жилых зданий». Для деревянных крыш в документе приведены только следующие дефекты и повреждения:

- ослабление креплений, болтов, хомутов, скоб;
- повреждение деталей слуховых окон;
- поражение гнилью мауэрлата и концов стропильных ног, ослабление врубок и соединений;
- наличие дополнительных временных креплений стропильных ног;
- увлажнение древесины;
- прогибы стропильных ног, поражение гнилью и жучком древесины деталей крыши.

Нормы по проектированию деревянных конструкций были разработаны в 1940–1950-х гг. и с тех пор не претерпевали значительных изменений, хотя были разработаны новые методы расчета сложного напряженного состояния конструкций, такие как теория интегрального модуля деформаций В.М. Бондаренко [1], использование резерва прочности конструкций [2], были подвергнуты конструктивной критике изменения в СП 2011 и 2017 гг. [3], предложены методы повышения эксплуатационной надежности на основе индекса безопасности, такие как армирование и использование комплекта перфорированного крепежа в виде уголков, пластин и опор [4].

Причины снижения прочности и надежности деревянных конструкций в основном определяются как повреждения от внешних воздействий: увлажнения, высушивания, механических повреждений [5].

Для нейтрализации негативного действия пороков древесины (сучков, ослабленных сечений) было предложено армирование балок стержнями по верхнему и нижнему поясу [6]. При этом, по результатам теоретических исследований, наблюдалось уменьшение деформативности армированных балок на 15–20% по сравнению с балками без армирования, а также возможность использовать древесину низшего сорта.

Коллектив авторов [7] предпринял попытку определить скорость износа несущих деревянных конструкций на основе статистического анализа результатов обследования зданий в Архангельской области. Модель выполнена при помощи регрессионного анализа методом наименьших квадратов.

Значительный вклад в область исследования надежности исторических зданий и сооружений внес В.А. Соколов [8], обобщив и систематизировав результаты многолетних исследований и сформулировав основные положения математической модели определения надежности таких зданий.

Для определения надежности крыши как системы необходимо перейти от понятия «физический износ, регламентируемый ВСН 53-86(р) «Госгражданстрой. Правила оценки физического износа жилых зданий»» к понятиям «относительная надежность» или «безотказная работа конструкции».

У большинства российских экспертов наиболее распространен метод А.Н. Добромыслова [9; 10] на основе визуального осмотра (физического износа), в котором определяется относительная надежность зданий и остаточный срок службы. При этом рассматриваются пять категорий технического состояния, каждой из которых соответствует своя величина относительной надежности.

Авторами предложено следующее соответствие показателей физического износа и относительной надежности зданий и сооружений (табл. 1).

Таблица 1

№ п/п	Категория технического состояния	Относительная надежность	Физический износ, %
1	Исправная	0,96–1,0	0–20
2	Работоспособная	0,86–0,95	21–40
3	Ограничено работоспособная	0,77–0,85	41–60
4	Неработоспособная	0,66–0,75	61–80
5	Аварийная	0–0,65	81–100

Для определения категории технического состояния (относительной надежности) здания был выбран метод с использованием сетевого графа [11; 12]. Сетевая модель системы «Крыша» (рис. 1) состоит из следующих вершин, характеризующих относительную надежность (вероятность безотказной работы) для следующих

случаев: И — исправное состояние объекта; 1 — состояние гидроизоляции, кровельного ковра, кровельного покрытия; 2 — состояние свесов; 3 — состояние обрешетки, контробрешетки; 4 — состояние коньковой балки; 5 — состояние стропил и их крепления к несущим конструкциям здания; 6 — состояние мауэрлата; р — разрушение объекта; ребра — проявление взаимодействий подсистем.

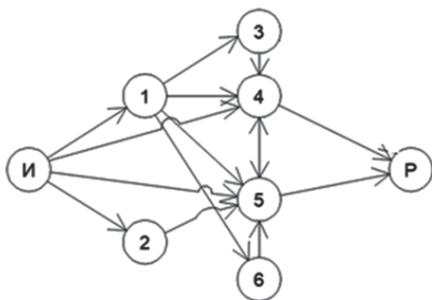


Рис. 1. Сетевая модель системы «Крыша»

Согласно графу разрушение чердачного покрытия здания (путь между вершинами И и Р) может пройти по любому из полных путей: И-1-3-4-Р, И-1-4-Р, И-1-5-Р, И-1-6-5-Р, И-1-6-5-4-Р, И-2-5-Р, И-2-5-4-Р, И-1-4-5-Р, И-5-Р, И-4-Р.

Относительная поврежденность j -ой системы равна ε_j . Для данной сетевой модели:

$$Y_{\text{общ}} = 1 - \prod_{j=1}^{10} f_j.$$

Расчет надежности конструкций крыши проведен на примере обследования пяти двухэтажных домов с деревянной стропильной системой в г. Рязани и Рязанской области. Информация о строительных объектах представлена в табл. 2.

Выявленные дефекты деревянных крыш приведены в табл. 3.

Таблица 2

Информация об обследованных жилых многоквартирных домах

Номер объекта, адрес	Описание архитектурных и конструктивных решений	Фото характерного фасада
1. Рязанская область, г. Скопин, ул. Советская, 99	Здание двухэтажное, двухподъездное, с габаритными размерами 17,16 × 25,62 м, высотой до карнизного свеса 8,70 м. Количество квартир — 15, высота этажа 3,300 м. Здание бескаркасное, жесткой конструктивной схемы. Несущие конструкции — кирпичные стены толщиной 640–810 мм. Чердачное перекрытие — подвесное балочное из деревянного бруса. Несущие конструкции покрытия — висячая стропильная система. Кровля из асбестоцементных волнистых листов по деревянной обрешетке. Постройка начала XIX в.	
2. Рязанская область, г. Скопин, ул. Боклевского 2/14	Здание двухэтажное, двухподъездное, габаритные размеры 12,52 × 34,40 м, высотой 6,650 м. Количество квартир — 16, высота этажа — 3,260 м. Здание бескаркасное, жесткой конструктивной схемы. Стены кирпичные толщиной 510 мм, перекрытия — железобетонные плиты. Крыша вальмовая, несущие конструкции — наслонные стропильные ноги. Кровля из асбестоцементных волнистых листов по деревянной обрешетке. Постройка середины XX в.	
3. Рязанская область, г. Скопин, ул. Фабричная, 10	Здание двухэтажное, размерами 14,75 × 43,8 м, высотой до конька 9,5 м. Количество квартир — 16, высота этажей — 3,3 м. Здание бескаркасное, несущие конструкции — кирпичные стены. Перекрытие сборное из ребристых железобетонных плит. Кровля из асбестоцементных волнистых листов по деревянной обрешетке. В конструкциях покрытия применена древесина 2-го сорта хвойных пород. Постройка середины XX в.	

Номер объекта, адрес	Описание архитектурных и конструктивных решений	Фото характерного фасада
4. г. Рязань, ул. Маяковского, 45	Здание двухэтажное, бревенчатое, с пятью входами, размерами в плане 11,53 × 16,4 м, высотой до карнизного свеса — 9,900 м. Высота этажа — 3,250 м. Несущие конструкции — стены рубленые из бревен диаметром 170 мм. Крыша скатная, несущие конструкции — фермы, нижний пояс которых служит несущими конструкциями чердачного перекрытия. Кровля из асбестоцементных волнистых листов по деревянной обрешетке. Утеплитель — минераловатная плита толщиной слоя 50–100 мм (после восстановления после пожара). Постройка конца XIX в.	
5. г. Рязань, ул. Лесопарковая, 44	Здание двухэтажное, бревенчатое, размерами в плане 17,1 × 12,3 м, высотой до карнизного свеса — 6,700 м. Высота этажа — 2,800 м. Несущие конструкции — стены рубленые из бревен диаметром 200 мм. Крыша вальмовая, несущие конструкции — наслонные стропильные ноги. Кровля из асбестоцементных волнистых листов по деревянной обрешетке. Постройка начала XX в.	

Таблица 3

Дефекты деревянных крыш

№ п/п	Дефекты	Номер объекта по табл. 2, физический износ					
		1	2	3	4	5	Всего
1	Ветхое состояние короба и заполнение слухового окна					80	1
2	Биологическое поражение грибом наслонных ног, распределительной балки					60	1
3	Биологическое поражение конька					40	1
4	Биологическое поражение грибом наконной ноги (рис. 2, а)	40				40	2
5	Прогиб балок перекрытия					80	1
6	Поражение стропильной ноги короедом (рис. 1, б)				40	40	2
9	Разрушение кровельного покрытия на локальных участках, следы замачивания стропильной системы (рис. 1, в)	80	80			80	3
10	Ветхое состояние люков					40	1
11	Минимальный поперечный нахлест листов АЦВЛ 15 мм					40	1

Продолжение табл. 3

№ п/п	Дефекты	Номер объекта по табл. 2, физический износ					
		1	2	3	4	5	Всего
12	В местах демонтажа вентиляционных шахт не восстановлена обрешетка					60	1
13	Строительный мусор					20	1
14	Отсутствие целостности затяжки				20		1
15	Поражение обрешетки грибом на локальных участках				20		1
16	Ветхое состояние фронтов, отливов и карнизных свесов (общий дефект)				80		1
17	Ветхое состояние парапета				60		1
18	Отсутствие отмостки (общий дефект)				40		1
19	Негерметичное примыкание шифера к вентиляционным дымовым каналам		20				1
20	Биологическое повреждение бруса в узле крепления подкоса		60				1
21	Коробление досок обрешетки в районе слуховых окон		40				1
22	Ветхое состояние переплетов слуховых окон		40				1

Окончание табл. 3

№ п/п	Дефекты	Номер объекта по табл. 2, физический износ					
		1	2	3	4	5	Всего
23	Отклонение от вертикали подвески-бабки с поясом (затяжкой)	20					1
24	Повреждение нижнего пояса в узле сопряжения	40					1
25	Повреждение кровельного покрытия (АЦВЛ) на локальных участках (отверстия, трещины, сползания)				20		1
26	Разрушение кирпичной кладки вентканалов (дымоходов)	60					1
27	Ветхий деревянный корпус слухового окна	80					1
28	Протечки в слуховом окне	60					1
29	Разрушение штукатурного слоя кладки карниза по периметру			40			1
30	Размораживание кирпичной кладки вентиляционных (дымовых) труб			60			1
31	Ветхое состояние облицовки слуховых окон			80			1
32	Нарушена герметичность в примыкании кровли к вентканалам (дымоходам)	40					1
33	Нарушена целостность гидроизоляции	60	60				2
34	Биологическое разрушение затяжки на врубке стропильной ноги	60					1
35	Отсутствуют стальные тяжи в сопряжении подвески-бабки с поясом	80					1
36	Организованный водосток с кровли отсутствует (рис. 1, з)		100	100			2
37	Отсутствует естественная вентиляция чердачного помещения		100				1
38	Под АЦВЛ отсутствует гидроизоляция			90			1

Категория технического состояния, как и показатели надежности (вероятность отказа и безотказной работы) для всех конструкций крыши, сведены в табл. 4 (если дефекта данной конструкции не зафиксировано, то относительная надежность принимается равной 1,0).

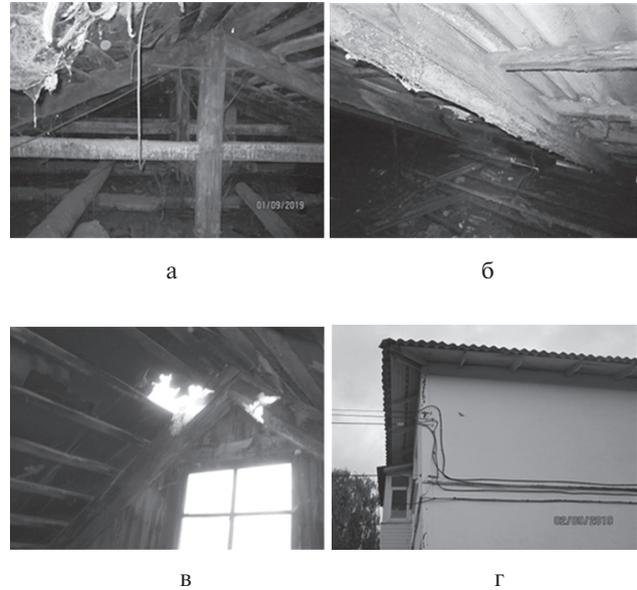


Рис. 2. Основные дефекты стропильных конструкций и конструкций кровли:

а — отсутствуют стальные тяжи в сопряжении подвески-бабки с поясом; б — поражение стропильной ноги короедом; в — разрушение кровельного покрытия на локальных участках (трещины и сквозные отверстия), следы замачивания стропильной системы; г — организованный водосток с кровли отсутствует при свесе кровли менее 600 мм

Таблица 4

№ п/п	Состояние групп конструкций стропильной системы	Номер объекта по табл. 2, относительная надежность				
		1	2	3	4	5
1	Гидроизоляция (кровельное покрытие)	0,66	0,66	0,4	0,96	0,66
2	Свесы	1,0	1,0	1,0	0,66	1,0
3	Обрешетка	0,76	0,86	0,66	1,0	0,96
4	Конек	1,0	1,0	1,0	1,0	0,76
5	Стропила	0,86	0,76	1,0	0,76	0,66
6	Мауэрлат	0,86	1,0	1,0	1,0	1,0

Расчет вероятности разрушения сведен в табл. 5.

Остаточный ресурс конструкции определяется как время до наступления неработоспособного состояния (относительная надежность $P_{\text{нер}} = 0,75$):

$$R_{\text{ост}} = \frac{\ln p_{\text{нер}} - \ln p_{\text{пок}}}{\lambda_{\text{пок}}}$$

где $\lambda_{\text{пок}}$ — скорость разрушения чердачного покрытия здания:

$$\lambda_{\text{пок}} = \frac{\ln p_{\text{пок}}}{t},$$

где t — время от ввода в эксплуатацию до обследования.

Расчет остаточного ресурса сведен в табл. 5.

Таблица 5

Расчет вероятности разрушения и остаточного ресурса чердачного покрытия здания

№ n/n	Путь	Номер объекта по табл. 2				
		1	2	3	4	5
1	Вероятность разрушения (относительная поврежденность)	0,23	0,3	0,19	0,24	0,34
2	Вероятность безотказной работы (относительная надежность)	0,77	0,7	0,81	0,76	0,66

Окончание табл. 5

№ n/n	Путь	Номер объекта по табл. 2				
		1	2	3	4	5
3	Категория технического состояния конструкций покрытия	Ограничено работоспособная	Неработоспособная	Работоспособная	Ограничено работоспособная	Неработоспособная
4	Период с момента ввода в эксплуатацию (в том числе с момента ремонта стропильной системы) до момента обследования, лет	200	70	70	60	70
5	Остаточный ресурс	14	исчерпан	13	1	исчерпан

Проведенный анализ эффективности применения комплексного подхода (определение физического износа по ВСН 53-86(р) и теории графов) к определению остаточного ресурса зданий позволяет учесть техническое состояние каждого вида конструкций крыши с учетом их дефектов.

Литература

1. *Ведяков И.И.* Перспективы совершенствования норм проектирования деревянных конструкций [Текст] / И.И. Ведяков, А.А. Погорельцев, К.П. Пятикrestовский // Промышленное и гражданское строительство. — 2015. — № 4. — С. 28–32.
2. *Колобов М.В.* Использование резерва прочности при оценке надежности сжато-изгибаемых составных элементов дощатых ферм покрытия с соединениями на металлических зубчатых пластинах [Текст] / М.В. Колобов // Известия КазГАСУ. — 2011. — № 1.
3. *Арленинов Д.К.* Об актуализации норм проектирования деревянных конструкций (в порядке обсуждения) [Текст] / Д.К. Арленинов // Промышленное и гражданское строительство. — 2018. — № 1. — С. 33–37.
4. *Ушаков А.Ю.* Повышение несущей способности и эксплуатационной надежности деревянных конструкций дополнительными элементами [Текст] / А.Ю. Ушаков // Промышленное и гражданское строительство. — 2020. — № 1. — С. 28–32.
5. *Ермакова К.Н.* Поиск причин снижения прочности и надежности элементов деревянных конструкций [Текст] / К.Н. Ермакова, А.В. Красильникова, В.В. Киселев // Надежность и долговечность машин и механизмов. — 2018. — С. 70–73.
6. *Христофорова Т.Н.* Влияние некоторых видов ослаблений поперечного сечения на работу армированных деревянных балок [Текст] / Т.Н. Христофорова. — Н. Новгород, 2006.
7. *Невзоров А.Л.* Статистический анализ износанесущих конструкций деревянных зданий в Архангельской области [Текст] / А.Л. Невзоров // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. — 2001. — № 5–6.
8. *Соколов В.А.* Вероятностный анализ технического состояния и надежности строительных конструкций зданий старой городской застройки [Текст] / В.А. Соколов. — 2016.
9. *Добромыслов А.Н.* Диагностика повреждений зданий и инженерных сооружений [Текст] / А.Н. Добромыслов. — Litres, 2015. — 121 с.
10. *Добромыслов А.Н.* Оценка надежности зданий и сооружений по внешним признакам [Текст]: справочное пособие / А.Н. Добромыслов. — М.: АСВ, 2008. — 72 с.
11. *Skibin G.M., Shutova M.N., Subbotin A.I.* Approaches for development of a universal method for calculating the residual life of buildings and structures // Procedia Engineering. — 2016. — Т. 150. — С. 1715–1720.
12. *Соболев В.И.* Математическая модель определения остаточного ресурса зданий и сооружений [Текст] / В.И. Соболев // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2006. — № 2.

References

1. *Vedyakov I. I., Pogorel'cev A. A., Pyatikrestovskij K.P.* Perspektivy sovershenstvovaniya norm proektirovaniya derevyannykh konstrukcij [Prospects for improving the design standards of wooden structures]. *Promyshlennoe i grazhdan-*
2. *Kolobov M.V.* Ispol'zovanie rezerva prochnosti pri ocenke na-dezhnosti szhato-izgibaemykh sostavnykh elementov doshchatykh skoe stroitel'stvo [Industrial and civil construction]. 2015, I. 4, pp. 28–32.

- ferm pokrytiya s soedineniyami na metallicheskih zubchatyh plastinah [The use of strength reserve in assessing the reliability of compressed-bending components of cladding trusses with joints on metal gear plates]. *Izvestiya KazGASU* [News of KazGASU]. 2011, I. 1.
3. Arlenin D.K. Ob aktualizacii norm proektirovaniya derevyannykh konstrukcij (v poryadke obsuzhdeniya) [On updating the design standards of wooden structures (in order of discussion)]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and civil construction]. 2018, I. 1, pp. 33–37.
 4. Ushakov A. YU. Povyshenie nesushchej sposobnosti i eksploatacionnoj nadezhnosti derevyannykh konstrukcij dopolnitel'nymi elementami [Increasing the bearing capacity and operational reliability of wooden structures with additional elements]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2020, I. 1, pp. 28–32.
 5. Ermakova K. N., Krasil'nikova A. V., Kiselev V. V. Poisk prichin snizheniya prochnosti i nadezhnosti elementov derevyannykh konstrukcij [Search for the reasons for the decrease in strength and reliability of elements of wooden structures]. *Nadezhnost' i dolgovechnost' mashin i mekhanizmov* [Reliability and durability of machines and mechanisms]. 2018, pp. 70–73.
 6. Hristoforova T.N. *Vliyanie nekotoryh vidov oslablenij poperechnogo secheniya na rabotu armirovannykh derevyannykh balok* [The effect of some types of cross-section attenuation on the operation of reinforced wooden beams]. N. Novgorod. 2006.
 7. Nevzorov A.L. Statisticheskij analiz iznosanesushchih konstrukcij derevyannykh zdaniy v Arhangel'skoj oblasti [Statistical analysis of the wear-bearing structures of wooden buildings in the Arkhangelsk region]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Lesnoj zhurnal* [News of higher educational institutions. Forest magazine]. 2001, I. 5-6.
 8. Sokolov V.A. *Veroyatnostnyj analiz tekhnicheskogo sostoyaniya i nadezhnosti stroitel'nykh konstrukcij zdaniy staroj gorodskoj zastroyki* [A probabilistic analysis of the technical condition and reliability of building structures of old urban buildings]. 2016.
 9. Dobromyslov A. *Diagnostika povrezhdenij zdaniy i inzhenernykh sooruzhenij* [Diagnosis of damage to buildings and engineering structures]. Litres Publ., 2015. 121 p.
 10. Dobromyslov A.N. *Ocenka nadezhnosti zdaniy i sooruzhenij po vneshnim priznakam* [Assessment of the reliability of buildings and structures by external signs]. Moscow: ASV Publ., 2008. 72 p.
 11. Skibin G.M., Shutova M.N., Subbotin A.I. Approaches for development of a universal method for calculating the residual life of buildings and structures // *Procedia Engineering*. 2016. V. 150. Pp. 1715–1720.
 12. Sobolev V.I. *Matematicheskaya model' opredeleniya ostatocnogo resursa zdaniy i sooruzhenij* [A mathematical model for determining the residual resource of buildings and structures]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Tekhnicheskie nauki* [News of higher educational institutions. North Caucasus region. Technical science]. 2006, I. 2.