

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОТРЫВ

Н. Н. Шалобыта¹, Е. С. Матвеевко², Т. П. Шалобыта³, Н. В. Матвеевко⁴

¹ К. т. н., проректор по научной работе учреждения образования
Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: nnshalobyta@mail.ru

² Магистрант кафедры строительных конструкций учреждения образования

Брестский государственный технический университет, e-mail: Elizabeth.Brenkovich@yandex.by

³ К. т. н., доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов учреждения образования
Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь

⁴ М. т. н., старший преподаватель кафедры строительных конструкций учреждения образования
Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: nikifarych@yandex.by

Реферат

Проведен анализ методов расчета на отрыв (вырыв) бетона, в том числе механических анкерных креплений по отечественным и зарубежным нормам. Выполнены сравнительные расчеты и произведена оценка точности приведенных расчетных методик.

Ключевые слова: механические анкера, несущая способность, отрыв, железобетонные конструкции.

ANALYSIS OF THE METHODS FOR CALCULATING THE BREAKOUT STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

N. N. Shalobyta, E. S. Matveenko, T. P. Shalobyta, N. V. Matveenko

Abstract

Represent analysis of calculation methods of the breakout strength of reinforced concrete structures, including mechanical anchoring in accordance to domestic and foreign standards. Comparative calculations were performed and the accuracy of the given calculation methods was assessed.

Keywords: mechanical anchors, load-bearing capacity, breakout strength, reinforced concrete structures.

Введение

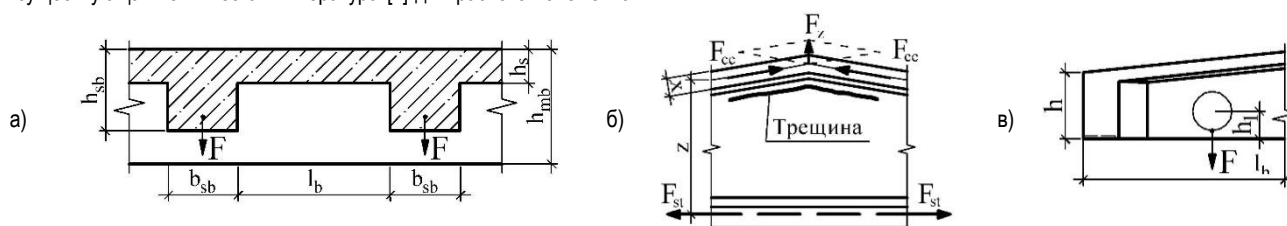
При проектировании железобетонных конструкций, как правило, в проверках несущей способности традиционно выполняют расчеты на прочность по нормальным сечениям и сечениям наклонным к продольной оси. При этом имеется ряд случаев, когда не учитываются частные случаи местного действия растягивающих нагрузок. В ряде конструкций возникают условия, при которых формируется значительное растягивающее усилие, приложенное на сравнительно небольшом участке. Распределение напряжений в таких областях неравномерно, в следствие чего может произойти местное разрушение конструкции. Одним из таких случаев является отрыв (вырыв). Отрыв может возникать в совершенно различных ситуациях, зачастую которым не уделяется особого значения. Например отрыв бетона в главной балке монолитного ребристого перекрытия в результате действия опорных реакций второстепенных балок (рисунок 1, а), или отрыв полки от стенки в коньковом узле двухскатных стропильных балок двутаврового сечения (рисунок 1, б) согласно рекомендациям [6], учитываются соответствующие расчеты. При этом, такие случаи, как отрыв части бетона в балке нагрузкой от оборудования, подвешенного к ней через отверстия в стенке (рисунок 1, в), или отрыв закладных деталей, или вырыв отдельных анкеров не рассматриваются в отечественной [1] и зарубежной литературе [2, 3].

Практически все исследования последних нескольких десятилетий и существующая техническая литература [1] для расчетов элементов

на отрыв, в том числе и действующие в Республике Беларусь гармонизированные Еврокоды [2], рассматривают данный расчет в конструкциях только с точки обеспечения несущей способности. При этом следует отметить, что расчеты анкерных элементов на отрыв (вырыв) полностью отсутствуют в нормативной базе технических документов Республики Беларусь (имеется лишь ссылки на соответствующие документы Еврокодов (или ЕТАГ 001) или на Рекомендации по проектированию стальных закладных деталей для железобетонных конструкций [1], разработанные более сорока лет назад).

С точки зрения механики, явление отрыва очень похоже на механизм продавливания. Несмотря на то, что при продавливании согласно действующих норм проектирования [1] угол среза далеко не соответствует 45° , при отрыве тем не менее в действующих нормативных документах он заложен с точки зрения действия главных напряжений 45° .

Кроме выше отмеченного, в расчете на отрыв, в независимости от расчетной ситуации, сопротивление срезу бетона по поверхности отрыва учитывают косвенно, корректируя величину только отрывающей силы и сравнивая ее с несущей способностью дополнительной (как правило конструктивной) поперечной арматуры, установленной, опять же, на некоторой длине зоны отрыва l_{crit} (рисунок 2), при условии ее надежной анкеровки.



а – отрыв бетона в главной балке монолитного ребристого перекрытия от действия опорных реакций второстепенных балок;
б – отрыв полки от стенки в коньковом узле двухскатных стропильных балок;
в – отрыв части бетона в балке нагрузкой от оборудования, подвешенного к ней через отверстия в стенке.

Рисунок 1 – Примеры конструкций, в которых формируется значительное растягивающее усилие, приложенное на сравнительно небольшом участке

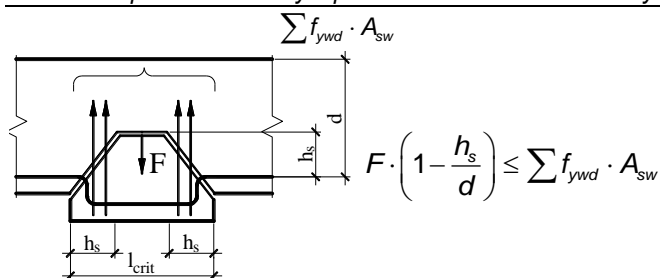


Рисунок 2 – Схема усилий при расчете прочности на отрыв [5]

Особенности проектирования и расчета закладных деталей

В данной статье выполнен анализ наиболее распространенных в настоящее время случаев, в которых в обязательном порядке выполняются расчеты на местное растяжение бетона – расчеты закладных деталей при действии на них растягивающей и сдвигающей силы, а также изгибающего момента.

Разрушение анкера согласно указанным выше нормам может произойти по одному из механизмов: по стали анкера (рисунок 3, а); по контакту анкера с основанием (рисунок 3, б); комбинировано по контакту и от выкалывания бетона основания (рисунок 3, в); от выкалывания бетона (рисунок 3, г); по стали анкера при действии перерезывающего усилия (рисунок 3, д); от выкалывания бетона основания за анкером при действии сдвигающего усилия (рисунок 3, е).

Как правило, разрушение по стали анкера предотвращается путем применения анкера соответствующего диаметра и класса прочности на разрыв. Чтобы избежать разрушения по контакту анкера с окружающим бетоном на конце анкера предусматривают усиления: шайбы, крюки и иные конструктивные особенности.

В связи с этим одним из основных и при этом наименее изученных механизмов разрушения анкерного крепления, а также имеющих существенные различия при расчетах от других возможных механизмов разрушения (рисунок 3), является разрушение от выкалывания бетона (отрыв).

Рассмотрим особенности проектирования и расчета закладных деталей на действие осевой растягивающей силы при разрушении от выкалывания бетона основания, приведенных в отечественных [1] и зарубежных нормах [2, 3], на примере закладных деталей с нормальными анкерами с усилениями на концах.

При расчетах согласно стандарту ETAG 001 [2] сила сопротивления анкера при разрушении от выкалывания бетона основания при осевом приложении нагрузки к анкеру N_{ETAG} , выглядит следующим образом:

$$N_{ETAG} = N_{Rk,c}^0 \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot \Psi_{s,N} \cdot \Psi_{re,N} \cdot \Psi_{ec,N}, \quad (1)$$

где $N_{Rk,c}^0$ – номинальная сила сопротивления анкера при разрушении от выкалывания бетона основания, Н, определяется по формуле:

$$N_{Rk,c}^0 = k_1 \cdot h_{ef}^{3/2} \cdot \sqrt{f_{ck,cube}}, \quad (2)$$

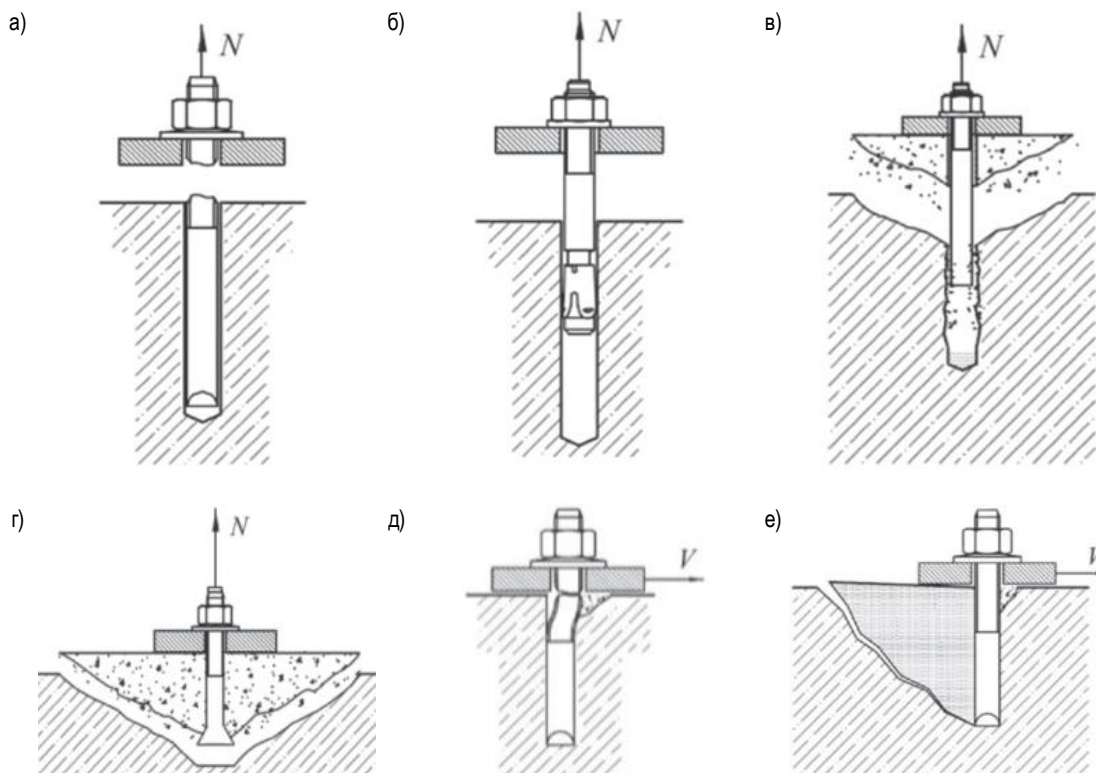
здесь $f_{ck,cube}$ – характеристическая прочность бетона на сжатие, измеряемая на кубиках со стороной 150 мм, Н/мм² (МПа);

h_{ef} – эффективная длина анкерной анкеровки, мм;

k_1 – коэффициент, зависящий от состояния основания в зоне анкера (при наличии трещин принимается равным 7.2 [2]);

$\Psi_{s,N}; \Psi_{re,N}; \Psi_{ec,N}$ – коэффициенты, учитывающие неравномерность распределения напряжений в бетоне, вероятность раскалывания бетона основания при продергивании анкера и влияние совместной работы группы анкеров соответственно;

$A_{c,N}; A_{c,N}^0$ – площадь проекции призмы выкалывания для отдельного анкера и анкерной группы соответственно (рисунок 4).



а – по стали; б – по контакту с основанием; в – комбинированное разрушение по контакту и от выкалывания бетона основания; г – от выкалывания бетона; д – по стали анкера при срезе; е – от выкалывания бетона основания за анкером

Рисунок 3 – Механизм разрушения анкеров при действии растягивающих (а, б, в, г) и сдвигающих (д, е) усилий [4]

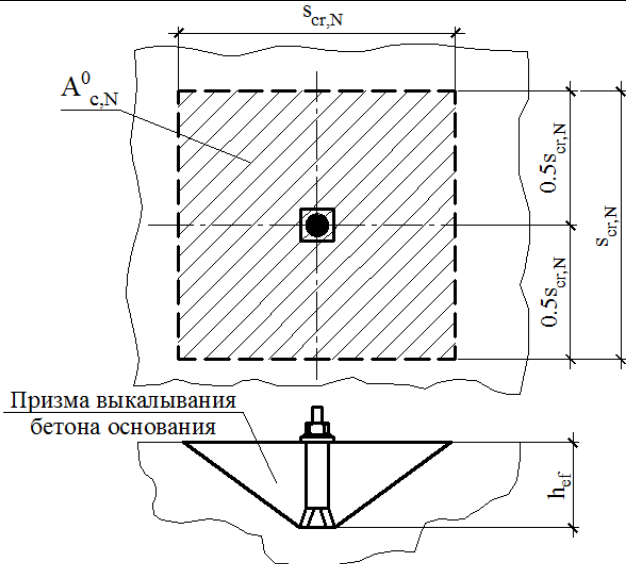


Рисунок 4 – Номинальная площадь основания условной призмы выкалывания для одиночных анкеров при растяжении согласно [2]

Согласно [1] с учетом связи прочности бетона при сжатии и растяжении $R_{bt} = 0.23 \cdot \sqrt[3]{R^2}$, МПа, прочность анкера $N_{рек}$ при выкалывании в основании из тяжелого бетона может быть представлена в виде:

$$N_{рек} = 0.48 \cdot h_{eff}^2 \cdot \bar{R}^{0.67} \quad (3)$$

С другой стороны, для групповых анкеров расчет на действие осевой растягивающей силы при разрушении от выкалывания бетона основания закладных деталей с нормальными анкерами представляет собой [1]:

$$N_{рек} \leq \frac{\phi_2 \phi_3 A R_{bt}}{1 + 3.5 \frac{e_1}{a_1} + 3.5 \frac{e_2}{a_2}} \quad (4)$$

где A – площадь проекции на плоскость, нормальную к анкерам, поверхности выкалывания, идущей от усилений анкеров (краев анкерных пластин, высаженных головок или от мест пересечения коротышей с анкером) под углом 45° к осям анкеров;

e_1 и e_2 – эксцентриситеты силы N относительно центра тяжести площади A в направлении соответственно a_1 и a_2 соответственно;

a_1 и a_2 – размеры проекции поверхности выкалывания (рисунок 5);

ϕ_2 – коэффициенты, учитывающие вид бетона (для тяжелого бетона принимается 0,5);

ϕ_3 – коэффициенты, принимаемые в зависимости от величины напряжения в окружающем бетоне.

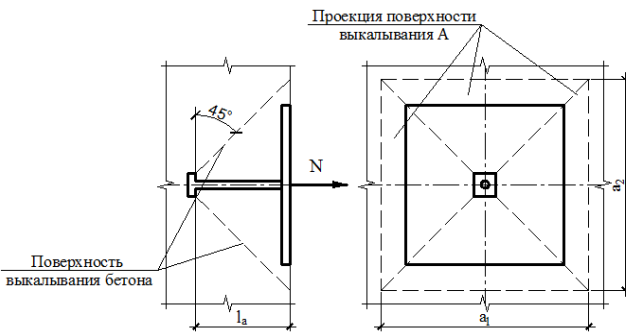


Рисунок 5 – Схема выкалывания бетона анкерами закладной детали в соответствии с [1]

В нормах [3] расчет одиночного анкера или анкерной группы на действие осевой растягивающей силы при разрушении от выкалывания бетона производится с учетом того, что угол наклона поверхности

отрыва составляет 35° к плоскости, перпендикулярной оси анкеров (рисунок 6). Величины сопротивления отрыву составляет:

– для одиночного анкера:

$$N_{ACI} = \frac{A_{N_c}}{A_{N_{co}}} \cdot \Psi_{ed,N} \cdot \Psi_{c,N} \cdot \Psi_{cp,N} \cdot N_b; \quad (6)$$

– для анкерной группы:

$$N_{ACI} = \frac{A_{N_c}}{A_{N_{co}}} \cdot \Psi_{ec,N} \cdot \Psi_{ed,N} \cdot \Psi_{c,N} \cdot \Psi_{cp,N} \cdot N_b; \quad (7)$$

где N_b – базовая прочность бетона на разрыв при растяжении одного анкера с учетом вероятности наличия трещин в бетоне основания, N ; для предустановленных анкеров:

при $h_{ef} < 11$ дюймов – $N_b = 24 \cdot \lambda_a \cdot \sqrt{f_c} \cdot h_{ef}^{1.5}$; (8)

при $11 \leq h_{ef} \leq 25$ дюймов – $N_b = 16 \cdot \lambda_a \cdot \sqrt{f_c} \cdot h_{ef}^{5/3}$. (9)

$\Psi_{ec,N}$; $\Psi_{ed,N}$; $\Psi_{c,N}$; $\Psi_{cp,N}$ – коэффициенты, учитывающие соответственно внецентренное приложение отрывающего усилия, краевые эффекты, наличие трещин в основании анкера, а также вероятность разрушения от раскалывания бетона при установке анкеров в готовое основание.

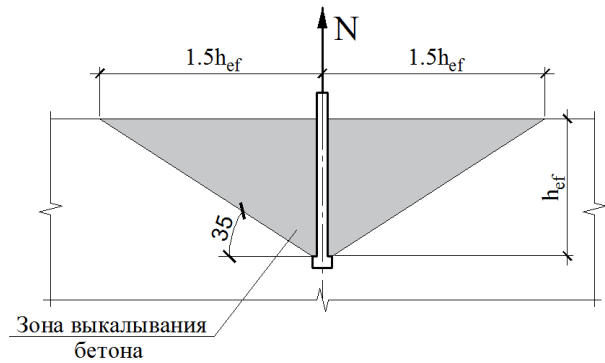


Рисунок 6 – Зона выкалывания бетона основания при растяжении [3]

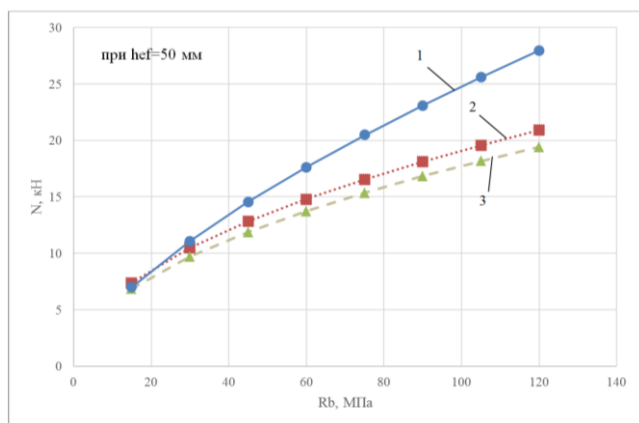
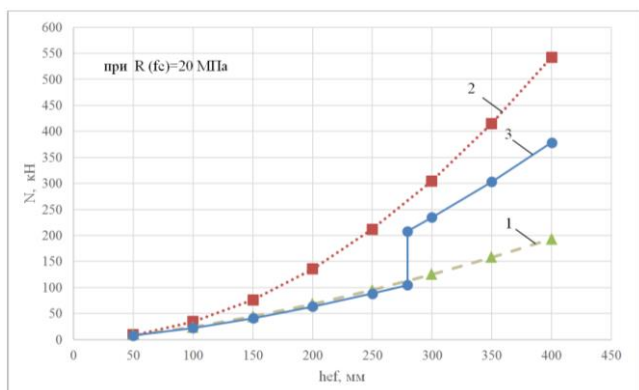
Выполнен сравнительный анализ изменения отрывающего усилия по различным нормам [1–3] при увеличении глубины заделки анкера h_{ef} (рисунок 7, а) и при увеличении средней прочности бетона на сжатие R_b (f_c) (рисунок 7, б).

При расчете прочности анкера при выкалывании бетона основания по нормам [1] учитывается площадь проекции на плоскость, нормальную к анкерам, поверхности выкалывания, в то время как нормы по проектированию [2] и [3] учитывают лишь отношение площадей, учитывающее влияние межосевого расстояния в анкерной группе и расстояние до края основания. В связи с этим несущая способность отдельного анкера, определенная по [1], оказывается больше, чем рассчитанная согласно [2] и [3], несмотря на то, что согласно этим нормам призма выкалывания имеет большую площадь поверхности отрыва (рисунок 7).

Анализ графиков, предоставленных на рисунке 7 (а) показал, что в пределах глубины заделки от 50 до 400 мм, нормы по проектированию [2] и [3] оценивают прочность от выкалывания существенно ниже отечественных норм [1] и с увеличением глубины заделки разница в расчетном сопротивлении увеличивается. В американских нормах [3] приводятся две формулы: при глубине заделки до 279 мм (11 дюймов) и при глубине заделки от 279 мм до 635 мм (11 и 25 дюймов соответственно). При глубине заделки до 279 мм отрывающие усилия, определенные по Еврокоду и ACI, имеют практически идентичные значения, что связано с одинаковой структурой формул и незначительной разницей в величине коэффициентов. При большей глубине заделки сопротивление отрыву (вырыву), рассчитанное по выражениям (6) и (9), оказывается существенно выше значений, полученных по формуле (1) и по своим значениям приближается к усилиям, определенным по [1].

С ростом прочности бетона различия в величине несущей способности, определенной по разным нормам, постепенно увеличиваются и составляют при $R_b = 120$ МПа не более 30 %, что представлено на рисунке 7 (б).

Следует отметить, что изменение силы сопротивления одиночного анкера при разрушении от выкалывания бетона основания при осевом приложении нагрузки к анкеру, полученные в результате использования методик, приведенных в нормах [2] и [3], в пределах глубины заделки от 50 до 400 мм и средней прочности бетона на сжатие от 15 до 120 МПа, имеют схожий характер и дают близкие по значению результаты, а характер изменения и результаты несущей способности анкера, полученные при использовании отечественных норм [1], существенно отличаются.



- 1 – сопротивление отрыву согласно нормам [2];
- 2 – сопротивление отрыву согласно нормам [1];
- 3 – сопротивление отрыву согласно нормам [3]

Рисунок 7 – Зависимость прочности анкера при выкалывании бетона в основании с трещинами от глубины заделки h_{ef} (а)

и прочности бетона $f_{ck}(\bar{R})$ (б)

Выводы:

1. В настоящее время как в отечественных, так и зарубежных нормах при оценке несущей способности конструкций при местном действии локальных растягивающих усилий (отрыве) используют в основном формулу, учитывающую только несущую способность металла и косвенно сжимающее усилие за счет работы вовлеченного в отрыв бетона, при этом как правило принимается идеализированная модель с углом среза равным 45°. В зарубежных нормах [2] и [3] размер призмы выкалывания больше, чем в отечественных нормах [1] (угол наклона поверхности отрыва составляет 35°), но ее размер в приведенных методиках расчета учитывается только при рассмотрении анкерной группы. Для одиночного анкера сопротивление отрыву, рассчитанное согласно нормам [2] и [3], оказывается ниже, чем определенное по [1].

2. Как показал анализ расчетных зависимостей несущей способности применительно для механических анкеров при разрушении от отрыва (выкалывания) бетона имеются существенные расхождения в величине полученных усилий. В американских нормах проектирования [3] сопротивление отрыву в значительной степени зависит от глубины заделки анкера h_{ef} . При $h_{ef} \geq 279$ мм величина отрывающего расчетного значения усилия увеличивается скачкообразно и приближается по величине к усилию, рассчитанному по методике [1].
3. Величина отрывающего усилия находится в пропорциональной зависимости от прочности бетона. При этом сопротивление отрыву, определенное согласно отечественным нормам [1], при увеличении прочности бетона при сжатии (R_b) возрастает стремительнее, чем сопротивление, рассчитанное согласно [2] и [3].

Список цитированных источников

1. Рекомендации по проектированию стальных закладных деталей для железобетонных конструкций / НИИЖБ. – М. : Стройиздат, – 1978. – 87 с.
2. Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for Use in Concrete : ETAG 001 : 2008. – Brussel: European Organisation for Technical Approvals, Introduced February 2008. – 34 p.
3. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (318R-19) : ACI Committee 318 – MI ; Farmington Hills : American Concrete Institute, 2019 – 628 p.
4. Анкерные крепления к бетону с применением анкеров HILTI. Расчет и конструирование : СТО 36554501-039-2014. – Введ. 25.12.2014. – М. : ОАО НИЦ «Строительство», 2014. – 112 с.
5. Бетонные и железобетонные конструкции : СП 5.03.01-2020. – Введ. 16.11.2020. – Минск : М-во архит. и строит. Республики Беларусь, 2020 – 244 с.
6. Голышев, А. Б. Проектирование железобетонных конструкций : Справочное пособие / А. Б. Голышев [и др.] ; под ред. А. Б. Голышева. – 2-е изд. – К. : Будивельник, – 1990. – 544 с.

References

1. Rekomendacii po proektirovaniu stal'nykh zakladnykh detalej dlja zhelezobeton-nykh konstrukcij / NIIZhB. – M. : Strojizdat, - 1978. – 87 s.
2. Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for Use in Concrete : ETAG 001 : 2008. – Brussel: European Organisation for Technical Approvals, Introduced February 2008. – 34 p.
3. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (318R-19) : ACI Committee 318 – MI ; Farmington Hills : American Concrete Institute, 2019 – 628 p.
4. Ankernye krepnenija k betonu s primeneniem ankerov HILTI. Raschet i konstruirovanie : SТО 36554501-039-2014. – Vved. 25.12.2014. – M. : ОАО НИЦ «Stroi-tel'stvo», 2014. – 112 s.
5. Betonnyye i zhelezobetonnyye konstrukcii : SP 5.03.01-2020. – Vved. 16.11.2020. – Minsk : M-vo arhit. i stroit. Respubliki Belarus', 2020 – 244 s.
6. Holyshev, A. B. Proektirovanie zhelezobetonnykh konstrukcij : Spravochnoe posobie / A. B. Holyshev [i dr.] ; pod red. A. B. Golysheva. – 2-e izd. – K. : Budivjel'nyk, – 1990. – 544 s.

Материал поступил в редакцию 27.01.2021