

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА / STRUCTURAL MECHANICS

DOI: <https://doi.org/>

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ УЗЛОВОГО СОПРЯЖЕНИЯ РИГЕЛЕЙ И КОЛОНН В СБОРНО-МОНОЛИТНОМ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОМ КАРКАСЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Научная статья

Луценко А.И.^{1*}, Аriskин М.В.²

^{1,2} Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия

* Корреспондирующий автор (luts-00[at]yandex.ru)

Аннотация

Целью проведенного исследования является изучение работы узлового сопряжения ригелей и колонн в сборно-монолитном железобетонном каркасе, выявление степени его эффективности и обоснование для возведения, а также исследование его уязвимости.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Моделирование узлового сопряжения ригелей и колонн в сборно-монолитном железобетонном каркасе при помощи систем автоматизированного проектирования;
- Разработка конечно-элементной расчетной модели узла сопряжения при помощи системы автоматизированного проектирования SCAD;
- Статический и динамический расчет;
- Анализ результатов расчета, конструирование элементов каркаса;
- Исследование узлового соединения железобетонных несущих конструкций в сборно-монолитном каркасе как наиболее уязвимой его зоны;
- Создание 3D-модели узла сборно-монолитного каркаса в AutoCAD;
- Импорт 3D-модели узла в ANSYS и преобразование ее в конечно-элементную модель;
- Линейный и нелинейный расчет конечно-элементной модели узла;
- Анализ результатов, выводы.

Практическая значимость и реализация результатов работы заключается в том, что сборно-монолитное домостроение, является очевидным компромиссом между сборным и монолитным, обладает существенными преимуществами обоих вышеуказанных типов, в частности:

- 1) возможность возведения высотных зданий (до 25 этажей), свобода планировки;
- 2) легкость и технологичность работ, простота монтажа;
- 3) относительно невысокая себестоимость работ;
- 4) возможность строительства в зонах повышенной сейсмичности.

Ключевые слова: сопряжения ригелей и колонн, сборно-монолитный каркас, узловые сопряжения, моделирование, расчет.

A STUDY OF THE WORK OF THE NODE COUPLING OF CROSSBARS AND COLUMNS IN A HALF-PRECAST MONOLITHIC REINFORCED FRAME USING A COMPUTER-AIDED-DESIGN SYSTEM

Research article

Lutsenko A.I.^{1*}, Ariskin M.V.²

^{1,2} Penza State University of Architecture and Construction

* Corresponding author (luts-00[at]yandex.ru)

Abstract

The aim of the research is to study the work of the node coupling of crossbars and columns in a half-precast monolithic reinforced frame, to establish the degree of its effectiveness and substantiation for construction, as well as to study its vulnerability.

To achieve this goal, it is necessary to solve the following tasks:

- A simulation of the node coupling of crossbars and columns in a half-precast monolithic reinforced frame using a computer-aided-design system;
- Development of a finite element simulation model of the coupling node using the computer-aided design system SCAD;
- Static and dynamic calculation;
- Analysis of calculation results, construction of frame elements;
- Research of the nodal connection of reinforced concrete load-bearing structures in a half-precast monolithic frame as its most vulnerable zone;
- Creating a 3D model of a half-precast monolithic frame node in AutoCAD;
- Importing a 3D node model to ANSYS and converting it to a finite element model;
- Linear and nonlinear calculation of finite element node model;
- Analysis of the results, conclusions.

The practical significance and implementation of the results of the work lies in the fact that half-precast monolithic housing construction is an obvious compromise between half-precast and monolithic one, has significant advantages of both types, in particular:

- 1) the possibility of erecting high-rise buildings (up to 25 floors), freedom of planning;
- 2) easiness and adaptability of works, easiness of installation;
- 3) relatively low cost of works;
- 4) the possibility of construction in areas of increased seismic intensity.

Keywords: crossbar and column coupling, half-precast monolithic frame, nodal coupling, simulation, calculation.

Введение

Сборно-монолитное домостроение, являясь очевидным компромиссом между сборным и монолитным, обладает существенными преимуществами обоих вышеуказанных типов [1], [2], [3], [9], в частности:

- 1) возможность возведения высотных зданий (до 25 этажей), свобода планировки;
- 2) легкость и технологичность работ, простота монтажа;
- 3) относительно невысокая себестоимость работ;
- 4) возможность строительства в зонах повышенной сейсмичности.

Однако, несмотря на указанные преимущества, вокруг каркасов многоэтажных зданий из сборно-монолитного железобетона проходят ожесточенные споры на предмет их конструктивного несовершенства, в частности, целесообразности и надежности узлов сопряжения, указанных выше. Испытания не нашли широкого отражения в нормативной литературе, обязательных стандартах и рекомендациях по проектированию. Также обнаружено, что в узлах сопряжения конструкций наиболее полно проявляется конструктивная нелинейность каркасов СМКД, а существующие методы расчета, использующие упрощенные и идеализированные модели, не в полной мере способны отразить реальную работу каркаса.

Все факторы выше позволяют сделать выводы о необходимости изучения поведения сборно-монолитных каркасов и о высокой актуальности данного вопроса в связи с увеличением доли СМКД на современном рынке. Так, по оценкам экспертов, рост объемов строительства в России с использованием СМКД составит 12-15% в ближайшие 3-5 лет, а сама технология, в перспективе, сможет встать в один ряд с традиционными, и уровень применения ее будет сопоставим с европейским.

Основные дефекты узловых сопряжений колонн и ригелей

Узловые сопряжения являются наиболее уязвимыми элементами систем каркаса. Ввиду того, что работы по армированию и замоноличиванию узлов производятся уже на объекте и, зачастую, при ненадлежащем контроле качества, возможно появление различного рода дефектов. Так, основным обоснованием изучения узлового сопряжения является характерное появление деформаций ввиду трещинообразования в приопорных зонах и обмятия бетона по контактным поверхностям.

Также из рисунка ниже можно отметить характерные наклонные трещины.



Рис. 1 – Раскрытие наклонных трещин в приопорной зоне

Факт того, что работы по устройству узлов могут быть выполнены некачественным образом, влечет за собой возможные дефекты, исключающие совместную работу бетона и арматуры.



Рис. 2 – Непробетонированные участки, обнаруженные при обследовании

Кроме того, стоит заметить, что в узлах сборно-монолитных каркасов в наибольшей степени проявляется их физическая и конструктивная нелинейность. Степень податливости варьируется в зависимости от напряженно-деформированного состояния, что неизменно приводит к существенному перераспределению усилий.

В существующих методах расчета на данный момент времени не в полной мере учитывается влияние податливости узловых сопряжений на совместную работу строительных подсистем каркаса – продольных и поперечных рам, дисков перекрытия и диафрагм жесткости. В основном это объясняется недостаточной изученностью пространственного взаимодействия сборно-монолитных элементов в обеих их стадиях работы, упругой и пластической. Поэтому, как правило, расчет каркасных зданий производится по расчетным схемам с шарнирными или жесткими узлами сопряжений элементов, что не в полной мере может отразить работу несущих конструкций.

Современные требования к экономической эффективности принимаемых конструктивных решений влекут за собой неизбежное уточнение расчетных моделей узловых сопряжений конструкций сборно-монолитных каркасных зданий.

Методология исследования

Одним из рациональных способов решения поставленной задачи является моделирование узла сборно-монолитного каркаса при помощи системы автоматизированного проектирования.

Моделирование узла осуществляется поэтапно при помощи средств AutoCAD с последующим импортом модели в ANSYS. Такой подход также наглядно иллюстрирует процесс устройства узла сопряжения конструкций непосредственно на объекте и является первым этапом уточнения модели узла, реализуемого в SCAD.

Расчет выполняется в соответствии с требованиями [10].

Моделирование узла в SCAD

Армирование ригеля и плит опалубок не замоделировано (в запас прочности).

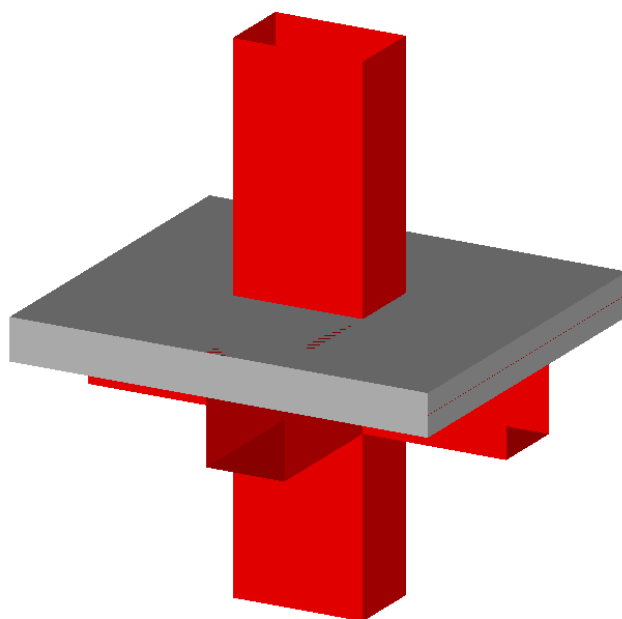


Рис. 3 – Прототип узла в SCAD

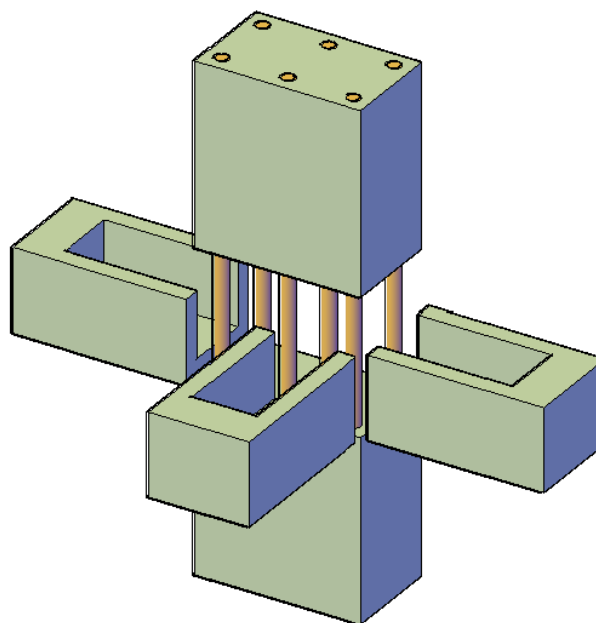


Рис. 4 – Модель колонны с рабочим армированием и подходящих к ней ригелей

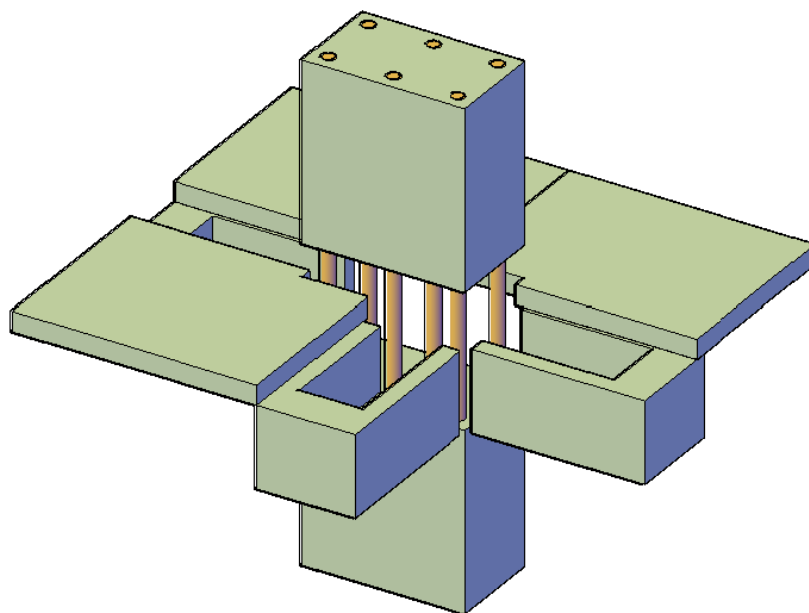


Рис. 5 – Моделирование плит-опалубок

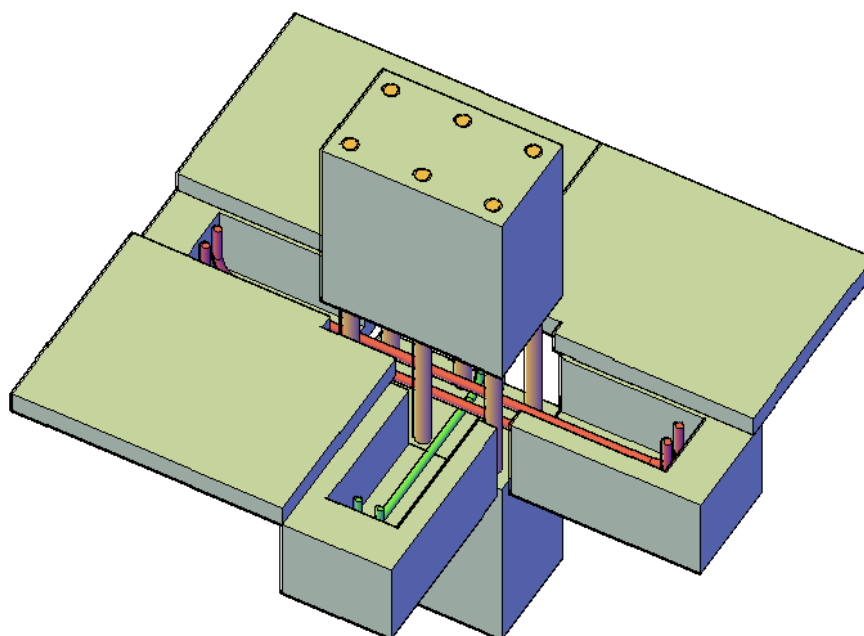


Рис. 6 – Моделирование нижнего узлового армирования

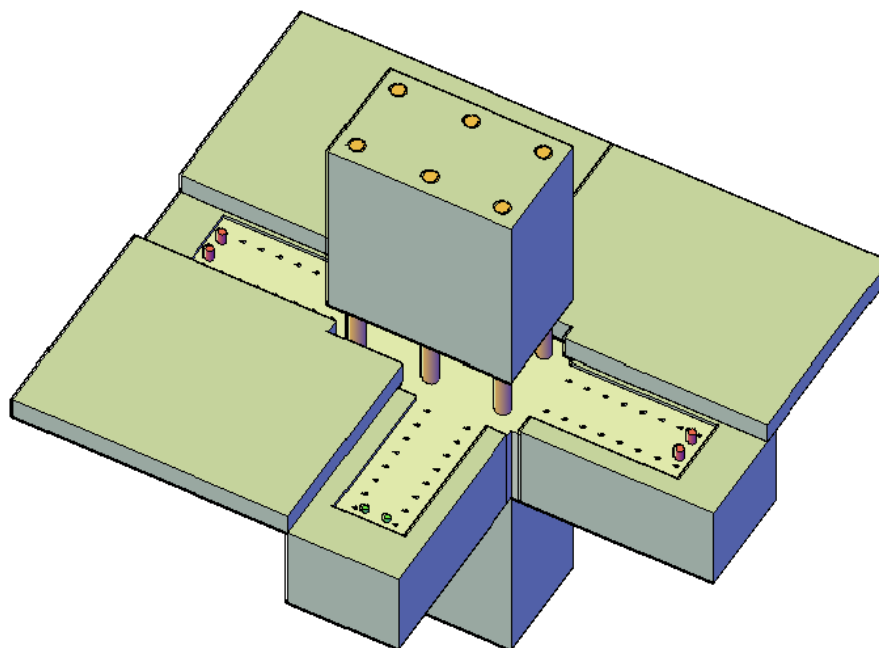


Рис. 7 – Моделирование бетонирования 1-го этапа

Исходными данными для загрузки выбраны данные, полученные в результате расчетов каркаса сборно-монолитного жилого дома и реализуются в три этапа: через сбор нагрузок на фрагмент схемы – перекрытие, путем конвертации внутренних усилий ригеля и в виде нагрузки от конструкции пола и полезной нагрузки. В качестве единиц выходных данных выбраны Н для удобного переноса нагрузок в ANSYS; для нагрузки от конструкции пола и полезной нагрузки – т.

В качестве варианта загрузки выбрано наименее выгодное сочетание нагрузок.

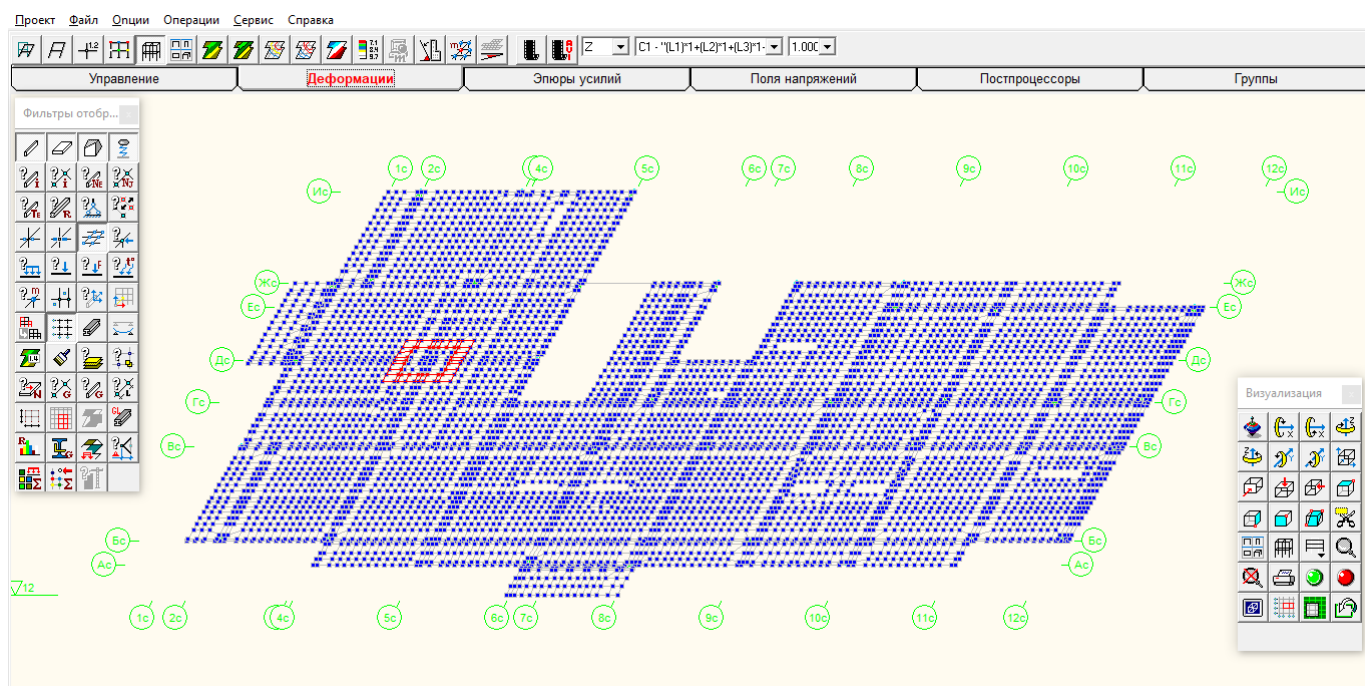


Рис. 8 – Расположение исследуемого узла

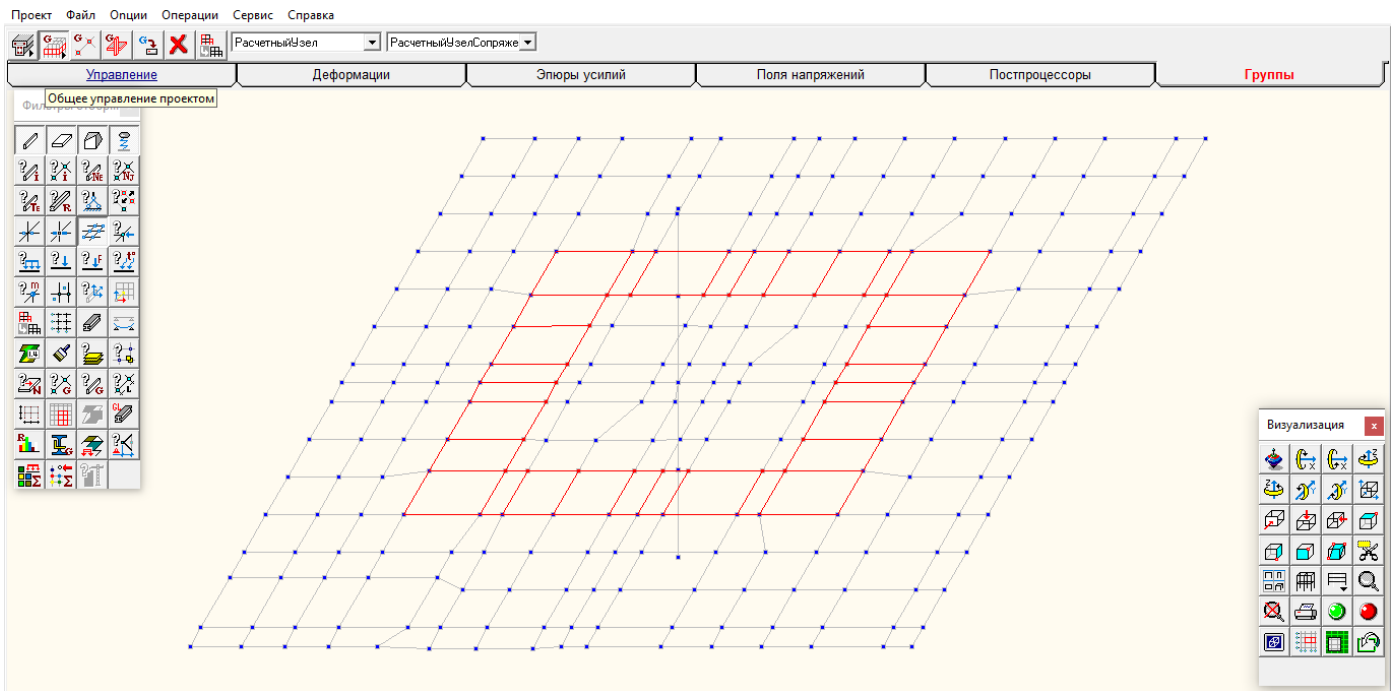


Рис. 9 – Сбор нагрузок на фрагмент схемы

Загружение формируется многокомпонентным, на интервале от 0 с до 1 с равномерно возрастающим до полной величины. Такой метод позволяет добиться большей сходимости нелинейного расчета и в целом упростить решаемую задачу. Ввиду несоответствия осей в SCAD и ANSYS, загрузки поименованы со ссылкой на SCAD. Нагружение для монолитной плиты и плит-опалубок формируется по нагрузкам в узлах расчетной схемы SCAD, деленным на площадь поверхности грани выбранных элементов. Площади поверхности:

- $0,06 \cdot 0,75 = 0,045 \text{ м}^2$; $0,06 \cdot 0,85 = 0,051 \text{ м}^2$ – для плит-опалубок;
- $1,4 \cdot 0,16 - 0,59 \cdot 0,06 = 0,1886 \text{ м}^2$ – для левой монолитной грани;
- $1,5 \cdot 0,16 - 0,06 \cdot 0,75 = 0,195 \text{ м}^2$ – для дальней монолитной грани;
- $1,4 \cdot 0,16 - 2 \cdot 0,59 \cdot 0,06 = 0,1532 \text{ м}^2$ – для правой монолитной грани;
- $1,5 \cdot 0,16 - 0,06 \cdot 0,75 - 0,06 \cdot 0,85 = 0,144 \text{ м}^2$ – для ближней монолитной грани.

Импорт узла из SCAD в ANSYS и его дальнейшее моделирование

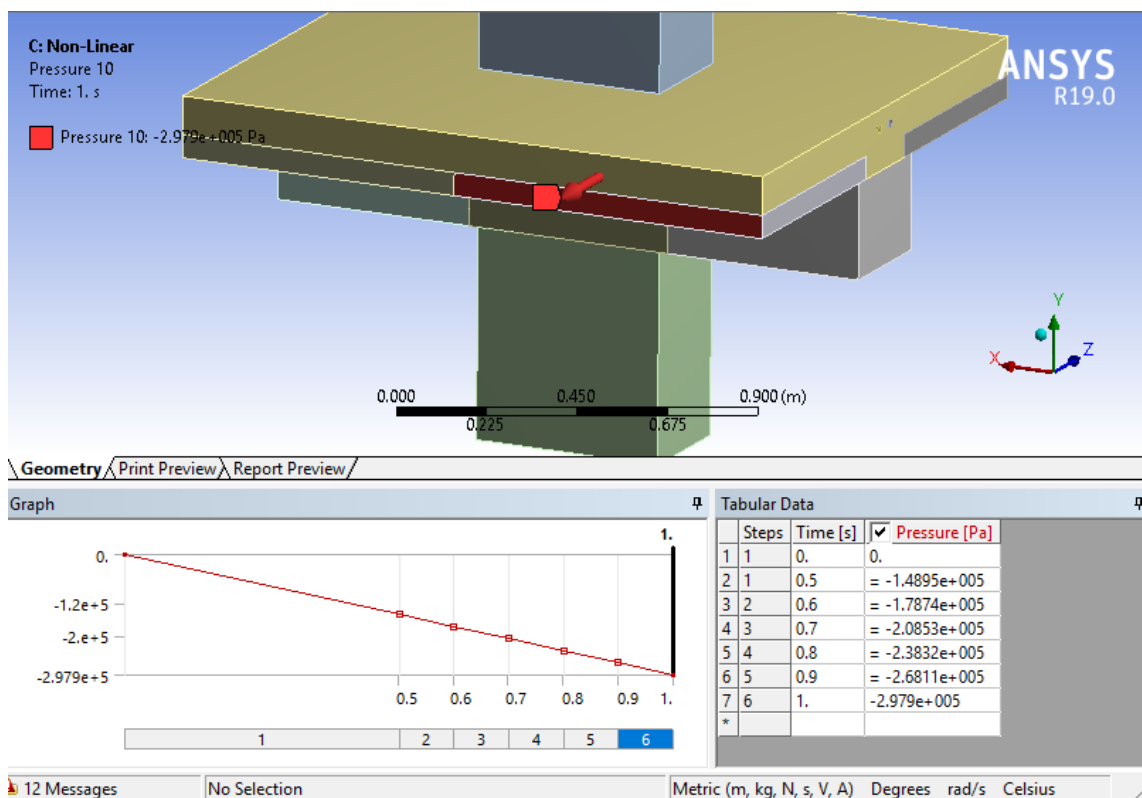


Рис. 10 – Нагружение плиты-опалубки ближней грани

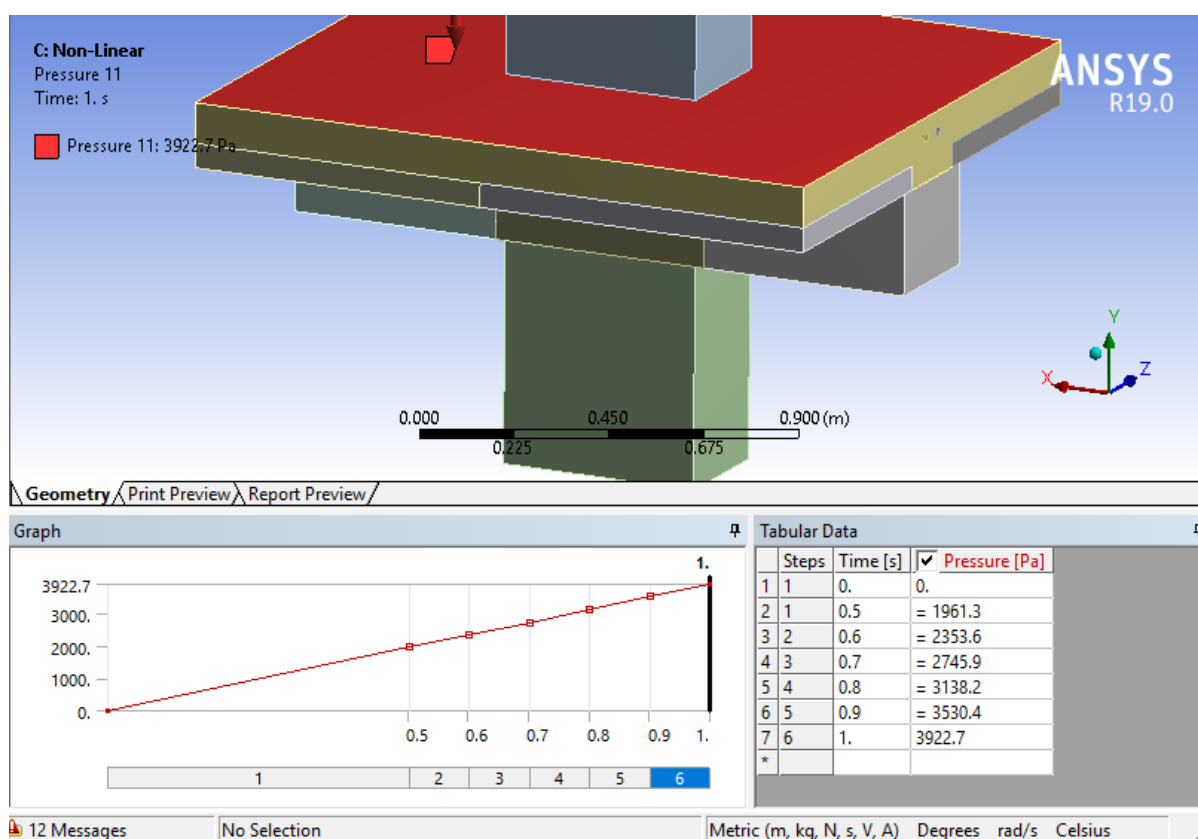


Рис. 11 – Нагружение полезной нагрузкой и нагрузкой от конструкции пола

Перемещение модели в пространстве ограничивается 14-ю жесткими связями по поверхностям вырезанных граней колонны и ее арматурных стержней, снизу и сверху.

Помимо прочего, на первом этапе анализа всем телам системы назначаются контакты по поверхностям типа «Bonded». Данные контакты являются линейными и функционируют как абсолютно жесткие. Узел, таким образом, будет работать как монолитная конструкция.

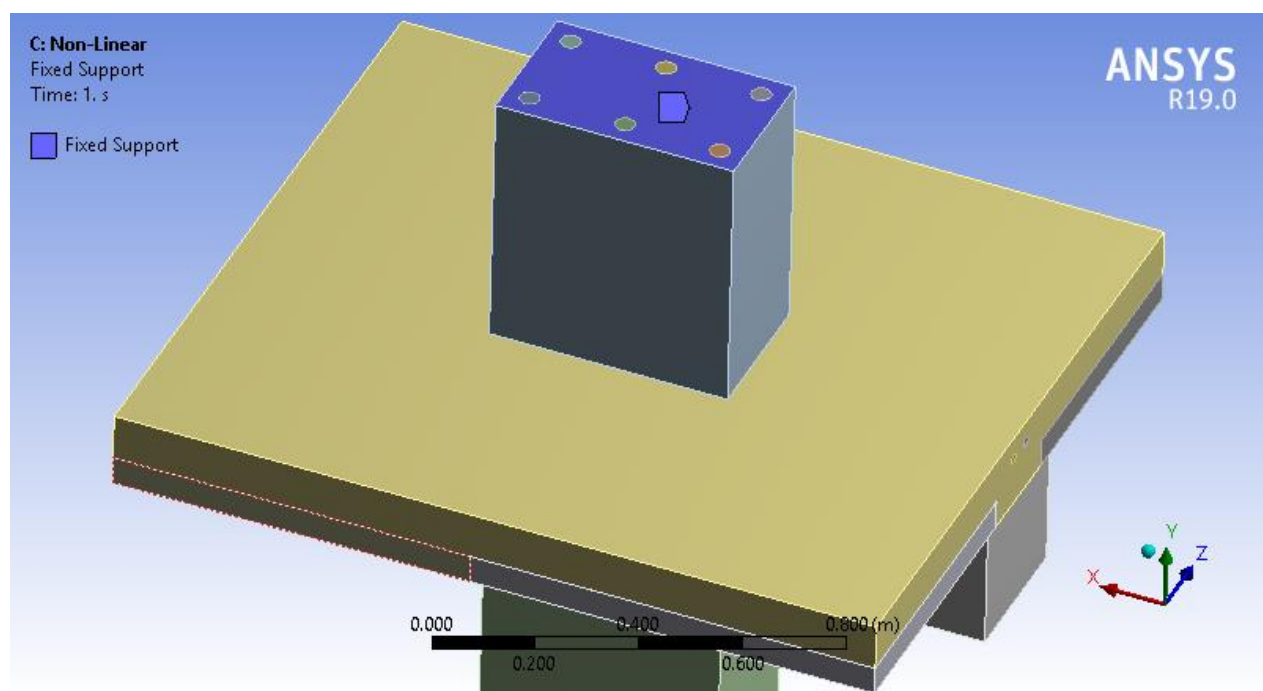


Рис. 12 – Жесткая заделка в бетоне колонны

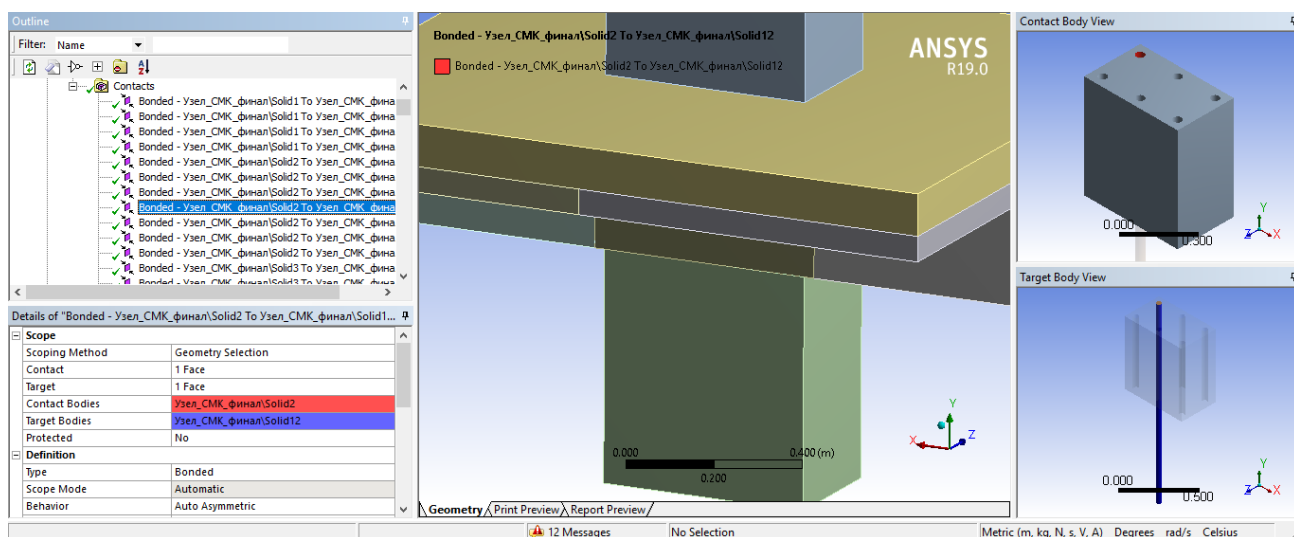


Рис. 13 – Связи по контактным поверхностям бетона и арматуры

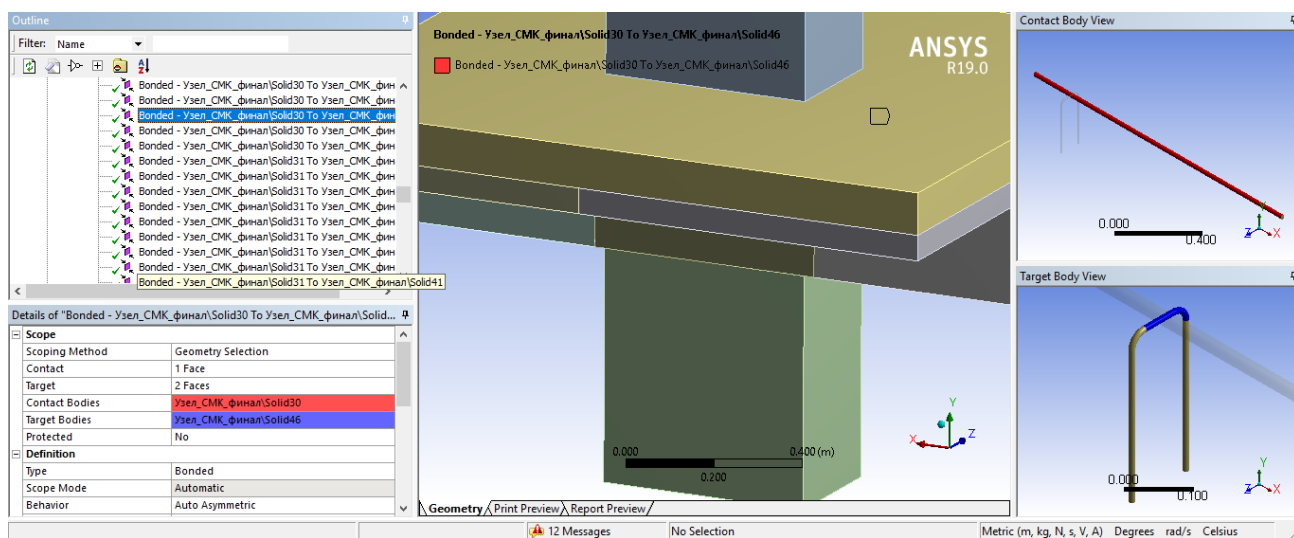


Рис. 14 – Связи по контактным поверхностям арматуры

Сетка конечно-элементной модели задана адаптивно с приоритетом на квадратные элементы. Размер конечного элемента – 0.05 м.

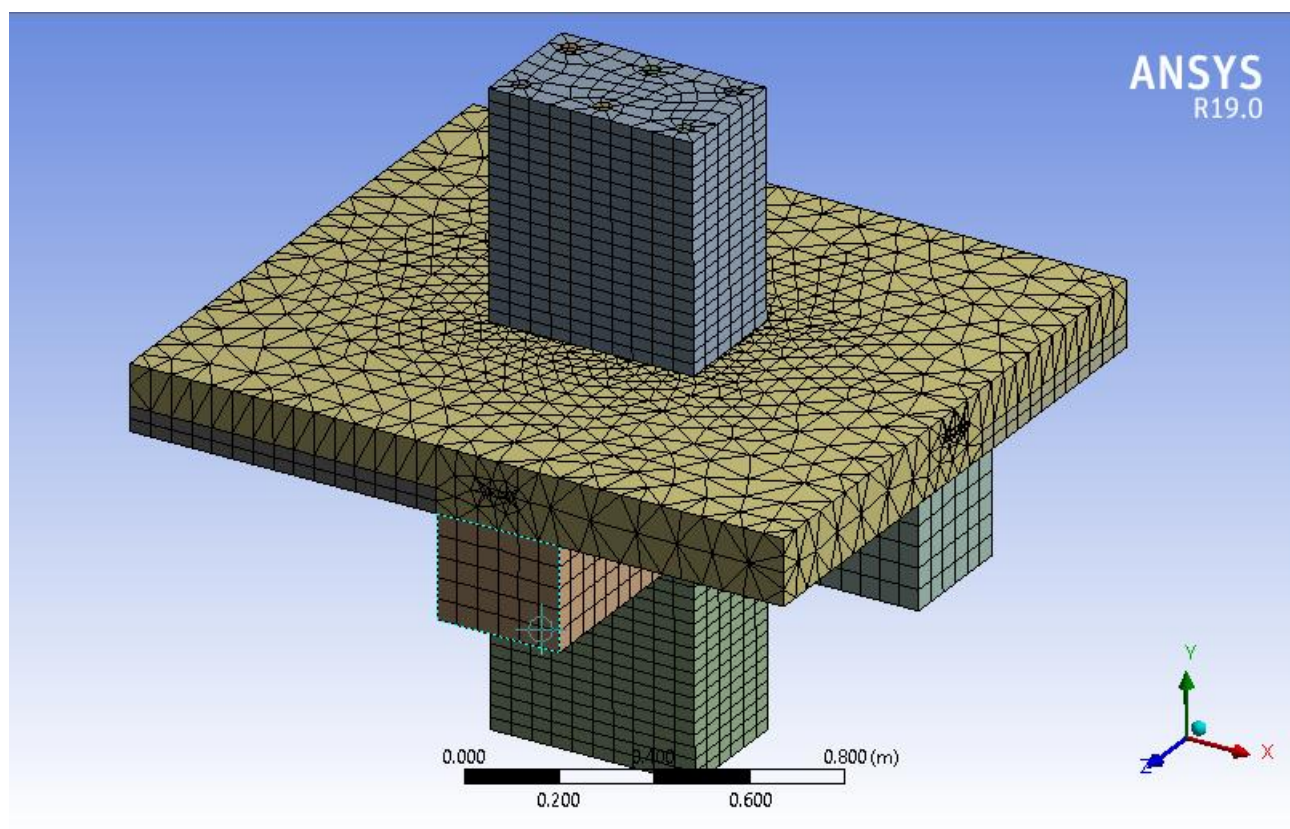


Рис. 15 – Конечно-элементная модель арматуры

Анализ результатов расчета

В рамках расчета установлены эквивалентные напряжения в бетоне и арматуре и определена степень деформативности модели под нагрузкой.

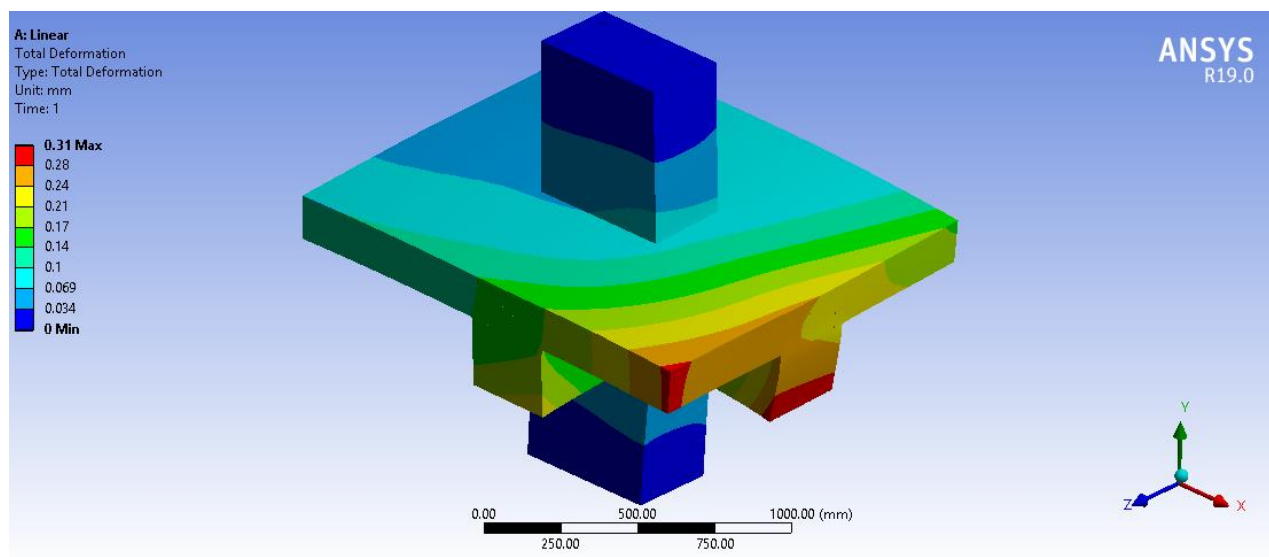


Рис. 16 – Схема деформаций

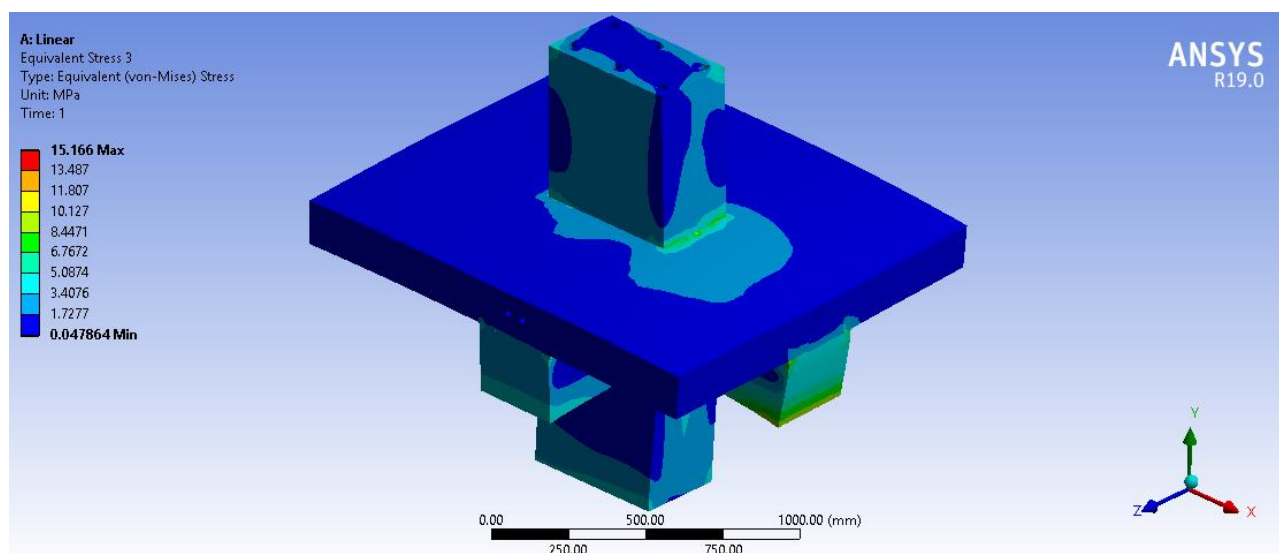


Рис. 17 – Эквивалентные напряжения в бетоне

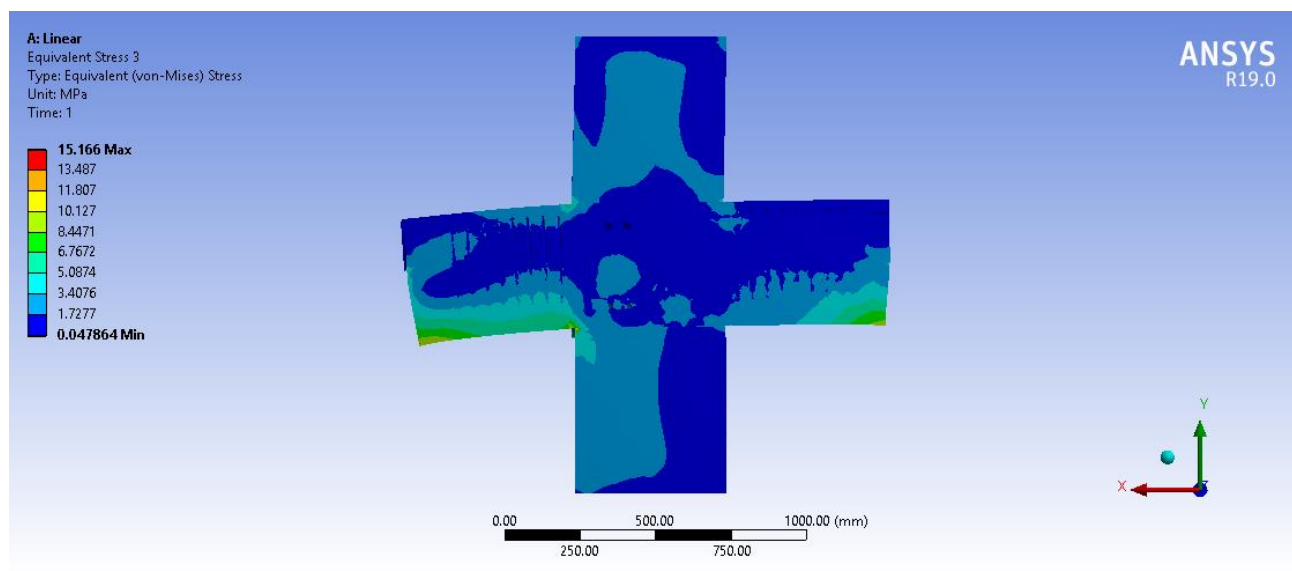


Рис. 18 – Эквивалентные напряжения в бетоне (разрез)

Как видно из рисунка, приопорные зоны действительно наиболее подвержены возникновению трещин.

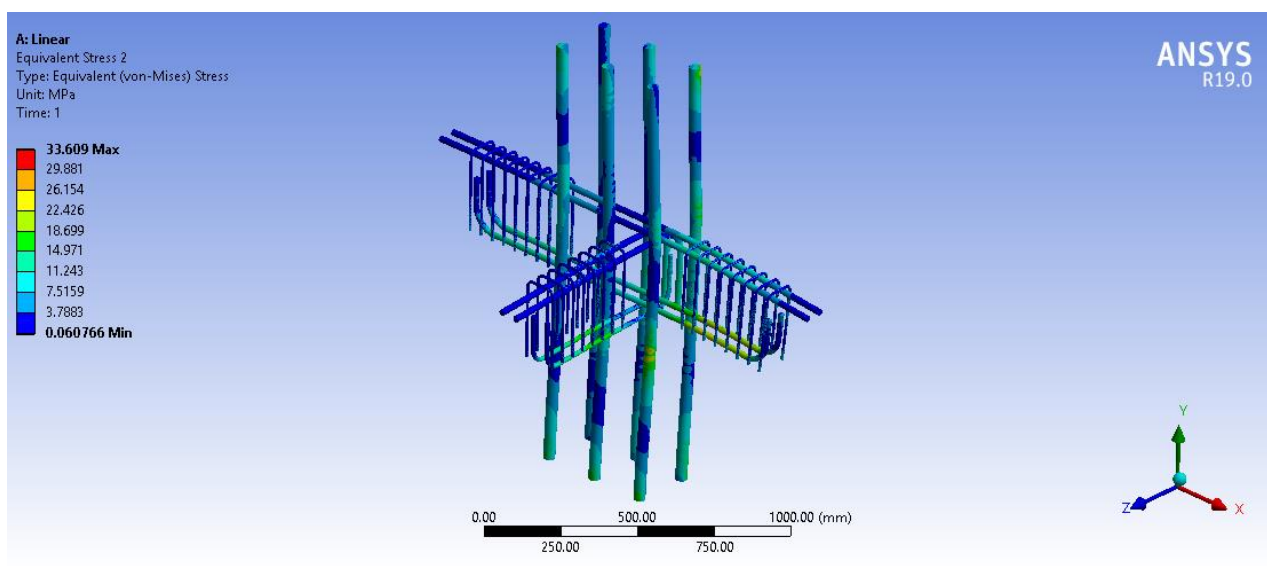


Рис. 19 – Эквивалентные напряжения в арматуре

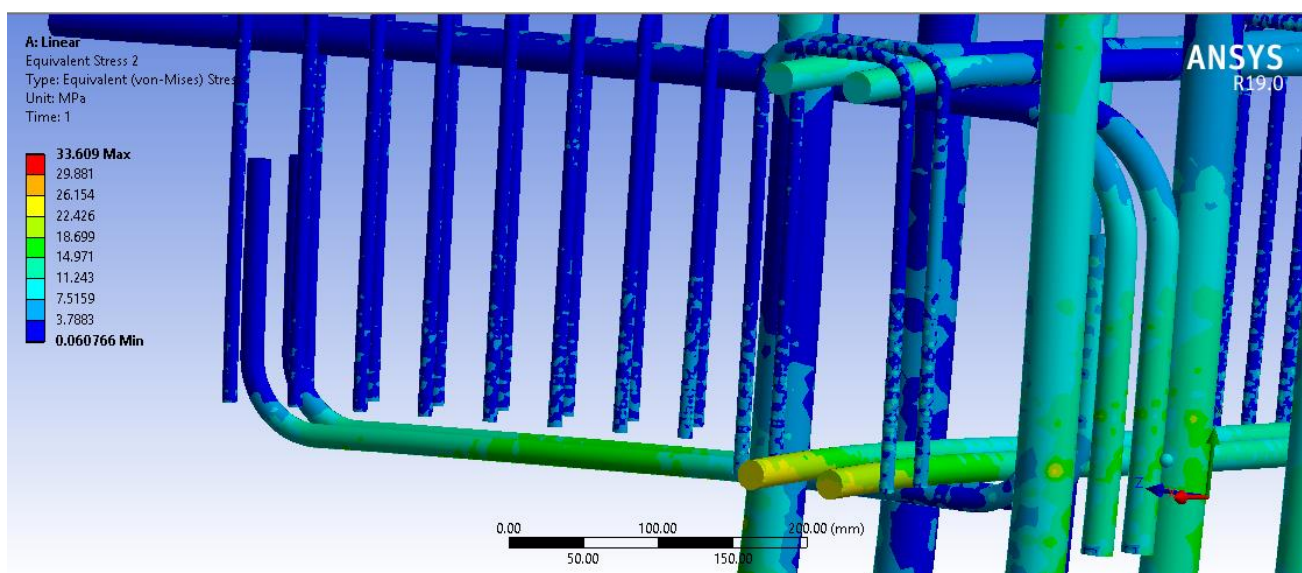


Рис. 20 – Эквивалентные напряжения в арматуре (разрез)

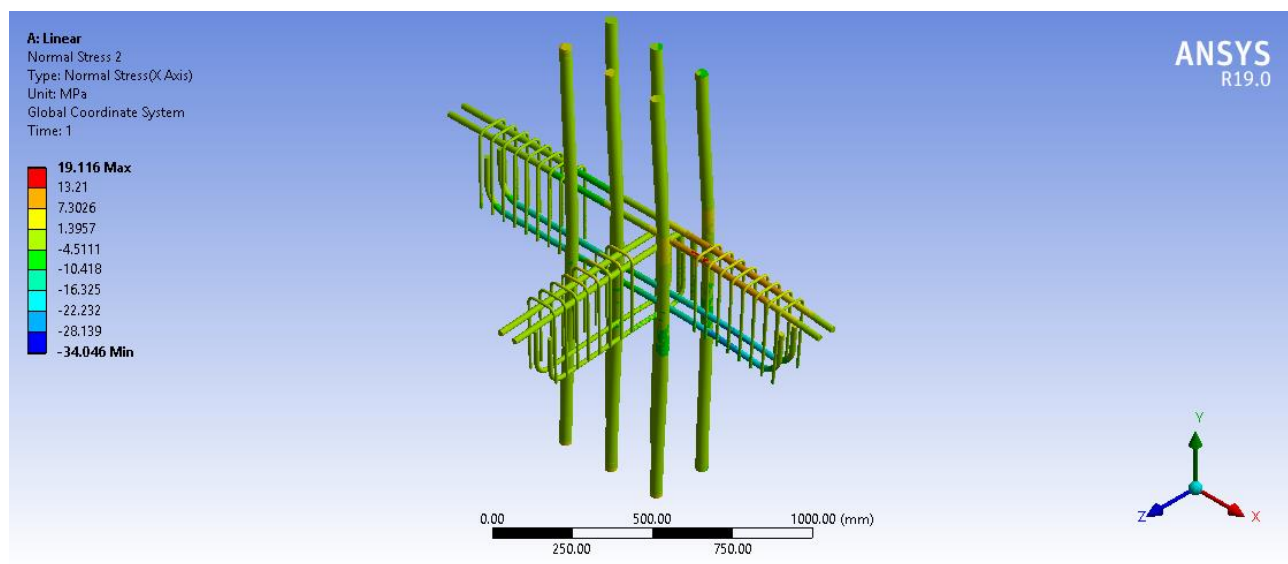


Рис. 21 – Нормальные напряжения в арматуре

Полученные изополя напряжений позволяют сделать вывод о том, что бетон и арматура не выходят за пределы упругой стадии работы.

Force Convergence

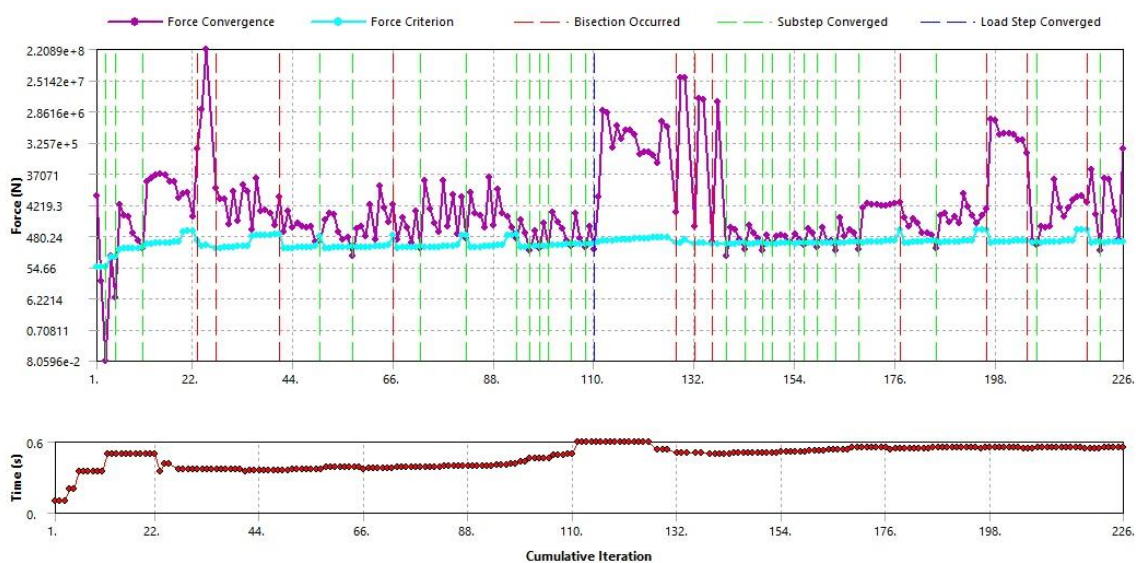


Рис. 22 – График сходимости

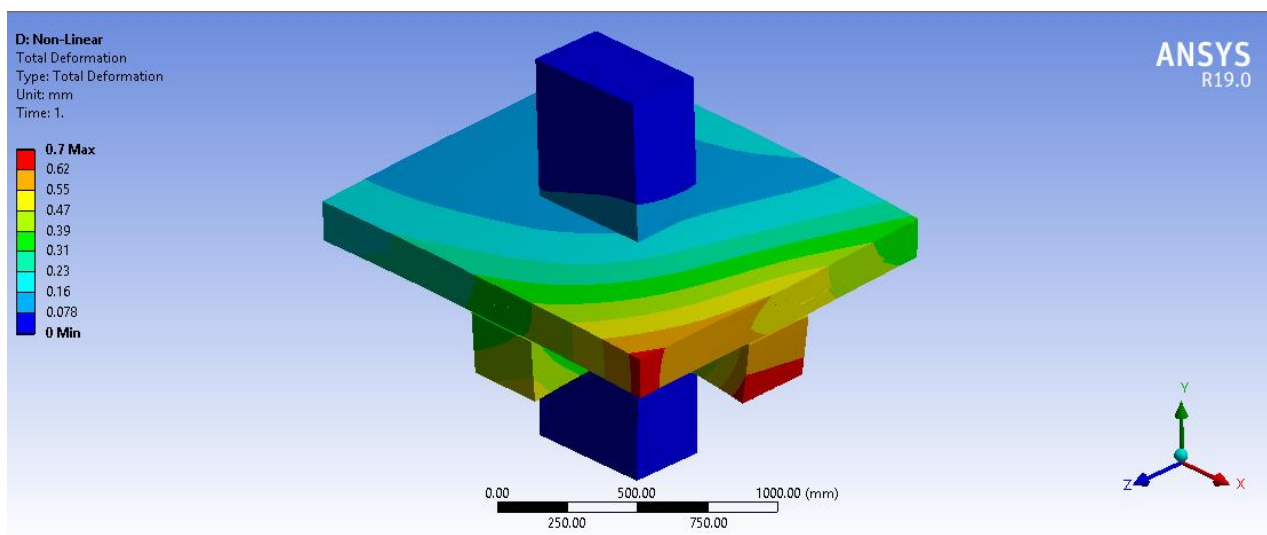


Рис. 23 – Схема деформаций

Как видно из полученной схемы деформаций, максимальные деформации существенно возросли.

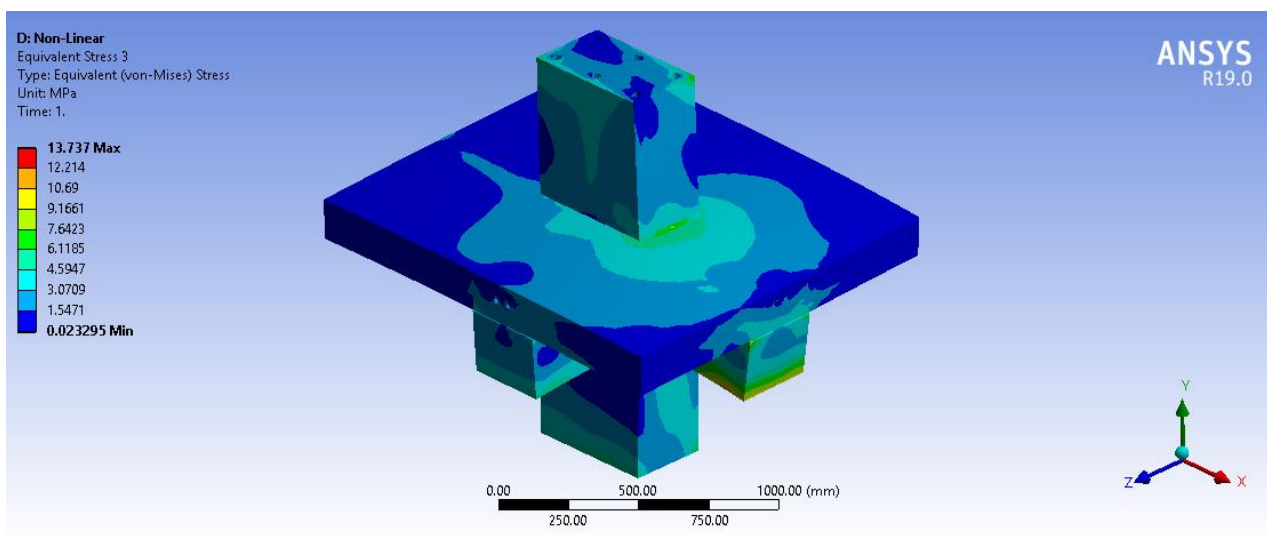


Рис. 24 – Эквивалентные напряжения в бетоне

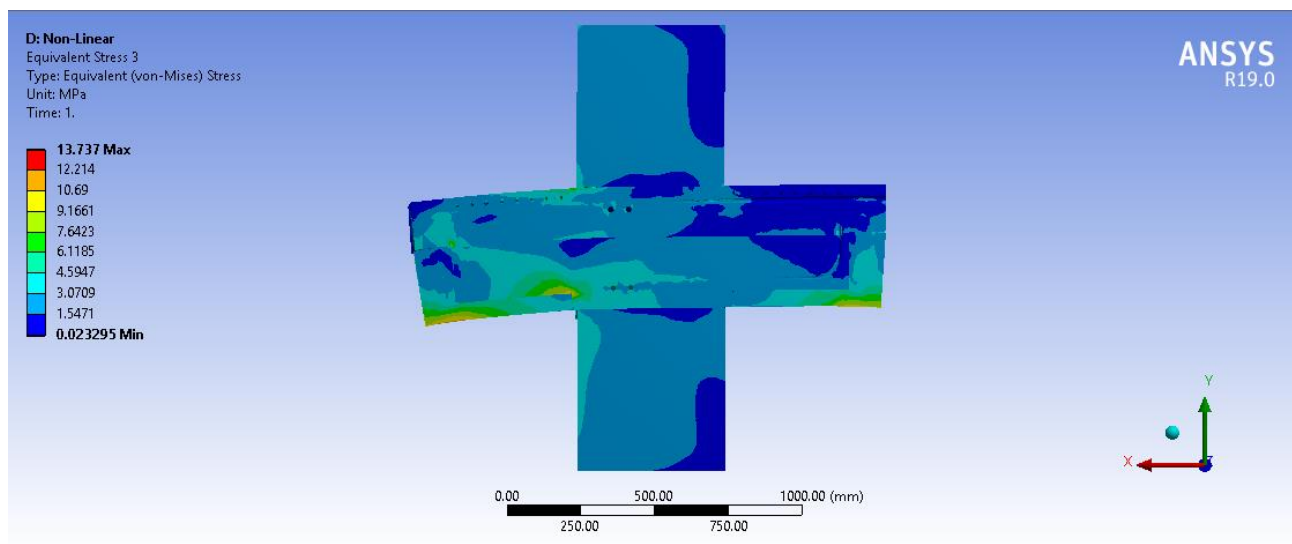


Рис. 25 – Эквивалентные напряжения в бетоне (разрез)

Полученные изополя демонстрируют уменьшение предельных значений напряжений в материале, однако количество активных зон существенно возросло. Также можно заметить концентрацию напряжений в зоне сопряжения преднапряженных плит-опалубок и монолитного слоя, что объясняет возможность возникновения наклонных трещин в приопорных зонах.

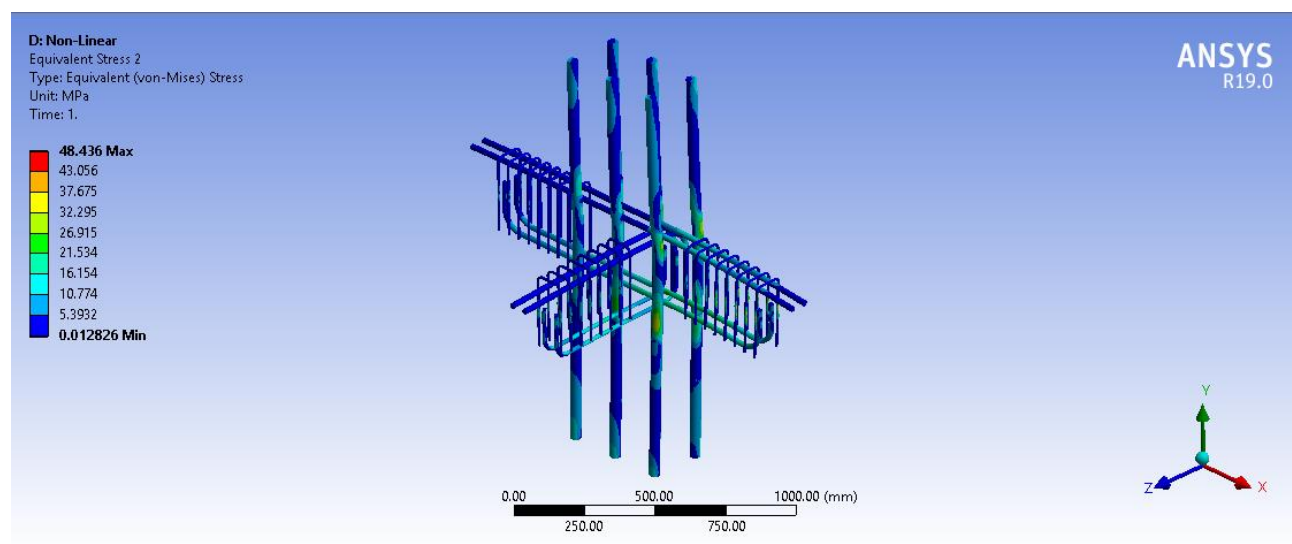


Рис. 26 – Эквивалентные напряжения в арматуре

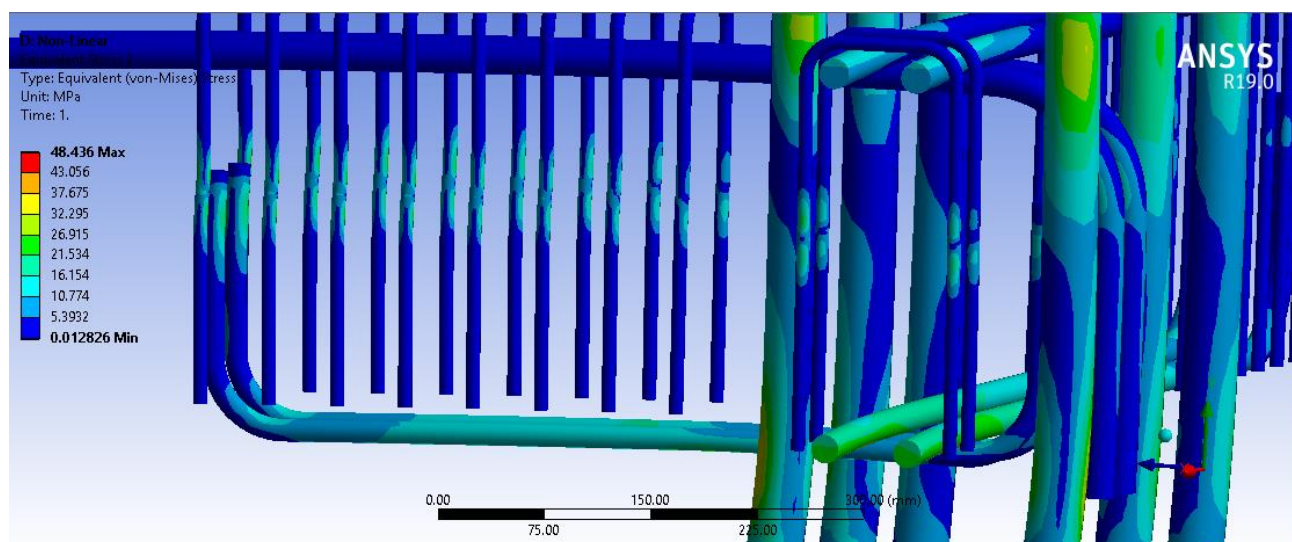


Рис. 27 – Эквивалентные напряжения в арматуре (разрез)

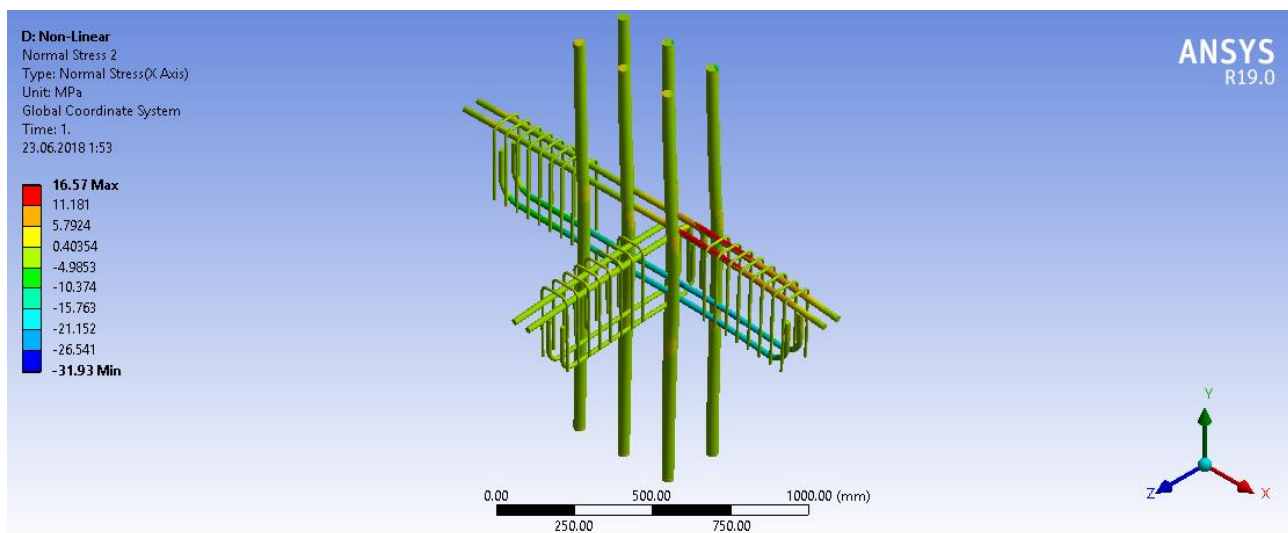


Рис. 28 – Нормальные напряжения в арматуре

Переход к нелинейной модели арматуры привел к более плавному распределению полей напряжений. Также можно отметить существенное возрастание предельных значений напряжений.

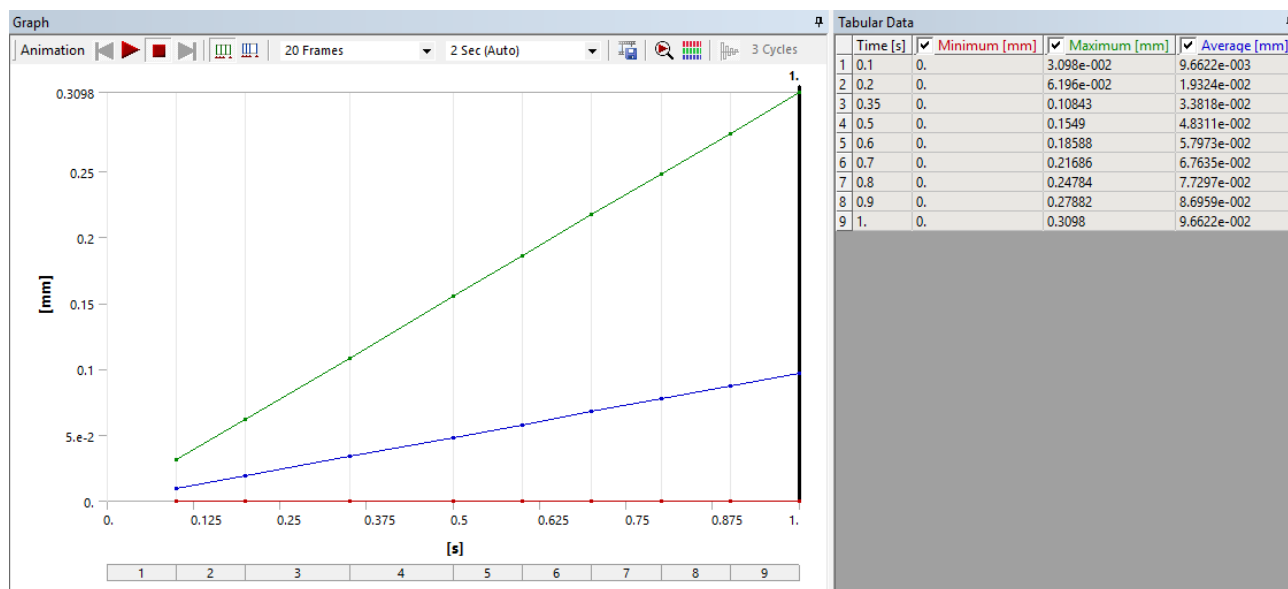


Рис. 29 – График изменения деформаций (линейный расчет)

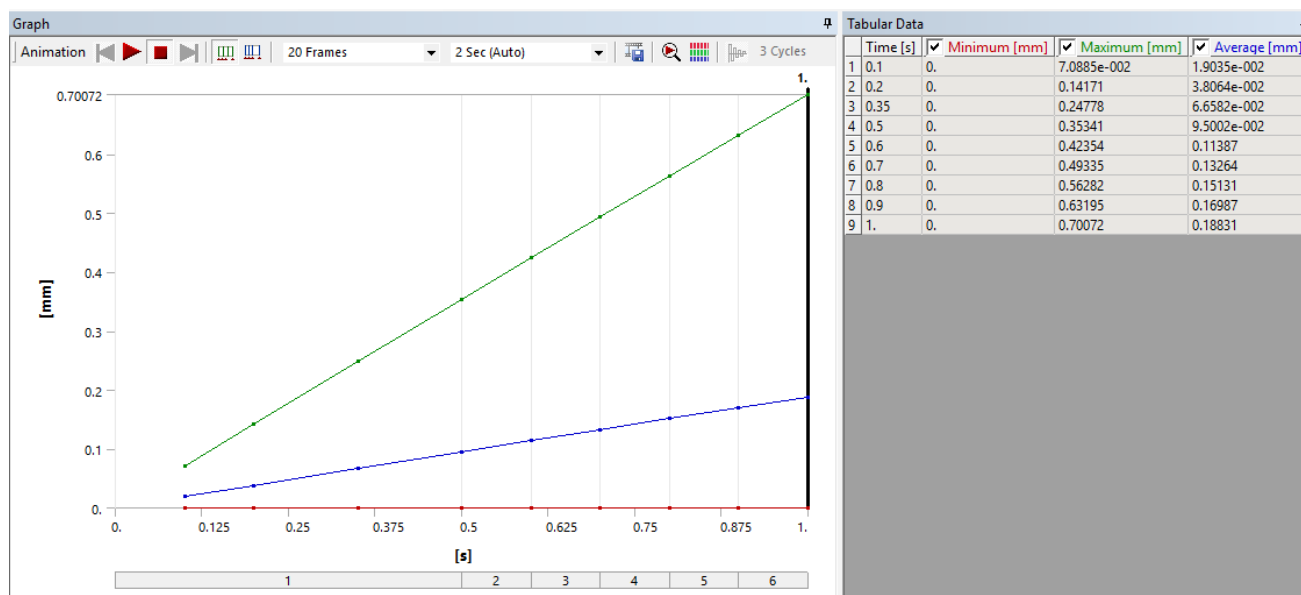


Рис. 30 – График изменения деформаций (нелинейный расчет)

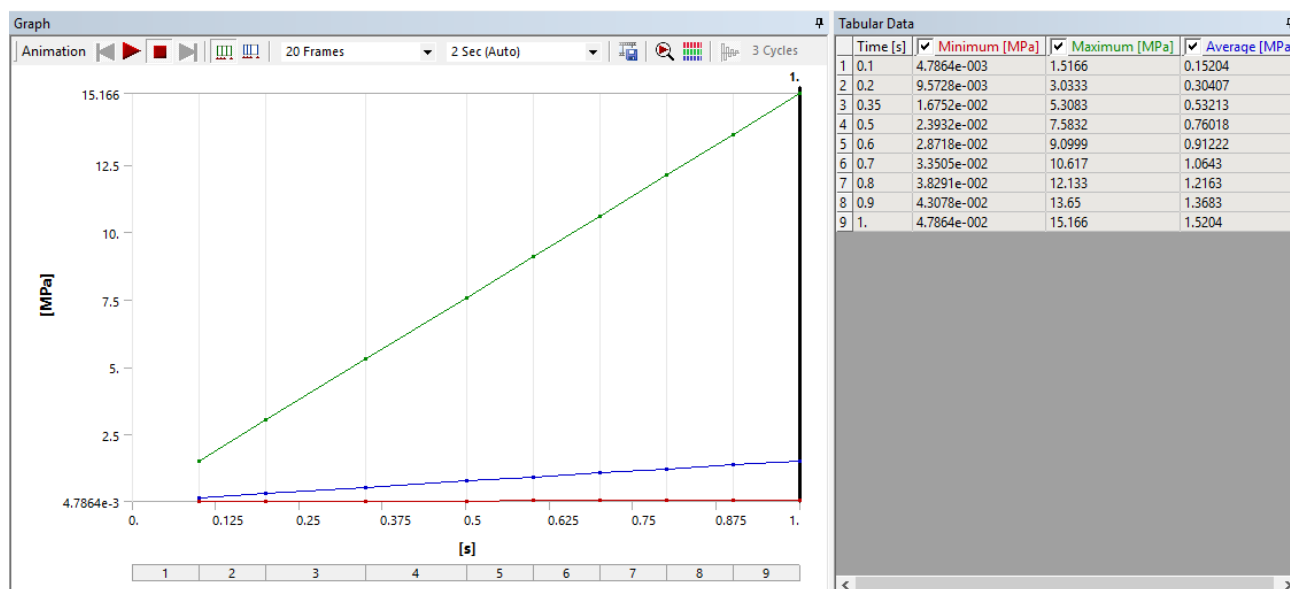


Рис.31 – График изменения эквивалентных напряжений в бетоне (линейный расчет)

Уход от линейной модели позволил более полно оценить работу сборно-монолитного узла. Однако созданная модель по-прежнему остается идеализированной: жесткие связи по контактным поверхностям элементов системы не позволяют оценить напряжения трения, возникающие между элементами, а также установить возможность проскальзывания, так как связь типа «Bonded» функционирует по принципу «Sticking», т.н. «прилипания», и напряжения трения при таком типе связи попросту не возникают.

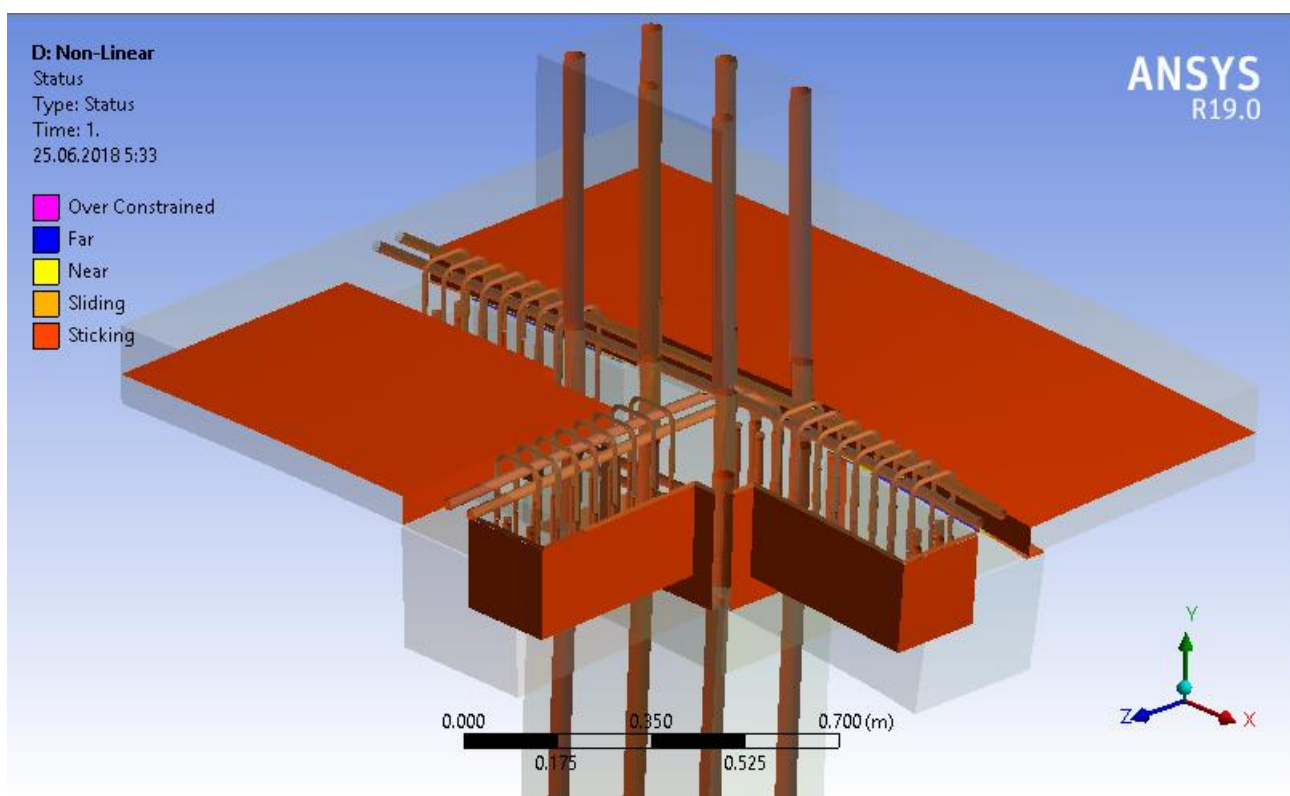


Рис. 32 – Статус связей контактных поверхностей

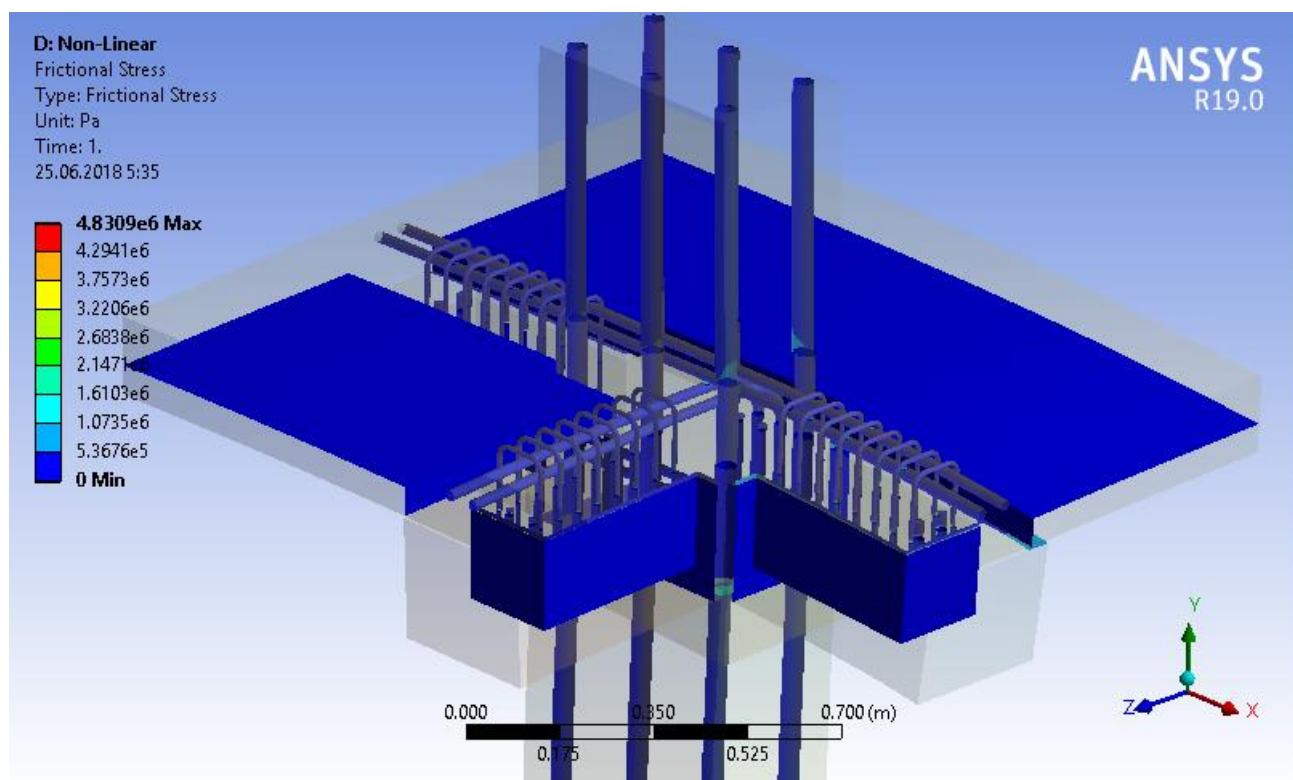


Рис. 33 – Напряжения трения

Наиболее рациональным следующим шагом по уточнению модели станет учет геометрической нелинейности при помощи связи «Frictional» – фрикционной. Данный тип связи устанавливает геометрическую нелинейность в зависимости от коэффициента трения материалов.

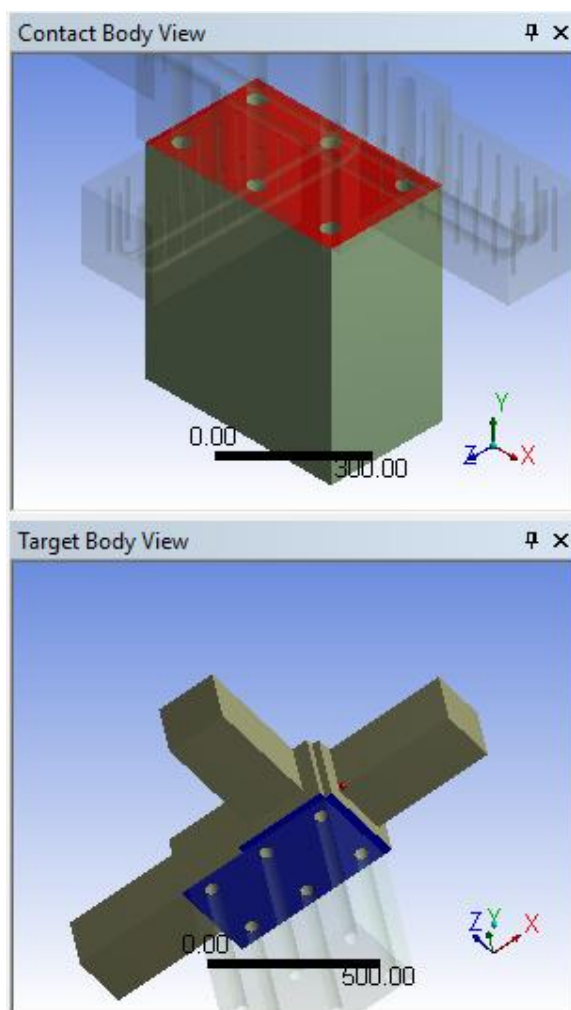


Рис. 34 – Контактные поверхности двух бетонных тел

Модель подобного рода позволит спрогнозировать возможность нарушения совместной работы арматуры и бетона, отсутствия сцепления или его недостаточность для монолитных слоев бетона и сопряженных с ними сборных конструкций. Однако такая модель по-прежнему остается в некотором смысле идеализированной, т.к. она не учитывает возможность изменения коэффициента трения в процессе эксплуатации или испытания узла. Подобную проблему возможно решить командным вводом параметров изменения коэффициентов трения для указанных тел, однако по-прежнему для точной оценки работы сборно-монолитного узла необходимо проведение экспериментов.

Заключение

В рамках проведенного исследования удалось осуществить моделирование узлового сопряжения перекрытия с колонной при помощи средств программных комплексов SCAD и ANSYS.

В ходе работы сконструированы несущие элементы каркаса и рассмотрено напряженно-деформированное состояние узла их сопряжения как наиболее уязвимой в конструктивном отношении части несущего каркаса при помощи линейного и нелинейного анализа.

Переход к уточненной нелинейной модели позволил более точно определить точки концентрации напряжений в исследуемом узле.

Разработана методика дальнейшего улучшения модели путем введения геометрической нелинейности.

Conflict of Interest

None declared.

Конфликт интересов

Не указан.

Список литературы / References

1. Гуров Е.П. Сборное домостроения. Стратегия развития / Е.П. Гуров // СтройПРОФИль. – 2010. – № 4 (82). – С. 8–11. – URL: <http://stroyprofile.com/files/pdf/5-10-10.pdf> (дата обращения: 10.11.2022).
2. Мордич А.И. Эффективные конструктивные системы многоэтажных жилых домов и общественных зданий (12–25 этажей) для условий строительства в Москве и городах Московской области, наиболее полно удовлетворяющие современным маркетинговым требованиям / А.И. Мордич, В.Н. Белевич, В.Н. Симбиркин и др. – Минск : НИЭПУП «Институт БелНИИС», 2002. – 117 с.
3. Шембаков В.А. Сборно-монолитное каркасное домостроение: руководство к принятию решения / В.А. Шембаков. – 2-е изд. – Чебоксары : ООО «Чебоксарская типография №1», 2005. – 119 с.
4. Митасов В.М. Работа диска сборно- монолитного перекрытия перекрытия / В.М. Митасов, А.А. Коянкин // Известия высших учебных заведений. – Строительство. 2014. – № 3. – С. 103–109.
5. Никитин Н.В. Рекомендации по проектированию конструкций плоского сборно-монолитного перекрытия «Соchi» / Н.В. Никитин, П.И. Франов, Е.М. Тимонин. – 3-е изд. – М. : Стройиздат, 1975. – 34 с.
6. Коянкин А.А. Экспериментальные исследования работы стыкового соединения ригеля с колонной в сборно-монолитном перекрытии / А.А. Коянкин, В.М. Митасов // Вестник МГСУ. – 2015. – №5. – С. 27–35.
7. Сахновский К.В. Железобетонные конструкции / К.В. Сахновский. – 8-е изд. – М. : Госстройиздат, 1960. – 840 с.
8. Мордич А.И. Сборно-монолитные и монолитные каркасы многоэтажных зданий с плоскими распорными перекрытиями / А.И. Мордич // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2001. – № 8–9. – С. 10–14.
9. Мордич А.И. Опыт практического применения и основные результаты натурных испытаний сборно-монолитного каркаса БелНИИС / А.И. Мордич, В.Н. Белевич, В.Н. Симбиркин и др. // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2004. – №8. – С. 8–12.
10. Свод правил по проектированию и строительству: СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры : нормативно-технический материал. – М. : ФГУП ЦПП, 2004. – 53 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Gurov E.P. Sbornoe domostroeniya. Strategiia razvitiya [Prefabricated Housing Construction. Development Strategy] / E.P. Gurov // StrojPROFIL [Construction Profile]. – 2010. – №4 (82). – P. 8-11. – URL: <http://stroyprofile.com/files/pdf/5-10-10.pdf> (дата обращения 10.11.2022) [in Russian]
2. Mordich A.I. Effektivnye konstruktivnye sistemy mnogoetazhnykh zhilykh domov i obshchestvennykh zdaniy (12–25 etazhej) dlya uslovij stroitel'stva v Moskve i gorodakh Moskovskoj oblasti, naibolee polno udovletvoryayushchie sovremennym marketingovym trebovaniya [Effective structural systems of multi-storey residential buildings and public buildings (12–25 floors) for construction conditions in Moscow and the cities of the Moscow region, most fully satisfying modern marketing requirements] / A.I. Mordich, V.N. Belevich, V.N. Simbirkin [et al.]. – Minsk : NIEPUP "Institute of BelNIIS", 2002. – 117 p. [in Russian]
3. Shembakov V.A. Sborno-monolitnoe karkasnoe domostroenie: rukovodstvo k prinyatiyu resheniya [Half-precast Monolithic Frame Housing Construction: a guide to decision-making]: 2nd ed., reprint. And add. / N.V. Nikitin, P.I. Franov, E.M. Timonin. – Cheboksary : Cheboksary Publishing House No. 1, LLC, 2005. – 119 p. [in Russian]
4. Mitsov V.M. Rabota diska sborno- monolitnogo perekrytiya perekrytiya [The Operation of the Disk of the Half-precast Monolithic Overlap] / V.M. Mitsov, A.A. Koyankin // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo [Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction]. – 2014. – №3. – P. 103-109. [in Russian]
5. Nikitin N.V. Rekomendacii po proektirovaniyu konstrukcij ploskogo sborno-monolitnogo perekrytiya «Sochi» [Recommendations for the Design of Structures of a Flat Half-precast Monolithic Overlap "Sochi"] / N.V. Nikitin, P.I. Franov, E.M. Timonin. – 3rd ed. – M.: Stroyizdat, 1975. – 34 p. [in Russian]
6. Koyankin A.A. Eksperimental'nye issledovaniya raboty stykovogo soedineniya rigelya s kolonnoj v sborno-monolitnom perekrytii [Experimental Studies of the Work of the Joint of a Crossbar with a Column in a Half-precast

Monolithic Overlap] / A.A. Koyankin, V.M. Mitsov // Vestnik MGSU [Bulletin of MSSU]. – 2015. – №5. – P. 27–35 [in Russian]

7. Sakhnovsky K.V. Zhelezobetonnye konstrukcii [Reinforced Concrete Structures] / K.V. Sakhnovsky. – 8th ed. – M. : Gosstroyizdat, 1960. – 840 p. [in Russian]

8. Mordich A.I. Sborno-monolitnye i monolitnye karkasy mnogoetazhnykh zdaniy s ploskimi raspornymi perekrytiyami [Half-precast and Monolithic Frames of Multi-storey Buildings with Flat Spacer Ceilings] / A.I. Mordich // Montazhnye i special'nye raboty v stroitel'stve [Installation and Special Works in Construction]. – 2001. – №8-9. – P. 10-14. [in Russian]

9. Mordich A.I. Opyt prakticheskogo primeneniya i osnovnye rezul'taty naturnykh ispytaniy sborno-monolitnogo karkasa BelNIIS [Practical Application Experience and the Main Results of Field Tests of a Half-precast Monolithic Frame BelNIIS] / A.I. Mordich, V.N. Belevich, V.N. Simbirkin [et al.] // BST: Byulleten' stroitel'noj tekhniki [BST: Bulletin of Construction Equipment]. – 2004. – №8. – P. 8-12. [in Russian]

10. Svod pravil po proektirovaniyu i stroitel'stvu [Code of Rules for design and construction]: SP 52-101-2003. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii bez predvaritel'nogo napryazheniya armatury : normativno- tekhnicheskij material [Concrete and reinforced concrete structures without prestressing the reinforcement : normative and technical material]. – M. : FSUE TSPP, 2004 – 53 p. [in Russian]
