

Анализ расчетов прочности анкерных стержней и опорной пластины при однократном импульсном воздействии с учетом использования различных вычислительных комплексов

А.И. Никулин, С.В. Коуркин

Белгородский Государственный Технологический Университет им. В.Г. Шухова

Аннотация: В статье рассматриваются современные подходы к расчету закладных деталей с помощью наиболее распространенных в проектной среде вычислительных комплексов. Основной целью работы является сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния опорных пластин и анкерных стержней при расчете в различных вычислительных комплексах для получения наиболее достоверных и полных результатов необходимых проектировщику для обеспечения надежности при проектировании узлов строительных конструкций. Помимо вышеизложенного, в статье акцентируется внимание на обеспечении жесткости опорных пластин, в случае соблюдения которой, узловой конструктивный элемент способен выдерживать однократное импульсное воздействие.

Ключевые слова: вычислительные комплексы, закладные детали, методы расчета, расчетные ситуации, коэффициент динамичности, прочностные показатели.

Введение

С целью проведения сравнительного анализа моделируется крепление стойки с поперечным сечением в виде двутавровой балки 20К2 из стали С255 к железобетонной фундаментной плите толщиной 400 мм из бетона В25W8F200 через приварку стойки к закладной детали. Исходными данными для выполнения расчета закладной детали служат физико-механические характеристики арматуры, бетона и стали, а также усилия на приопорном участке стойки, полученные в результате статического расчета.

Опорная пластина имеет размеры в плане 320x320 мм с двумя рядами анкеров, по 2 стержня в каждом, с шагом 260 мм в обоих направлениях, и изготавливается из стали С255, как и прикрепляющаяся к ней стойка. Анкерные стержни выполнены из профилированной арматуры класса А500 диаметром 10 мм. Усилия, приходящиеся на основание стойки, составляют: $N=7.85$ кН и $M=10.30$ кНм (значением усилия Q в следствии малого значения и существенного отдаления закладной детали от края бетона - пренебрегаем). Расчетная ситуация описанная выше отражена на рис. 1.

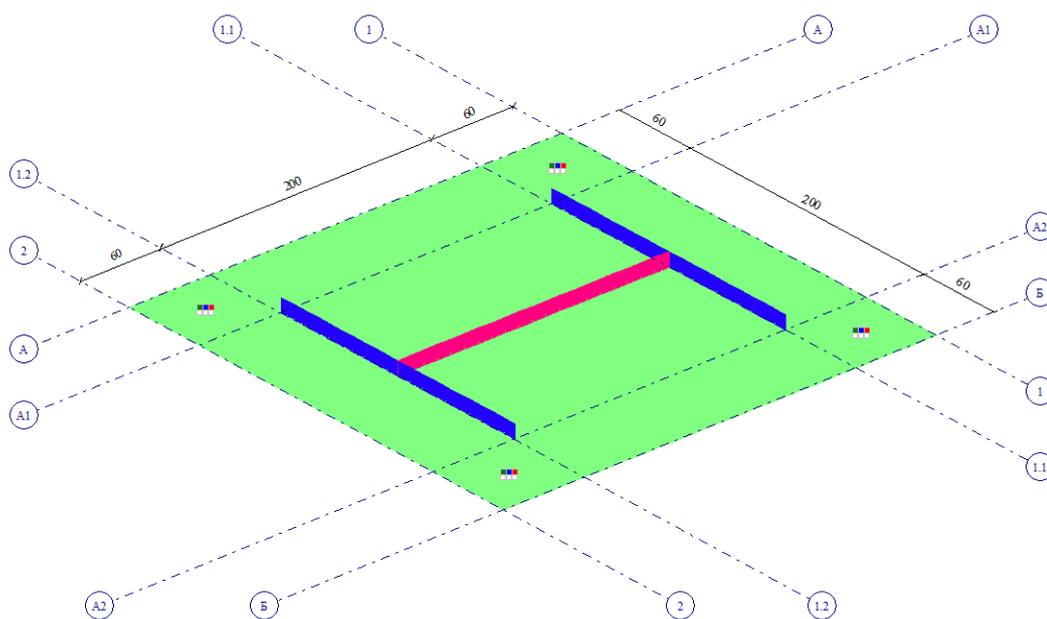


Рис. 1. – Геометрические параметры закладной детали

С целью наиболее наглядного отображения жесткостей на рис. 1 они определены различными цветами. Зеленым – опорная пластина, синим – пояса стойки и красным – стенка двутавра. Жесткостные характеристики пластин представлены на рис. 2.

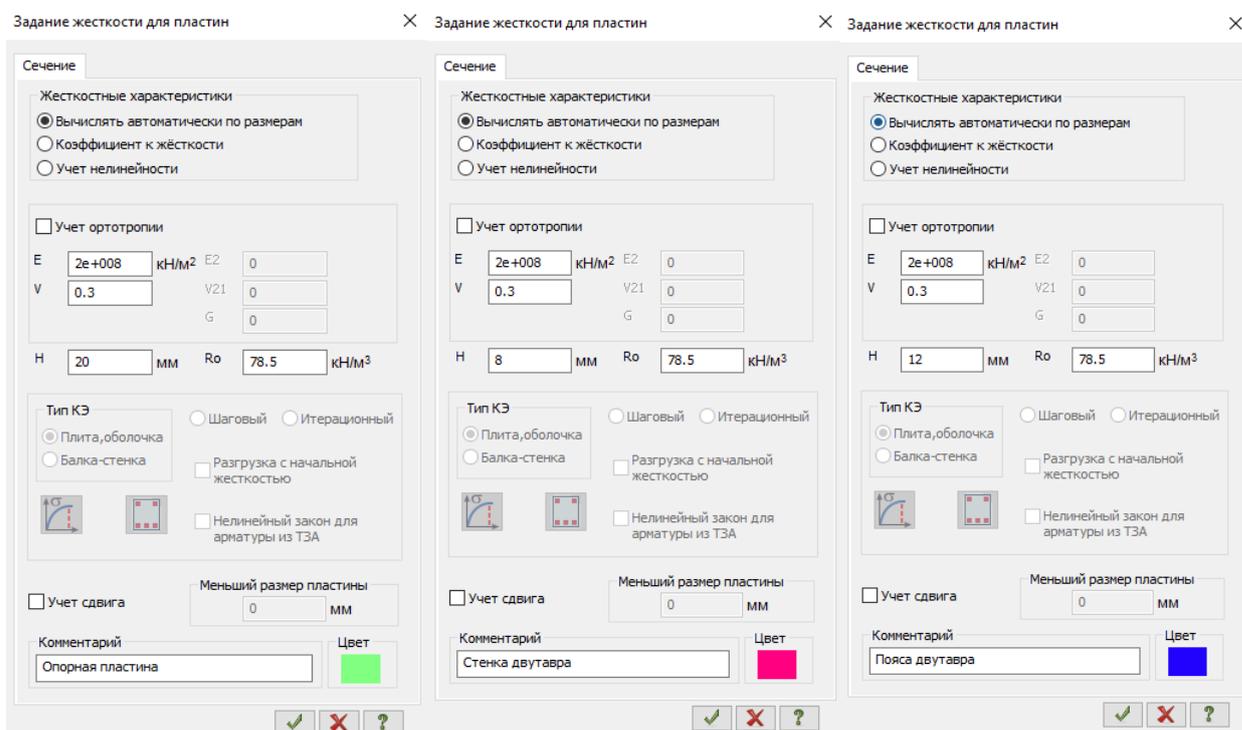


Рис. 2. – Жесткостные характеристики пластин

Передача усилий осуществляется за счет моделирования группы абсолютно жестких тел (узлов) по грани двутавровой стойки, с помощью радиокнопки «Абсолютно жесткое тело», к одному из которых прикладываются усилия, определенные на приопорном участке стойки в результате статического расчета и представленные в исходных данных.

Крепление анкерной пластины в первичном расчете осуществляется путем наложения связей узлов по X, Y, Z в точках расположения анкерных стержней с помощью радиокнопки «Связи».

Так как ручной расчет выполняется, исходя из предпосылки применения жесткой анкерной пластины, изначально производится численное моделирование в программном комплексе «ПК ЛИРА-САПР 2022» с целью определения уровня напряжений в пластине, с последующим принятием ее толщины, удовлетворяющей критерию жесткости в соответствии с СП 513.1325800.2022 «Анкерные крепления к бетону».

Опорную пластину закладной детали допускается принимать жесткой, если максимальные расчетные напряжения в пластине не превышают значения, определенного по формуле (1):

$$R_{y,1} = \frac{R_y}{\gamma_{el}} = \frac{240}{1.5} = 160 \text{ МПа} , \quad (1)$$

где R_y – расчетное сопротивление стали, из которой изготавливается пластина; γ_{el} – коэффициент запаса, равный 1,5.

Жесткие пластины при ручном расчете применяются с целью равномерного распределения усилий между анкерными стержнями, за счет отсутствия ее возможных деформаций. В случае, если критерий жесткости пластины не выполняется, необходимо учитывать дополнительные усилия – реакции отпора от бетонной поверхности, влияющие на усилия, возникающие в анкерных креплениях закладной детали, работающих на растяжение.

1. Применение вычислительных комплексов для сравнительного анализа напряженного состояния опорных пластин и анкерных стержней

1.1 Расчет в программном комплексе «ПК ЛИРА-САПР 2022» без учета податливости бетона и материала анкера:

Напряжения в пластине, возникающие в результате передачи усилий со стойки на закладную деталь через сварные швы (прочность сварных швов в моделируемой задаче не рассматривается), определяются через эквивалентные напряжения по четвертой теории прочности (энергетическая теория Губера-Хенки-Мизеса) [1,2]. Согласно результатам расчета, представленным на рис. 3, наибольшие эквивалентные напряжения возникают в пластине вблизи анкерных креплений, в верхнем слое, и составляют 147 МПа.

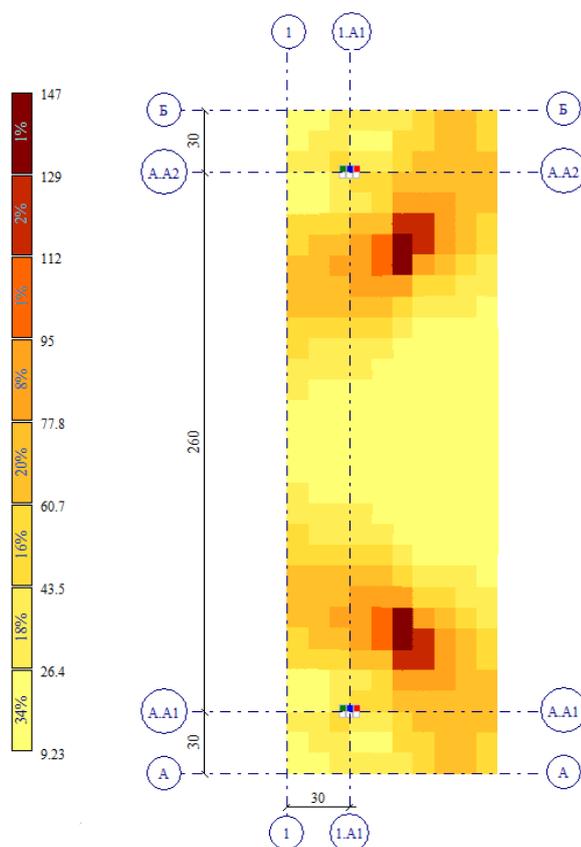


Рис. 3. – Эквивалентные напряжения в опорной пластине

Возникающие напряжения удовлетворяют основному критерию жесткости опорных пластин, согласно формуле (1), и позволяют принять опорную пластину толщиной 20 мм.

Убедившись в достаточной жесткости пластины, что свидетельствует о равномерном перераспределении усилий между анкерными болтами, переходим к определению усилий в каждом из анкеров, воспользовавшись радиокнопкой «Сбор нагрузок на фрагмент» для узлов, моделирующих анкера закладной детали. По результатам расчета, представленным на рис. 4, действующий изгибающий момент и продольная сила распределяются между анкерами следующим образом: в верхнем ряде болтов на каждый из анкеров действует сжимающее усилия 21.8 кН, а в нижнем - растягивающие 17.8 кН.

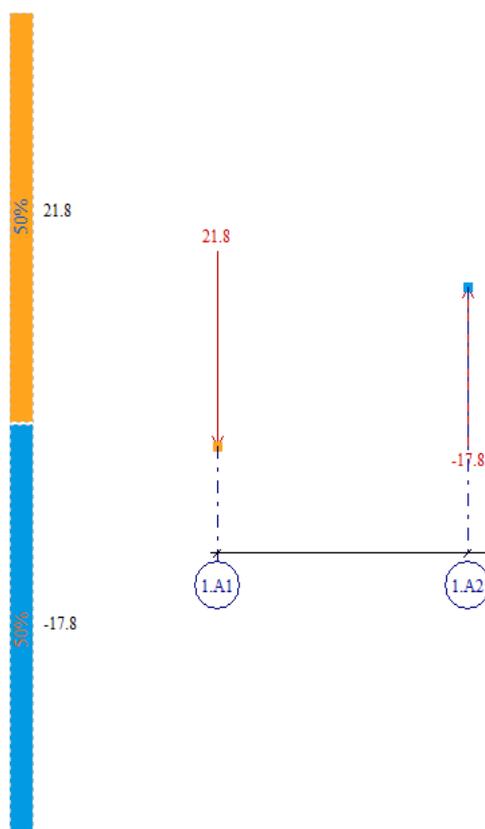


Рис. 4. – Усилия в анкерах закладной детали

Так как усилие сжатия воспринимается бетоном, то необходимо проверить несущую способность анкера на растягивающее усилие.

Предельное растягивающее усилие для анкеров из арматурной стали определяется по формуле (2):

$$N_{ult,s} = \frac{R_{s,n} \cdot \pi \cdot d_{nom}^2}{4 \cdot \gamma_{Ns}} = \frac{500000 \cdot 3.14 \cdot 0.01^2}{4 \cdot 1.25} = 31.4 \text{ кН}, \quad (2)$$

где: $R_{s,n}$ – нормативное значение сопротивления растяжению материала анкера; d_{nom} – номинальный диаметр анкерного стержня; γ_{Ns} – коэффициент надежности по стали при растяжении, принимаемый для анкеров с арматурными стержнями А400 – А500 равным 1,25.

На последнем этапе определяем коэффициенты использования анкерного стержня и опорной пластины по формулам (3, 4):

$$\frac{N}{N_{ult,s}} = \frac{17.8}{31.4} \cdot 100\% = 56.7\%, \quad (3)$$

где: N – усилие, возникающее в растянутых анкерах при рассматриваемой расчетной ситуации; $N_{ult,s}$ – предельное растягивающее усилие для анкеров.

$$\frac{\sigma}{\sigma_y} = \frac{147}{240} \cdot 100\% = 61.3\%, \quad (4)$$

где: σ – напряжение, возникающее в опорной пластине при рассматриваемой расчетной ситуации; σ_y – предел текучести для стали С255.

1.2 Расчет в программном комплексе «ПК ЛИРА-САПР 2022» с учетом податливости бетона и материала анкера:

Для учета жесткости бетона воспользуемся применением односторонней работы упругого основания [3].

Коэффициент жесткости основания принимается по формуле (5):

$$C_b = 20 \text{ мм}^{-1} \cdot R_b = 20 \text{ мм}^{-1} \cdot 14.5 \text{ МПа} = 290 \text{ Н/мм}^3, \quad (5)$$

где: R_b – расчетное сопротивление бетона по прочности на сжатие.

Жесткость анкера диаметром 10 мм с эффективной глубиной посадки 100 мм по формуле (6):

$$C_0 = \frac{E_s \cdot A_{an}}{h_{ef}} = \frac{200000 \cdot 78.5}{100} = 157000 \text{ Н/мм} = 157 \text{ кН/мм}, \quad (6)$$

где: E_s – модуль упругости стали; A_{an} – номинальная площадь сечения анкера; h_{ef} – рабочая глубина заделки анкера.

Вычисленный коэффициент жесткости основания по формуле (5) прикладывается к опорной анкерной пластине с помощью радиокнопки «Коэффициенты постели C1, C2» с учетом односторонней упругой работы основания. В случае, если односторонняя работа упругого основания не будет задана, в месте растяжения пластины (и анкерных креплений), программа будет считать, что сверху ее растяжению препятствует бетон, по аналогии с участком сжатия, что является конструктивно неверным.

Анкерные стержни в рассматриваемом подходе моделируются с помощью одноузлового конечного элемента (КЭ 251), расположенного в местах установки анкерных стержней, с вычисленными по формуле (6) параметрами, как показано на рис. 5, а не с помощью закрепления узлов по X, Y и Z, как это было представлено в предшествующем способе моделирования.

Благодаря конструктивно настроенной работе упругого основания, отображающей действительную работу анкерной группы, коэффициент жесткости бетона (коэффициент постели) будет включаться в совместную работу только в месте локального сжатия, возникающего в результате действия на прикрепляемую стойку изгибающего момента, то есть, участке прижатия опорной пластины к основанию (в области сжатых анкеров). Возникающий при этом напряжения в бетоне составляют 3.46 МПа и представлены на рис. 6.

При этом эквивалентные напряжения, возникающие в верхнем волокне при рассматриваемой расчетной схеме, вблизи растянутых анкеров составляют 120 МПа, как представлено на рис. 7.

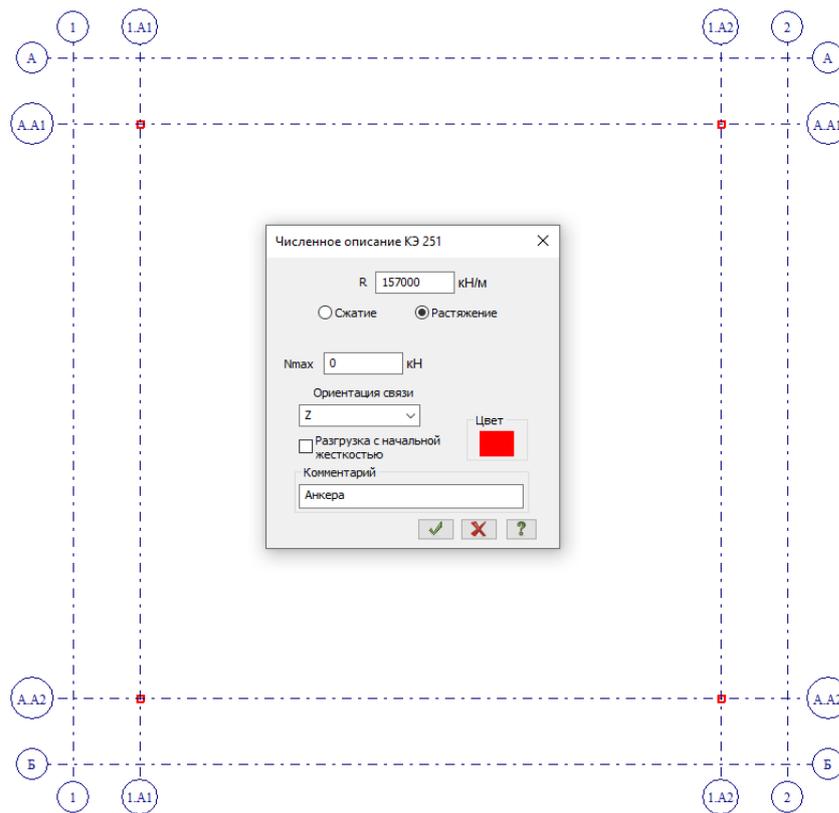


Рис. 5. – Учет жесткости анкерных стержней

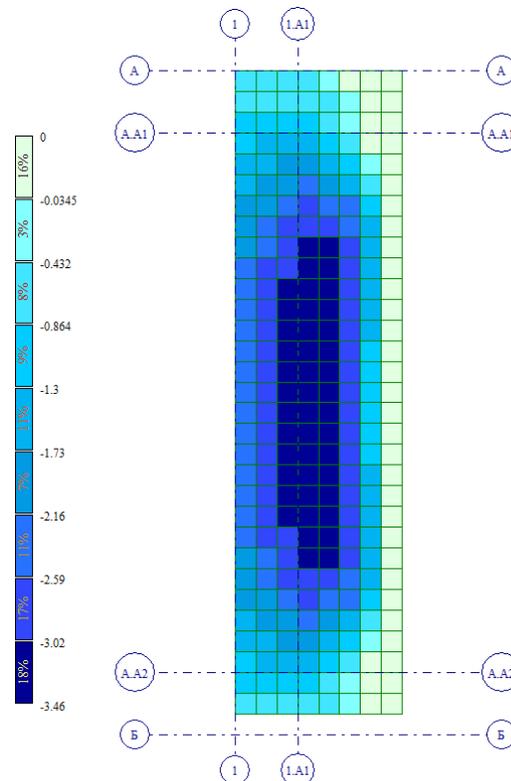


Рис. 6. – Напряжение под сжатой зоной анкерной пластины

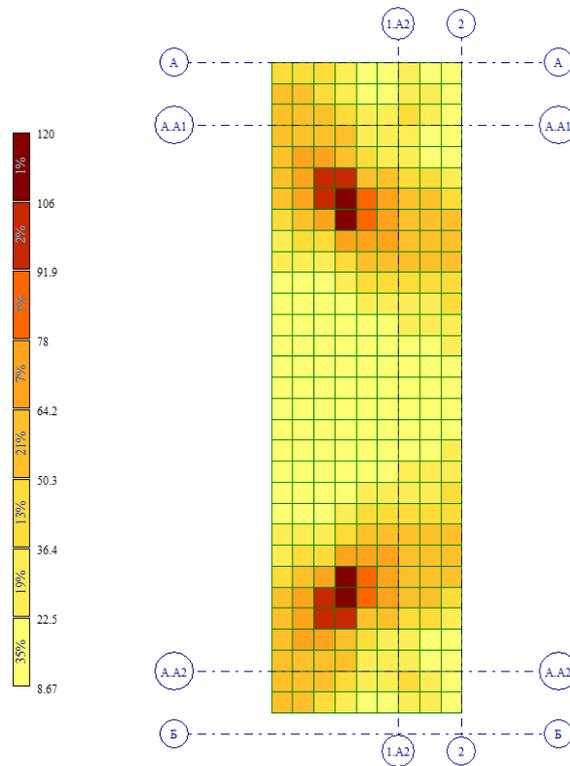


Рис. 7. – Эквивалентные напряжения в опорной пластине с упругим основанием

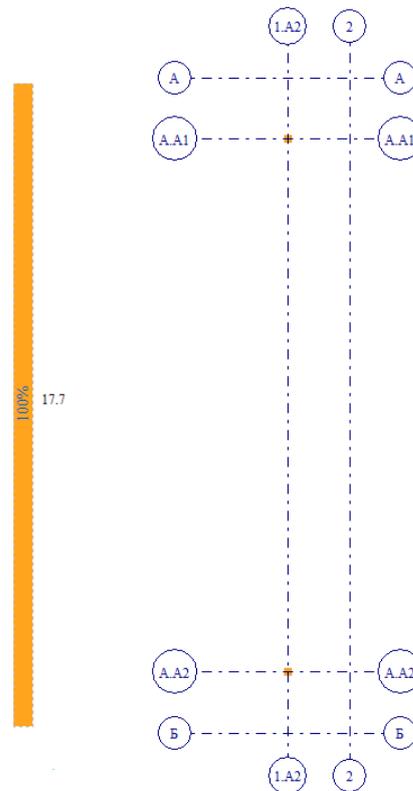


Рис. 8 – Усилия в податливых анкерах закладной детали

Возникающие в анкерах реакции представлены в виде усилий, возникающих в одноузловых конечных элементов (КЭ). Растягивающие усилия составили 17.7 кН на каждый анкер, как представлено на рис. 8, а сжимающие усилия в одноузловых элементах отсутствуют, так как воспринимаются бетоном.

Определяем коэффициенты использования анкерного стержня и опорной пластины с учетом податливости бетона и материала анкера по формулам (3, 4):

$$\frac{N}{N_{ult,s}} = \frac{17.7}{31.4} \cdot 100\% = 56.4\%;$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_y} = \frac{120}{240} \cdot 100\% = 50.0\%$$

1.3 Расчет в сателлитах программного комплекса «SCAD Office 21.1.9.7»:

Определение коэффициентов использования опорной пластины и анкерных стержней в сателлите «Арбат» программного комплекса «SCAD Office 21.1.9.7» выполняется в несколько этапов.

На первом этапе задаются общие параметры, в которые входят тип и физико-механические характеристики проектируемой детали с действующими на нее нагрузками (усилиями от прикрепляемого элемента). Тип детали и действующие на закладную деталь нагрузки принимаются аналогичными выше предоставленным расчетам и задаются в программный комплекс, как показано на рис. 9.

На втором этапе задаются физико-механические характеристики бетона, в котором будет располагаться закладная деталь, а также коэффициенты, отражающие его работу, как показано на рис. 10.

На завершающем этапе задаются геометрические параметры детали, в соответствие с исходными данными, как продемонстрировано на рис. 11.

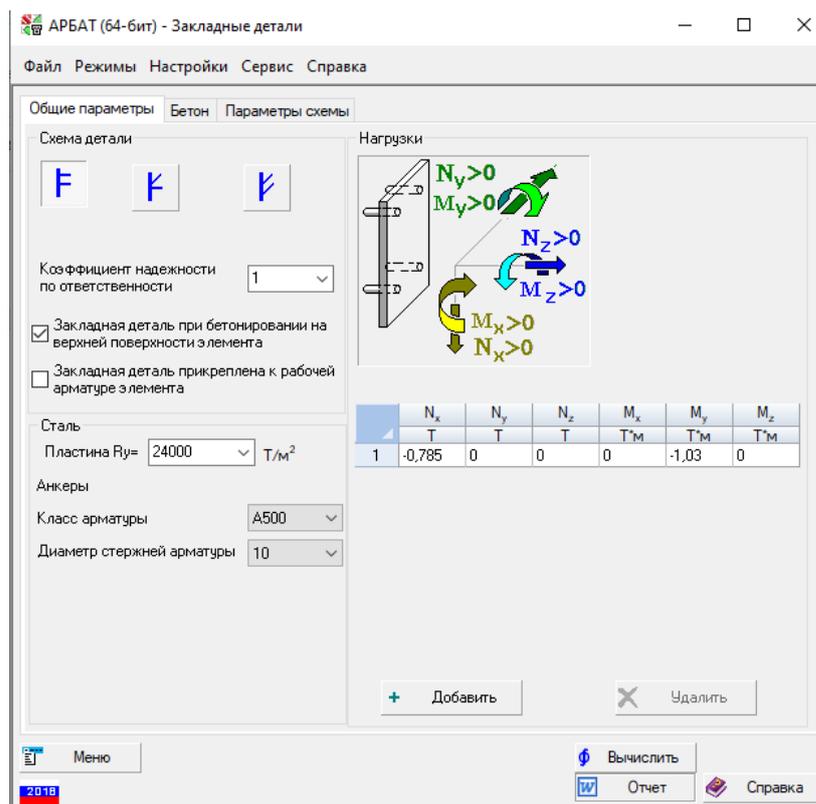


Рис. 9. – Общие параметры

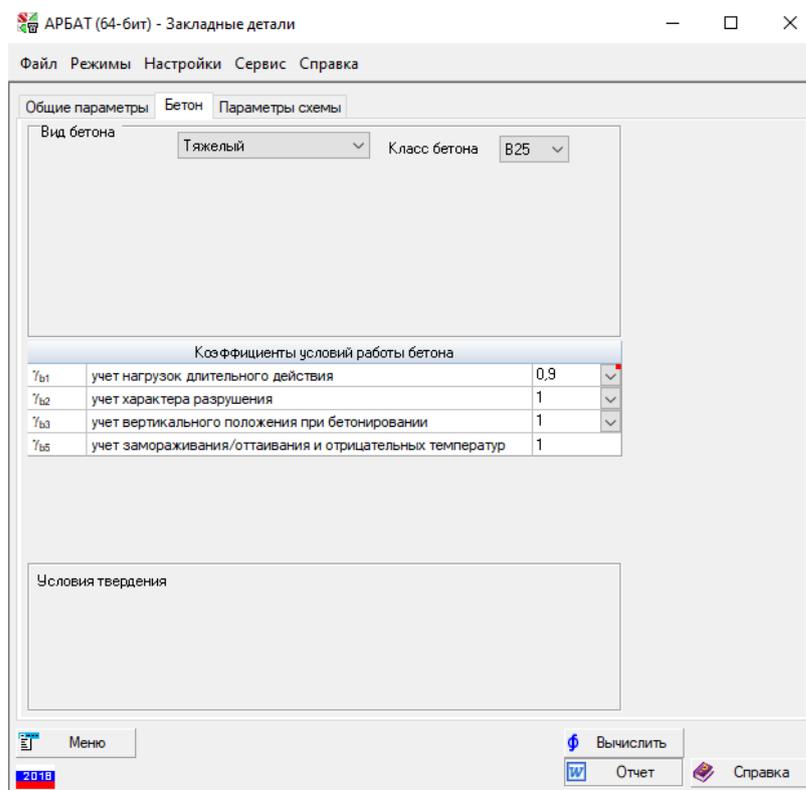


Рис. 10. – Физико-механические характеристики бетона

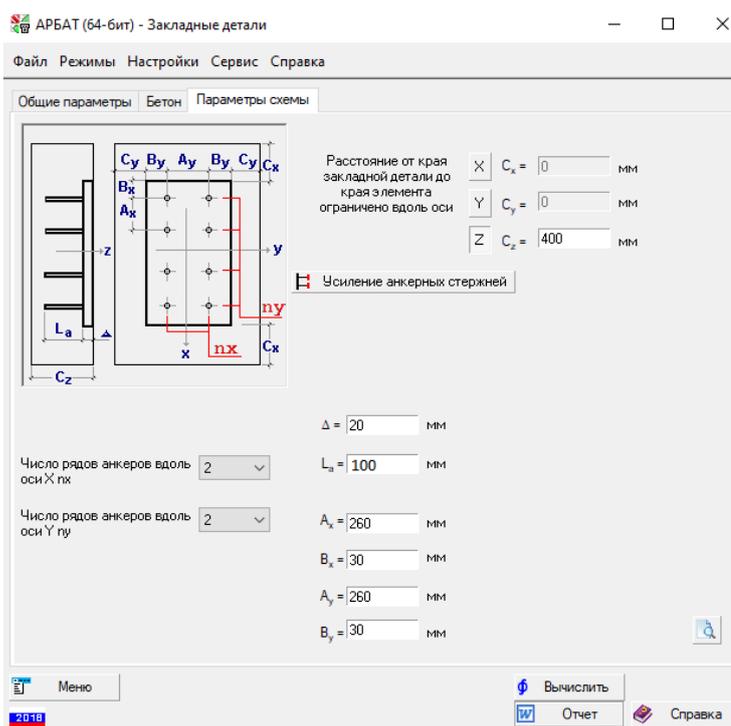


Рис. 11. – геометрические характеристики закладной детали

Требуемых параметров комплексу необходимо и достаточно для вычисления коэффициента использования по прочности наиболее напряженного анкера, который составил 0,68 (68%), однако никаких данных по использованию опорной пластины не предоставляется, что не позволяет целостно оценить картину работы проектируемой детали [4,5].

1.5 Расчет в программном комплексе «ПК ЛИРА-САПР 2022» с учетом податливости бетона, материала анкера и толщины опорной пластины 8 мм:

В случае применения толщины пластины по конструктивным требованиям, согласно СП 513.1325800.2022 и Пособия к СНиП 2.03.01-84 равной 8 мм, без изменения действующих усилий, в верхнем волокне анкерной пластины получаем эквивалентные напряжения, представленные на рис. 12, достигающие 789 МПа вблизи растянутых анкерных креплений, что существенно превышает временное сопротивление стали С255, не говоря уже о пределе текучести.

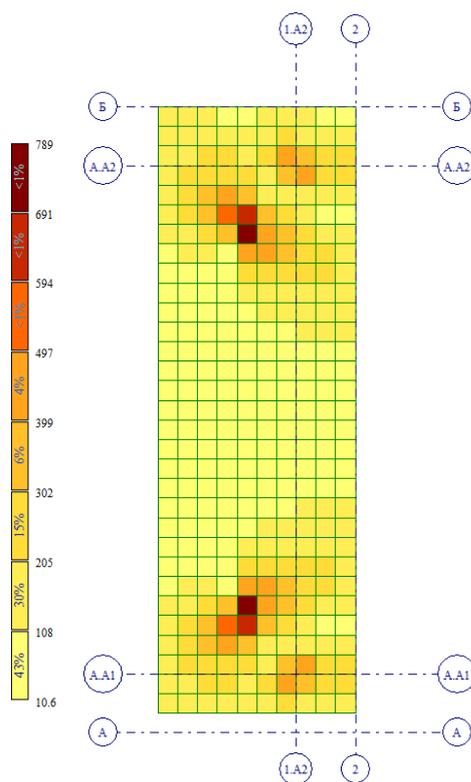


Рис. 12. – Эквивалентные напряжения в опорной пластине с упругим основанием толщиной 8 мм

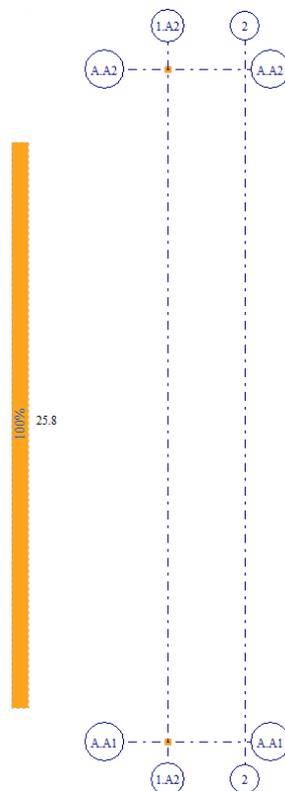


Рис. 13. – Усилия в податливых анкерах закладной детали толщиной 8 мм

Возникающие в анкерах реакции представлены в виде усилий одноузловых конечных элементов (КЭ) и отражены на рис. 13. Растягивающие усилия составили 25.8 кН, а сжимающие отсутствуют, так как воспринимаются сжатой зоной бетона.

Определяем коэффициенты использования анкерного стержня и опорной пластины с учетом податливости бетона и материала анкера по формулам (3, 4):

$$\frac{N}{N_{ult,s}} = \frac{25.8}{31.4} \cdot 100\% = 82.20\%;$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_y} = \frac{789}{240} \cdot 100\% = 328.8\%.$$

1.6 Расчет в программном комплексе «ПК ЛИРА-САПР 2022» при однократном импульсном воздействии сверхкратковременной динамической нагрузкой:

Расчет задачи будет осуществляться в квазистатической постановке, когда одна из основополагающих нагрузок увеличивается на коэффициент динамичности по нагрузке k_d [6-8].

При выполнении расчета, в соответствии с СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения», коэффициенты надежности по нагрузке γ_f следует принимать равными 1, коэффициент увеличения динамической прочности стали φ_s - равным 1.2, а коэффициент увеличения динамической прочности арматуры $\gamma_{\varphi s}$ - равным 1.

Так как изначально нагрузки задавались в виде расчетных, необходимо перевести их значения в нормативные, путем деления их значений на усредненный коэффициент надежности по нагрузке $\gamma_f=1.25$. Итоговые нагрузки составят $N=6.28$ кН и $M=8.24$ кН м.

За счет повышения динамической прочности стали, предел текучести увеличивается до 288 МПа.

Величина коэффициента динамичности по нагрузке вытекает из теоретического решения, когда в упругой постановке без демпфирования реакция повреждений конструкции моделируется, как отклик одномассовой системы на кратковременное воздействие по формуле (7):

$$k_{\text{дин}} = 1 + \frac{|\sin(\pi \frac{t_r}{T})|}{\pi \frac{t_r}{T}}, \quad (7)$$

где t_r – время отказа конструкции (время нагружения); T – период собственных колебаний.

При времени отказа стремящимся к нулю, так как в случае аварийной ситуации выход конструкции из строя происходит моментально (в кратчайший промежуток времени), и применении свойства первого замечательно предела [9,10], формула (7) преобразуется в формулу (8):

$$k_{\text{дин}} = 1 + \lim_{t_r \rightarrow 0} \frac{|\sin(\pi \frac{t_r}{T})|}{\pi \frac{t_r}{T}} = 1 + 1 = 2, \quad (8)$$

На НДС пластины основное влияние оказывает изгибающий момент, поэтому его значение необходимо увеличить на коэффициент динамичности по нагрузке и получить значение 16.48 кНм. Данное усилие необходимо приложить к исходной расчетной схеме, вместо 10.30 кНм.

При этом эквивалентные напряжения, вблизи анкерных креплений и возникающие в верхнем волокне при квазистатическом подходе, составляют 201 МПа и представлены на рис. 14.

Возникающие в анкерах реакции представлены в виде усилий одноузловых конечных элементов (КЭ) на рис. 15. Растягивающие усилия составили 29.6 кН, а сжимающие отсутствуют, так как воспринимаются сжатой зоной бетона.

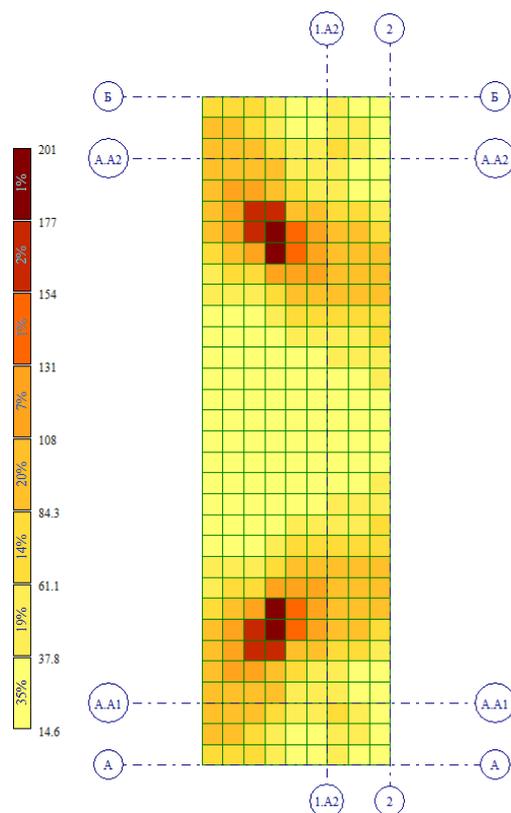


Рис. 14. – Эквивалентные напряжения в опорной пластине при квазистатическом подходе

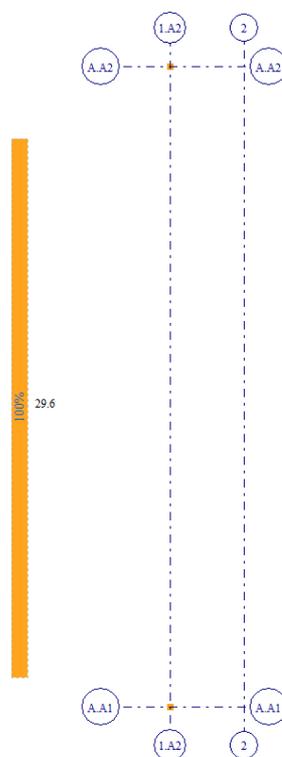


Рис. 15. – Усилия в податливых анкерах закладной детали

Определяем коэффициенты использования анкерного стержня и опорной пластины с учетом податливости бетона и материала анкера по формулам (3, 4):

$$\frac{N}{N_{ult,s}} = \frac{29.6}{37.68} \cdot 100\% = 78.56\%;$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_y} = \frac{201}{288} \cdot 100\% = 69.79\%.$$

2. Верификационный ручной расчет

2.1 Расчет в соответствии с СП 513.1325800.2022 «Анкерные крепления к бетону»:

Расчетные усилия в анкере при действии продольной силы и изгибающего момента в плоскости жесткой опорной пластины определяются по расчетной схеме, представленной на рис. 16.

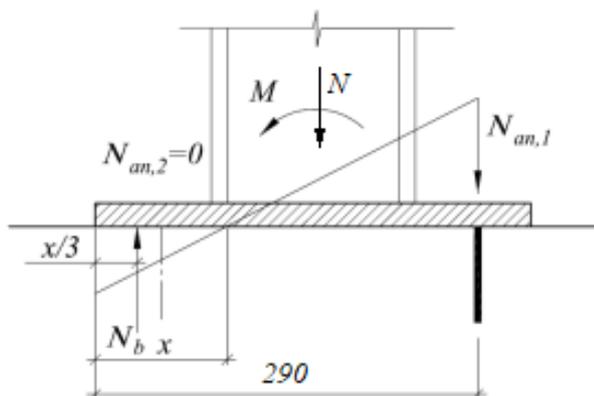


Рис. 16. – Расчетная схема закладной детали

Выполняем определение приведенного модуля деформации бетона по формуле:

$$E_{b,red} = \frac{R_b}{\varepsilon_b} = \frac{14,5}{0,0015} = 9667 \text{ МПа}, \quad (9)$$

где: ε_b – относительные деформации бетона, отвечающие непродолжительному действию нагрузки, принимаемые для тяжелого бетона 0,0015.

Расчетная жесткость анкера определяется по формуле (6):

$$C_{an} = C_0 = \frac{E_s \cdot A_{an}}{h_{ef}} = \frac{200000 \cdot 78.5}{100} = 157000 \frac{\text{Н}}{\text{мм}},$$

Коэффициент α_E , вычисляется по формуле:

$$\alpha_E = \frac{E_{b,red} \cdot b}{C_{an} \cdot h_{ef} \cdot n} = \frac{9667 \cdot 320}{157000 \cdot 100 \cdot 2} = 0.1 \text{ мм}^{-1}, \quad (10)$$

где: $E_{b,red}$ – приведенный модуль деформации бетона; b – ширина опорной пластины закладной детали; n – количество анкеров в ряду.

Высота сжатой зоны определяется по формуле:

$$x = \frac{\sqrt{2 \cdot \alpha_E \cdot z_1 + 1} - 1}{\alpha_E} = \frac{\sqrt{2 \cdot 0.1 \cdot 290 + 1} - 1}{0.1} = 66.81 \text{ мм}, \quad (11)$$

где: z_1 – расстояние от рассматриваемого ряда анкеров до наиболее сжатой грани опорной пластины.

Усилие в крайнем ряду анкеров для этого случая определяют по формуле:

$$N_{an,1} = \frac{N}{2} - \frac{M}{(z_1 - x/3)} = \frac{7.85}{2} - \frac{10.3}{0.29 - \frac{0.067}{3}} = 34.5 \text{ кН}, \quad (12)$$

где: N и M – действующие в приопорной зоне усилия.

Усилие определено для ряда, содержащего два анкера. Максимальное расчетное усилие в одном анкере составляет 17,25 кН.

Толщина пластины определяется конструктивно по формуле:

$$\delta = 0.25d \frac{R_s}{R_{sq}} = 0.25 \cdot 10 \cdot \frac{435}{0.58 \cdot 240} = 7.81 \text{ мм}, \quad (13)$$

где d – диаметр анкерного стержня; R_{sq} – расчетное сопротивление стали опорной пластины при сдвиге, соответствующее R_s .

Принимаем толщину опорной пластины 8 мм при типе соединения Т2-Рф в соответствии с ГОСТ 14098-2104.

Определяем коэффициенты использования анкерного стержня и опорной пластины с учетом податливости бетона и материала анкера по формуле (3):

$$\frac{N}{N_{ult,s}} = \frac{17.25}{31.4} \cdot 100\% = 54.9\%.$$

Заключение

Сопоставление полученных результатов выполним в виде таблицы №1, основными рассматриваемыми параметрами которой будут методы расчета и коэффициенты использования опорной пластины и анкерных стержней. Принимая за базисное значение результаты ручного расчета по действующей в настоящее время нормативной базе (СП 513.1325800.2022 «Анкерные крепления к бетону»), определим отклонения напряжений в анкерных стержнях (Δ), полученных при расчетах представленными методами.

Основываясь на данных, полученных в результате выше представленных расчетов и отраженных в табличной форме (таблица №1), можно сделать следующие выводы:

1) Конструктивный ручной расчет опорных пластин не отражает настоящую ее работу и уровень напряжений, возникающий в процессе передачи усилия от прикрепляемого элемента, что приводит к ее разрушению. Однако, усилия в анкерных стержнях сопоставимы со значениями, полученными в процессе моделирования в расчетных комплексах, так как условно не зависят от толщины пластины (жесткость пластины изначально принимается достаточной для равномерного распределения усилий).

2) Подбор толщины пластин по критерию жесткости позволяет закладной детали воспринять усилия, возникающие в результате однократного импульсного воздействия сверхкратковременной динамической нагрузкой.

3) Применение сателлитов при расчете и подборе закладных деталей носит условный характер, так как программы не формируют данные необходимые и достаточные для анализа НДС как опорной пластины, так и анкерных стержней, а лишь выдают коэффициенты использования отдельных ее составляющих.

Таблица № 1

Сопоставление полученных результатов

№ п/п	Метод расчета	Толщина пластины, мм	$K_{исп.ст.}, \%$	$K_{исп.пл.}, \%$	$\Delta, \%$
1.	ПК ЛИРА-САПР 2022 без учета податливости анкеров	20	56.70	61.30	+3.27
2.	ПК ЛИРА-САПР 2022 с учетом податливости	20	56.40	50.00	+2.73
3.	СП 513.1325800.2022	8	54.90	-	0
4.	Сателлит «SCAD Office 21.1.9.7»	20	68.00	-	+23.86
5.	Сателлит «Стройэкспертиза Base»	6	59.00	-	+7.46
6.	ПК ЛИРА-САПР 2022 с учетом податливости и рекомендованной толщиной пластины	8	82.20	328.80	+49.73
7.	ПК ЛИРА-САПР 2022 при однократном сверхкратковременном импульсном воздействии	20	94.27	69.79	+71.71

Литература

1. Саламахин С. В., Синельников А.С. Моделирование узла винтового соединения тонкостенных стальных перфорированных профилей методом конечных элементов // Строительство уникальных зданий и сооружений – 2013. – № 4(9). URL: [unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2013/4\(9\)/6_salamahin_sinelnikov_09.pdf](http://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2013/4(9)/6_salamahin_sinelnikov_09.pdf).
2. Vatin N. I, Sinelnikov A. S. Strength and durability of thin-walled cross-sections // Design, fabrication and economy of metal structures. 2013. URL: researchgate.net/publication/291769785_Strength_and_Durability_of_Thin-Walled_Cross-Sections_Design_Fabrication_and_Economy_of_Metal_Structures.
3. Отчет о научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе по теме: «Исследование анкерных креплений к бетону с разработкой расчётных зависимостей для нормирования». – АО «НИЦ «Строительство», 2017. - 154 с.
4. Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD. — М.: Издательство СКАД СОФТ, 2011. – 656 с.
5. Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А. SCAD Office. Формирование сечений и расчет их геометрических характеристик. — М.: Издательство АСВ, 2013. – 128 с.
6. Белостоцкий А.М. Акимов П.А. Актуальные проблемы численного моделирование зданий, сооружений и комплексов. — М.: Издательство АСВ, 2016. — 596 с.
7. Никулин А.И. О динамической прочности бетона при неоднородном импульсном сжатии // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №1. URL: dspace.bstu.ru/jspui/bitstream/123456789/1210/1/13.%20%D0%9D%D0%B8%D0%BA%D1%83%D0%BB%D0%B8%D0%BD.pdf.

8. Никулин А.И., Коуркин С.В. Методы расчета и защиты монолитных железобетонных конструкций безригельных каркасов многоэтажных зданий при аварийных воздействиях // Инженерный вестник Дона, 2023. №1. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_43__12_nikulin_kourkin.pdf_ae70cb3506.pdf.

9. Department of Defense USA. UFC 4-023-03. Unified Facilities Criteria (UFC). Design of buildings to resist progressive collapse, 2009. – 188 p.

10. Cao M.S., Sha G.G., Gao Y.F., Ostachowicz W. Structural damage identification using damping: a compendium of uses and features // Smart Materials and structures – 2017. – V. 26 – № 4. URL: researchgate.net/publication/311843103_Structural_Damage_Identification_Using_Damping_A_Compendium_of_Uses_and_Features.

References

1. Salamahin S. V., Sinel'nikov A.S. Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij. 2013, № 4(9), URL: [unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2013/4\(9\)/6_salamahin_sinelnikov_09.pdf](http://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2013/4(9)/6_salamahin_sinelnikov_09.pdf).

2. Vatin N. I, Sinelnikov A. S. Design, fabrication and economy of metal structures. 2013. URL: researchgate.net/publication/291769785_Strength_and_Durability_of_Thin-Walled_Cross_Design_Fabrication_and_Economy_of_Metal_Structures.

3. Issledovanie ankernyh kreplenij k betonu s razrabotkoj raschjotnyh zavisimostej dlja normirovanija [Research of anchor fastenings to concrete with the development of calculated dependencies for normalization]. AO «NIC «Stroitel'stvo», 2017. 154 p.

4. Karpilovskij V.S., Kriksunov Je.Z., Maljarenko A.A., Perel'muter A.V., Perel'muter M.A. SCAD Office. Vychislitel'nyj kompleks SCAD [Computing complex SCAD]. M.: Izdatel'stvo SKAD SOFT, 2011. 656 p.

5. Karpilovskij V.S., Kriksunov Je.Z., Maljarenko A.A., Perel'muter A.V., Perel'muter M.A. SCAD Office. Formirovanie sechenij i raschet ih



geometricheskih harakteristik [Formation of sections and calculation of their geometric characteristics]. M.: Izdatel'stvo ASV, 2013. 128 p.

6. Belostockij A.M. Akimov P.A. Aktual'nye problemy chislennogo modelirovanie zdaniy, sooruzhenij i kompleksov [Actual problems of modeling buildings, structures and complexes]. M.: Izdatel'stvo ASV, 2016. 596 p.

7. Nikulin A.I. Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova. 2017. №1. URL: dspace.bstu.ru/jspui/bitstream/123456789/1210/1/13.%20%D0%9D%D0%B8%D0%BA%D1%83%D0%BB%D0%B8%D0%BD.pdf.

8. Nikulin A.I., Kourkin S.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023. №1. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_43__12_nikulin_kourkin.pdf_ae70cb3506.pdf.

9. Department of Defense USA. UFC 4 023 03. 2009. 188 p.

10. Cao M.S., Sha G.G., Gao Y.F., Ostachowicz W. Smart Materials and structures 2017. V. 26. № 4. URL: researchgate.net/publication/311843103_Structural_Damage_Identification_Using_Damping_A_Compndium_of_Uses_and_Features.