

**ОБ УЧЕТЕ ЭФФЕКТА НАРУШЕНИЯ СПЛОШНОСТИ В ЖЕЛЕЗОБЕТОНЕ
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РЕКОНСТРУКЦИИ
ПРЕДПРИЯТИЙ ТЕКСТИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**ABOUT THE VIOLATION SOLID EFFECT OF REINFORCED CONCRETE
IN RECONSTRUCTION DESIGN OF TEXTILE INDUSTRY ENTERPRISES**

Вл.И. КОЛЧУНОВ, И.А. ЯКОВЕНКО
VI.I. KOLCHUNOV, I.A. YAKOVENKO

(Юго-Западный государственный университет,
Национальный авиационный университет)
(South-West State University, National Aviation University)
E-mail: vlik52@mail.ru, i2103@ukr.net

В работе рассмотрены особенности учета эффекта нарушения сплошности железобетонных конструкций при проектировании реконструкции предприятий текстильной промышленности в условиях различных воздействий: изгиб, центральное растяжение и др. Предложена упрощенная зависимость энергетического функционала и рассмотрена специфика построения расчетного двухконсольного элемента механики разрушения в зонах, прилегающих к трещинам. Решение задачи позволяет, даже оставаясь в рамках традиционной модели сопротивления железобетона, заметно уточнить его основные параметры и объяснить многие замеченные в экспериментальных исследованиях явления, происходящие при сопротивлении железобетона силовым и деформационным воздействиям.

The paper discusses the features of the account the violation of solid effect reinforced concrete constructions in the reconstruction design of the textile industry enterprises in a variety of such effects: bending, the central tension and others. It is proposed a simplified dependence of the energy functional and discussed the peculiarities of the design element dual console fracture mechanics in the zones adjacent to cracks. The solution allows, even while staying within conventional reinforced concrete resistance model, much to clarify its basic parameters and explain many phenomena which have seen in experimental studies in resisting reinforced concrete force and deformation effects.

Ключевые слова: проектирование реконструкции, железобетон, двухконсольный элемент, энергетический функционал, напряженное состояние, трещины, механика разрушения.

Keywords: design of reconstruction, reinforced concrete, dual console element, the energy functional, stress state, cracks, fracture mechanics.

Технология производства текстиля предполагает традиционно использование большого количества воды, что отражается на эксплуатации железобетонных конструкций, значительно сокращает сроки между капитальными ремонтами и проведения реконструкции зданий и сооружений текстильной промышленности. В последние годы все большее внимание уде-

ляется проблемам реконструкции зданий и сооружений и разработке методов их расчета. В результате проведенных исследований [1...15] авторами предложен современный метод физических моделей сопротивления [1...4], предназначенный для расчета железобетонных конструкций зданий и сооружений.

В данной работе представлены двухконсольные элементы, включающие различные трещины, предназначенные для использования в разрабатываемом методе физических моделей сопротивления применительно к реконструируемым зданиям, в том числе текстильной промышленности, обеспечивающих их дальнейшую безаварийную эксплуатацию. Приведены результаты разработки двухконсольных моделей при изгибе [1], [2], [5], центральном растяжении [6] и при сложном сопротивлении, в зоне наклонных трещин [7...9].

Железобетонные конструкции, как правило, эксплуатируются в стадии, наступающей после образования трещин, ограничивается лишь ширина их раскрытия. Привлечение к расчету расстояния между трещинами и ширины раскрытия трещин железобетонных конструкций инструментария механики разрушения [5], [10...12], безусловно, позволяет достичь заметного уточнения этого дифференциального параметра, традиционно измеряемого в опытах с помощью микроскопа.

Уже сегодня анализ двухконсольного элемента, используемого в механике разрушения, может принести свои положительные результаты в расчете расстояния между трещинами и ширины раскрытия трещин при проектировании железобетонных конструкций.

Возмущение напряженно-деформированного состояния железобетонной конструкции после нарушения сплошности бетона может быть описано с привлечением зависимостей механики разрушения [1], [2], [5], [10...12]. Анализ зоны предразрушения показывает, что традиционные диаграммы $\sigma_{bt} - \epsilon_{bt}$ реализуются здесь при ограниченных значениях деформаций, то есть с учетом ниспадающей ветви – опыты Хиллирборга-Модера-Петерсона, Бажанта, Чубрикова и др. В качестве аналога зависимости $\sigma_i - \epsilon_i$ в механике разрушений может быть использована зависимость квадрата коэффициента концентрации напряжений от удельной энергии образования новых поверхностей трещины, – $K_b^2 - \zeta_{bu}$. Тогда новые константы бетона выражаются как некоторые точки этих диаграмм. В дальнейшем, связывая эти константы с податливостью двухконсольного элемента (ДКЭ), выделенного в окрестности трещины, отыскивается возмущение напряженно-деформированного состояния.

Податливость ДКЭ связана с перемещениями всего железобетонного стержня. Таким образом, прослеживается взаимосвязь первого и второго предельных состояний.

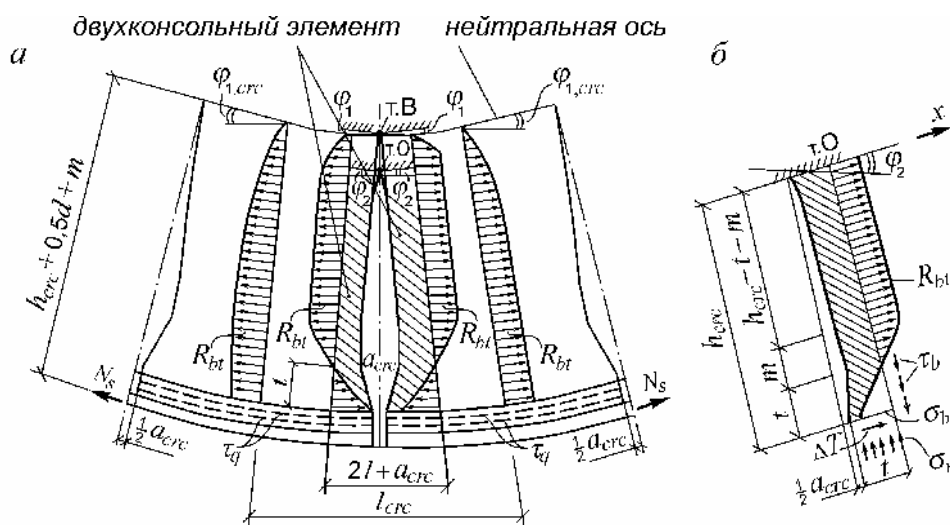


Рис. 1

Ввиду наличия четкого физического смысла и обзорности зависимостей механики разрушения (здесь эти зависимости вытекают из решения дифференциального уравнения, они могут быть включены непосредственно в разрабатываемые физические модели сопротивления, тем более, что используемый здесь ДКЭ (рис. 1 – изгибаемая конструкция (а) и расчетная консоль (б))

распространяется на любые случаи напряженно-деформированного состояния (рис. 2 – центрально-растянутая конструкция (а) и расчетная консоль (б)) и (рис. 3 – конструкция в условиях сложного сопротивления (а) и напряженно-деформированное состояние на кончике трещины (б)).

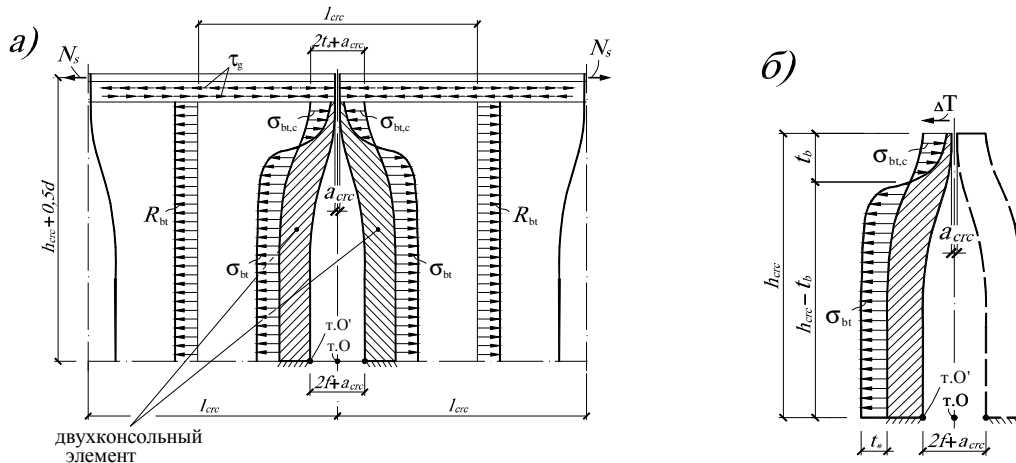


Рис. 2

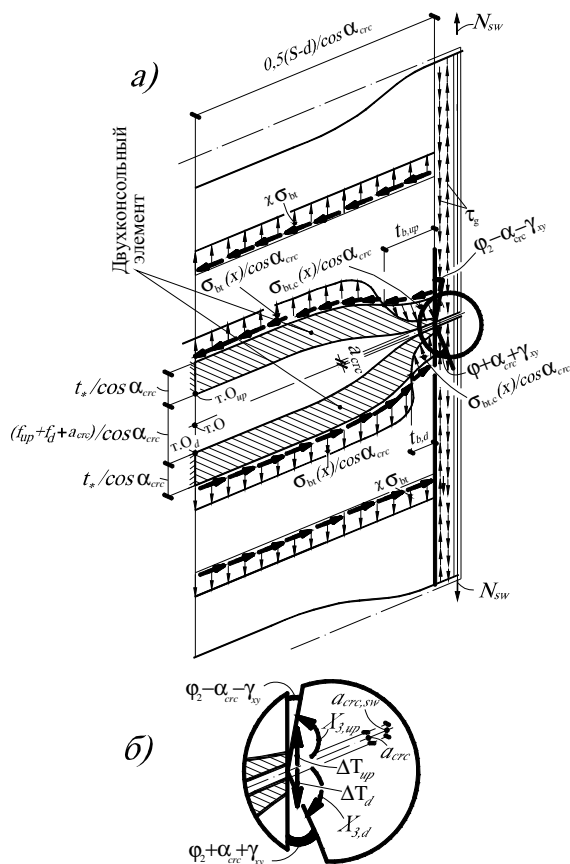


Рис. 3

Функцию податливости находим из определения скорости высвобождения энергии (удельной энергии образования новых поверхностей трещины):

$$\zeta_{bu} = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\delta W - \delta V}{\delta A} \right) = \frac{dW}{dA} - \frac{dV}{dA}, \quad (1)$$

где δV — уменьшение потенциальной энергии тела при продвижении трещины на малое приращение δA ; δW — дополнительная работа, совершаемая над телом при продвижении трещины на малое приращение δA ; A — площадь образовавшейся поверхности трещины.

Изложенные выше соображения использованы при выделении двухконсольных элементов (рис. 1...3). Здесь параметр t_b (характеризующий размер зоны сжатого бетона в окрестности, прилегающей к трещине) в соответствии с принципом Сен-Венана и с исследованиями околоарматурной зоны, выполненными с привлечением полуаналитических [2] и численных методов, в первом приближении пола-

гается равным полутора диаметрам арматуры. В дальнейшем значение t_b уточняется из решения задачи сцепления. Растягивающие напряжения в выделяющих сечениях распределены по закону квадратной параболы от нейтральной оси до точки, где меняется знак этих напряжений. При этом максимальная их величина ограничивается значением R_{bt} , поэтому на значительном участке фактическое распределение растягивающих напряжений близко к прямоугольнику, независимо от закона их распределения в упругой стадии. Сжимающие напряжения в этих же сечениях на участках, прилегающих к арматуре, распределены по треугольнику. Анализ зависимостей "силовое воздействие – перемещение" для воздействий на выделенный двухконсольный элемент показывает, что такие зависимости нелинейны и могут иметь даже ниспадающую ветвь деформирования. Площадь таких диаграмм, через которую выражается значение потенциальной энергии, отличается от $0,5P_0e_0$. Здесь P_0 – обобщенное усилие, а e_0 – обобщенное перемещение. Интегралы, характеризующие площади этих диаграмм, дают довольно близкие значения к величине $(2/3)P_0e_0$, поэтому выражение для потенциальной энергии, накопленной в теле, может быть представлено в виде:

$$V = \frac{2}{3} P_0 e_0. \quad (2)$$

Выполнив почленное дифференцирование, получим нелинейное дифференциальное уравнение.

Эта зависимость позволяет найти касательные напряжения в зоне, непосредственно прилегающей к трещине ΔT , за-

Тогда:

$$\frac{dV}{dA} = \frac{4}{3} C_P \frac{\partial P}{\partial A} + \frac{2}{3} P^2 \frac{\partial C}{\partial A}. \quad (3)$$

Аналогично можно преобразовать слабое dW/dA , входящее в формулу (1). Тогда, подставляя выражение (3) в уравнение (1), получим:

$$\zeta_{bu} = \frac{1}{3} \left(P^2 \frac{\partial C}{\partial A} - C_P \frac{\partial P}{\partial A} \right). \quad (4)$$

Применительно к выделенному двухконсольному элементу (рис. 1...3), находящемуся под воздействием пяти усилий $(\Delta T, P_1, P_2, q, M_{con})$, выражение (4) приобретает вид:

$$\zeta_{bu} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^5 \left(\frac{P_i^2 \partial C_i}{\partial A} - C_i P_i \frac{\partial P_i}{\partial A} \right). \quad (5)$$

Для реализации полученной зависимости обратимся к рис. 1-б.

Податливость C элемента определяется соотношением:

$$e_0 = C P_0. \quad (6)$$

Перемещения в соответствующих сечениях выделенной консоли (рис. 1-б; 2-б; 3) определяются методами строительной механики.

В итоге после алгебраических преобразований формула (6) приводится к виду:

$$\zeta_{bu} = \frac{1}{3b} \left(\Delta T^2 \frac{\partial C_I}{\partial h_{crc}} + P_1^2 \frac{\partial C_{II}}{\partial h_{crc}} + P_2^2 \frac{\partial C_{III}}{\partial h_{crc}} + b^2 P_{bt}^2 \frac{\partial C_q}{\partial h_{crc}} + M_{con}^2 \frac{\partial C_0}{\partial h_{crc}} - C_I \Delta T \frac{\partial \Delta T}{\partial h_{crc}} - C_{II} P_1 \frac{\partial P_1}{\partial h_{crc}} - C_{III} P_2 \frac{\partial P_2}{\partial h_{crc}} - C_0 M_{con} \frac{\partial M_{con}}{\partial h_{crc}} \right). \quad (7)$$

висающие в том числе и от константы бетона ζ_{bu} . Именно здесь, как показывают экспериментальные и численные исследования, происходит резкое возмущение касательных напряжений, сопровождающееся их скачкообразным увеличением и сменой

знака (рис. 3-б). При этом изменяются знаки нормальных напряжений в бетоне (из растягивающих они превращаются в сжимающие), что также подтверждается в экспериментах [1], [2], [6], [8], [13] и др.

Объяснения этому явлению до настоящего времени не было дано (кроме исключительной работы [1]). В работах Я.М. Немировского [14] делается предположение, что причиной такого изменения напряженно-деформированного состояния является усадка бетона, однако опыты целого ряда авторов этого не подтверждают.

Здесь причина заключается в том, что после образования трещин сплошность бетона нарушается и его деформирование уже не подчиняется законам сплошного тела. В зонах, прилегающих к трещинам, возникает концентрация деформаций, которая перенасыщает "потребность системы" (состоящей из бетонных блоков и арматуры при заданной статической схеме) в деформациях. Таким образом, в трещинах возникает дополнительное деформационное воздействие, которое и вызывает замеченный в опытах эффект.

Это объясняет многие замеченные в экспериментах явления, происходящие при сопротивлении железобетона и дает возможность модернизировать традиционную модель В. И. Мурашева [15]. Использование полученных зависимостей в практике проектирования реконструкции зданий предприятий текстильной промышленности позволяет существенно уточнить нормируемые расчетные параметры железобетона и более строго оценить остаточный ресурс эксплуатируемых конструкций [16], что будет способствовать экономии материалов.

ВЫВОДЫ

1. Развита гипотеза механики разрушения применительно к учету эффекта нарушения сплошности железобетона при проектировании реконструкции предприятий текстильной промышленности в условиях различных воздействий: изгиб, центральное растяжение и др. с упрощением энергетического функционала.

2. Решение поставленной задачи позволяет заметно уточнить основные параметры железобетона и объяснить многие замеченные в экспериментах явления, связанные с его сопротивлением и тем самым приблизить расчет к действительности и более строго оценить остаточный ресурс эксплуатируемых конструкций что, безусловно, приводит к экономии стали и бетона.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бондаренко В.М., Колчунов В.И.* Расчетные модели силового сопротивления железобетона. – М.: Изд-во АСВ, 2004.
2. *Верюжский Ю.В., Колчунов В.И.* Методы механики железобетона – К.: Кн. изд-во НАУ, 2005.
3. *Колчунов В.И., Яковенко И.А., Ключева Н.В.* Метод физических моделей сопротивления железобетона // Промышленное и гражданское строительство. – 2013, №12. С. 51...55.
4. *Яковенко И.А.* Реализация метода физических моделей сопротивления применительно к расчету реконструируемых зданий из железобетона // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2014, №1. С. 17...21.
5. *Колчунов В.И., Яковенко И.А.* Разработка двухконсольного элемента механики разрушения для расчета ширины раскрытия трещин железобетонных конструкций // Вестник гражданских инженеров. – Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 2009, №4(21). С. 160...163.
6. *Федоров В.С., Фам Фук Тунг, Колчунов В.И.* Определение граничных условий в задаче расчета ширины раскрытия трещин железобетонных конструкций при центральном растяжении // Вестник отделения строительных наук РААСН. – Курск: Изд-во КурГТУ, 2004, вып. 2. С. 208...224.
7. *Колчунов В.И., Яковенко И.А., Ключева Н.В.* К построению расчетной модели ширины раскрытия наклонных трещин в составных железобетонных конструкциях // Строительная механика и расчет сооружений. – 2014, №1(252). С. 13...17.
8. *Баширов Х.З., Федоров В.С., Колчунов В.И., Чернов К. М.* Прочность железобетонных конструкций по наклонным трещинам третьего типа // Вестник гражданских инженеров. – 2012, №5(34). С. 50...54.
9. *Ключева Н.В., Чернов К.М., Колчунов В.И., Яковенко И.А.* Прочность железобетонных составных конструкций и новые критерии разрушения в зоне наклонных трещин // Промышленное и гражданское строительство. – 2014, №11. С. 36...40.
10. *Зайцев Ю.В.* Механика разрушения для строителей. – М.: Высшая школа, 1991.
11. Разрушение: В 7 т. / Под ред. А.Ю. Имлинского; пер. с англ. – Т. 2: Математические основы теории разрушения. – М.: Изд-во Мир, 1975.

12. Ключева Н.В., Колчунов В.И., Яковенко И.А. Проблемные задачи развития гипотез механики разрушения применительно к расчету железобетонных конструкций // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014, №3(29). С. 41...45.

13. Колчунов В.И., Яковенко И.А., Усенко Н.В., Приймак А.О. Основные результаты экспериментальных исследований трещиностойкости наклонных сечений в составных железобетонных конструкциях при деформационном воздействии // Ресурсоэкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць. – Ровно, 2014, вып. 28. С. 219...228.

14. Немировский Я.М. Пересмотр некоторых положений теории раскрытия трещин в железобетоне // Бетон и железобетон. – 1970, № 3. С. 5..8.

15. Мурашев В.И. Трещиностойкость, жесткость и прочность железобетона. – М.: Машстройиздат, 1950.

16. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Хрунов В.А., Шестеркин М.Е. О некоторых проблемах технологии безопасности и долговечности зданий, сооружений и инженерной инфраструктуры // Строительные материалы. – 2015, №3. С. 8...11.

17. Федосов С.В., Хихлуха Л.В., Алоян Р.М., Подживотов В.П. Реконструкция жилищ: организация, технология. – Иваново: Изд-во ИГАСУ, 2007.

REFERENCES

1. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Raschetnye modeli silovogo soprotivlenija zhelezobetona. – М. : Izd-vo ASV, 2004.

2. Verjuzhskij Ju.V., Kolchunov V.I. Metody mehaniki zhelezobetona – K.: Kn. izd-vo NAU, 2005.

3. Kolchunov V.I., Jakovenko I.A., Kljueva N.V. Metod fizicheskikh modelej soprotivlenija zhelezobetona // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2013, №12. S. 51...55.

4. Jakovenko I.A. Realizacija metoda fizicheskikh modelej soprotivlenija primenitel'no k raschetu rekonstruiemykh zdaniy iz zhelezobetona // Promislove budivnictvo ta inzhenerni sporudi. – 2014, №1. S.17...21.

5. Kolchunov V.I., Jakovenko I.A. Razrabotka dvuhkonsol'nogo jelementa mehaniki razrushenija dlja rascheta shiriny raskrytija treshhin zhelezobetonnih konstrukcij // Vestnik grazhdanskikh inenerov. – Sankt-Peterburg, SPbGASU, 2009, №4(21). S. 160...163.

6. Fedorov V.S., Fam Fuk Tung, Kolchunov V.I. Opredelenie granichnykh uslovij v zadache rascheta shiriny raskrytija treshhin zhelezobetonnih konstrukcij pri central'nom rastjazhenii // Vestnik otdelenija

stroitel'nyh nauk RAASN. – Kursk: Izd-vo KurGTU, 2004, vyp. 2. S. 208...224.

7. Kolchunov V.I., Jakovenko I.A., Kljueva N.V. K postroeniju raschetnoj modeli shiriny raskrytija naklonnyh treshhin v sostavnyh zhelezobetonnih konstrukcijah // Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij. – 2014, №1(252). S. 13...17.

8. Bashirov H.Z., Fedorov V.S., Kolchunov V.I., Chernov K. M. Prochnost' zhelezobetonnih konstrukcij po naklonnym treshhinam tret'ego tipa // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. – 2012, №5(34). S. 50...54.

9. Kljueva N.V., Chernov K.M., Kolchunov V.I., Jakovenko I.A. Prochnost' zhelezobetonnih sostavnyh konstrukcij i novye kriterii razrushenija v zone naklonnyh treshhin // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2014, №11. S. 36...40.

10. Zajcev Ju.V. Mehanika razrushenija dlja stroitelej. – М. : Vysshaja shkola, 1991.

11. Razrushenie: V 7 t. / Pod red. A.Ju. Imlinskogo; per. s angl. – T. 2: Matematicheskie osnovy teorii razrushenija. – М.: Izd-vo Mir, 1975.

12. Kljueva N.V., Kolchunov V.I., Jakovenko I.A. Problemye zadachi razvitija gipotez mehaniki razrushenija primenitel'no k raschetu zhelezobetonnih konstrukcij // Izvestija Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. – 2014, №3(29). S. 41...45.

13. Kolchunov V.I., Jakovenko I.A., Usenko N.V., Prijmak A.O. Osnovnye rezul'taty jeksperimental'nyh issledovanij treshhinostojkosti naklonnyh sechenij v sostavnyh zhelezobetonnih konstrukcijah pri deformatsionnom vozdejstvii // Resursoekonomni materiali, konstrukcii, budivli ta sporudi : zb. nauk. prac'. – Rovno, 2014, vyp. 28. S. 219...228.

14. Nemirovskij Ja.M. Peresmotr nekotoryh polozhenij teorii raskrytija treshhin v zhelezobetone // Beton i zhelezobeton. – 1970, № 3. S. 5..8.

15. Murashev V.I. Treshhinostojkost', zhestkost' i prochnost' zhelezobetona. – М.: Mashstrojizdat, 1950.

16. Fedosov S.V., Rumjanceva V.E., Hrunov V.A., Shesterkin M.E. O nekotoryh problemah tehnologii bezopasnosti i dolgovechnosti zdaniy, sooruzhenij i inzhenernoj infrastruktury // Stroitel'nye materialy. – 2015, №3. S. 8...11.

17. Fedosov S.V., Hihluha L.V., Alojan R.M., Podzhivotov V.P. Rekonstrukcija zhilishh: organizacija, tehnologija. – Ivanovo: Izd-vo IGASU, 2007.

Рекомендована кафедрой промышленного и гражданского строительства ЮЗГУ. Поступила 08.04.16.