

УДК: 624.012  
DOI: 10.52409/20731523\_2023\_3\_122  
EDN: JKTSTG



## Численное исследование напряженно-деформированного состояния в зоне контакта бетона и арматуры при статическом нагружении

Илшат Т. Мирсаяпов<sup>1</sup>, Р.И. Минзянов<sup>1</sup>, А.М. Зайнутдинов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Казанский государственный архитектурно-строительный университет  
г. Казань, Российская Федерация

<sup>2</sup> ПИ Союзхимпромпроект, г. Казань, Российская Федерация

**Аннотация:** метод конечных элементов используется для имитации поведения зоны контакта «бетон-арматура» при испытании на отрыв одиночного стержня, заделанного в бетонный блок. В предлагаемой модели в зону контакта вводятся элементы, моделирующие деформации арматуры и окружающего бетона и имитирующие перенос нагрузки. Такой подход позволяет точно моделировать нелинейный отклик при высоких ограничивающих давлениях. Цель исследования: при заданных геометрических, физико-механических характеристиках выбрать наиболее подходящие теории прочности материалов для использования созданной модели при решении научных, технических и инженерных задач. Для достижения поставленной цели необходимо выполнить ряд задач: создать компьютерную модель, задать ей необходимые характеристики материалов для корректной работы; выполнить верификационный расчет, сравнить его с существующими экспериментальными и теоретическими исследованиям; сделать вывод о работоспособности модели и областях ее применения.

**Результаты.** Предложена модель в программном комплексе Ansys, основанная на методе конечных элементов. При разработке модели учитывался опыт отечественных и зарубежных ученых и исследователей в части выбора конечных элементов. Модель учитывает реальные геометрические, механические, физические параметры объектов. Модель позволяет задать различную геометрию и физико-механические характеристики материалов. Получены результаты испытания 9 образцов. Приводится сравнение конечно-элементной модели с натурными экспериментами.

**Выводы.** В результате сравнения установлено, расчет по предложенной численной модели хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований других авторов. Данную модель рекомендуется использовать для определения напряжений и перемещений в контактной зоне «бетон-арматура» для решения научных и инженерных задач.

**Ключевые слова:** железобетон; сцепление арматуры с бетоном; метод конечных элементов; модель пластичности повреждений бетона 2 (CDPM2); испытание на отрыв

**Для цитирования:** Мирсаяпов Илшат Т., Минзянов Р.И., Зайнутдинов А.М. Численное исследование напряженно-деформированного состояния в зоне контакта бетона и арматуры при статическом нагружении // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с.122-134, DOI: 10.52409/20731523\_2023\_3\_122, EDN: JKTSTG

# Numerical study of the stress-strain state in the contact zone of concrete and reinforcement under static loading

Ilshat T. Mirsayapov<sup>1</sup>, R.I. Minzyanov<sup>1</sup>, A.M. Zainutdinov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kazan State University of Architecture and Engineering  
Kazan, Russian Federation

<sup>2</sup>DI Soyuzkhimpromproekt, Kazan, Russian Federation

**Abstract:** The Finite Element Method is used to simulate the behavior of the concrete-reinforcement contact zone when testing the pull-out of a single bar embedded in a concrete block. In the proposed model, elements are introduced into the contact zone, simulating deformations of reinforcement and surrounding concrete and simulating load transfer. This approach allows accurate modeling of the nonlinear response at high confining pressures. The purpose of the study: for given geometric, physical and mechanical characteristics, to choose the most appropriate theories of the strength of materials for using the created model in solving scientific, technical and engineering problems. To achieve this goal, it is necessary to perform a number of tasks: create a computer model, set the necessary characteristics of materials for it to work correctly; perform a verification calculation, compare it with existing experimental and theoretical studies; make a conclusion about the performance of the model and the areas of its application.

*Results.* We propose a model in the Ansys software package based on the finite element method. When developing the model, the experience of domestic and foreign scientists and researchers in terms of the choice of finite elements was taken into account. The model takes into account the real geometric, mechanical, physical parameters of objects. The model allows you to set different geometry and physical and mechanical characteristics of materials. The test results of 9 samples were obtained. A comparison of the finite element model with full-scale experiments is given.

*Conclusions.* As a result of the comparison, it was established that the calculation by the proposed numerical model is in good agreement with the results of experimental studies by other authors. This model is recommended to be used to determine stresses and displacements in the contact zone "concrete-reinforcement" for solving scientific and engineering problems.

**Key words:** reinforced concrete; adhesion of reinforcement to concrete; finite element method; concrete damage plasticity model 2 (CDPM2); pull-out test

**For citation:** Mirsayapov Ilshat T., Minzyanov R.I., Zainutdinov A.M. Numerical study of the stress-strain state in the contact zone of concrete and reinforcement under static loading // News KSUAE, 2023, № 3(65), p.122-134, DOI: 10.52409/20731523\_2023\_3\_122, EDN: JKTSTG

## 1. Введение

Железобетон представляет собой композитный конструкционный материал, состоящий из арматурной стали и бетона. Для совместной работы требуется адекватная передача усилия между бетоном и арматурой, которая называется сцеплением. Стандартный способ исследования поведения сцепления, включая механизм передачи нагрузки в зоне контакта, факторы, влияющие на прочность контакта, и зависимость силы сцепления (или напряжения) от проскальзывания, заключается в проведении теста на отрыв.

Испытание на выдергивание проводится таким образом, что одиночная стержневая арматура, заделанная в бетонный цилиндр или призму, вытягивается в осевом направлении до разрушения испытуемого образца.

Конечно-элементное моделирование часто используется в дополнение к натурным экспериментам для исследования поведения систем и компонентов. Для железобетонных компонентов и систем, подвергающихся нагрузке, точное моделирование реакции требует точного описания зоны контакта (реакции зоны соединения).

Существует несколько подходов к моделированию зоны контакта бетона и арматуры. В обзоре и сравнении методов исследования характеристик сцепления арматуры с бетоном, автор в работе [1] приходит к выводу, что наиболее предпочтительным методом для исследования характеристик сцепления является beam-end test (исследование балок), поскольку данный метод позволяет в точности моделировать напряженно-деформированное состояние (НДС) бетона зоны заделки и корректно учитывать влияние на прочность сцепления таких факторов как интенсивность поперечного армирования, толщина защитного слоя, длина заделки и пр. Вместе с тем, использование данного метода связано с наибольшими технологическими трудностями при проведении испытания.

В процессе сопротивления стальной стержневой профилированной арматуры возникают последовательно три стадии: разрушение адгезионных связей, срез бетонных шпонок под арматурными выступами и разрушение образца (вытягивание арматуры или раскол призмы). Величину сцепления цементного геля между арматурой и бетоном определяли в работе [2]. Моделирование выполнялось в программном комплексе (ПК) Ansys 19.0 Workbench. В результате исследования было установлено, что адгезия не оказывает существенное влияние на несущую способность заделки, но может оказывать влияние на величину смещения в тех случаях, когда нагрузка не превышает 40% от разрушающей.

Интересный подход к моделированию прочности сцепления арматуры с бетоном авторы предложили в работе [3]. Исследователи предложили модель на основе искусственной нейронной сети. Данный метод может быть использован при обработке результатов численных и экспериментальных исследований.

В работе [4] сцепление арматуры с бетоном моделируются в ПК Ansys в виде многпустотной плиты перекрытия, а в работе [5] – в ПК Лира САПР в виде монолитной железобетонной плиты перекрытия существующего здания. Результаты расчетов по данным исследованиям согласуются с результатами экспериментов.

Зависимость прочности сцепления стальной арматуры с бетоном при наличии в нем определенных минеральных добавок исследовалась в работе [6]. Опытные результаты показали, что главным образом прочность сцепления между арматурой и цементным камнем зависит от коррозионной стойкости арматуры. Добавление минеральных добавок к бетону может увеличить прочность сцепления в 1,7 раз по сравнению с бетонами без добавок. Это может быть особенно важно для конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах, к примеру, морские гидротехнические конструкции.

Большое внимание проблемам сцепления арматуры с бетоном уделяется также и за рубежом. Такой интерес связан с огромным потенциалом данной области, который позволяет испытывать новые конструкции и материалы без создания экспериментальных образцов, что экономит материальные, финансовые ресурсы и время.

Так, авторским коллективом из Университета Хохай, Китай, проводилась численная оценка связей сцепление-скольжение для естественно корродированных арматурных стержней в бетонных балках [7]. Применение метода конечных элементов показало хорошие результаты сходимости. Основным выводом этого исследования было то, что для адекватного описания структурного поведения решающими факторами были потеря связи при текучести и асимметрия развития текучести.

Сравнение сцепления стальной и полимерной композитной арматуры выполнено в работе [8]. При помощи ПК Ansys авторами сделан вывод, что сцепление полимерной арматуры с бетоном ниже, чем стальной. Предложены способы увеличения сопротивления заделки.

Исследования [9] и [10] также представляют большой интерес, поскольку наряду с численным моделированием выполнялось и экспериментальное. Результаты исследования показали, что наличие ребер приводит к среднему увеличению напряжений (примерно 33–67%), а введение возможного производственного брака вызывает резкое увеличение напряженности (примерно в 2–3,3 раза превышает приложенное среднее растягивающее напряжение).

Большое внимание поведения бетона на границе раздела сред «арматура-бетон» уделено в работе [11]. Авторами предложены две модели контакта, каждая из которых обладает своими преимуществами и недостатками.

В работе [12] представлена новая модель определения сцепления арматуры с бетоном. Модель основана на теории раскалывания Залесова, Сахарова, Старчевского. Методика и модель имеют хорошую сходимость с существующими теоретическими и экспериментальными исследованиями, и рекомендуется для оценки прочности сцепления.

Многими авторами проводились экспериментальные исследования. Многообразие форм, размеров, видов профиля арматуры, классов бетона и стали вызывает сложности в классификации всех методов испытания. Наиболее распространенным видом экспериментального исследования является вытягивание арматуры, заделанной в бетонный блок тем или иным образом. Среди таких исследований можно выделить эксперимент А.А. Квасникова [13]. Им проводились эксперименты по вытягиванию центрально расположенных стержней из бетонных блоков в виде усеченной пирамиды. Высота 400 мм, сторона верхнего основания 150 мм, нижнего – 200 мм. Пирамиды были изготовлены в жестком железобетонном массиве размерами 1000x3000x400 мм. Выдергивание стержней проводилось гидродомкратом мощностью до 75 т. В результате были получены аппроксимирующие зависимости между сцеплением и параметрами арматурного профиля.

В работе [14] приведены экспериментальные методы исследования сцепления арматуры с бетоном. Большой интерес также представляют работы [15]-[16], в которых приводится модифицированная диаграмма сжатия бетона, позволяющая получать наиболее приближенные значения численных экспериментов к реальным конструкциям.

Как видно из анализа состояния вопроса, одним из основных факторов, влияющих на адекватность работы модели, является зона контакта «сталь-бетон». Вопрос по-прежнему остается открытым, какой же способ моделирования сцепления наиболее близок к сцеплению в реальных конструкциях.

Таким образом, целью настоящего исследования является определение геометрических, физико-механических характеристик численной модели, а также выбор наиболее подходящих теорий прочности материалов для использования созданной модели при решении научных, технических и инженерных задач. В рамках данной работы необходимо выполнить следующие задачи: создать компьютерную модель, задать ей необходимые характеристики материалов для корректной работы; выполнить верификационный расчет, сравнить его с существующими экспериментальными и теоретическими исследованиями; сделать вывод о работоспособности модели и областях ее применения.

## 2. Материалы и методы

Для решения задачи метода конечных элементов выбран ПК ANSYS. Для анализа принимается тип задачи Static Structural (статический прочностной расчета). Статический прочностной анализ позволяет определить перемещения, напряжения, деформации и внутренние усилия в конструкциях или элементах, от нагрузок, не обладающих значительной инерцией или динамикой. Предполагается, что нагрузки и реакция не имеют мгновенного изменения во времени.

Для моделирования бетона и арматуры используется пространственный 8-узловой конечный элемент SOLID185. SOLID185 используется для трехмерного моделирования твердых тел. Он определяется восемью узлами, имеющими три степени свободы в каждом узле: перемещения по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ . Элемент обладает пластичностью, гиперэластичностью, жесткостью при напряжении, ползучестью, большим прогибом и большой деформацией. Он также обладает смешанной формульной способностью для моделирования деформаций почти несжимаемых эластопластичных материалов и полностью несжимаемых гиперэластичных материалов (см. рис. 1).

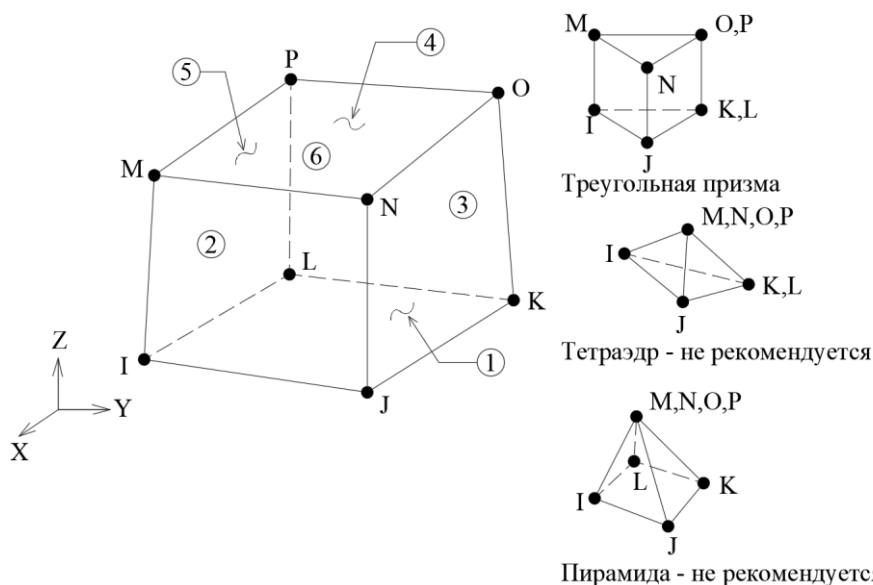


Рис. 1. Геометрия однородного твердого тела SOLID185 (иллюстрация авторов).  
 Fig. 1. Geometry of a homogeneous solid SOLID185 (illustration by the authors).

Свойства материалов принимаются по СП 63.13330 в виде кусочно-линейных зависимостей. Для бетона будем использовать трехлинейную диаграмму (пример диаграммы для бетона В25 на рис. 2), для арматуры – двухлинейную диаграмму Прандтля (пример диаграммы для арматуры А400 на рис. 3). На диаграммах показаны зависимости напряжений в материалах от относительных деформаций.

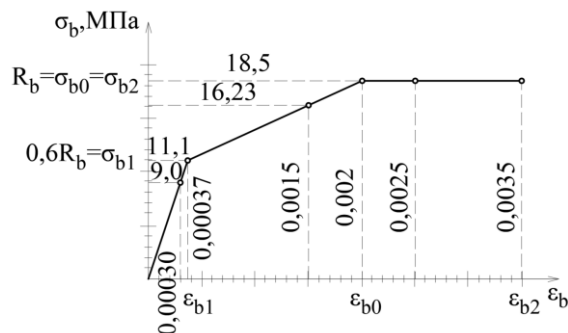


Рис. 2: Диаграмма состояния бетона В25 по СП63.13330 (иллюстрация авторов).  
 Fig. 2: Diagram of the state of concrete B25 according to SP63.13330 (illustration by the authors).

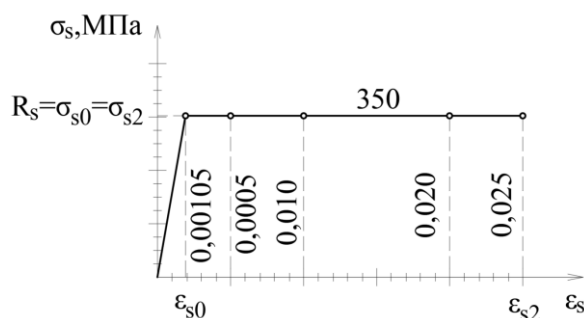


Рис. 3. Диаграмма состояния арматуры А400 по СП63.13330 (иллюстрация авторов).  
 Fig. 3. A400 valve state diagram according to SP63.13330 (illustration by the authors).

В качестве расчётных моделей принимаются поверхности текучести Мизеса и Друкера-Прагера (см. рис 4).

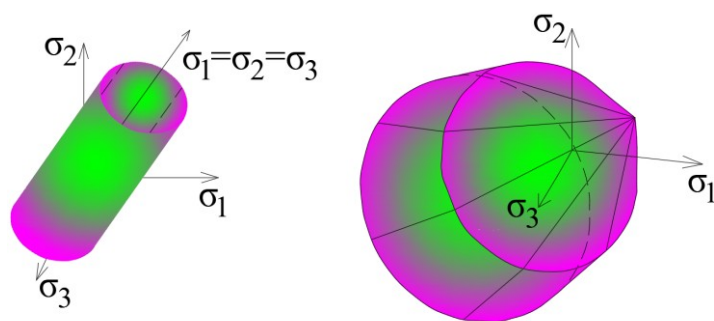


Рис. 4. Поверхности текучести Мизеса и Друкера-Прагера (иллюстрация авторов).

Fig. 4. Mises and Drucker-Prager yield surfaces (illustration by the authors).

Критерий прочности по Мизесу:

$$f(\sigma, \sigma_y) = \sigma_e - \sigma_y = 0, \tag{1}$$

по Друкеру-Прагеру для растяжения и сжатия соответственно

$$f_{DPt} = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} + \beta_t \cdot \sigma_m - \sigma_{yt}, \tag{2}$$

$$f_{DPr} = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} + \beta_c \cdot \sigma_m - \sigma_{yc} \cdot \Omega_c. \tag{3}$$

Для моделирования контакта используются элементы CONTA174 и TARGE170. CONTA174 используется для создания контакта и скольжения между трехмерными целевыми поверхностями и деформируемой поверхностью, определяемой этим элементом. Элемент применим для трехмерного структурного и связанного анализа контактов. Может использоваться как для парного, так и для общего контакта. TARGE170 используется для представления различных трехмерных целевых поверхностей для соответствующих контактных элементов (CONTA174). Сами контактные элементы перекрывают твердое тело, оболочку или линейные элементы, описывающие границу деформируемого тела, и потенциально находятся в контакте с целевой поверхностью, определенной в TARGE170.

### 3. Результаты и обсуждение

Для анализа НДС в зоне контакта бетона и арматуры были созданы 9 образцов с различными характеристиками (Таблица 1).

Таблица 1

Характеристики образцов для численного исследования

№ п/п	Размеры сечения, мм	Высота, мм	Длина заделки, мм	Класс арматуры	Диаметр, мм	Класс бетона
1	Ø200	300	200	A400	12	B25
2	Ø250	300	200	A400	12	B30
3	Ø250	300	200	A400	12	B35
4	Ø300	350	250	A400	14	B25
5	Ø300	350	250	A400	14	B30
6	Ø300	350	250	A400	14	B35
7	Ø350	400	300	A400	16	B25
8	Ø350	400	300	A400	16	B30
9	Ø350	400	300	A400	16	B35

Размеры периодического профиля, принятые по ГОСТ 5781, представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Размеры профилей в мм

$d_n$	$d$	$h$	$d_l$	$h_l$	$l$	$b$	$b_l$	$r$
12	11,0	1,25	13,5	1,25	7	1,0	2,0	1,9
14	13,0	1,25	15,5	1,25	7	1,0	2,0	1,9
16	15,0	1,5	18	1,5	8	1,5	2,0	2,2

Ниже (рис. 5-7) представлены изополя распределения главных напряжений в бетонном образце №1.

Эквивалентные напряжения (Equivalent (von-Mises) Stress) определяются по формулам (2), (3).

Если для главных напряжений справедливо неравенство  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ , то Maximum Principal отображает главное напряжение  $\sigma_1$ , Middle Principal –  $\sigma_2$ , Minimum Principal –  $\sigma_3$ .

Полное перемещение (Total deformation) определяется из условия:

$$u = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}. \quad (4)$$

Касательные напряжения (Maximum Shear) рассчитываются по формуле:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}. \quad (5)$$

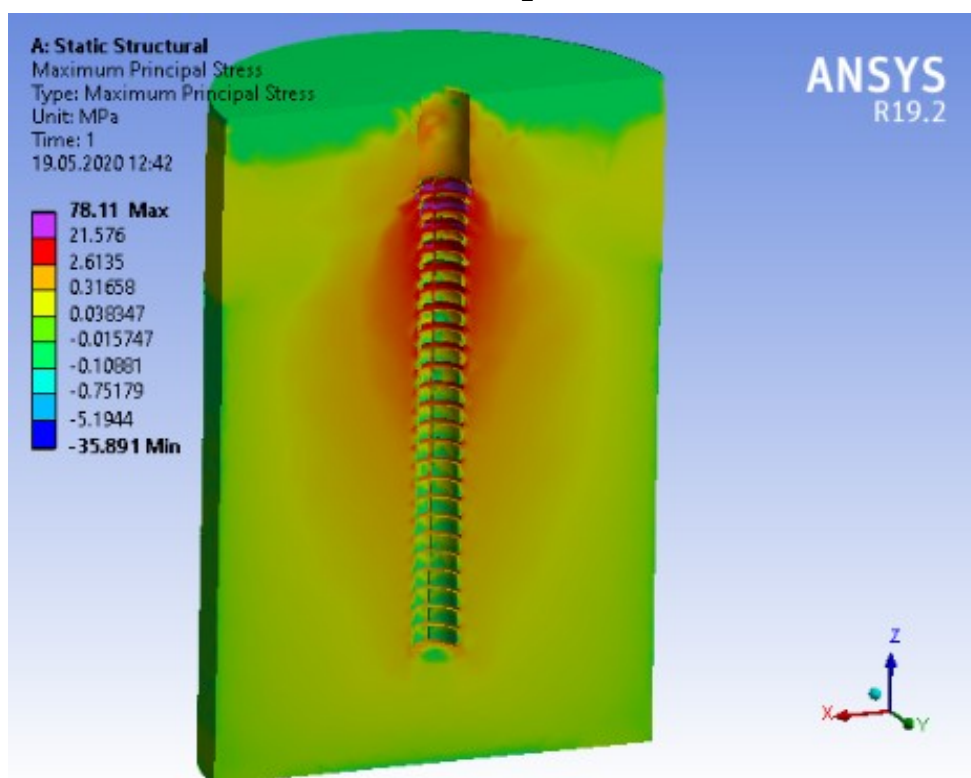


Рис. 5. Распределение главных напряжений  $\sigma_1$  (МПа) в бетоне для образца №1 (иллюстрация авторов).

Fig. 5. Distribution of principal stresses  $\sigma_1$  (MPa) in concrete for sample №1 (illustration by the authors).

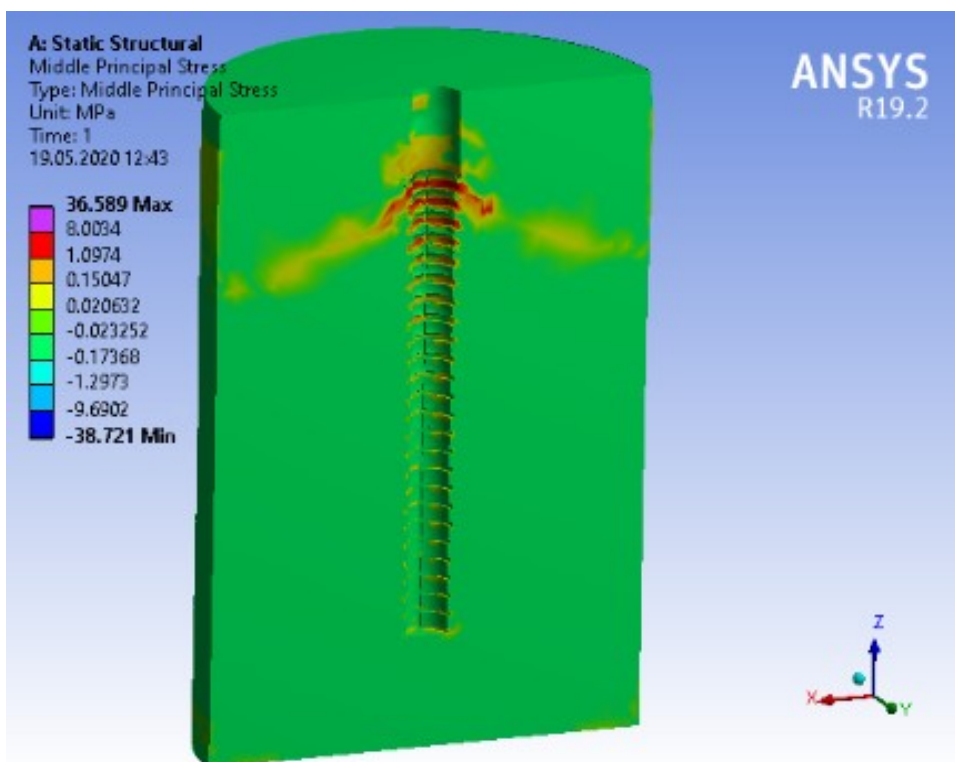


Рис. 6. Распределение главных напряжений  $\sigma_2$  (МПа) в бетоне для образца №1 (иллюстрация авторов).

Fig. 6. Distribution of principal stresses  $\sigma_2$  (MPa) in concrete for sample №1 (illustration by the authors).

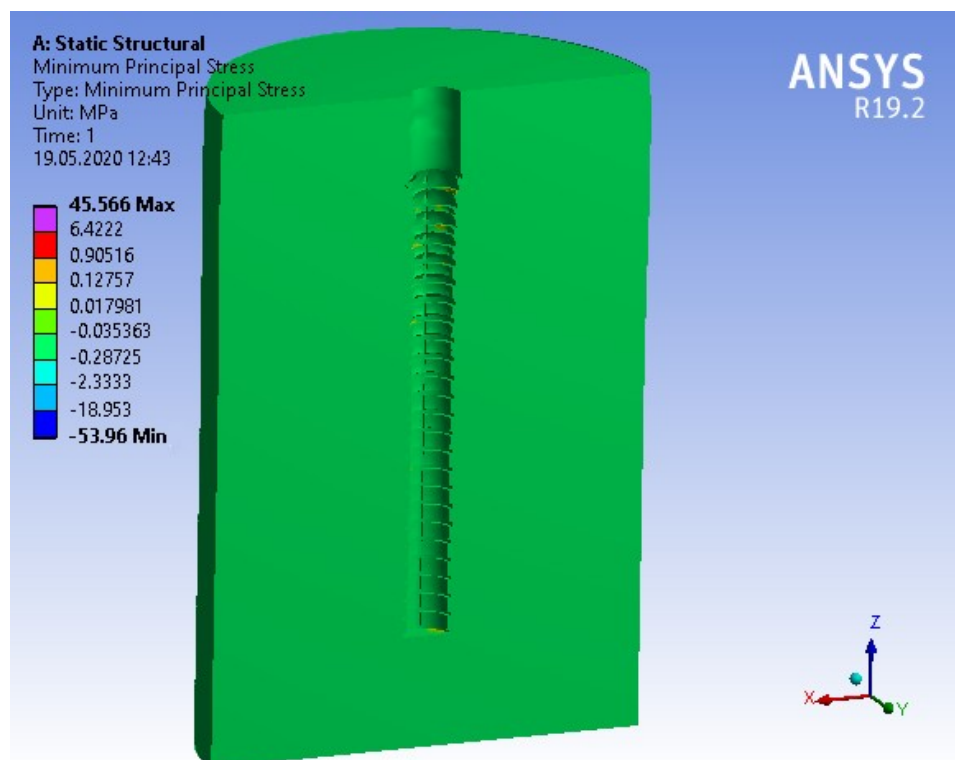


Рис. 7. Распределение главных напряжений  $\sigma_3$  (МПа) в бетоне для образца №1 (иллюстрация авторов).

Fig. 7. Distribution of principal stresses  $\sigma_3$  (MPa) in concrete for sample №1 (on the right - enlarged) (illustration by the authors).

На рисунках 8-10 представлены результаты расчета образцов, приведенных в таблице 1.



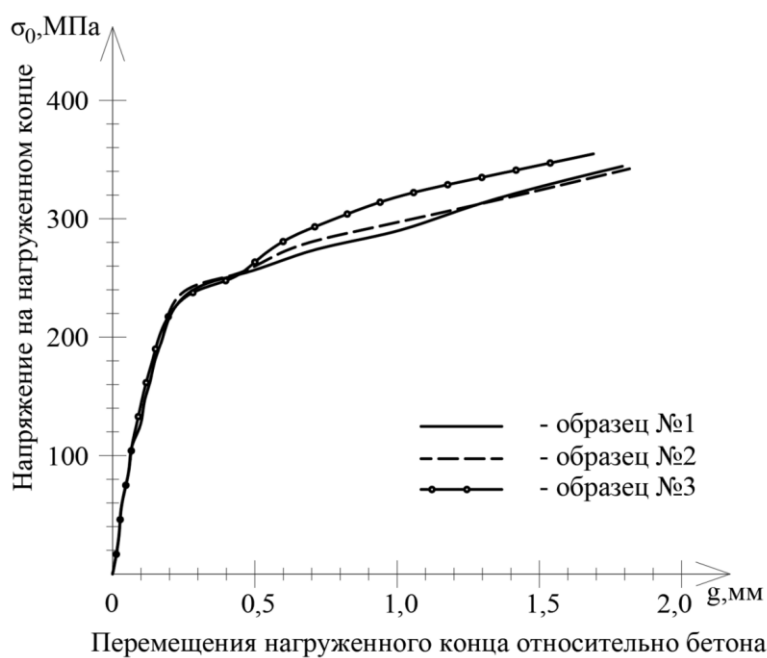


Рис. 8. Зависимость напряжений в арматурном стержне от перемещений нагруженного конца стержня (образцы 1÷3) (иллюстрация авторов).  
 Fig. 8. Dependence of stresses in the reinforcing bar on the displacements of the loaded end of the bar (samples 1÷3) (illustration by the authors).

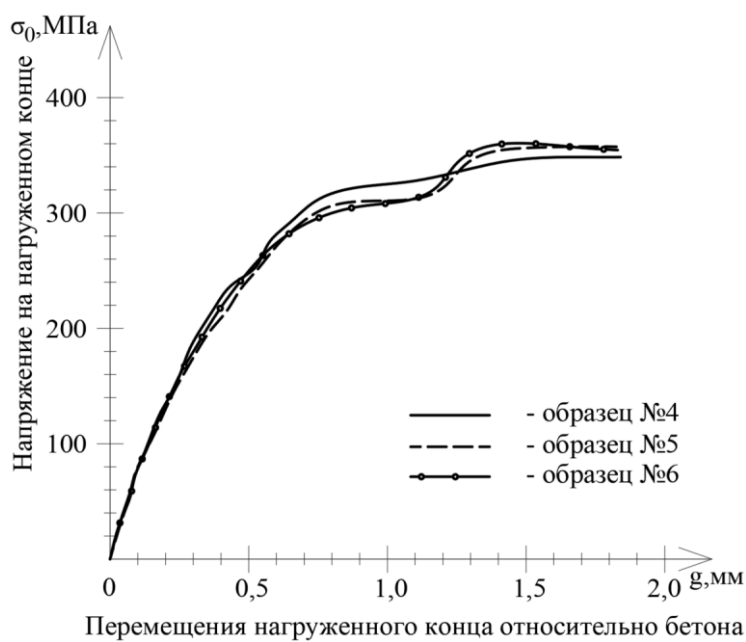


Рис. 9. Зависимость напряжений в арматурном стержне от перемещений нагруженного конца стержня (образцы 4÷6) (иллюстрация авторов).  
 Fig. 9. Dependence of stresses in the reinforcing bar on the displacements of the loaded end of the bar (samples 4÷6) (illustration by the authors).

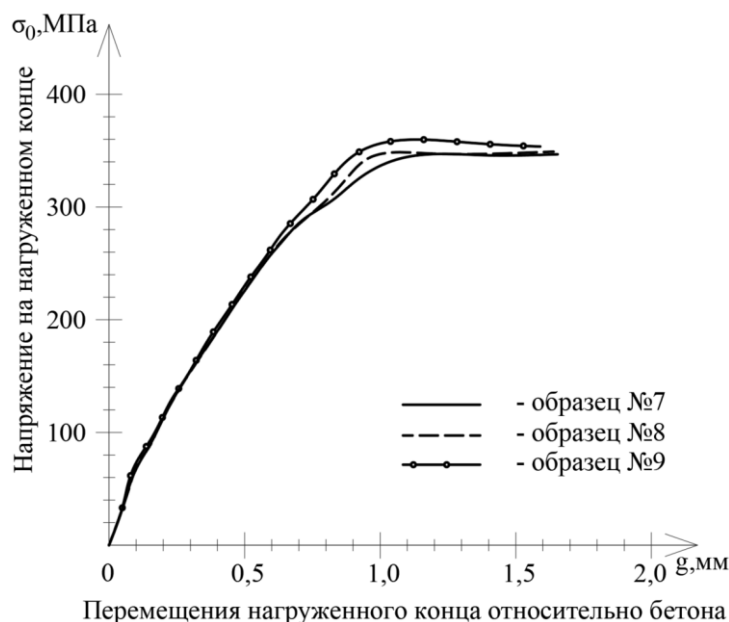


Рис. 10. Зависимость напряжений в арматурном стержне от перемещений нагруженного конца стержня (образцы 7÷9) (иллюстрация авторов).

Fig. 10. Dependence of stresses in the reinforcing bar on the displacements of the loaded end of the bar (samples 7÷9) (illustration by the authors).

По данным, представленным на рисунках 8-10, можно провести аналогию с зависимостями, полученными в работах [12], [13], что может говорить о сходимости результатов настоящего исследования с работами других авторов.

По рисункам 8-10 отчетливо видны участки упругой работы заделки арматуры в бетоне. Начиная с напряжений 250-300 МПа при перемещениях конца стержня на 0,5-0,7 мм начинается участок пластической работы. Это вызвано деформациями бетонных консолей под выступами арматурного стержня. После пластической работы материала наступает разрушение, ниспадающая ветвь графика характеризует вырыв арматуры из бетонного блока.

Для сравнения результатов расчета выполняется их сравнению с экспериментальными данными, полученными в работе [13]. Также сравнение ведется с теорией, предложенной в работе [12].

Сравнение производится по формуле:

$$\delta = \frac{\sigma_{s0, \text{теор}}}{\sigma_{s0, \text{ANSYS}}}, \quad (6)$$

Таблица 3

Сравнение результатов расчета и экспериментов

	$\sigma_{s0}$ , МПа	$g_0$ , мм
Теория [12]	347	1,52
ANSYS	355	1,59
Эксперимент А.А. Квасникова [13]	353	1,57
<b>Теория/эксперимент А.А. Квасникова</b>	<b>0,9830</b>	<b>0,9681</b>
<b>ANSYS/эксперимент А.А. Квасникова</b>	<b>1,0057</b>	<b>1,0127</b>

Общая картина, описывающая напряженно-деформированное состояние в зоне контакта бетона и арматуры, схожа для разработанной численной модели, теории и эксперимента А.А. Квасникова.

Можно заключить, что предложенная модель хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований и с теорией.

#### 4. Заключение

1. Предложена модель в ПК Ansys, основанная на методе конечных элементов. При разработке модели учитывался опыт других ученых и исследователей в части выбора

элементов. Модель учитывает реальные геометрические, механические, физические параметры объектов.

2. Модель позволяет задать различную геометрию и физико-механические характеристики материалов. Получены результаты испытания 9 образцов.

3. В результате сравнения установлено, расчет по предложенной численной модели хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований других авторов, а также с теорией.

4. Модель подходит при решении научных, технических и инженерных задач при необходимости оценки уровня напряжений и перемещений в зоне контакта «бетон-арматура».

#### Список литературы / References

1. Стахов, Д. О. Обзор и сравнение методов исследования характеристик сцепления арматуры с бетоном / Д. О. Стахов // Молодой ученый. – 2021. – № 23(365). – С. 62-68. – EDN VWFIKC [Stakhov, D. O. Review and comparison of methods for studying the characteristics of adhesion of reinforcement with concrete / D. O. Stakhov // Young scientist. - 2021. - No. 23 (365). - P. 62-68. – EDN VWFIKC].
2. Аналитическое исследование величины сцепления цементного геля между арматурой и бетоном / А. Н. Николукин, В. П. Ярцев, С. А. Мамонтов [и др.] // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2020. – Т. 26. – № 3. – С. 483-495. – DOI 10.17277/vestnik.2020.03.pp.483-495. – EDN KIOXJK [Analytical study of the adhesion of cement gel between reinforcement and concrete / A. N. Nikoluyukin, V. P. Yartsev, S. A. Mamontov [et al.] // Bulletin of the Tambov State Technical University. - 2020. - T. 26. - No. 3. - S. 483-495. – DOI 10.17277/vestnik.2020.03.P.483-495. – EDN KIOXJK].
3. Моделирование прочности сцепления арматуры с бетоном на основе искусственной нейронной сети / А. Н. Николукин, В. П. Ярцев, Б. А. Бондарев, А. О. Корнеева // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2019. – № 2(54). – С. 11-20. – DOI 10.25987/VSTU.2019.54.2.001. – EDN ISNDAO [Nikoliukin A. N., Yartsev V. P., Bondarev B. A., Korneeva A. O. Modeling the adhesion strength of reinforcement to concrete based on an artificial neural network // Scientific Journal of Construction and Architecture. - 2019. - No. 2 (54). - P. 11-20. – DOI 10.25987/VSTU.2019.54.2.001. – EDN ISNDAO].
4. Ивашенко, Ю. А. Моделирование влияния нарушения сцепления арматуры с бетоном на прочность и деформативность изгибаемых железобетонных конструкций / Ю. А. Ивашенко // Наука ЮУрГУ : Материалы 69-й научной конференции, Челябинск, 04–05 апреля 2017 года / Министерство образования и науки Российской Федерации; Южно-Уральский государственный университет. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – С. 17-23. – EDN ZVELJJ [Ivashenko, Yu. A. Modeling the effect of breaking the adhesion of reinforcement with concrete on the strength and deformability of bent reinforced concrete structures / Yu. Sciences of the Russian Federation; South Ural State University. - Chelyabinsk: Publishing Center of SUSU, 2017. - P. 17-23. – EDN ZVELJJ].
5. Mirsayapov, I. Research of the stress-strain state of a reinforced concrete beamless floor / I. Mirsayapov, E. Khorkov, R. Minzianov // E3S Web of Conferences Volume 274 (2021) : 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE - 2021), Kazan, 21–28 апреля 2021 года. – France: EDP Sciences, 2021. – P. 3031. – DOI 10.1051/e3sconf/202127403031. – EDN BOCMUJ.
6. Хунг, Н. С. Влияние минеральных добавок на прочность сцепления цементного камня бетона со стальной арматурой / Н. С. Хунг, Б. И. Булгаков, О. В. Александрова // Промышленное и гражданское строительство. – 2022. – № 6. – С. 25-31. – DOI 10.33622/0869-7019.2022.06.25-31. – EDN DJCFEO [Hung, N. S., Bulgakov, B. I., Aleksandrova, O. V. Influence of mineral additives on the adhesion strength of concrete cement stone with steel reinforcement // Industrial and civil construction. - 2022. - No. 6. - P. 25-31. – DOI 10.33622/0869-7019.2022.06.25-31. – EDN DJCFEO].

7. Yu, X., Robuschi, S., Fernandez, I., & Lundgren, K. (2021). Numerical assessment of bond-slip relationships for naturally corroded plain reinforcement bars in concrete beams. *Engineering Structures*, 239. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112309>.
8. Li, M., Liu, Z., Yang, Z., Wang, Z., & Yuan, H. (2020). Bond-slip behaviors between reinforced concrete and coated rebar via a new strain monitoring method and FEA simulation. *Construction and Building Materials*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120402>.
9. Mahesh, Rawat, P., Singh, K. K., & Singh, P. K. (2020). Comparison of steel and fiber-reinforced polymer rebars for mining applications: A numerical approach. In *Materials Today: Proceedings* (Vol. 33, P. 5041–5045). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.840>.
10. Pantazopoulos, G., Pressas, I., & Vazdirvanidis, A. (2019). Fatigue failure analysis of a Ø14 B500C steel rebar: Metallurgical evaluation and numerical simulation. *Engineering Failure Analysis*, 101, 180–192. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.03.016>.
11. Seok, S., Haikal, G., Ramirez, J. A., Lowes, L. N., & Lim, J. (2020). Finite element simulation of bond-zone behavior of pullout test of reinforcement embedded in concrete using concrete damage-plasticity model 2 (CDPM2). *Engineering Structures*, 221. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110984>.
12. Mirsayapov, I. Rebar movement in seals under static loading / I. Mirsayapov, R. Minzianov // IOP conference series : Materials Science and Engineering, Kazan, 29 апреля – 15 2020 года. – Kazan, Russia: IOP Science, 2020. – P. 012073. – DOI 10.1088/1757-899X/890/1/012073. – EDN FAXEJY.
13. Квасников, А.А. Моделирование совместной работы арматуры различного периодического профиля с тяжелым бетоном : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Квасников Анатолий Александрович. – М., 2019. – 176с [Kvasnikov, A.A. Simulation of the joint operation of reinforcement of various periodic profiles with heavy concrete: dis. ... cand. tech. Sciences: 05.23.01 / Kvasnikov Anatoly Aleksandrovich. - M., 2019. – 176p.].
14. Попов, А. М. Методы исследования взаимодействия арматуры с бетоном Часть 1. Экспериментальные и аналитические методы / А. М. Попов, А. С. Самошкин, В. М. Тихомиров // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 2(57). – С. 53-60. – DOI 10.52170/1815-9265\_2021\_57\_53. – EDN DBNIBC [Popov, A. M. Methods for studying the interaction of reinforcement with concrete Part 1. Experimental and analytical methods / A. M. Popov, A. S. Samoshkin, V. M. Tikhomirov // Bulletin of the Siberian State University of Communications. - 2021. - No. 2 (57). - P. 53-60. – DOI 10.52170/1815-9265\_2021\_57\_53. – EDN DBNIBC].
15. Mirsayapov, I. Modified trilinear stress-strain diagram of concrete designed for calculation of beams with fiberglass rebar / I. Mirsayapov, G. Arkhadze // IOP conference series : Materials Science and Engineering, Kazan, 29 апреля – 15 2020 года. – Kazan, Russia: IOP Science, 2020. – P. 012079. – DOI 10.1088/1757-899X/890/1/012079. – EDN XWJHRE.
16. Juliya Mironova. Structural solution of the horizontal joint of floor slabs in girderless frame // 2 International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE –2021). 2021. Vol. 274 P.1–10. DOI: 10.1051/e3sconf/202127403017.
17. Холмянский, М.М. Механическое взаимодействие арматуры и бетона в железобетоне : дис. ... докт. техн. наук : 05.23.01 / Холмянский Марк Моисеевич. – М., 1970. – 230с. [Kholmyansky, M.M. Mechanical interaction of reinforcement and concrete in reinforced concrete: dis. ... doc. tech. Sciences: 05.23.01 / Kholmyanskiy Mark Moiseevich. - M., 1970. – 230p].

#### Информация об авторах

**Мирсаяпов Илшат Талгатович**, доктор технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: mirsayapovit@mail.ru

**Минзянов Рустам Ильдарович**, ассистент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: minzianovrustam@gmail.com

**Зайнутдинов Алмаз Маратович**, инженер-проектировщик, ПИ Союзхимпромпроект, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: almaz\_zainutdinov@mail.ru

#### **Information about the authors**

**Ilshat T. Mirsayapov**, Doctor of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: mirsayapovit@mail.ru

**Rustam I. Minzyanov**, assistant, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: minzianovrustam@gmail.com

**Almaz M. Zainutdinov**, project engineer, Design Institute Soyuzkhimpromproekt, Kazan, Russian Federation

E-mail: almaz\_zainutdinov@mail.ru