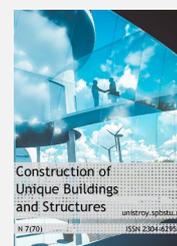




Construction of Unique Buildings and Structures



journal homepage: www.unistroy.spbstu.ru



doi: 10.18720/CUBS.79.2

Моделирование узла балка-колонна с помощью микрополярной модели

Modeling a beam column using a micropolar model

О.Н. Перцева^{1*}, Е.И. Переладова², Г.В. Мартынов³,
Д.Е. Монастырева⁴, З.С. Дауров⁵, Р.С. Тихонов⁶

O. Pertseva^{1*}, E. Pereladova², G. Martynov³,
D. Monastyreva⁴, Z. Daurov⁵, R. Tikhonov⁶

Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St.
Petersburg, Russia

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

микрополярная теория;
метод конечных элементов;
микропланы;
деформация бетона;
устойчивость;
моделирование;
микротрещины;

KEYWORDS

micropolar theory;
finite element method;
micro-plans;
the deformation of the concrete;
sustainability;
modeling;
micro-fractures;

АННОТАЦИЯ

В данной статье рассмотрена микрополярная модель, позволяющая описать нелинейный процесс разрыхления бетона в постпиковой зоне с помощью разделения относительных деформаций на пластическую и линейную часть, а также их подсчёта на каждой плоскости микропланов. Было проведено несколько численных экспериментов и их результаты сравнены с лабораторными экспериментами, которые были проведены ранее другими исследователями. Кроме того, результаты сравнивались с расширенной моделью материала Дрюкера-Прагера. Все числовые примеры были смоделированы в среде ANSYS APDL. После выполнения расчетов были получены результаты для процессов нагрузки и разгрузки, получены переменные деформации для данных процессов. Также было произведено сравнение кривых нагрузки-смещения текущей модели и предыдущих исследований (эксперимент и моделирование с SOLID65) для нисходящей и восходящей нагрузки соответственно. Наконец, приведены характерные значения нагрузки и максимальные прогибы. (В этом проекте была проанализирована правильность микрополярной модели с пластичностью на армированных комплексных структурных образцах, которые были сравнены с экспериментальными данными, проведенными ранее с использованием модели конструктивного материала Виллема и Варнке.)

ABSTRACT

This article discusses the micropolar model, which allows to describe the nonlinear process of concrete loosening in the post-peak zone by separating the relative deformations into the plastic and linear parts, as well as from the calculation on each plane of the microplans. Such a model was used to perform various three-dimensional samples in order to demonstrate its regularization properties. Several numerical samples were investigated and compared with the results of experiments that were conducted recently. In addition, the results were compared with an extended Drucker-Prager material model. All numerical examples were modeled in the ANSYS APDL environment. After performing the calculations, results were obtained for descending and ascending loads. Variable deformations were obtained for the load down and for the load up. We also compared the load-displacement curves of the current model and previous studies (experiment and simulation with SOLID65) for the downward and upward loads, respectively. Finally, characteristic load values and maximum deflections for various modeling sources were given for the load down and for the load up.

Содержание

1.	Введение	23
2.	Методы	25
3.	Результаты и обсуждение	30
4.	Заключение	35

1. Введение

Согласно современным представлениям, основными методами для выполнения численного моделирования являются методы конечно-элементного анализа (МКЭ), которые основаны на формировании массива конечных областей (элементов), для каждой из которых решаются дифференциальные уравнения с частными производными на границах (в узлах) этих областей. Данный метод широко используется для решения задач механики деформируемого твёрдого тела и, в частности, моделирования разрушения бетонного камня [1- 2].

Упруго-пластическое разрушение бетона может быть условно разделено на три основных стадии: линейное деформирование, рыхление из-за образования микротрещин и разуплотнение бетона после образования магистральной трещины. Соответственно, эти стадии отображены на Рис. 1, где отображено деформационное поведение бетона при испытании на растяжение. На данном рисунке первая зона представляет линейно-упругое деформирование, которое описывается законом Гука. Вторая зона – зона образования микротрещин, которые в основном образуются при разрушении контактной поверхности между агрегатом и цементной матрицей (как правило, самая слабая область в бетонном камне). В пиковой зоне (при достижении предела прочности на растяжение β_z) микротрещины, выросшие до мезотрещин, объединяются в магистральную трещину, определяя дальнейшее деформирование. Более того, вся энергия деформирования, которая раньше была равномерно распределена в образце, концентрируется в устье магистральной трещины и в дальнейшем не влияет на остальные области. Несмотря на образование магистральной трещины, в пост-пиковом регионе (зона III) сбоя системы не происходит и образец продолжает сопротивляться прикладываемым напряжениям [3-4]. Но в этом случае при растущих деформациях напряжение снижается. Данный эффект принято описывать как разуплотнение бетона.

На данный момент природа возникновения эффекта разуплотнения бетона объясняется двумя явлениями. Первое – самозаживление трещин (crack-bridging), которое основано на передачи напряжений от одной микротрещины к другой через крупный заполнитель (агрегаты), как отображено на Рис. 2. На данном рисунке слева показан момент трансфера напряжений через неразрушенный камень, пока микротрещины вокруг агрегата ещё не объединились, а справа – состояние при объединении данных трещин и прекращение трансфера напряжений в данном месте.

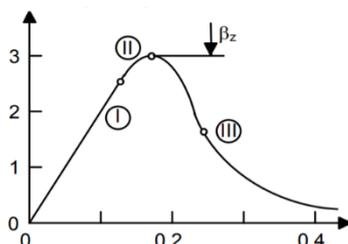


Рисунок 1. Деформационная кривая при испытании бетона на растяжение

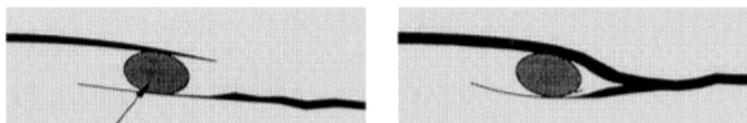


Рисунок 2 Эффект самозаживления трещин в бетоне

Другое явление, влияющее на эффект разуплотнения бетона – взаимное смыкание краёв трещин, которые отличаются повышенной шероховатостью, как это отображено на Рис. 3.

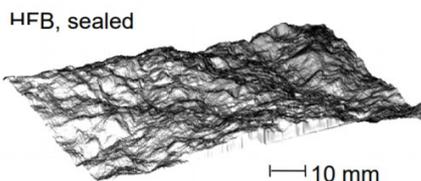


Рисунок 3 Изображение поверхности трещины цементного камня

Соответственно, при открытии трещины взаимное расположение её краёв может принимать разные формы, отображённые на Рис. 4, где r – эффективная шероховатость. На данном рисунке показано смыкание краёв при закрытии трещины и их размыкании при её открытии сверху и снизу соответственно. Таким образом, очевидна передача напряжений от одного края трещины к другому через её края из-за имеющихся неровностей (Рис.4).

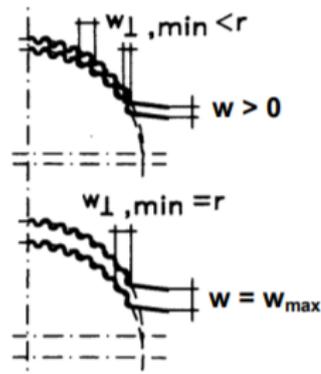


Рисунок 4. Взаимное расположение краёв трещины бетона при разрушении

Физический аспект деформационного разуплотнения бетона можно объяснить с точки зрения механики разрушений. В области максимума (пиковый регион на кривой деформирования), сформировавшейся во время загрузки, микротрещины, образовавшиеся в допиковом регионе, объединяются в макротрещины, формулирую при этом главную магистральную трещину с определенной траекторией. В последующей области, после области максимума, магистральная трещина продолжает расти, но в то же время сопротивление трещины растет и сбой (полная неспособность сопротивляться нагрузке) не происходит сразу, из-за постепенного развития зоны деформационного разуплотнения в устье трещины, как описано в [5]. Эта передача напряжений основывается на двух главных механизмах, которые происходят за вершиной макротрещины, таких как заполнение трещин [6] и самозаживление трещины [7-8]. Таким образом, нелинейная зависимость является следствием формирования и постепенного роста микротрещин под нагрузкой.

Таким образом, даже при образовании магистральной трещины бетона всё ещё в состоянии передавать напряжения, что повышает работоспособность конструкции и должно быть учтено при численном моделировании (а в дальнейшем и проектировании) как просто работы бетонного камня, так и совместной работы бетона, и арматуры. Обычно, первые два этапа разрушения не вызывают трудностей при математическом описании. Первая зона (линейное деформирование) описывается широкоизвестным законом Юнга. Вторая область (образование микротрещин) на Рис. 1 должна описываться нелинейным законом, что привело к многочисленным разработкам в сфере применения теории пластичности для описания пластического деформирования бетонного камня.

Однако, базовых (линейных) представлений МКЭ недостаточно для описания пластической зоны разрушения бетона, а также для описания релаксации материала после образования магистральной трещины. Поэтому на сегодняшний день одним из самых важных направлений является формирование такой численной модели применения МКЭ, которая способна описать разрушение бетонного камня с максимальной сходимостью с лабораторными результатами.

Одной из наиболее широко применяемых моделей для описания текучести (пластического разрушения) материала является чашечная модель Друкера-Прагера, которая успешно применяется для моделирования разрушения металлических конструкций. В случае с бетоном, данная модель позволяет сформировать участок пластического разрушения камня (формирование микротрещин), но слабо реагирует на эффект релаксации материала после формирования магистральной трещины [9-10]. В работе [11] Варыгин М.П. подчеркивает, что в данном случае затруднено определение параметров разрушения бетонного камня. Поэтому на основании модели Друкера-Прагера активно развивается микропластичная модель разрушения [12-16], где в качестве поверхности разрушения рассматриваются грани сферы и их напряженно-деформированное состояние как на поверхности, так и за пределами поверхности. Такой подход характеризуется хорошей сходимостью результатов с экспериментами, а также низкой зависимостью результатов от сформированной сетки конечных элементов, но был применён только для бетонного камня без применения какого-либо армирования.

Процессы, которые происходят при повреждении железобетона, имеют большое практическое значение в науке и технике. Одно из самых важных явлений, которое должно быть описано во время повреждения – деформационное разуплотнение материала. Для того, чтобы охарактеризовать пластичность материала разработан новый микрополярный подход пластичности-повреждения [17-19]. Описание модели позволяет установить смягчающее поведение бетона при реализации нелокальной микрополярной теории с использованием параметров повреждения и V-D расщепления пластических деформаций [20]. При таком подходе эффективные напряжения в неповрежденном пространстве должны быть рассчитаны по основной зависимости деформации от напряжения путем интегрирования по поверхности с 42 независимыми микропланами. В этом определяющем отношении микрополярные и пластические деформации делятся на объемные и девиаторные части проецированием на соответствующие объемные и девиаторные тензоры [21-23].

Функция пластичности, реализованная в исследуемой модели, может быть описана как плавная трехповерхностная микрополярная функция текучести с точки зрения функции текучести Друкера-Прагера с упрочнением. Кроме того, правило потока включает в себя предельные значения сжатия и растяжения, описанные в понятиях функции Хевисайда и объемных напряжений [24].

Для решения проблемы зависимости сетки, которая всегда сопровождает формулировку нелинейности материала, этой модель подвергалась градиентному усилению. Для этой цели разработана сверхлокальная формулировка и оценено среднее эквивалентное штамма [25].

Таким образом, основной целью данной работы является оценка надежности применения микрополярной модели Друкера-Прагера для бетона с дискретным армированием.

Из поставленной цели вытекают следующие задачи:

1. Выявление особенностей микрополярной деформационной модели и оценка возможности её применения для моделирования железобетонных конструкций;
2. Проведение численных экспериментов разрушения железобетонных изделий с заранее известными лабораторными результатами.

2. Методы

2.1 Микроплановая модель

Применяемая модель моделирования стальной арматуры - дискретная реализация арматурных стержней в местах с ее фактической геометрией. Таким образом, в этом случае армирование моделируется как двух узловые (стержневые) элементы с геометрическими и прочностными свойствами, такими как площадь поперечного сечения или длина, которые аналогичны действительным параметрам. Более того, дискретная модель проще для реализации, поскольку она не требует дополнительных вычислений для моделирования трансформированного поперечного сечения. Графически схемы слоевой и дискретной арматуры в простой балке показаны на рисунке 5.

Сходимость восьми узловых объемных элементов бетона с двух узловыми элементами арматуры была обеспечена с помощью прямого геометрического ввода совместных узлов (одинаковых координат узлов КЭ арматуры и бетона). На Рис. 6 отображена такая сходимость «совместных» узлов и схема, как она достигается.

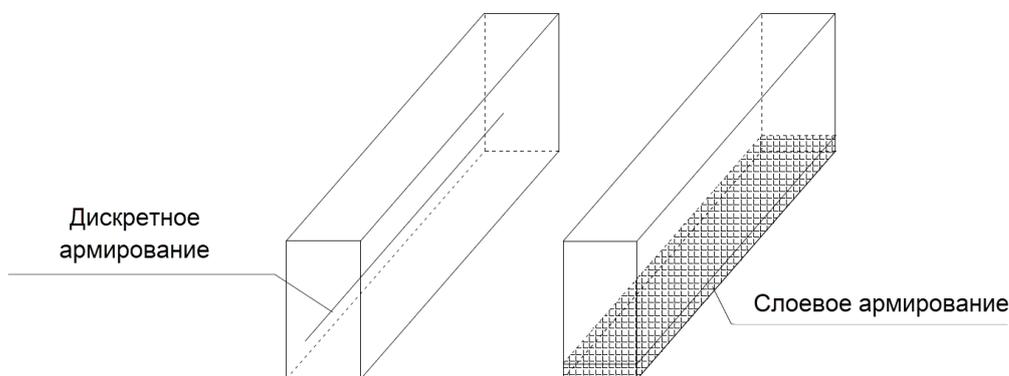


Рис. 5. Схемы изображения слоевого и дискретного армирования

В этом случае арматура использует элементы стержня, которые непосредственно связаны с узлами бетонной сетки. Поэтому бетон и арматурная сетка имеют одни и те же совместные узлы, а бетон - в тех же областях, что и арматура. Такой подход позволяет обеспечить связность узлов из 8-узлов конкретных трехмерных объемных элементов (которые могут иметь от 3 степеней свободы и более) и узлов из стержневой двух мерной арматуры.

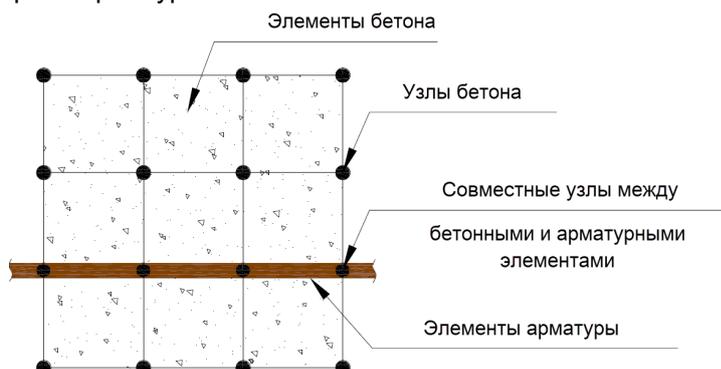


Рис. 6. Совместные узлы объёмных бетонных элементов и стержневых плоских элементов арматуры

Основная идея микрополярной модели состоит в том, чтобы выразить конститутивный закон не в терминах тензоров, а в терминах векторов напряжения и деформации, действующих на плоскостях различных ориентаций, называемых микропланами. Для микропланарной модели для бетона требуется введение нескольких основных гипотез. Согласно этой гипотезе следует полагать, что кривые напряжения и деформации каждого микроплана не зависят от пути, пока этот микроплан подвергается нагрузке. Основываясь на границах напряжений и деформаций, можно ввести следующий конститутивный материальный закон для изотропного повреждения

$$\sigma = (1 - d)C\varepsilon \tag{2.1}$$

где σ и ε являются векторами напряжения и деформации Коши соответственно, C – тензор упругой жесткости Коши и d - переменная скалярного повреждения от 0 (неповрежденная) до 1 (повреждена). Альтернативным способом получения конститутивного закона для микрополярной модели является использование объемного девиаторного расщепления (V-D). При использовании V-D расщепления с кинематическими граничными ограничениями могут быть разработаны более комплексные конститутивные законы.

Основное предположение для достижения таким способом термодинамически последовательной модели состоит в том, что стандартная макроскопическая свободная энергия Ψ^{mac} должна вычисляться как интеграл свободных энергий микропланов по всем ориентациям:

$$\Psi^{mac} = \frac{3}{4\pi} \int_{\Omega} \Psi^{min} d\Omega \tag{2.2}$$

где Ψ^{min} определяется как микрополярная свободная энергия с линейным упрочнением, которая определяется по формуле:

$$\Psi^{min} = \frac{1}{2} K^{mic} (\varepsilon_V - \varepsilon_V^{pl})^2 + G^{mic} (\varepsilon_D - \varepsilon_D^{pl}) \cdot (\varepsilon_D - \varepsilon_D^{pl}) + \frac{1}{2} H (K^{mic})^2 \tag{2.3}$$

где верхний индекс pl означает пластическую часть, а ε_V и ε_D означают скалярную микрополярную деформацию и девиаторную относительную деформацию второго порядка соответственно. Кроме того, H означает жесткость закалки, а K^{mic} подразумевает переменную упрочнения.

Для описания взаимозависимости между процедурой повреждения и пластичности была предложена следующая процедура. Во-первых, это расчет эффективных напряжений в неповрежденном пространстве. Впоследствии пластические деформации следует рассчитывать для оценки ущерба. Предлагаемая модель основана на следующем фундаментальном уравнении:

$$\sigma = \frac{3}{4\pi} \int_{\Omega} (1 - d^{mic}) [K^{mic} V (\varepsilon_V - \varepsilon_V^{pl}) + 2G^{mic} Dev^T \cdot (\varepsilon_D - \varepsilon_D^{pl})] d\Omega \tag{2.4}$$

где ε_V означает скалярная микрополярная деформация, а ε_D – девиаторную относительную деформацию второго порядка. Эти деформации рассчитаны как двойное тензорное стягивание с объёмным (шаровым) и девиаторным проекционными тензором соответственно:

$$\varepsilon_V = V \div \varepsilon, \quad \varepsilon_D = Dev \div \varepsilon, \tag{2.5}$$

Проекционные девиаторный и шаровой тензора Dev и V определяются с помощью единичных тензоров и нормали вектора n для каждого микроплана:

$$V = \frac{1}{3} \mathbf{1}, \quad Dev = n \cdot I^{dev} = n \cdot I^{sym} - \frac{1}{3} n \cdot \mathbf{1} \otimes \mathbf{1} \tag{2.6}$$

В формуле 2.4 параметры K^{mic} и G^{mic} являются линейными характеристиками микрополярной модели и могут быть описаны объёмным модулем деформации K и модулем сдвига G соответственно:

$$K^{mic} = 3K, \quad G^{mic} = G \tag{2.7}$$

Функция текучести для микрополярной пластической модели описывается как трёхмерная функция f_1 по формуле:

$$\tag{2.8}$$

$$f_1(\sigma_D^e, \sigma_V^e, k) = \frac{3}{2} \sigma_D^e \cdot \sigma_D^e - f_1^2(\sigma_V^e, k) f_c(\sigma_V^e, k) f_t(\sigma_V^e, k)$$

Соответствующее графическое изображение чашечной трёх поверхностной микрополярной функции представлено на Рис. 7

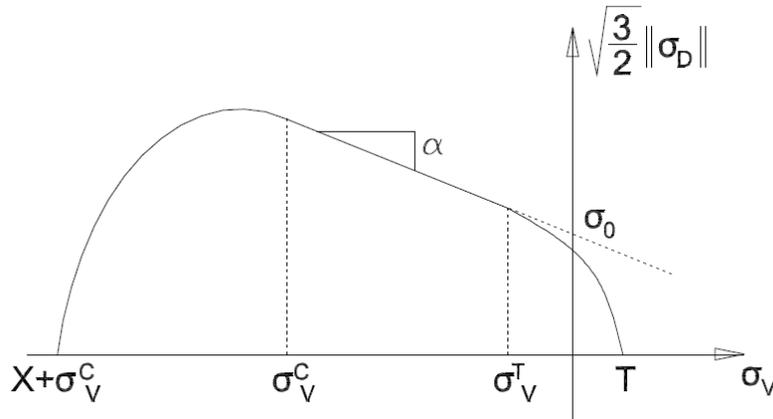


Рис. 7. Функция текучести для микрополярной пластической модели

Для того чтобы понизить влияние размера сетки конечных элементов необходимо использование градиентного регулирования. В данном случае целесообразно использовать философию локальных и нелокальных относительных деформаций. В общем смысле это означает, что такое градиентное регулирование состоит из численного вычисления нелокальной усреднённой эквивалентной относительной деформации, то есть деформации за поверхностью каждой площадки. Такая операция может быть осуществлена с помощью обзора и перебора всех нелокальных эквивалентных относительных деформация как экстремальных степеней свободы для дифференциального уравнения Гельмгольца. Следовательно, будет добавлено ещё одно, дополнительное звено в уравнения баланса линейных микрополярных моментов.

$$\bar{\eta}_m - c \nabla^2 \bar{\eta}_m = \eta_m \quad (2.9)$$

Также должна быть использована гомогенная переменная Ноймана для описания граничных условий:

$$\nabla \bar{\eta}_m \cdot \eta_b = 0 \quad (2.10)$$

где ∇ - это градиентный оператор, а ∇^2 – оператор Лапласа.

Таким образом, микрополярная модель позволяет описать нелинейный процесс разрыхления бетона в постпиковой зоне с помощью разделения относительных деформаций на пластическую и линейную часть, а также из подсчёта на каждой плоскости микропланов.

Модель, предложенная выше, используется для выполнения различных трехмерных образцов, чтобы продемонстрировать ее свойства регуляризации. Несколько числовых образцов были исследованы и сравнены с результатами экспериментов, которые были проведены недавно. Кроме того, результаты сравнивались с расширенной моделью материала Друкера-Прагера. Первый пример был также выполнен с тремя различными размерами сетки. Все числовые примеры были смоделированы в среде ANSYS APDL. Для применения модели должны быть указаны следующие параметры, кроме свойств материала:

- Координата пересечения σ_V^c , которая требуется для формулировки предела подавления;
- Соотношение между большой и малой осями R, что также необходимо для формулировки предела подавления;
- параметр градиента c, который следует определить из эксперимента;
- параметр материала m (должен быть больше 1) для формулировки сверхнелокальной;
- порог повреждения γ_0 для избежания недопустимых значений деформации;
- материальные константы β_t и β_c для формулирования законов повреждения от растяжения и сжатия.

Для оценки общей пластической деформации рассчитывали гомогенизованную переменную упрочнения k^{hom} как интеграл по независимым переменным на 21 микропланах

$$(2.11)$$

$$k^{hom} = \frac{\frac{3}{4\pi} \int_{\Omega} k^{mic} d\Omega}{\frac{3}{4\pi} \int_{\Omega} d\Omega}$$

и гомогенизированная переменная общего ущерба d^{hom} была рассчитана как

$$d^{hom} = \frac{\frac{3}{4\pi} \int_{\Omega} d^{mic} d\Omega}{\frac{3}{4\pi} \int_{\Omega} d\Omega} \quad (2.12)$$

Тот же подход был применен для расчета переменных повреждения сжатия d_c^{mic} и натяжение d_t^{mic}

$$d_c^{hom} = \frac{\frac{3}{4\pi} \int_{\Omega} d_c^{mic} d\Omega}{\frac{3}{4\pi} \int_{\Omega} d\Omega} \quad d_t^{hom} = \frac{\frac{3}{4\pi} \int_{\Omega} d_t^{mic} d\Omega}{\frac{3}{4\pi} \int_{\Omega} d\Omega} \quad (2.13)$$

2.2 Цифровой образец 1

Первый числовой пример – слабо армированное соединение колонны с наружной балкой. Геометрию и расположение арматуры можно увидеть на рис. 8.

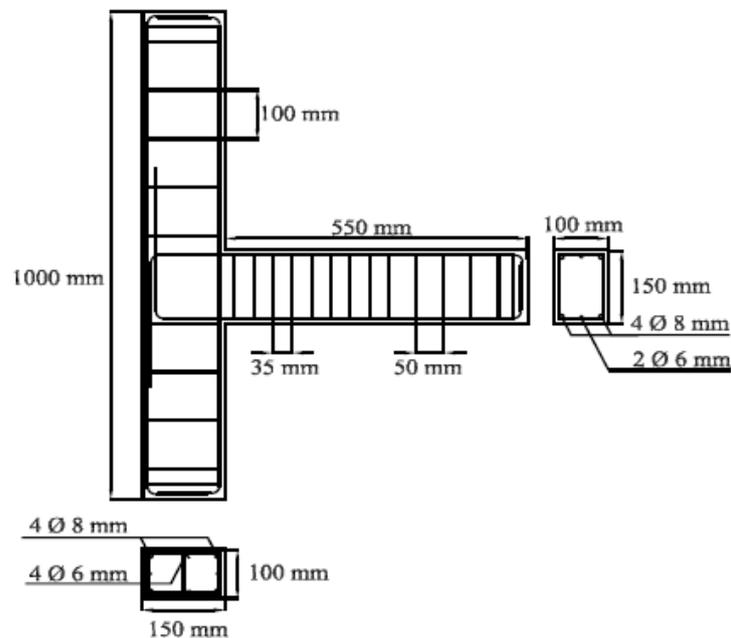


Рисунок 8. Геометрия и граничные условия цифрового образца 1.

Нагрузка была приложена в два этапа. Прежде всего, осевая сжимающая нагрузка 53,06 кН была равномерной была равномерно распределена через линию узлов в центре верха колонны. После подвергания колонны сжатию было приложено смещение 30 мм на 50 мм от свободного конца балки. При этом осевая нагрузка в колонне оставалась прежней. Подушки моделировались в местах задания граничных условий и нагрузки. Сетка бетонной модели, расположение подушек и распределение арматуры изображены на рис. 9.

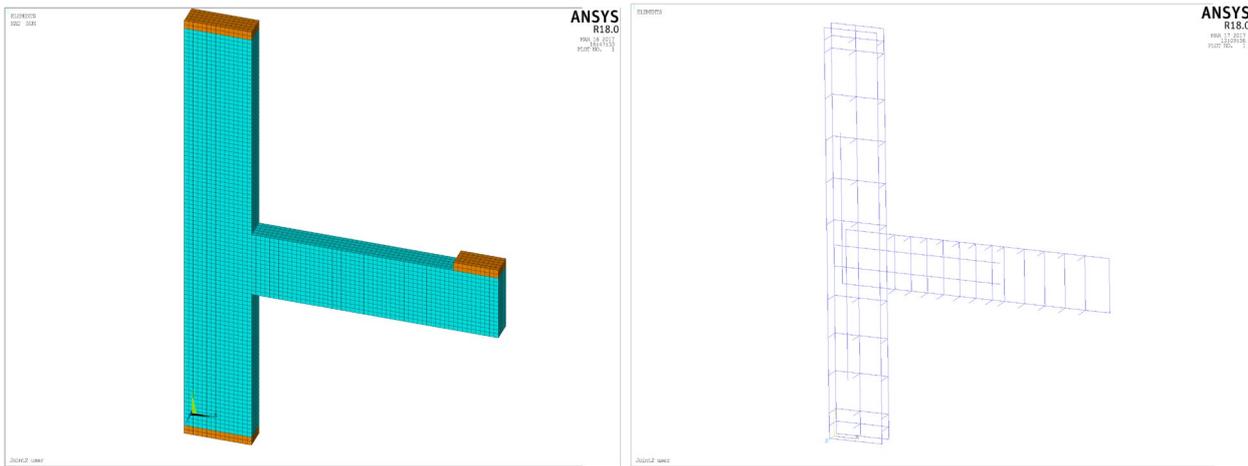


Рисунок 9. Детали моделирования для цифрового образца 1.

Таблица 1. Свойства и параметры материала бетона для числового образца 1.

E [МПа]	ν	f_{cu} [МПа]	C [mm ²]	σ_V^c [МПа]	R	m	γ_o	β_t	β_c
32520	0.2	35.376	500	-40	2	2.5	0.0001	5000	3000

Верхний конец колонны удерживается роликовой опорой, ограничивая смещения узлов с левой и правой сторон колонны на расстоянии 50 мм от вершины. Более того, нижний конец колонны имеет фиксированные опоры вдоль центральной линии узлов. Арматура диаметром 6 мм и 8 мм использовалась в качестве продольных стержней, а диаметр 6 мм - для хомутов в колонне и балке. Материал и параметры модели приведены в таблице 1. Армирование было смоделировано так же, как в численном примере 1, и его свойства для настоящего примера приведены в таблице 2. Материал для подушек имел те же параметры, что и в численном примере 1. Также следует упомянуть, что соединение было проанализировано на предмет нагрузки балки в направлении вверх и вниз путем применения отрицательных или положительных смещений конца балки. Кроме того, в этом численном примере был выполнен неармированный случай этого соединения.

Таблица 2. Свойства материала армирования для числового образца 1.

E [МПа]	ν	f_y [МПа]	E_T [МПа]
210000	0.3	432	6000

2.3 Цифровой образец 2

Второй числовой пример — это то же самое усиленное соединение внешней колонны и балки, но с поперечным армированием соединения. Геометрию и расположение арматуры можно увидеть на рис. 10.

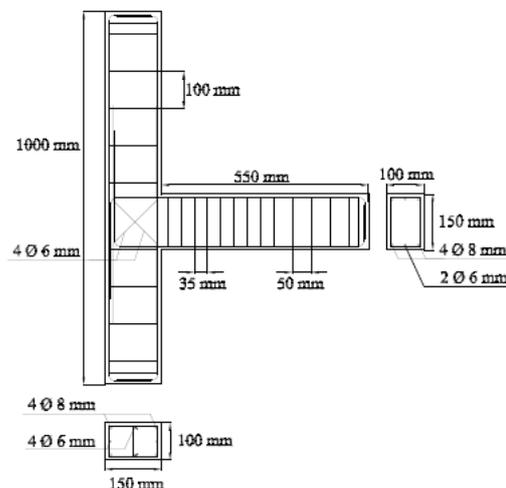


Рисунок 10. Геометрия и граничные условия цифрового образца 2.

Нагрузка и граничные условия были применены таким же образом, как это было для числового примера 1. Сетка модели бетона, расположение подушек и распределение арматуры изображены на рисунке 11. Для армирования и бетона применялись те же материалы, что и в числовом примере 1. Арматура диаметром 6 мм была использована для системы поперечных связей. Материал и модельные параметры для бетона приведены в таблице 3. Данные для моделирования арматуры приведены в таблице 2. Материал для нагрузочных пластин имел те же параметры, что и в численном примере 1. Это соединение также анализировалось на нагрузку балки в направления вверх и вниз путем приложения отрицательных или положительных смещений к концу балки.

Таблица 3. Свойства и параметры материала бетона для числового образца 2.

E [МПа]	ν	f_{cu} [МПа]	C [mm ²]	σ_V^c [МПа]	R	m	γ_o	β_t	β_c
32520	0.2	35.376	500	-40	2	2.5	0.0001	5000	3000

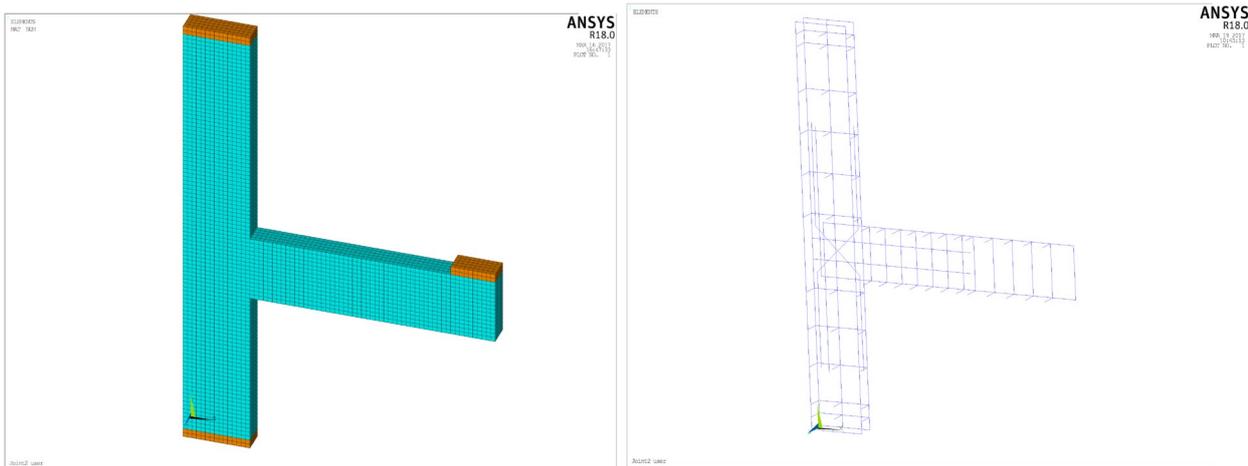
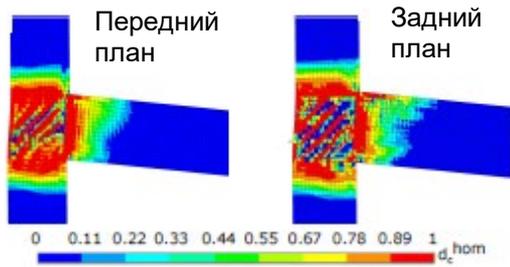


Рисунок 11. Детали моделирования для числового примера 2.

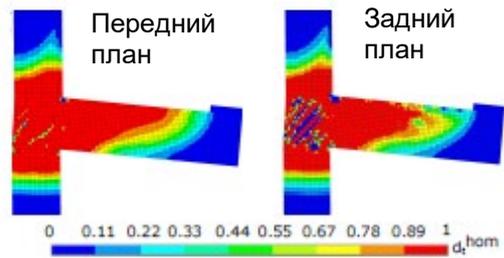
3. Результаты и обсуждение

3.1 Цифровой образец 1

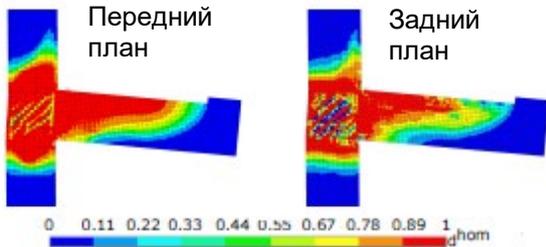
Полученные переменные повреждения для нагрузок вниз и вверх показаны на рис. 12 и рис. 13 соответственно. Результаты для неармированного случая для обоих направлений нагрузки представлены на рис. 14 и рис. 15. Поскольку расчеты были выполнены только для половины соединения с учетом условий симметрии, на рисунках ниже представлены два вида. Вид спереди - вид сечения в середине соединения. Другими словами, это вид спереди с рис. 9а. Можно заметить из сравнения рис. 12-13 и рис. 14 и 15 что обработка деформации при загрузении вниз близка к отражению повреждения, возникающего при загрузении вверх, что соответствует основным ожиданиям. Наконец, сравнение кривых нагрузки-смещения для армированного случая представлено на рис. 16а, а для неармированного корпуса это показано на рис. 17. Кроме того, характерные нагрузки при различных типах повреждений и максимальном смещении свободного конца в консольной балке приведены в таблице 3 для нагрузки приложенной вниз и в таблице 4 для нагрузки вверх. В этих таблицах данные из смоделированных соединений для армированного и неармированного случая сравниваются с данными, полученными экспериментально и моделированием с использованием твердотельного железобетонного элемента SOLID65 (модель материала Уильяма и Варнке).



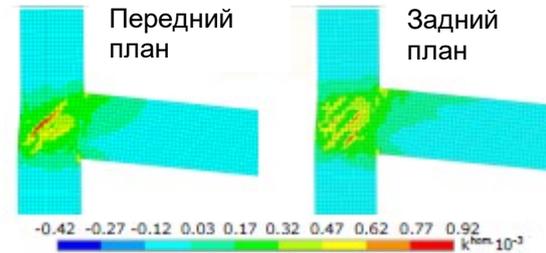
а) переменная повреждения при сжатии



б) переменная повреждения при натяжении

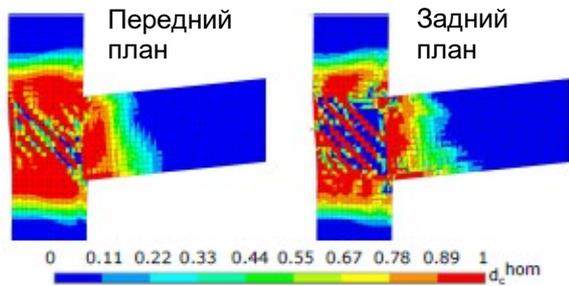


с) гомогенизированная переменная общего повреждения

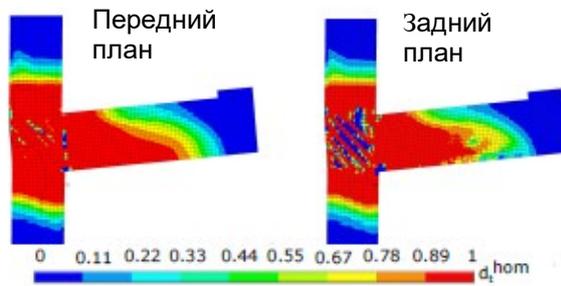


д) гомогенизированная переменная упрочнения

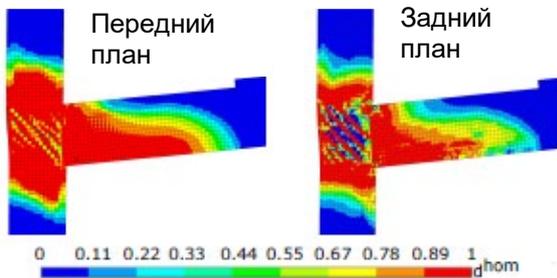
содяц...



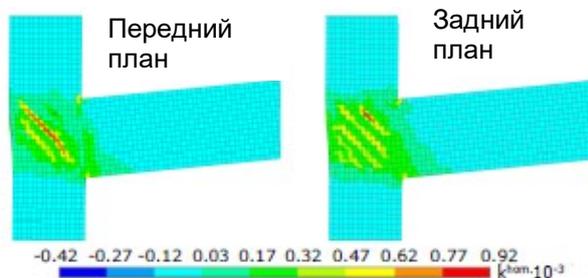
а) переменная повреждения при сжатии



б) переменная повреждения при натяжении



с) гомогенизированная переменная общего повреждения



д) гомогенизированная переменная упрочнения

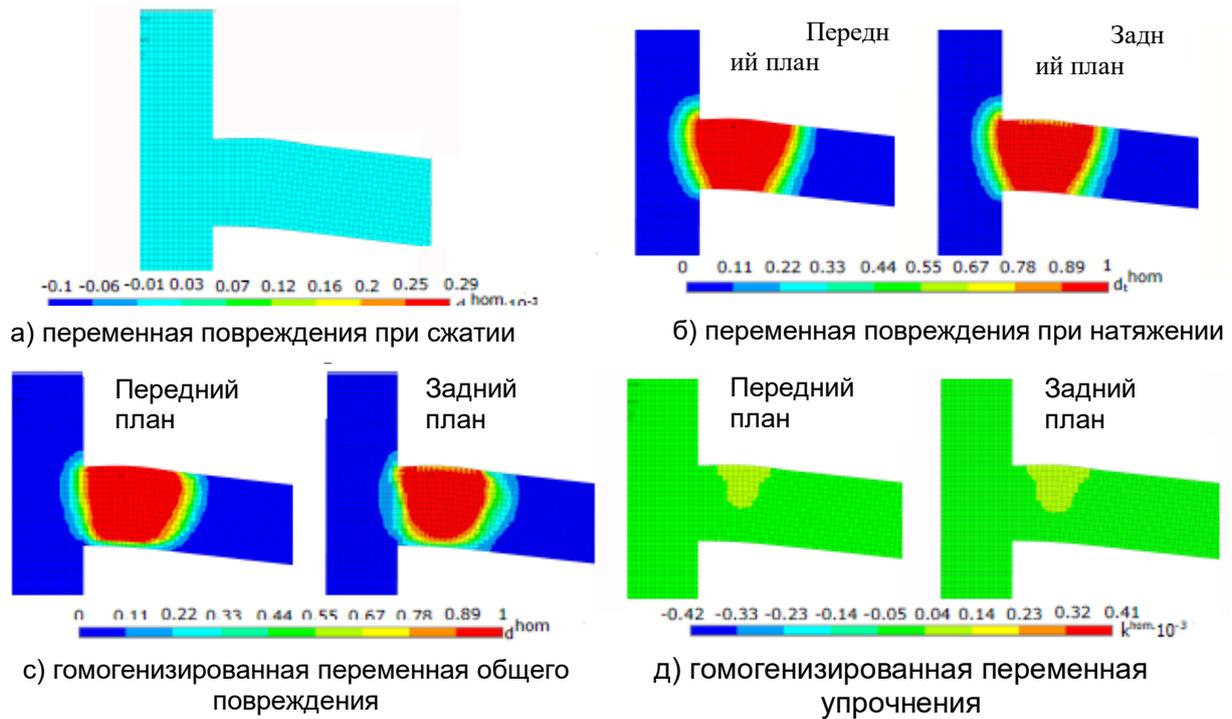


Рисунок 14. Переменные повреждения для нагрузки вниз неармированного случая в численном примере 1.

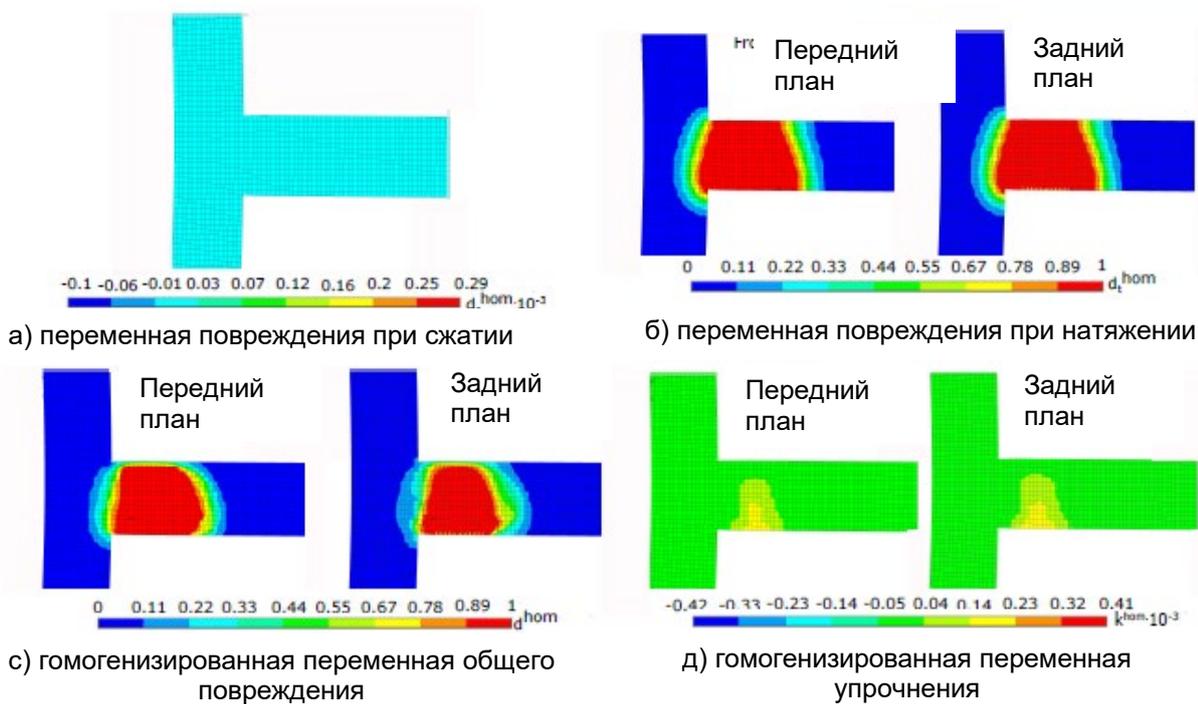


Рисунок 15. Переменные повреждения для неармированной случая и восходящего направления нагрузки в цифровом образце 1

Таблица 3. Сравнение результатов изгибного анализа для нисходящей нагрузки в числовом примере 1.

Соединение	Первая растрескивающая нагрузка [кН]	Пиковая (размягчающая) Нагрузка [кН]	Предельная нагрузка [кН]	Максимальный прогиб в середине пролета [мм]
------------	--------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------	---

Solid65 [10]	6.20	21.90	22.00	19.10
Эксперимент [10]	6.10	17.70	17.50	20.00
Армированное	6.087	22.40	10.040	37.674
Неармированное	3.549	4.266	1.039	2.770

Таблица 4. Сравнение результатов изгибного анализа для восходящей нагрузки в числовом примере 1.

Соединение	Первая растрескивающая нагрузка [кН]	Пиковая (размягчающая) Нагрузка [кН]	Предельная нагрузка [кН]	Максимальный прогиб в середине пролета [мм]
Solid65 [10]	6.10	20.30	20.60	17.50
Эксперимент [10]	5.90	17.30	18.00	14.00
Армированное	5.507	22.226	10.763	44.075
Неармированное	3.577	4.298	0.317	4.136

Микрополярная модель пластической деформации, применяемая в настоящем проекте, очень хороша для моделирования деформационного разрушения железобетона. На кривых нагрузки-смещения на рис. 16 - 17 видно, что для армированных и неармированных смоделированных случаев можно изобразить постпиковую область с деформационным размягчением бетона. Кроме того, микрополярная модель пластического повреждения может уловить упрочнение арматуры после полного разрушения бетона.

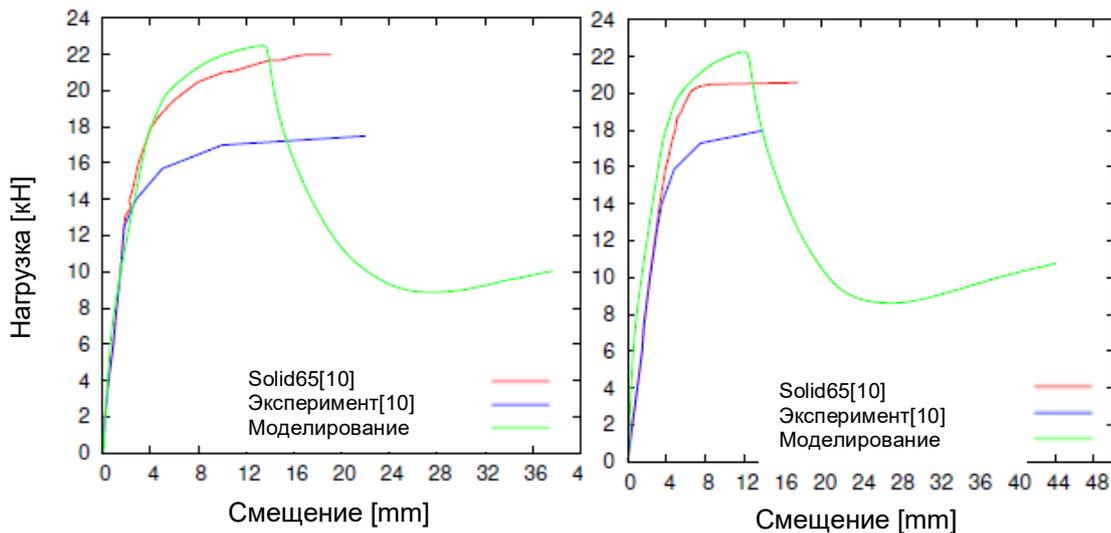


Рисунок 16. Смоделированная кривая нагрузки-смещения для нисходящей и восходящей нагрузки в цифровом образце 1

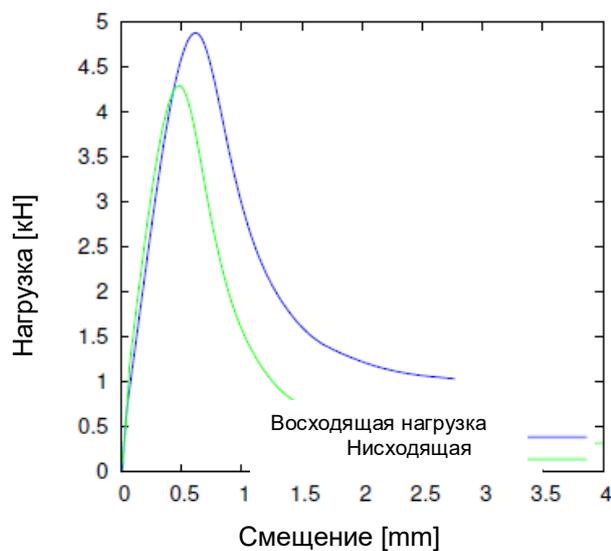


Рисунок 17. Смоделированная кривая нагрузки-смещения для неармированного случая в численном примере 1.

Из рисунка 17 также можно сделать вывод, что смоделированная форма кривой нагрузки-смещения полностью соответствует известной в литературе кривой поведения бетона при изгибе. Из анализа значений в таблицах 3 - 4 можно сделать вывод, что текущее моделирование армированного случая очень хорошо соответствует моделированию с SOLID65 в случае предпиковой области и максимальной несущей способности. Дополнительно, значения моделирования неармированного случая намного меньше, чем для армированного, что является ожидаемым, и еще раз доказывает правильность предложенной модели.

3.1 Цифровой образец 2

После выполнения расчетов были получены результаты для нисходящих и восходящих нагрузок. Переменные деформации для нагрузки вниз приведены на рис. 19, а результаты для нагрузки вверх показаны на рис. 18. А сравнение кривых нагрузки-смещения текущей модели и предыдущих исследований (эксперимент и моделирование с SOLID65) приведено на рис. 20а и рис. 20б для нисходящей и восходящей нагрузки соответственно. Для сравнения этих результатов с неармированным случаем следует учесть данные из числового примера 1 (Рис. 14-15 и Рис. 17). Наконец, характерные значения нагрузки и максимальные прогибы для различных источников моделирования приведены в таблице 6 для нагрузки вниз и таблице 5 для нагрузки вверх. Как видно из анализа кривых смещения-нагрузки, микрополярная модель пластического повреждения дает наиболее детальную форму, которая также включает зону деформации разрыхления. Тем не менее, моделируемые кривые очень близки к кривым, полученным при моделировании с использованием элемента SOLID65, но не с результатами, полученными в лаборатории.

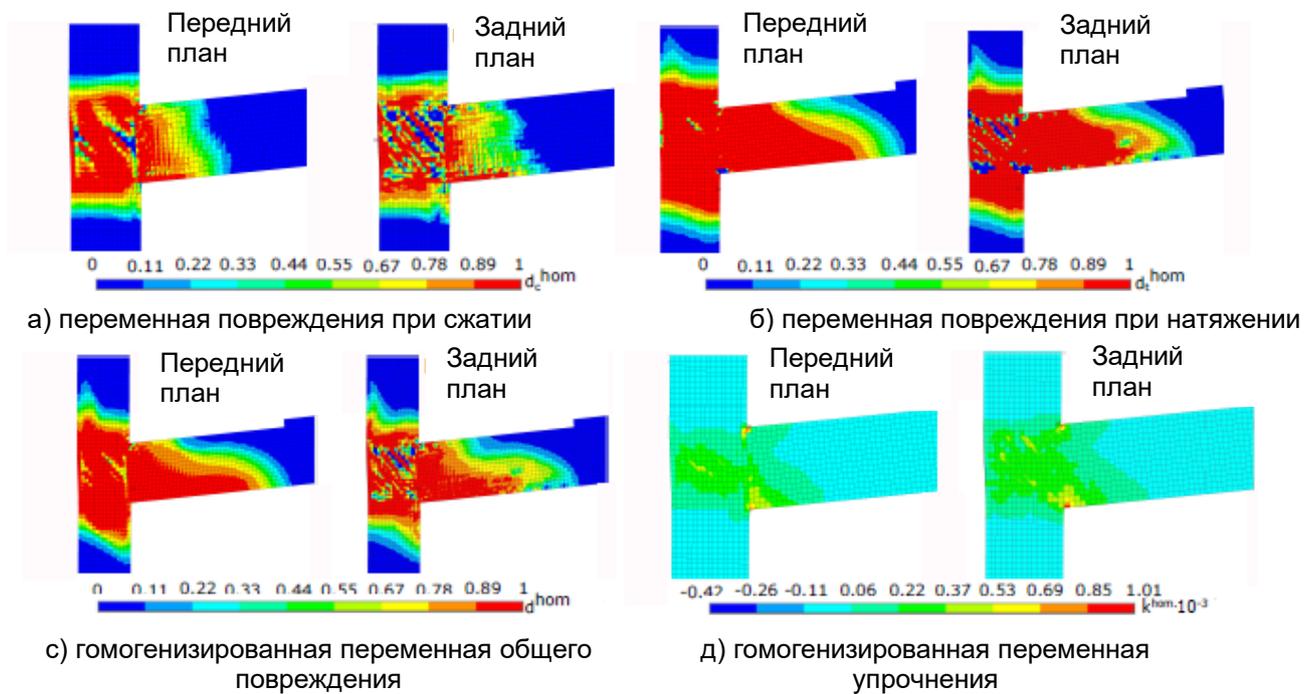


Таблица 5. Сравнение результатов изгибного анализа для восходящей нагрузки в числовом примере 2

Соединение	Первая растрескивающая нагрузка [кН]	Пиковая (размягчающая) Нагрузка [кН]	Предельная нагрузка [кН]	Максимальный прогиб в середине пролета [мм]
Solid65 [10]	6.10	21.80	22.00	20.00
Эксперимент [10]	5.90	14.20	18.00	31.00
Армированное	4.81	23.32	17.278	38.16
Неармированное	3.577	4.298	0.317	4.098

Передний план

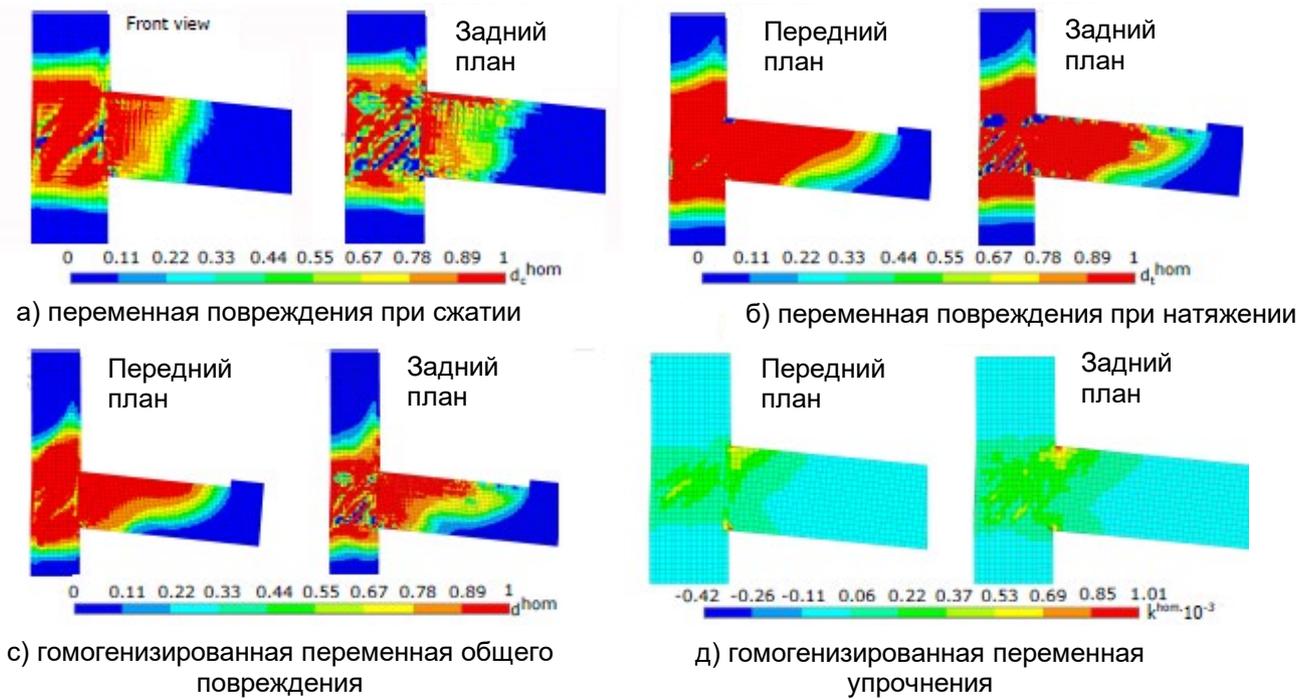


Рисунок 19. Переменные деформации для нисходящей нагрузки в числовом примере 2.

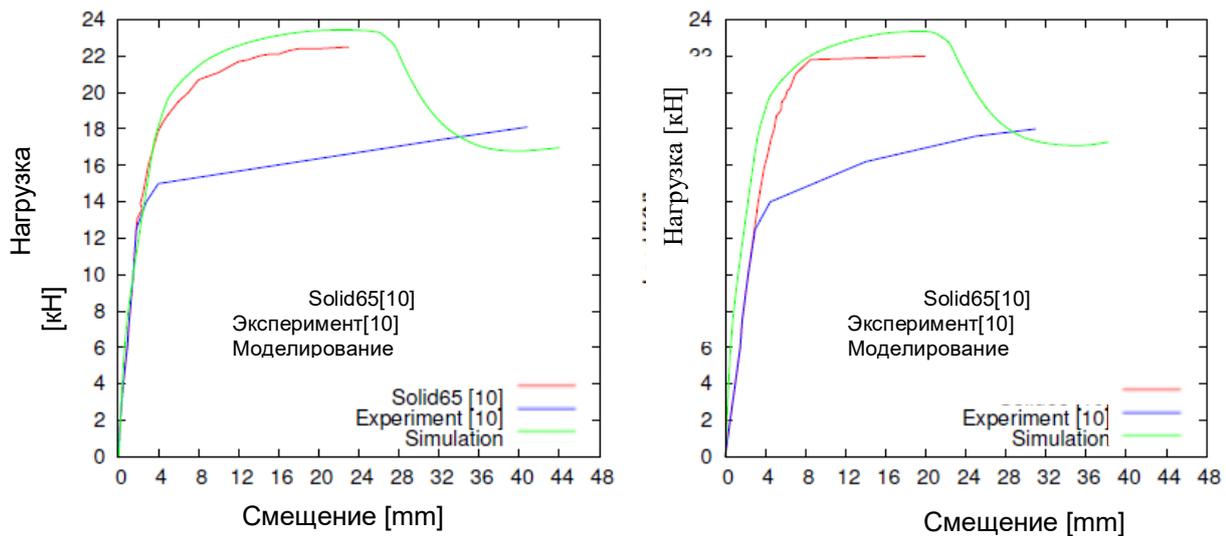


Рисунок 20. Смоделированная кривая нагрузки-смещения для нисходящей и восходящей нагрузки в цифровом образце 2

Таблица 6. Сравнение результатов изгибного анализа для нисходящей нагрузки в числовом примере 2

Соединение	Первая растрескивающая нагрузка [кН]	Пиковая (размягчающая) Нагрузка [кН]	Предельная нагрузка [кН]	Максимальный прогиб в середине пролета [мм]
Solid65 [10]	16.10	20.70	22.50	23.00
Эксперимент [10]	12.50	15.00	18.10	40.80
Армированное	17.46	23.419	16.977	44.03
Неармированное	3.549	4.266	0.421	2.808

4. Заключение

В случае моделирования соединений балки-колонны без поперечной арматуры можно прийти к выводу, что модель не чувствительна к направлению загрузки, но обеспечивает не столь точные результаты в сравнении с результатами лабораторных экспериментов. Средняя разница между смоделированными и

экспериментальными результатами составляет 20,98% для нисходящей нагрузки и 22,16% для восходящей. Но все же результаты хорошо соответствуют результатам, полученным при моделировании элементом SOLID65. Средняя разница между этими результатами составляет 2,23% для нисходящей нагрузки и 8,66% для восходящей. Сравнительно такие же результаты были получены при моделировании соединения балки-колонны с поперечной арматурой. В этом случае сближение с лабораторными данными составило 22,7% и 22,81% для нисходящей загрузки и восходящей загрузки соответственно. И разница при сравнении с результатами метода модели конструктивного материала Willam и Warnke составила 3,92% и 5,66%. Результаты, полученные из последнего числового примера, коррелируют не так хорошо с экспериментальным. Расхождение лабораторных экспериментом равно 20,77% и 14,08% по сравнению с результатами, полученными с использованием модели материала Уильяма и Варнке. Кроме того, следует отметить, что во всех смоделированных неармированных случаях разуплотнение было достигнуто. Но одна из трудностей при использовании модели заключается в том, что всегда необходимо калибровать модель, чтобы выбрать наиболее подходящие параметры расчета. Принимая во внимание все аспекты, указанные выше, можно сделать вывод, что предложенная микрополярная модель пластической деформации позволяет надлежащим образом описать разуплотнение бетона с армированием или без него и может использоваться для моделирования железобетонных конструкций. Тем не менее необходимы дальнейшие исследования для улучшения конвергенции с лабораторными экспериментами

Литература

- [1]. Chen X. and Bažant Z. (2014). Microplane damage model for jointed rock masses. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2014. №38. Pp. 1431-1452.
- [2]. Dawari V.B., Vesmawala G.R. (2014). Application of Nonlinear Concrete Model for Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams. *International Journal of Scientific and Engineering Research*. 2014. №9. Pp. 776-782.
- [3]. Hua Jianga, Jidong Zhaoa. (2015). Calibration of the continuous surface cap model for concrete masses. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2015. №97. Pp 1-19.
- [4]. Kala J., Hušek M. (2015). Useful Material Models of Concrete when High Speed Penetrating Fragments are Involved. *Mechanics, Energy, Environment*. 2015. №42. Pp 190-194.
- [5]. Putar F., Sorić J., Lesić T., Tonković Z. (2016). Modeling of damage phenomenon using strain gradient based finite elements. *Special workshop Multiscale Modeling of Heterogeneous Structures, MUMO 2016 Workshop Organizing Committee*. 2016. USB edition.
- [6]. Qinami A., Zreid I., Fleischhauer R., Kaliske M. (2015). Modelling of impact on concrete plates by use of the microplane approach *International Journal of Non-linear Mechanics*. 2015. №80 Pp 107-121.
- [7]. Zreid I. and Kaliske M. (2014). Regularization of microplane damage models using an implicit gradient enhancement. *International Journal of Solids and Structures*. 2014. №51. Pp 3480-3489.
- [8]. Zreid I. and Kaliske M. (2016). An implicit gradient formulation for microplane Drucker-Prager plasticity. *International Journal of Plasticity*. 2016. №83. Pp 252-272.
- [9]. Fahmy E.H., Shaheen Y.B., Tawab A.A., Abdelnaby A.M. (2014). Theoretical analysis and finite element modelling of composite ferrocement-concrete beams. *International journal of structural engineering*. 2014. No.2, Pp. 142-162. DOI: 10.1504/IJSTRUCTE.2014.060906
- [10]. Zidan M.K., Fayed M.N., Elhosiny A.M., Abdelgawad K.M., Orfy H.H. (2014). Modelling of damage patterns of rc concrete columns under demolition by blasting. *Wit transactions on the built environment*. 2014. Pp.95-111. DOI: 10.2495/SUS1140091

References

- [1]. Chen X. and Bažant Z. (2014). Microplane damage model for jointed rock masses. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2014. №38. Pp. 1431-1452.
- [2]. Dawari V.B., Vesmawala G.R. (2014). Application of Nonlinear Concrete Model for Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams. *International Journal of Scientific and Engineering Research*. 2014. №9. Pp. 776-782.
- [3]. Hua Jianga, Jidong Zhaoa. (2015). Calibration of the continuous surface cap model for concrete masses. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2015. №97. Pp 1-19.
- [4]. Kala J., Hušek M. (2015). Useful Material Models of Concrete when High Speed Penetrating Fragments are Involved. *Mechanics, Energy, Environment*. 2015. №42. Pp 190-194.
- [5]. Putar F., Sorić J., Lesić T., Tonković Z. (2016). Modeling of damage phenomenon using strain gradient based finite elements. *Special workshop Multiscale Modeling of Heterogeneous Structures, MUMO 2016 Workshop Organizing Committee*. 2016. USB edition.
- [6]. Qinami A., Zreid I., Fleischhauer R., Kaliske M. (2015). Modelling of impact on concrete plates by use of the microplane approach *International Journal of Non-linear Mechanics*. 2015. №80 Pp 107-121.
- [7]. Zreid I. and Kaliske M. (2014). Regularization of microplane damage models using an implicit gradient enhancement. *International Journal of Solids and Structures*. 2014. №51. Pp 3480-3489.
- [8]. Zreid I. and Kaliske M. (2016). An implicit gradient formulation for microplane Drucker-Prager plasticity. *International Journal of Plasticity*. 2016. №83. Pp 252-272.
- [9]. Fahmy E.H., Shaheen Y.B., Tawab A.A., Abdelnaby A.M. (2014). Theoretical analysis and finite element modelling of composite ferrocement-concrete beams. *International journal of structural engineering*. 2014. No.2, Pp. 142-162. DOI: 10.1504/IJSTRUCTE.2014.060906
- [10]. Zidan M.K., Fayed M.N., Elhosiny A.M., Abdelgawad K.M., Orfy H.H. (2014). Modelling of damage patterns of rc concrete columns under demolition by blasting. *Wit transactions on the built environment*. 2014. Pp.95-111. DOI: 10.2495/SUS1140091
- [11]. Варыгина М.П. Вычислительный алгоритм для моделирования микрополярных тонких пластин // Решетневские чтения. 2015. №19. С. 142-147
- [12]. Саркисян А.А., Саркисян С.О. Математическая модель динамики микрополярных упругих тонких балок. свободные

- [11]. Варыгина М.П. Вычислительный алгоритм для моделирования микрополярных тонких пластин // Решетневские чтения. 2015. №19. С. 142-147
- [12]. Саркисян А.А., Саркисян С.О. Математическая модель динамики микрополярных упругих тонких балок. свободные и вынужденные колебания // Физическая мезомеханика. 2015. №3. С. 25-31
- [13]. Никабидзе М.У. Некоторые варианты уравнений микрополярных теорий оболочек // Прикладная математика и математическая физика. 2015. №1. С. 101-118. DOI:10.18262/amp.2015.0101-07
- [14]. Варыгина М.П., Смолехо В.В. Численное моделирование микрополярных тонких пластин // Решетневские чтения. 2016. №20. С. 120-122
- [15]. Жамакочян К.А., Саркисян С.О. Метод конечных элементов в расчетах на изгиб микрополярных упругих тонких пластин // Вычислительная механика сплошных сред. 2016. №3. С. 375-383. DOI: 10.7242/1999-6691/2016.9.3.31
- [16]. Варыгина М.П. Численное моделирование микрополярных цилиндрических оболочек // Решетневские чтения. 2017. №21. С. 8-11
- [17]. Илюхин А.А., Попов А.К. Микрополярная модель деформации естественно-закрученного цилиндрического тела // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. №4. С. 105-111
- [18]. Шейдаков Д.Н., Михайлова И.Б. Бифуркация равновесия микрополярного стержня из функционально-градиентного материала в условиях комбинированного нагружения // Вестник Южного научного центра РАН. 2014. №3. С.3-9.
- [19]. Васильев А.А. К задаче символьного построения моделей тел Коссера // Вестник Тверского Государственного Университета. Серия: прикладная математика. 2015. №4. С.17-25.
- [20]. Зеленина А.А., Зубов Л.М. Точные решения нелинейной микрополярной теории упругости для сжимаемого материала // Труды международной научно-практической конференции "Транспорт-2014".2014. С.179.
- [21]. Poh L., Peerlings R., Geers M. and Swaddiwudhipong S. An implicit tensorial gradient plasticity model-formulation and comparison with a scalar gradient model. (2011). International Journal of Solids and Structures. 2011. №48. Pp 2595-2604.
- [22]. Dahmani L., Khennane A. and Kaci S. (2010). Crack identification in reinforced concrete beams using ansys software. Strength of Materials. No.42, 2010, Pp. 232-240.
- [23]. Muller W.H., Vilchevskaya E.N. (2017). Micropolar theory from the viewpoint of mesoscopic and mixture theories // Physical mesomechanics. 2017. №3. Pp. 25-39
- [24]. Адилходжаев А.И., Махаматалиев И.М., Шаумаров С.С. Теоретические аспекты структурно-имитационного моделирования макроструктуры композиционных строительных материалов // Научно-технический вестник брянского государственного университета. 2018. №3. С. 312-320
- [25]. Valiev S.N., Ovchinnikov I.G., Vasilyev Y.E., Tao C. Model of reinforced concrete structure deformation under combined effect carbonation and chloride corrosion// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. №3
- и вынужденные колебания // Физическая мезомеханика. 2015. №3. С. 25-31
- [13]. Никабидзе М.У. Некоторые варианты уравнений микрополярных теорий оболочек // Прикладная математика и математическая физика. 2015. №1. С. 101-118. DOI:10.18262/amp.2015.0101-07
- [14]. Варыгина М.П., Смолехо В.В. Численное моделирование микрополярных тонких пластин // Решетневские чтения. 2016. №20. С. 120-122
- [15]. Жамакочян К.А., Саркисян С.О. Метод конечных элементов в расчетах на изгиб микрополярных упругих тонких пластин // Вычислительная механика сплошных сред. 2016. №3. С. 375-383. DOI: 10.7242/1999-6691/2016.9.3.31
- [16]. Варыгина М.П. Численное моделирование микрополярных цилиндрических оболочек // Решетневские чтения. 2017. №21. С. 8-11
- [17]. Илюхин А.А., Попов А.К. Микрополярная модель деформации естественно-закрученного цилиндрического тела // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. №4. С. 105-111
- [18]. Шейдаков Д.Н., Михайлова И.Б. Бифуркация равновесия микрополярного стержня из функционально-градиентного материала в условиях комбинированного нагружения // Вестник Южного научного центра РАН. 2014. №3. С.3-9.
- [19]. Васильев А.А. К задаче символьного построения моделей тел Коссера // Вестник Тверского Государственного Университета. Серия: прикладная математика. 2015. №4. С.17-25.
- [20]. Зеленина А.А., Зубов Л.М. Точные решения нелинейной микрополярной теории упругости для сжимаемого материала // Труды международной научно-практической конференции "Транспорт-2014".2014. С.179.
- [21]. Poh L., Peerlings R., Geers M. and Swaddiwudhipong S. An implicit tensorial gradient plasticity model-formulation and comparison with a scalar gradient model. (2011). International Journal of Solids and Structures. 2011. №48. Pp 2595-2604.
- [22]. Dahmani L., Khennane A. and Kaci S. (2010). Crack identification in reinforced concrete beams using ansys software. Strength of Materials. No.42, 2010, Pp. 232-240.
- [23]. Muller W.H., Vilchevskaya E.N. (2017). Micropolar theory from the viewpoint of mesoscopic and mixture theories // Physical mesomechanics. 2017. №3. Pp. 25-39
- [24]. Адилходжаев А.И., Махаматалиев И.М., Шаумаров С.С. Теоретические аспекты структурно-имитационного моделирования макроструктуры композиционных строительных материалов // Научно-технический вестник брянского государственного университета. 2018. №3. С. 312-320
- [25]. Valiev S.N., Ovchinnikov I.G., Vasilyev Y.E., Tao C. Model of reinforced concrete structure deformation under combined effect carbonation and chloride corrosion// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. №3

Контактная информация

1.* +79531711053, olya_perceva@mail.ru (Перцева Ольга Николаевна, инженер)

Contact information

1.* +79531711053, olya_perceva@mail.ru (Pertseva Olga, engineer)

-
- | | |
|---|--|
| 2. +79092499660, ekat.pereladowa@yandex.ru (Переладова Екатерина Игоревна, студент) | 2. +79092499660, ekat.pereladowa@yandex.ru (Pereladova Ekaterina, Student) |
| 3. +79117333721, martynovgleb@rambler.ru (Мартынов Глеб Владимирович, студент) | 3. +79117333721, martynovgleb@rambler.ru (Martynov Gleb, Student) |
| 4. +79110270212, 12dm02@rambler.ru (Монастырева Дарья Евгеньевна, студент) | 4. +79110270212, 12dm02@rambler.ru (Monastyreva Daria, Student) |
| 5. +79818217520, zaur25k@gmail.com (Дауров Заур Сосланович, студент) | 5. +79818217520, zaur25k@gmail.com (Daurov Zaur, Student) |
| 6. +79811411560, tikhonovrs96@mail.ru (Тихонов Роман Сергеевич, студент) | 6. +79811411560, tikhonovrs96@mail.ru (Tikhonov Roman, Student) |
-

© Перцева О.Н., Переладова Е.И., Мартынов Г.В., Монастырева Д.Е., Дауров З.С., Тихонов Р.С., 2019