

УДК 624.012.45

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, УСИЛЕННЫХ ПРИКЛЕИВАНИЕМ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ ПЛАСТИН****Е.Н. БАДАЛОВА***(Полоцкий государственный университет)*

*Представлены результаты экспериментальных исследований многопустотных железобетонных плит, усиленных приклеиванием в растянутой зоне дополнительной арматуры в виде углепластиковых пластин, а также испытаний пластин на сдвиг относительно бетонной поверхности опытных образцов. Усиление железобетонных конструкций композиционными материалами в виде углепластиковых лент и холстов путем их приклеивания на поверхность бетона является прогрессивным методом. Благодаря ряду положительных свойств, из которых немаловажное значение имеет небольшой собственный вес, простота монтажа и коррозионная стойкость, композиционные материалы на основе углеродных волокон нашли широкое применение в мировой практике, в том числе и для усиления изгибаемых железобетонных конструкций. При проектировании усиления приклеиванием углепластиковых лент в растянутой зоне изгибаемых элементов особое внимание следует уделять вопросу сцепления материалов контактного шва, так как отсоединение пластин – наиболее частый вид разрушения таких конструкций.*

**Введение.** Выбор эффективного метода усиления всегда является непростой задачей, стоящей перед проектировщиком, решение которой требует комплексного подхода. Несомненно, обеспечение прочности, деформативности, долговечности конструкции после ее усиления являются в таком случае приоритетным. Однако нельзя не уделить должного внимания другим немаловажным аспектам усиления: эстетичности, ремонтпригодности, экономичности и др.

Метод усиления железобетонных конструкций увеличением поперечного сечения путем установки дополнительной арматуры достаточно распространен. При этом наиболее часто обеспечение совместной работы дополнительной арматуры с усиливаемой конструкцией осуществляется путем ее приварки к существующей арматуре. Наряду с этим стандартным решением существует и другой способ соединения дополнительной арматуры с эксплуатируемой конструкцией – путем приклеивания к бетону усиливаемого элемента.

В середине XX века отечественными и зарубежными учеными начали проводиться исследования прочности, жесткости и трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов, усиленных приклеиванием дополнительной стальной арматуры в виде полос и стержней гладкого и периодического профиля, результаты которых подтвердили возможность использования данного способа усиления. В это же время расширяется область применения композиционных материалов, первоначально созданных на основе стекловолокон. В начале 60-х годов в Великобритании были впервые произведены углеродные волокна, а в США – борные, что положило начало развития композиционных материалов нового поколения [1].

В настоящее время производство композиционных материалов на основе углеродных волокон осуществляется различными иностранными фирмами. Выпускаемые в виде пластин и холстов углепластиковые элементы нашли широкое применение при усилении железобетонных, в том числе и изгибаемых, конструкций во многих европейских странах, среди которых можно назвать Великобританию, Данию, Германию, Польшу, Швейцарию, а также были использованы для усиления конструкций в Голландии, Италии, Корее, России, Соединенных Штатах Америки. В Республике Беларусь система усиления конструкций композиционными материалами используется сравнительно недавно. Однако уже имеется положительный опыт применения углепластиковых лент Sika CarboDur фирмы Sika® AG (Швейцария) для усиления несущих конструкций мостов (например, пролетного строения автодорожного моста через Неман на трассе М1 «Брест – граница Российской Федерации») и перекрытий ряда гражданских объектов (в том числе плит перекрытия торгового дома «Ждановичи», ригелей Дворца спорта в городе Минске, монолитного перекрытия в Александров Пассаже) [2].

Широкое применение пластин и холстов, армированных углеродными волокнами, для усиления железобетонных конструкций объясняется рядом положительных свойств композиционных материалов, таких как высокая прочность на растяжение при достаточно высоком модуле упругости, небольшой собственный вес, коррозионная стойкость, простота транспортировки и монтажа, возможность проведения работ по реконструкции в короткие сроки с минимальной остановкой производства и другие, что делает этот способ усиления конкурентоспособным, а в ряде случаев превалирующим.

**Краткая история исследований.** Применению новых материалов и новых методов усиления в реальных условиях всегда предшествуют научные исследования. Так и в случае с композиционными материалами. Прежде чем в 1991 году метод усиления железобетонных конструкций приклеиванием дополнительной арматуры в виде углепластиковых пластин был впервые в мире применен вне лаборатории для конструкций моста Ибах в Люцерне (Швейцария) [3], состоялись некоторые экспериментальные исследования.

В 1970 году в Дюбендорфе (Швейцария) в лаборатории фирмы Sika® была усилена железобетонная балка приклеиванием дополнительной арматуры в виде пластин из композиционного материала Sika CarboDur. Этот образец находится под постоянным контролем. Исследования показали, что за 34 года (сведения 2004 г.) клей потерял менее 20 % прочности [2]. В последующие годы там же в Государственном центре испытаний и исследований материалов (EMPA) были проведены интенсивные исследования, подтвердившие возможность использования углепластиковых пластин для усиления строительных конструкций, выполненных из железобетона, каменной кладки, стали, алюминия, дерева.

Начиная с 1991 года с распространением системы усиления конструкций композиционными материалами за пределами Швейцарии возросло число научных исследований, проводимых в разных странах мира. Среди тех, кто посвятил свой труд теоретическим и экспериментальным исследованиям усиления железобетонных конструкций приклеиванием дополнительной арматуры из композиционных материалов на основе углеродных волокон, были: L. Bizindavyi, J.F. Chen, M. Deuring, L. De Lorenzis, P. Holzenkämpfer, X.Z. Lu, T. Maeda, A. Nanni, K.W. Neale, U. Neubauer, R. Niedermeier, T. Norris, D. Pilcher, H. Saadatmanesh, M. Savoia, B. Täljsten, J.G. Teng, H. Yuan и др. Предметом их изучения стали прочность, жесткость и трещиностойкость как усиленной конструкции в целом, так и стыкового соединения между бетоном усиленной конструкции и пластиной усиления. В результате некоторых исследований были разработаны методики расчета усиления железобетонных конструкций приклеиванием внешней углепластиковой арматуры, включенные в действующие нормы и рекомендации различных стран мира [4 – 7].

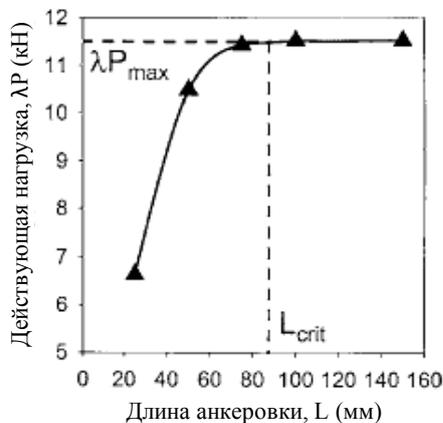


Рис. 1. Зависимость действующей нагрузки от длины анкерования углепластиковой пластины

Особое место среди научных разработок занимают исследования, посвященные вопросам анкеровки дополнительной углепластиковой арматуры, так как наиболее часто разрушение конструкции происходит в результате отслоения углепластиковой полосы от поверхности бетона [1].

В 2006 году Ali-Ahmad исследовал вопрос передачи напряжений между составляющими контактного шва [8] и с этой целью провел экспериментальные испытания на сдвиг углепластиковой пластины относительно бетонного блока, закрепленного неподвижно. Длина анкерования пластины варьировалась от 25 до 150 мм с шагом 25 мм. По результатам исследований Ali-Ahmad сделал следующие выводы: максимальная нагрузка возрастает с увеличением длины анкерования до тех пор, пока не достигнет наивысшей возможной величины  $P_{crit}$ , равной 11,5 кН (рис. 1). Максимальное значение длины анкерования (критическая длина) составляет приблизительно 85 мм. Когда длина анкерования превышает 85 мм, уровень максимальной разрушающей нагрузки

не увеличивается, несмотря на то, что общий сдвиг возрастает. Проведенные исследования подтвердили наличие критической длины анкерования углепластиковой пластины.

#### Основная часть

**Испытания на сдвиг.** Для получения зависимости длины анкерования углепластиковой пластины усиления более 150 мм от усилий в пластине нами были проведены экспериментальные испытания по разработанной методике. Опытными образцами явились железобетонные блоки с размерами поперечного сечения  $140 \times 250$ (h) мм длиной 500 мм, усиленные приклеиванием с одной стороны углепластиковой пластины типа Sika CarboDur S512 (рис. 2). Экспериментальные образцы были изготовлены трех различных классов бетона с призменной прочностью, установленной в результате испытания призм и кубов на осевое сжатие: 18,9, 24,3 и 32,1 МПа. Длина приклейки пластины усиления варьировалась от 200 до 400 мм.



Рис. 2. Опытные образцы для проведения испытаний на сдвиг

Железобетонный блок располагали в испытательной установке усиленной стороной вниз (рис. 3). Свободный конец пластины усиления неподвижно закрепляли на стенде посредством болтов. Испытание осуществлялось путем сдвига по контакту железобетонного блока и углепластиковой пластины. Нагружение образца велось ступенями по 2,5 кН с помощью гидродомкрата, установленного горизонтально.



Рис. 3. Общий вид испытательной установки

В процессе испытаний контролировали изменение относительных деформаций по длине углепластиковой пластины с помощью тензорезисторов, наклеенных на поверхность пластины. Относительные деформации по длине углепластиковой пластины распределялись неравномерно (рис. 4).

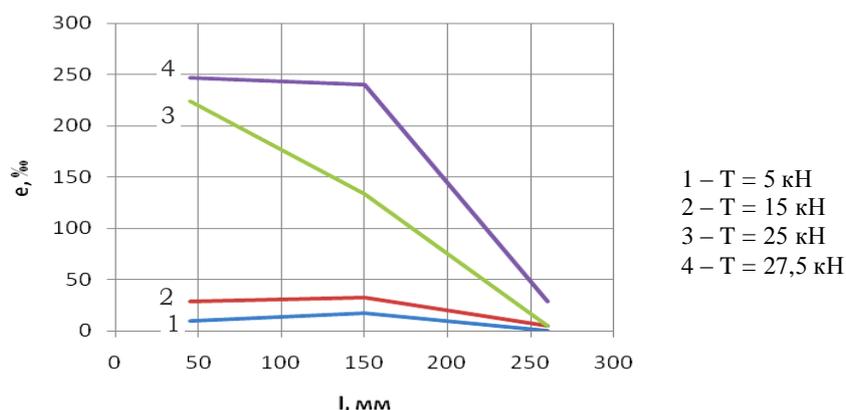


Рис. 4. Распределение относительных деформаций по длине приклеивания пластины Sika CarboDur S512

Наиболее интенсивный рост деформаций с увеличением нагрузки наблюдался на участке пластины, ближайшем к нагружаемому торцу железобетонного блока. На другом конце приклеенного участка пластины роста деформаций не происходило вплоть до последних ступеней нагружения (нагрузки, составляющей более 80 % от предельной). Перед разрушением наступало резкое увеличение относительных деформаций на конце приклеенной пластины, после чего пластина отрывалась от поверхности бетона. Отслоение углепластиковой пластины происходило следующим образом:

- по бетону (5 образцов). Разрушение происходило в основном непосредственно вблизи склеиваемой поверхности. Однако наблюдался также отрыв бетона на глубину до 40 мм вблизи нагружаемого торца блока (характерно для бетона с призменной прочностью 18,9 МПа);

- комбинировано: по бетону и по контакту между адгезивом и пластиной (6 образцов). При отслоении пластины по контакту между клеем и углепластиком почти всегда наблюдалось частичное отслоение углеродных волокон с поверхности пластины (5 образцов).

В результате эксперимента установлено, что среднее значение разрушающей нагрузки для блоков, усиленных приклеиванием углепластиковой пластины на длине 200...400 мм, одинаково и составляет 37,5 кН (рис. 5). Таким образом, увеличением длины приклейки углепластиковой пластины не достигнуто повышение прочности контактного шва.

С целью повышения прочности изгибаемого элемента, усиленного приклеиванием на наружную поверхность углепластиковых пластин, были проведены мероприятия по дополнительному усилению зоны анкерования пластины. В качестве дополнительного анкерующего элемента использован холст из углеродных волокон. Для выявления зависимости разрушающей сдвиговой нагрузки от расположения

волокон холста по отношению к продольной оси элемента были проведены опытные исследования. На подготовленную поверхность железобетонных блоков на длине 200 мм приклеивались пластины Sika CarboDur S512, поверх которых наклеивался холст шириной 150 и длиной 250 мм. Направление углеродных волокон холста по отношению к продольной оси опытного образца варьировалось от 0 до 90°. Результаты эксперимента показали, что наибольшего значения разрушающая нагрузка достигла при направлении углеродных волокон холста по отношению к продольной оси элемента около 15° (рис. 6). Разрушение происходило в результате отрыва углепластиковой пластины от поверхности бетонного блока с одновременным отслоением холста и его разрывом.

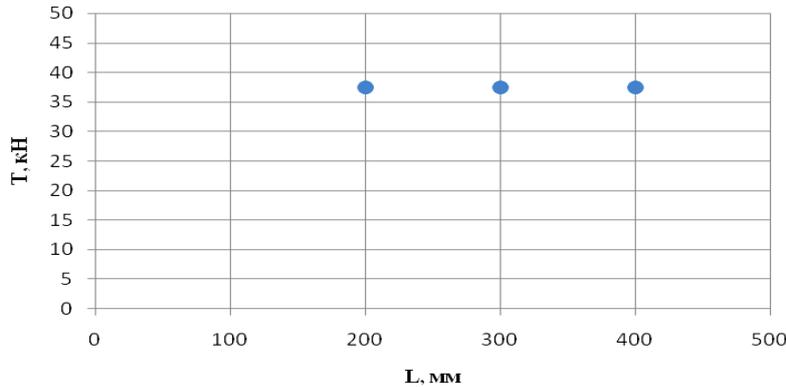


Рис. 5. Зависимость разрушающего сдвигающего усилия от длины приклеивания углепластиковой пластины

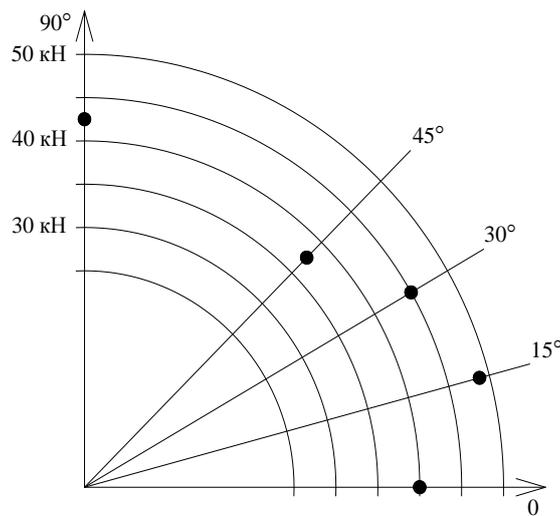


Рис. 6. Зависимость разрушающего сдвигающего усилия от расположения углеродных волокон холста относительно продольной оси элемента

**Экспериментальные исследования многопустотных плит.** С целью выявления особенностей работы изгибаемых железобетонных элементов, усиленных приклеиванием к бетону растянутой зоны углепластиковых пластин, проведена вторая серия исследований. В качестве экспериментальных образцов использованы железобетонные многопустотные плиты расчетным пролетом 5840 мм, шириной поперечного сечения 720 и высотой 220 мм. Плиты изготовлены из тяжелого бетона и армированы в растянутой зоне продольной арматурой 2Ø12 класса S800 [9]. Плита П-1 рассматривалась как эталонная, не имеющая усиления. Плиты П-2, П-3, П-4, П-5 (рис. 7) были усилены приклеиванием на наружную поверхность бетона углепластиковых лент типа Sika CarboDur H514 ( $f_{tk} = 1715$  МПа,  $E = 280\,000$  МПа) (плита П-2) и Sika CarboDur S512 ( $f_{tk} = 2\,465$  МПа,  $E = 160\,000$  МПа) (плиты П-3, П-4, П-5) в пролете на длине 5,5 м без заведения за грани опор.

Усиление плит П-2, П-3 выполнялось без предварительной подготовки поверхности бетона контактного шва, плит П-4, П-5 – с подготовкой поверхности бетона к приклеиванию путем шлифования до крупного заполнителя и обработки ацетоном. Для плиты П-5 в зоне анкеровки на длине 400 мм поверх пластин усиления был наклеен холст из углеродных волокон SikaWrap Hex 230 C.

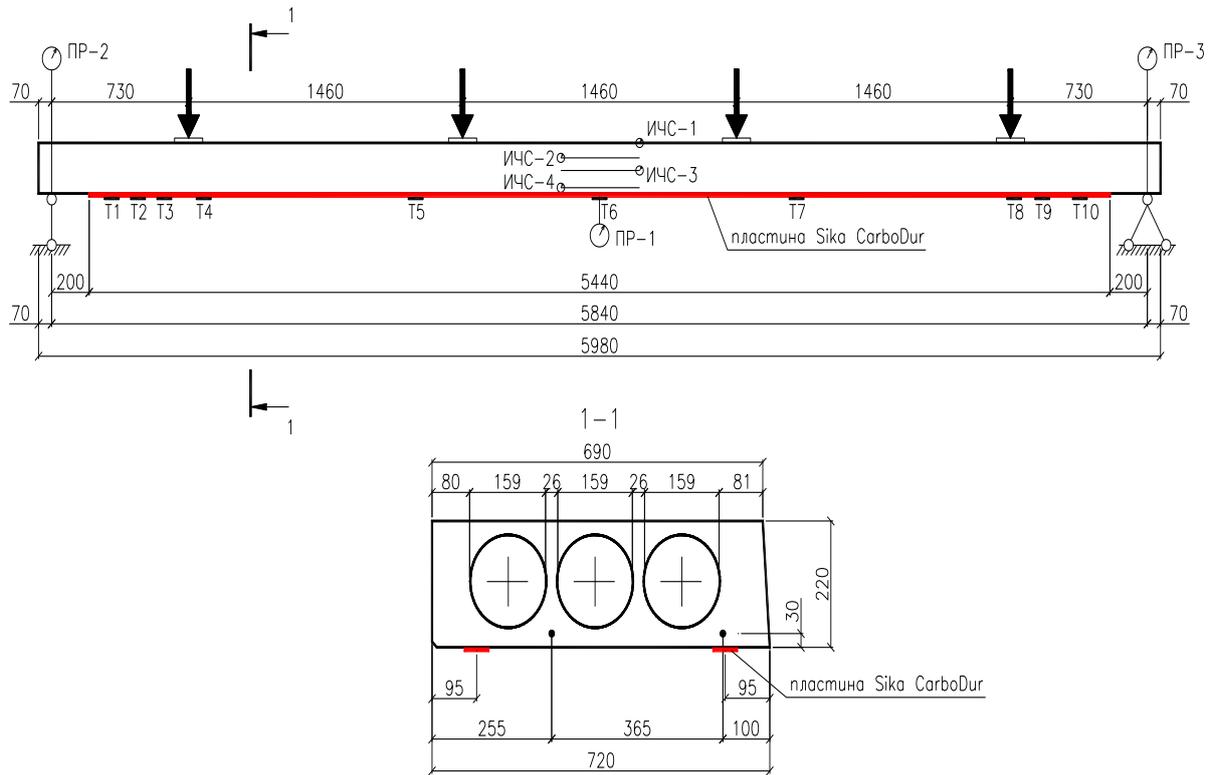


Рис. 7. Схема опытных плит П-2, П-3, П-4, П-5

Испытание плит проводилось по однопролетной балочной схеме с передачей нагрузки на верхнюю грань в четвертях пролета плиты. Нагружение осуществлялось поэтапно ступенями по 0,05 от нагрузки, соответствующей моменту разрушения плиты. Разрушение усиленных плит П-2, П-3, П-4, П-5 произошло в результате отслоения углепластиковых пластин от поверхности бетона (рис. 8).



Рис. 8. Общий вид опытных плит П-1...П-5 после разрушения

Экспериментальными исследованиями подтверждена эффективность использования углепластиковых лент в качестве дополнительной арматуры для усиления железобетонных изгибаемых элементов. Прочность плит после усиления возросла соответственно в 1,73, 1,45, 1,68 и 2,13 раза по сравнению с эталонной плитой.

Для усиленных плит увеличился также изгибающий момент, при котором ширина раскрытия трещин и прогиб достигли предельного значения [10, 11]. Так, для плиты П-1 трещины раскрылись на ширину 0,2 мм при действии изгибающего момента  $M = 27,4$  кН·м, что меньше изгибающего момента для плит П-2, П-3, П-4, П-5 соответственно в 1,73, 1,44, 1,54 и 1,68 раза. Изгибающий момент, при котором прогиб плит составил 30 мм, увеличился в 1,44 (плита П-2), 1,51 (плита П-3) и 1,29 раза (плиты П-4, П-5).

В таблице для опытных плит П-1...П-5 приведены значения разрушающего изгибающего момента  $M_u$ , изгибающего момента  $M_{[a_{lim}]}$ , соответствующего предельному прогибу  $a_{lim} = 30$  мм, и изгибающего момента  $M_{[w_{lim}]}$ , при котором ширина раскрытия трещин составила  $w_{lim} = 0,2$  мм (предельно допустимое значение ширины раскрытия трещин для предварительно напряженных элементов).

Стоит отметить, что значительное влияние на работу контактного шва оказывает подготовка поверхности бетона к приклеиванию, что видно из результатов экспериментальных исследований плит П-3 и П-4, усиленных аналогичным образом, но при более тщательной подготовке поверхности бетона плиты П-4.

Сопоставление значений изгибающего момента  $M_u$ ,  $M_{[a_{lim}]}$ ,  $M_{[w_{lim}]}$  для плит П-1...П-5

Шифр опытных плит	$M_u$ , кН·м	$\frac{M_{u_i}}{M_{u_1}}$	$M_{[a_{lim}]}$ , кН·м	$M_{[w_{lim}]}$ , кН·м
П-1	40,2	1,00	37,0	27,4
П-2	69,4	1,73	53,2	47,5
П-3	58,4	1,45	55,9	39,4
П-4	67,7	1,68	47,7	42,2
П-5	85,6	2,13	47,9	46,0

**Заключение.** Экспериментальные исследования показали, что прочность контакта в зоне анкеровки пластины может быть увеличена приклеиванием в этой зоне холста из углеродных волокон.

Немаловажным фактором, влияющим на сцепление углепластиковой пластины с поверхностью бетона, является качество поверхности усиливаемой конструкции в месте приклеивания пластины. Неподготовленная бетонная поверхность может существенно снизить прочность контакта.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шилин, А.А. Усиление железобетонных конструкций композиционными материалами / А.А. Шилин, В.А. Пшеничный, Д.В. Картузов. – М.: ОАО «Изд-во «Стройиздат», 2004. – 144 с.
2. Информационные материалы фирмы «Феликс» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.felix.by>.
3. Meier, H. Bridge strengthening with advanced composite systems / H. Meier, R. Clenin, M. Basler. – Sika Services AG, Zürich, Switzerland, 2002.
4. Shadravan, B. An investigation on the bond length of FRP sheets on concrete substrate / B. Shadravan, M. Saatcioglu, S. Foo // FRPRCS-8, University of Patras. – Patras, Greece, 2007.
5. Husemann, U. Increase of the bond capacity of externally bonded CFRP plates on RC structures due to self-induced contact pressure / U. Husemann, H. Budelmann // FRPRCS-8, University of Patras. – Patras, Greece, 2007.
6. Ceroni, F. Bond performance in concrete elements strengthened with CFRP sheets / F. Ceroni, M. Pecce // FRPRCS-8, University of Patras. – Patras, Greece, 2007.
7. Alemu, T. Numerical simulation of delamination failure in RC beams laminated with FRP plate / T. Alemu, P. Bhargava // FRPRCS-8, University of Patras. – Patras, Greece, 2007.
8. Ali-Ahmad, M.K. Analysis of scaling and instability in FRP-concrete shear debonding for beam-strengthening applications / M.K. Ali-Ahmad, K.V. Subramaniam, M. Ghosn // Journal of Engineering Mechanics. – January, 2007. – P. 58 – 65.
9. Бадалова, Е.Н. Усиление изгибаемых железобетонных конструкций углепластиковой арматурой / Е.Н. Бадалова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Прикладные науки. – 2007. – № 6. – С. 54 – 59.
10. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01-02 / Минстройархитектуры Респ. Беларусь. – Минск, 2003. – 139 с.
11. Нагрузки и воздействия: СНиП 2.01.07-85. – (Дополнения. Разд. 10. Прогибы и перемещения) / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 8 с.

Поступила 04.12.2009