Границы применимости расчётных моделей анкерных креплений навесных фасадов к железобетону

Луков Алексей Владимирович
кандидат технических наук, доцент, кафедра «Испытаний сооружений», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, vokul@yandex.ru,

Магомедов Исабек Магомедович
магистр ИДО, кафедра «Испытаний сооружений», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Исследованы условия переноса нормативных зависимостей и опубликованных испытательных данных на расчёт анкерного крепления навесного фасада к железобетонному основанию. Метод включает сопоставление областей применимости источников, проверку состава входных параметров аналитического модуля и независимое воспроизведение контрольного вычисления. Установлено, что российские нормы предусматривают групповую работу и краевые эффекты, тогда как исследуемый модуль не связывает часть соответствующих геометрических параметров с результатом расчёта. В контрольном примере показатель взаимодействия растяжения и сдвига составляет 0,788635, а после последовательного применения заданного множителя сопротивлений 0,85 возрастает до 1,006346; это выявляет несогласованность программного решения, но не подтверждает усталостную прочность изделия. Предложен порядок обоснования модели, который разграничивает проверку вычислений, квалификацию анкерного изделия и физическую валидацию и определяет состав данных для учёта группы, циклических воздействий и монтажных отклонений.

Ключевые слова: навесной фасад, железобетонное основание, анкерное крепление, анкерная группа, краевой эффект, выкалывание бетона, циклическое нагружение, усталость, монтажные отклонения, верификация вычислений, валидация модели, область применимости.

Постановка проблемы

Крепление фасадного кронштейна к железобетону связывает распределённую нагрузку от облицовки с локальным сопротивлением основания. Подконструкция передаёт усилия через опорную пластину, анкеры и контактную зону. Эксцентриситет нагрузки, податливость пластины и расположение свободных граней определяют, какая часть усилий приходится на каждый анкер. Поэтому результат расчёта одиночного крепежа становится характеристикой узла только после проверки схемы передачи нагрузки.

Особенно существенна эта связь при креплении к торцу перекрытия. Перенос отверстия меняет расстояния до верхней и нижней граней, положение относительно арматуры и плечо сил в кронштейне. Увеличение эффективной глубины анкеровки способно повысить сопротивление одному механизму разрушения и одновременно усилить влияние другого геометрического ограничения. Проверка лишь диаметра анкера и прочности бетона оставляет эти изменения за пределами модели.

Цель статьи — установить критерии достаточности расчётной модели фасадной анкеровки по результатам критического анализа первой главы ВКР и её исходного аналитического модуля [15]. Исследовательский вопрос состоит в том, какие доказательства позволяют перейти от воспроизводимого численного результата к обоснованному выводу о конкретном креплении. Объект рассмотрения ограничен стальными механическими и клеевыми анкерами в бетонном основании; крепление облицовки к направляющим и пластиковые фасадные дюбели требуют иных расчётных постановок.

Материалы и метод исследования

Исследование объединяет целевой обзор источников и проверку вычислительной логики. В нормативную группу включены документы, которые непосредственно определяют расчёт анкеров, закладных деталей и геометрические допуски. Экспериментальную группу составляют публикации с установленным типом крепления, режимом нагружения и измеряемым результатом. Документы производителей рассмотрены как источники характеристик определённых изделий и условий их применения. Отбор ориентирован на три вопроса первой главы: групповую работу у края, циклическое воздействие и монтажную изменчивость. Обзор не претендует на библиометрическую полноту.

Для каждого источника сопоставлены предмет расчёта, вид нагрузки, состояние бетона, геометрия крепления и уровень результата. Средняя предельная нагрузка опыта, характеристическое сопротивление изделия и расчётное сопротивление после введения коэффициентов надёжности учитываются раздельно. Результаты объединяются только при совпадении определений сравниваемых величин. Источник, описывающий квалификационное испытание, сам по себе не подтверждает численную модель контактного взаимодействия анкера и бетона.

Первичная вычислительная база — Python-модуль одиночного анкера, приложенный к исследуемой ВКР. Его название содержит ссылку на EN 1992-4, но соответствие стандарту проверяется по составу зависимостей, а не по названию файла. В статье сохранены исходные формулы и коэффициенты: исправление модели до анализа скрыло бы причину выявленных расхождений. Контроль выполнен повторным запуском модуля и отдельным вычислением его ветвей без вызова исходных функций. Проверка касается аналитического алгоритма; конечные элементы и результаты натурных испытаний в исходной базе отсутствуют.

Методическая последовательность начинается с установления физического смысла входа. Затем проверяются его участие в формуле, выбор определяющего сопротивления и связь этого сопротивления с окончательным условием. Варьирование параметра служит диагностикой: отсутствие реакции при заведомо изменённой геометрии требует проверки кода и области применимости, прежде чем исследователь станет объяснять его свойствами реального крепления.

Различия нормативных и экспериментальных подходов

Отечественная традиция расчёта закладных деталей не ограничивалась одиночным стержнем. Рекомендации НИИЖБ 1984 года относятся к стальным закладным деталям при статическом нагружении; пункт 1.6 предусматривает случайные эксцентриситеты вследствие монтажных и размерных отклонений, а раздел 4 рассматривает передачу усилий системой анкеров [2]. Эти положения подтверждают существование геометрической постановки, но не дают основания считать закладную деталь и установленный в просверленное отверстие анкер одной расчётной системой.

Приложение Б СП 63.13330.2018 посвящено закладным деталям, в том числе нормальным анкерам, приваренным к плоским стальным элементам [3]. Распорный анкер передаёт усилие через контакт с поверхностью подготовленного отверстия; для клеевого крепления значимы также состав, очистка, влажность и отверждение. Перенос формул между этими конструкциями только по совпадению диаметра или глубины не сохраняет механизм передачи нагрузки.

Непосредственную российскую нормативную основу рассматриваемой задачи составляет СП 513.1325800.2022 [1]. Пункт 7.1.3.2 предусматривает проверку анкерной группы при выкалывании основания, а пункт 7.2.3.2 — при откалывании края под действием сдвига. Документ связывает сопротивление с геометрией группы и краёв. Его область охватывает основания из тяжёлого и мелкозернистого бетона B15–B60; положения не распространяются на проектирование в районах сейсмичностью 7 баллов и более. Следовательно, отсутствие группового расчёта в отдельной программе нельзя представлять как отсутствие такого расчёта в российской нормативной системе.

В зарубежном направлении важен переход к сопоставлению геометрически различающихся испытаний. Fuchs, Eligehausen и Breen [4] проверили CCD-подход на базе примерно 1200 европейских и американских испытаний. Рассмотрены одиночные анкеры и группы, близость края, растяжение и сдвиг в бетоне без трещин при монотонном нагружении. Сопоставление с ACI 349-85 выявило зависимость консервативности прежнего подхода от конфигурации крепления. Значимость этого результата для фасадного узла связана с охватом механизмов и геометрических случаев; число испытаний не расширяет автоматически область вывода на трещиноватый бетон и усталость.

EN 1992-4:2018 систематизирует проектирование креплений в бетоне [5]. Общность предмета с СП 513 позволяет сравнивать состав проверок, однако смешение частных коэффициентов разных нормативных систем создаёт самостоятельную, заново не обоснованную модель. Для расчётного сравнения нужны одинаковые нагрузки, геометрия и характеристики изделия с согласованным смыслом прочности бетона. Значение цилиндрической характеристики f_{ck} нельзя механически приравнивать к числу в обозначении российского класса B.

Экспериментальная база циклической работы неоднородна. Sharma, Mahadik и Hofmann [6] исследовали два типа подрезных анкеров при циклическом раскрытии трещины с постоянной, синфазной и противофазной растягивающей нагрузкой. По критерию перемещений постоянная нагрузка оказалась не всегда консервативной. Это результат о протоколе сейсмической квалификации; он не устанавливает ресурс фасадного анкера при многолетнем ветровом воздействии. Для переноса нужны история усилий и соответствующий ей механизм накопления повреждения.

Fröhlich и Castridis [7] выделяют самостоятельную проблему учёта дополнительного армирования при усталостном нагружении креплений. Их анализ показывает, почему статический эффект армирования нельзя без проверки включить в циклическое сопротивление. В фасадной задаче это ограничение существенно для малых глубин и близости граней: наличие арматуры около отверстия ещё не задаёт её работу как рассчитанного усиления зоны анкеровки.

Метод усталостного расчёта существует: EOTA TR 061 в редакции марта 2026 года устанавливает соответствующую процедуру для креплений с подтверждёнными в ETA усталостными характеристиками [8]. Документ охватывает нормальный тяжёлый бетон C20/25–C50/60 и требует учитывать статическую и циклическую составляющие. При этом область применения исключает сдвиг с плечом и дистанционную установку. Для фасадного кронштейна необходимо определить, возникает ли именно изгиб анкера вследствие такого сдвига: вылет кронштейна и плечо сдвига в самом крепеже не являются тождественными величинами. Ссылка на TR 061 не снимает этой проверки.

Монтажную изменчивость раскрывают две дополняющие друг друга экспериментальные стратегии. Cook и Konz [9] исследовали 20 клеевых продуктов 12 изготовителей в 765 испытаниях. Отдельные серии изменяли условия отверстия, характеристики бетона, выдержку и температуру относительно базовой установки. Такая организация позволяет выделять фактор, сохраняя условия сравнения. Для обобщения результата необходимо сохранять идентичность продукта: общий коэффициент «качества монтажа» не воспроизводит различия клеевых систем.

Zeman и соавторы [10] сопоставили четыре типа анкеров на четырёх строительных площадках Австрии с лабораторными испытаниями. В таблице 7 для клеевого анкера приведено среднее отношение нормированной площадочной предельной нагрузки к лабораторной 0,8 и коэффициент вариации этого отношения 0,11. Авторы ограничивают проверку монтажного коэффициента средними значениями из-за объёма испытаний. Эти числа описывают отношение сопротивлений, а не ошибку глубины отверстия; подстановка 0,11 как коэффициента вариации глубины изменила бы предмет измерения. Площадочный результат объединяет несколько источников изменчивости и требует иной интерпретации, чем однофакторный лабораторный опыт.

JCSS Probabilistic Model Code отделяет изменчивость физических входов от неопределённости расчётной модели [11]. Даже точное знание геометрии и материалов не устраняет ошибку неполной зависимости сопротивления. Введение случайной глубины в алгоритм, который не учитывает групповую работу, не превращает его в вероятностную модель группы. Исследователь должен оценивать неопределённость формы модели отдельно от разброса измерений.

Для геометрических допусков в статье использован ГОСТ Р 58942-2020 [12]. Пункт 4.2 связывает соответствие допусков средствам технологического обеспечения и контроля со статистическим анализом процессов. Нормативный интервал допустимых размеров и распределение фактической ошибки имеют разный смысл. Ссылка на класс точности не определяет автоматически нормальный закон, среднее смещение или стандартное отклонение глубины анкеровки. Эти параметры требуют измерений выбранного технологического процесса.

Проверяемость расчётной модели

Сопоставление подходов позволяет разделить доказательства по тому, какой вывод они поддерживают. Таблица 1 задаёт такую структуру проверки для рассматриваемой задачи. Она не ранжирует источники по объёму или престижности: нормативный документ, техническая оценка и эксперимент решают разные вопросы.

Таблица 1
Основания и пределы расчётного вывода

Основание	Что проверяет	Предел вывода
Норма расчёта	Состав проверок и условия применения	Не задаёт все характеристики изделия
ETA или паспорт	Характеристики указанного крепежа	Не охватывает произвольную установку
Лабораторный опыт	Отклик при заданном протоколе	Не заменяет историю нагрузок объекта
Площадочные данные	Результат в наблюдавшихся условиях	Не разделяют все причины разброса
Повторный расчёт	Исполнение выбранных формул	Не доказывает физическую точность

Первый результат применения этой структуры — локализация несоответствия между входной формой и расчётной зависимостью. Модуль хранит два шага группы s_1, s_2, второе краевое расстояние c_2 и коэффициент групповой работы, но не использует их при определении сопротивлений. Формулы содержат расстояние c_1 и толщину основания. Поэтому расчёт представляет одиночный анкер с ограниченным описанием геометрии, даже если пользователь заполняет поля, относящиеся к группе. Такая проверка выявляет неполноту алгоритма без подмены её утверждением о физическом отсутствии группового эффекта.

Для воспроизводимого контрольного случая приняты исходные параметры модуля: механический анкер с номинальным диаметром 12 мм, эффективным диаметром стального сечения 10,3 мм и глубиной 100 мм; f_{uk} = 580 МПа; f_{ck} = 25 МПа; бетон с трещинами; толщина основания 200 мм; $c_1 = c_2$ = 200 мм. Растягивающая и сдвигающая силы равны соответственно 5 и 1,5 кН. Множители 0,95 и 0,92 сохранены как заданные параметры, без приписывания им экспериментальной калибровки. Эти данные задают вычислительный пример, а не идентифицированное серийное изделие или объект строительства.

В воспроизводимой реализации сопротивление конусной ветви при отсутствии её краевого снижения вычисляется как $8{,}5\sqrt{25}\cdot 100^{1{,}5}\cdot 0{,}95\cdot 0{,}92/1500$ = 24,763333 кН. Итоговые минимумы составляют N_{Rd} = 24,763333 кН и V_{Rd} = 1,906454 кН. Для положительных N и V программа использует условие

$$\eta = (N/N_{Rd})^{1{,}5} + (V/V_{Rd})^{1{,}5} \le 1. \quad (1)$$

Отдельный расчёт по тем же зависимостям даёт η = 0,788635. Это проверка исполнения исходного алгоритма; числитель конусной формулы и обобщённая сдвиговая ветвь здесь не объявляются полной реализацией EN 1992-4. В частности, исходная программа не разделяет сдвиговые механизмы откалывания края и выкалывания за анкером. Совпадение итогового числа не подтверждает полноту набора предельных состояний.

Второе несоответствие возникает при обработке множителя, названного в модуле усталостным. Программа выводит уменьшенные значения kN_{Rd} и kV_{Rd} при k = 0,85, но окончательный статус определяет по исходным сопротивлениям. Если последовательно применить тот же множитель в условии (1), получим

$$\eta_k = \eta/k^{1{,}5} = 0{,}7886345105/0{,}85^{1{,}5} = 1{,}006346. \quad (2)$$

Граница $\eta_k = 1$ соответствует $k_{crit} = \eta^{2/3} = 0{,}853592$. Исходный множитель 0,85 находится ниже этого порога, и условие после снижения сопротивлений не выполняется. Варьирование k меняет выведенные сопротивления, но сохраняет прежний программный статус. Проверка доказывает разрыв связи между введённым параметром и решением; она не доказывает усталостное разрушение реального анкера, поскольку для k отсутствует физическая идентификация.

Различие между исследовательской сеткой и областью допуска изделия можно проверить по опубликованным документам без назначения расчётных сопротивлений. В техническом листе Hilti HST3 редакции ноября 2023 года указаны переменные эффективные глубины M10 40–100 мм и M12 50–125 мм [13]. В ETA-20/0603 от 13 ноября 2020 года для системы fischer FIS V Plus приведены интервалы M12 70–240 мм и M16 80–320 мм [14, табл. B3.1]. Это данные конкретных редакций и исполнений, которые нельзя объединять в один универсальный диапазон крепежа.

Для M12 пересечение только этих интервалов с исследовательским диапазоном 60–150 мм даёт 60–125 мм для HST3 и 70–150 мм для FIS V Plus. Даже такой простой фильтр формирует разные множества кандидатов. Пересечение интервалов не подтверждает допустимость установки: отдельно остаются толщина основания, края, шаг, состояние бетона и монтажные усло-

вия соответствующего документа. Например, точка глубины 60 мм не соответствует приведённому минимуму клеевой системы M12, хотя находится внутри исследовательской сетки.

Обсуждение результатов и условия переноса

Выявленные несоответствия имеют общий признак: неполнота доказательной связи может сохраняться при численно правдоподобном сопротивлении. Если стальная ветвь не определяет минимум, ошибочный коэффициент в ней останется незаметным в одном контрольном примере. Аналогично неизменность результата при варьировании шага может выглядеть как устойчивость решения, хотя программа вообще не использует шаг. Поэтому проверка должна охватывать промежуточные ветви и переходы между механизмами, а не только итоговую допустимость.

Для пространственной геометрии существенна ориентация основания. Толщина элемента по направлению заделки отличается от высоты торца плиты при горизонтальном бурении. Если высота доступного торца H равна 200 мм, ближайшая из верхней и нижней граней расположена на расстоянии $\min(y, H - y) \le H/2 = 100$ мм от оси отверстия. Задание одного $c_1 = 200$ мм не описывает обе эти грани и не подтверждает отсутствие краевого эффекта. Здесь вывод следует из геометрии, независимо от выбора эмпирической формулы сопротивления.

Полный перебор комбинаций улучшает вычислительный охват, но не характеризует распространённость решений на строительных площадках. Для матрицы первой главы число сочетаний $4 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 2 = 3072$ задаётся четырьмя профилями, уровнями прочности, глубины, толщины, краевого расстояния и двумя состояниями бетона. Равный вес точек означает способ планирования вычислений. Чтобы оценить долю реально применяемых узлов, необходима выборка объектов и распределение этих параметров; увеличение числа запусков программы такую выборку не создаёт.

В инженерном исследовании достаточность модели целесообразно проверять через соответствие решению, которое предполагается принять. Для выбора глубины одиночного анкера нужен один набор данных. Для решения о креплении кронштейна двумя анкерами требуются дополнительно реакции пластины и сопротивление группы с учётом свободных граней. При прогнозировании ресурса вводятся история усилий и усталостные характеристики; при оценке надёжности монтажа — статистика геометрии и ошибок контроля. Область вывода расширяется после добавления соответствующих доказательств, а не после переименования расчётной модели.

Практическую реализацию предложенного порядка обеспечивает прослеживаемость данных. Проектировщик подконструкции передаёт сочетания реакций и точки их приложения. Расчётчик крепления фиксирует геометрию основания, идентификатор изделия, редакцию документа и перечень проверенных механизмов. Проверяющий воспроизводит контрольное вычисление и устанавливает, какие входы фактически изменяют итог. Монтажная запись связывает измеренную геометрию с тем же идентификатором узла. Это предлагаемая процедура, а не описание уже выполненного внедрения.

Для статистической идентификации монтажных отклонений исполнитель контроля должен сохранять номинал и измеренное значение, способ измерения, погрешность средства, тип изделия и условия установки. Глубину отверстия нельзя автоматически считать эффективной глубиной установленного анкера; их связь задаёт конструкция изделия. Совместная обработка разных способов бурения и систем крепежа допустима после проверки однородности данных. При повторяющихся отклонениях полезно исследовать зависимость от инструмента и исполнителя, поскольку независимость ошибок отдельных отверстий не гарантирована.

В статье разграничены три направления дальнейшего развития исследуемой модели. Групповая постановка требует реализовать существующие нормативные зависимости и распределение усилий; циклическая — связать режим воздействия с применимой характеристикой изделия; вероятностная — идентифицировать распределения по наблюдениям. Эти задачи относятся к полноте рассматриваемого расчётного средства. Они не означают отсутствия исследований и нормативных методов в соответствующих предметных областях.

Заключение

Критическое сопоставление источников показало, что основная методическая трудность фасадной анкеровки возникает при переносе результата между уровнями описания: от одиночного анкера к узлу, от статического сопротивления к циклическому ресурсу и от заданного допуска к распределению монтажной ошибки. Для каждого перехода необходимы собственные входные данные и проверка области применимости. Объединение нормативных документов и испытательных публикаций без такого разграничения создаёт видимость полноты расчёта.

Проверка исходного модуля выявила неиспользуемые параметры группы и несогласованность итогового условия с заданным снижением сопротивлений. Независимое воспроизведение контрольного случая подтвердило вычислительную причину изменения вывода. Сравнение диапазонов глубины двух серийных систем дополнительно показало, что исследовательская сетка не совпадает с областью допуска конкретного изделия.

Авторский результат состоит в порядке проверки доказательной связи между исходным параметром, механизмом сопротивления и принимаемым решением. Он позволяет установить, какие выводы поддерживает существующая расчётная база и какие сведения нужно получить до её применения к фасадному узлу. Физическая валидация требует независимых испытаний идентифицированного крепления; оценка монтажной надёжности — представительной выборки измерений. До получения этих данных численные результаты характеризуют исследуемый алгоритм и не заменяют проектный расчёт конкретного здания.

Литература

1. СП 513.1325800.2022. Анкерные крепления к бетону. Правила проектирования. Утверждён приказом Минстроя России от 24.03.2022 № 188/пр. Разделы 1, 6, 7.
2. НИИЖБ Госстроя СССР. Рекомендации по проектированию стальных закладных деталей для железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1984. 87 с.
3. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Приложение Б. Утверждён приказом Минстроя России от 19.12.2018 № 832/пр.
4. Fuchs W., Eligehausen R., Breen J. E. Concrete Capacity Design (CCD) Approach for Fastening to Concrete // ACI Structural Journal. 1995. Vol. 92. No. 1. P. 73–94. DOI: 10.14359/1533.
5. EN 1992-4:2018. Eurocode 2 — Design of concrete structures — Part 4: Design of fastenings for use in concrete. Brussels: CEN, 2018.
6. Sharma A., Mahadik V., Hofmann J. Influence of Tension Loading Protocol on Crack Cycling Tests on Undercut Anchors // ACI Structural Journal. 2016. Vol. 113. No. 4. P. 779–790. DOI: 10.14359/51688622.
7. Fröhlich T., Castridis S. Fatigue Behavior of Fastenings with Supplementary Reinforcement: Current Need for Research // Otto Graf Journal. 2022. Vol. 21. P. 55–66.
8. EOTA TR 061. Design method for fasteners in concrete under fatigue cyclic loading. Редакция марта 2026 г. Brussels: European Organisation for Technical Assessment, 2026. 20 p.
9. Cook R. A., Konz R. C. Factors Influencing Bond Strength of Adhesive Anchors // ACI Structural Journal. 2001. Vol. 98. No. 1. P. 76–86. DOI: 10.14359/10149.
10. Zeman O., Stierschneider E., Schwenn M., Bergmeister K. In-situ installation safety of post-installed anchorages—Investigations on construction sites // Civil Engineering Design. 2025. Vol. 7. No. 4. P. 202–210. DOI: 10.1002/cend.70003.
11. Joint Committee on Structural Safety. Probabilistic Model Code. Part 3: Resistance Models. Section 3.9: Model Uncertainties. Электронная публикация JCSS. 4 p.
12. ГОСТ Р 58942-2020. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Технологические допуски. Утверждён приказом Росстандарта от 29.07.2020 № 425-ст. Пункты 4.1–4.2.
13. Hilti. HST3 Expansion Anchor. Technical Datasheet. Update Nov-23. 2023. 13 p. P. 3.
14. Deutsches Institut für Bautechnik. European Technical Assessment ETA-20/0603 of 13 November 2020. fischer Injection system FIS V Plus. Berlin: DIBt, 2020. 37 p. Annex B3.
15. Конструктивно-технологические решения анкеровки фасадных систем на монолитных каркасах. Расчёт, оптимизация и контроль качества: магистерская ВКР. Редакция «Финиш2». 2026. Гл. 1. Неопубликованная рукопись и сопровождающий расчётный Python-модуль одиночного анкера.

Applicability limits of calculation models for ventilated facade anchorages to reinforced concrete

Lukov A.V., Magomedov I.M.
National Research Moscow State University of Civil Engineering

JEL classification: L61, L74, R53

This study examines the conditions for applying design provisions and published test data to the analysis of ventilated facade anchorages to reinforced concrete. The method combines a comparison of source applicability, an audit of the input parameters of an analytical module, and an independent reproduction of a reference calculation. Russian design provisions are shown to address anchor group behaviour and edge effects, whereas the investigated module does not link some relevant geometric inputs to its outputs. In the reference case, the tension–shear interaction index is 0.788635 and increases to 1.006346 when the specified resistance multiplier of 0.85 is consistently applied; this identifies an inconsistency in the computational decision but does not establish the fatigue resistance of an anchor product. An assessment procedure is proposed to distinguish calculation verification, anchor product qualification, and physical model validation and to define the data needed to account for group effects, cyclic actions, and installation deviations.

Keywords: ventilated facade, reinforced concrete substrate, anchorage, anchor group, edge effect, concrete breakout, cyclic loading, fatigue, installation deviations, calculation verification, model validation, applicability domain.

References

1. SP 513.1325800.2022. Anchoring to concrete. Design rules. Approved by the Ministry of Construction of Russia, Order No. 188/pr of 24 March 2022. Sections 1, 6, 7. (In Russian).
2. NIIZhB, USSR Gosstroy. Recommendations for the design of steel embedded parts for reinforced concrete structures. Moscow: Stroyizdat; 1984. 87 p. (In Russian).
3. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Appendix B. Approved by the Ministry of Construction of Russia, Order No. 832/pr of 19 December 2018. (In Russian).

4. Fuchs W., Eligehausen R., Breen J.E. Concrete Capacity Design (CCD) Approach for Fastening to Concrete. ACI Structural Journal. 1995;92(1):73–94. DOI: 10.14359/1533.
5. EN 1992-4:2018. Eurocode 2 — Design of concrete structures — Part 4: Design of fastenings for use in concrete. Brussels: CEN; 2018.
6. Sharma A., Mahadik V., Hofmann J. Influence of Tension Loading Protocol on Crack Cycling Tests on Undercut Anchors. ACI Structural Journal. 2016;113(4):779–790. DOI: 10.14359/51688622.
7. Fröhlich T., Castridis S. Fatigue Behavior of Fastenings with Supplementary Reinforcement: Current Need for Research. Otto Graf Journal. 2022;21:55–66.
8. EOTA TR 061. Design method for fasteners in concrete under fatigue cyclic loading. March 2026 edition. Brussels: European Organisation for Technical Assessment; 2026. 20 p.
9. Cook R.A., Konz R.C. Factors Influencing Bond Strength of Adhesive Anchors. ACI Structural Journal. 2001;98(1):76–86. DOI: 10.14359/10149.
10. Zeman O., Stierschneider E., Schwenn M., Bergmeister K. In-situ installation safety of post-installed anchorages—Investigations on construction sites. Civil Engineering Design. 2025;7(4):202–210. DOI: 10.1002/cend.70003.
11. Joint Committee on Structural Safety. Probabilistic Model Code. Part 3: Resistance Models. Section 3.9: Model Uncertainties. JCSS electronic publication. 4 p.
12. GOST R 58942-2020. System of ensuring the accuracy of geometrical parameters in construction. Manufacturing and assembling tolerances. Approved by Rosstandart, Order No. 425-st of 29 July 2020. Clauses 4.1–4.2. (In Russian).
13. Hilti. HST3 Expansion Anchor. Technical Datasheet. Update Nov-23. 2023. 13 p. p. 3.
14. Deutsches Institut für Bautechnik. European Technical Assessment ETA-20/0603 of 13 November 2020. fischer Injection system FIS V Plus. Berlin: DIBt; 2020. 37 p. Annex B3.
15. Structural and technological solutions for anchoring facade systems to monolithic frames. Calculation, optimization and quality control: master's thesis. Finish2 revision. 2026. Chapter 1. Unpublished manuscript and accompanying Python calculation module for a single anchor. (In Russian).