

Никитин Евгений Владимирович

Аринина Надежда Николаевна

**НЕЛИНЕЙНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ДВУХСЛОЙНОЙ МНОГОПРОЛЕТНОЙ БАЛКИ**

Ключевые слова: *сборно-монолитные конструкции, контактный шов, нелинейность материалов.*

Сборно-монолитное домостроение развивается очень быстрыми темпами, а уровень специалистов на стройке падает, следовательно, факторов, влияющих на качество монолитных работ, становится все больше. Влияние технологических недоверий на несущую способность становится как никогда актуальным. На сегодняшний день все нормативные документы и официальные руководства недостаточно точно позволяют оценить прочность и деформативность железобетонных конструкций. Актуальным, на данный момент, является точное исследование железобетонных элементов, в том числе особенностей деформирований и разрушений сборно-монолитных железобетонных конструкций, с учетом влияния нелинейности материалов, уровня предварительного напряжения и моделирования контактного шва.

Keywords: *precast-monolithic construction, the pin the seam, the material non-linearity.*

Precast-monolithic construction is developing very rapidly, and the level of specialists at the construction site is falling, therefore, the factors affecting the quality of monolithic works is becoming more and more. The impact of technological imperfections on the bearing capacity becomes more relevant than ever. Today, all the normative documents and official guidelines do not allow to estimate the strength and deformability of reinforced concrete structures accurately enough. Actual, at the moment, is a precise study of reinforced concrete elements, including the features of deformation and destruction of precast-monolithic reinforced concrete structures, taking

into account the influence of non-linearity of materials, the level of pre-stress and modeling of the contact seam.

В настоящее время научно-теоретическое развитие основ проектирования, модернизация уникальных схем зданий, которые должны учитывать все критерии безопасности, отвечать современным требованиям, является актуальной и главной задачей.

На данный момент существует сильная необходимость в переходе на совершенно новые и качественные методы расчета железобетонных конструкций, которые будут иметь единый подход.

Не полная разработка нормативной документации, детальное исследование напряженно-деформированного состояния на всех стадиях работы, составного и несоставного сечения, с предварительным напряжением, без предварительного напряжения, повышает необходимость в создании идеального подхода к расчету железобетонных конструкций. Все эти аспекты связаны с использованием железобетонных конструкций, которые состоят из разного типа бетона и арматуры, конструктивной формы и особенностью предварительных напряжений, недостаточно учитывающейся при расчетах, влекут за собой не точность проектирования зданий и сооружений, что в свою очередь увеличивают затраты на качество. Информация о затратах на качество создает предпосылки для принятия стратегических, тактических и оперативных управлеченческих решений с учетом требований всех заинтересованных лиц, что способствует повышению эффективности производства, рентабельности и возрастанию конкурентоспособности [2].

При использовании монолитных железобетонных конструкций, основные трудозатраты уходят на установку и разбору опалубки, что влечет за собой удороожание конструкции и увеличение сроков строительства. Одним из решений данных проблем является внедрение сборно-монолитных конструкций. Сдерживающим моментом, для использования данных конструкций, считается недостаточно изученная особенность влияния работы сборно-монолитных элементов, перед тем как монолитный слой бетона наберет прочность. Именно это и считается актуальной и современной задачей при разработке новейших методов

² <https://phsreda.com>

расчета напряженно-деформированного состояния и трещиностойкости конструкции.

Исходя из того, что работа сборно-монолитных конструкций отличается от работы обычных железобетонных, расчет производится аналогично на основе железобетонных конструкций. Эти расчеты относятся к деформативности, трещиностойкости, хотя основное различие находится в свойствах сборной и монолитной части элемента, двухстадийная работа, обусловленная с помощью предварительного загружения основной сборной части элемента, которая проявляется довольно заметно.

Данное исследование широко распространено на сборно-монолитные конструкций, как в малоэтажном, так и в многоэтажном строительстве, при реконструкциях, в которых производят усиление путем увеличения сечений изгибаемых элементов.

Также важно отметить работу контактного шва, между сборной и монолитной частью железобетонного элемента. Ключевым моментом в теории составных конструкций является физическая модель деформирования шва сдвигу. Податливость шва, сдвигу которого должно учитываться с помощью учета коэффициента жесткости шва или погонной жесткостью шва сдвига.

В настоящее время все нормы и официальные руководства позволяют, в целом, с большой точностью оценить прочность, деформативность и трещиностойкость железобетонных элементов.

Существующий расчетный аппарат, регламентированный нормативными документами, имеет фрагментарный характер, который построен на полуэмпирической основе, именно это и усложняет его применение при расчете железобетонных конструкций, как единых физических и геометрических нелинейных систем.

Разработка модели двухслойной железобетонной конструкций, при помощи метода конечных элементов, позволит подробно проследить как, напряженно-деформированный элемент работает на всех стадиях.

На данный момент, предоставляется актуальным точное исследование особенности деформирования и разрушения сборно-монолитных железобетонных конструкций, которые должны быть направлены: на учет нелинейности используемых материалов, уровня предварительного напряжения и моделирования контактного шва.

Моделирование и расчет двухслойной многопролетной балки был произведен в программном комплексе ЛИРА САПР 2018

После эксперимента были построены графики зависимости деформаций в арматуре, в бетоне от нагрузки на шагах нагрузки, прогибы балки от нагрузки, расположение высоты сжатой зоны от нагрузки и эпюры распределения усилий, развития деформаций по высоте сечения.

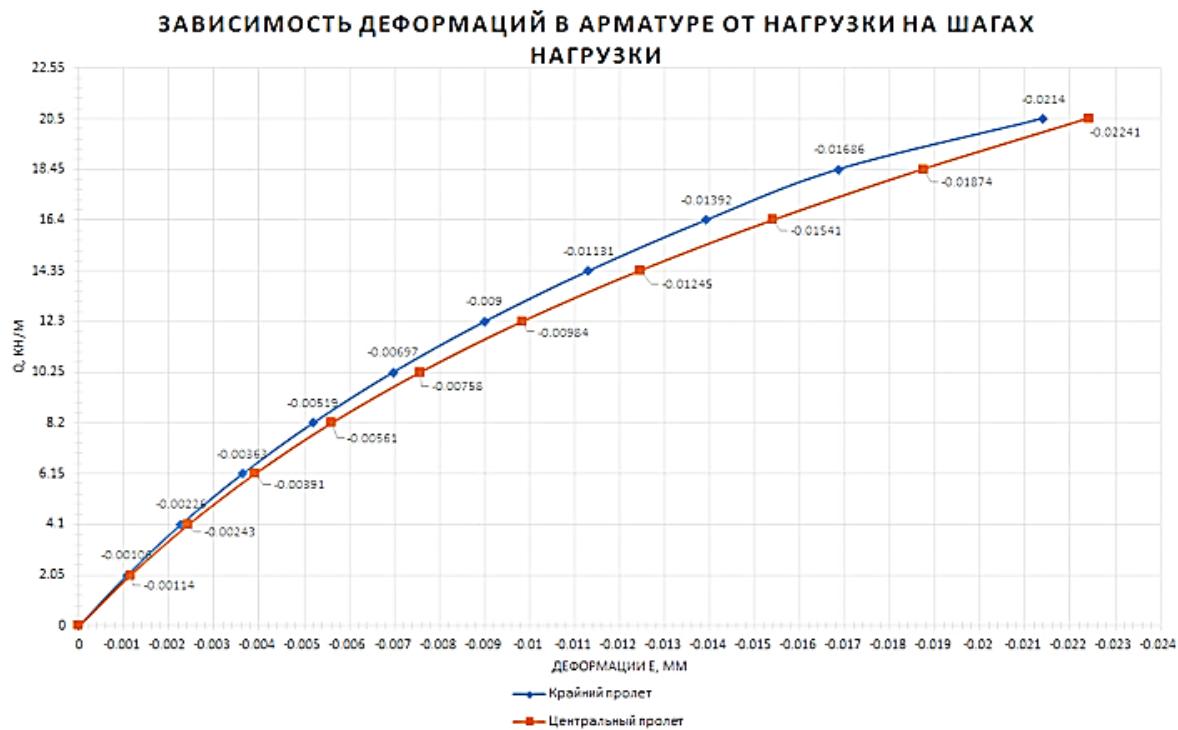


Рис. 1

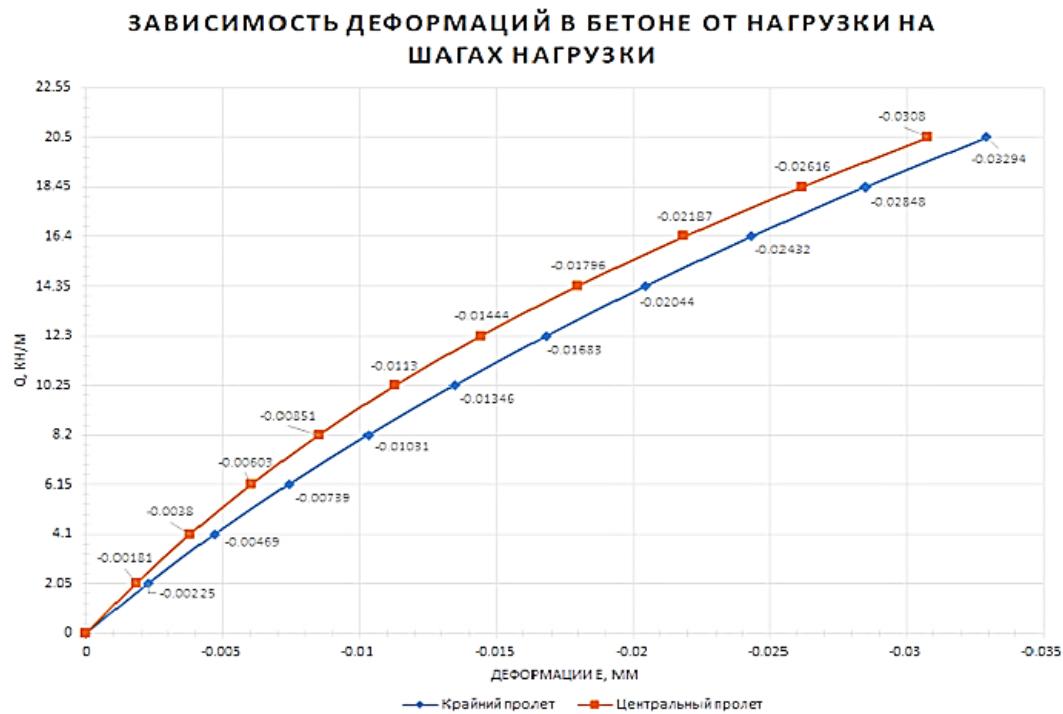


Рис. 2

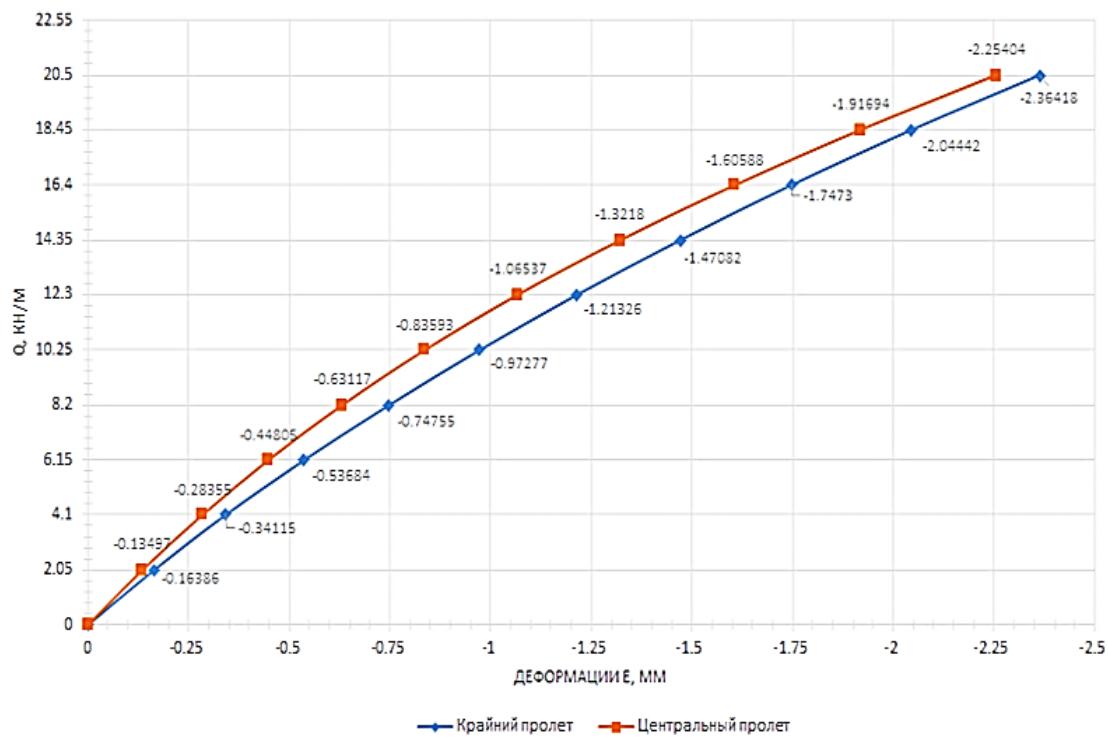
ЗАВИСИМОСТЬ ПРОГИБА БАЛКИ ОТ НАГРУЗКИ

Рис. 3

РАСПОЛОЖЕНИЕ ВЫСОТЫ СЖАТОЙ ЗОНЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАГРУЗКИ

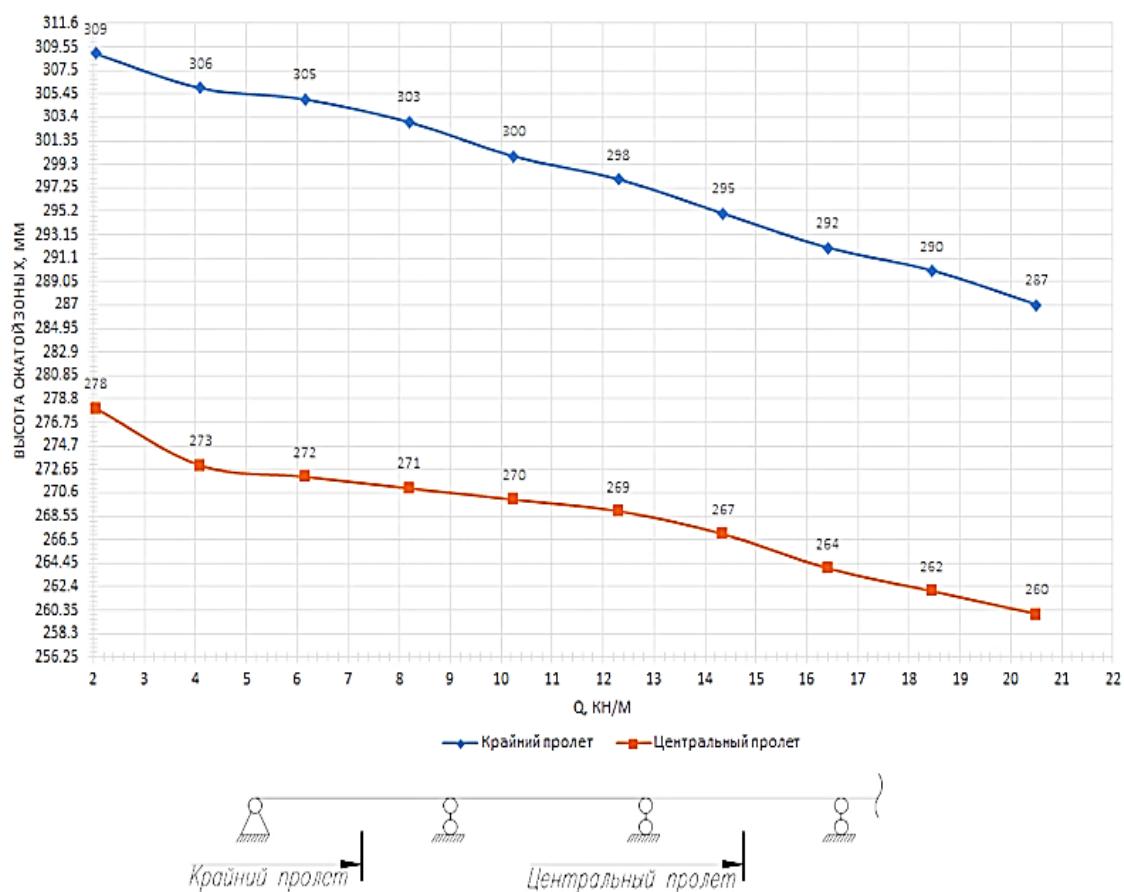


Рис. 4

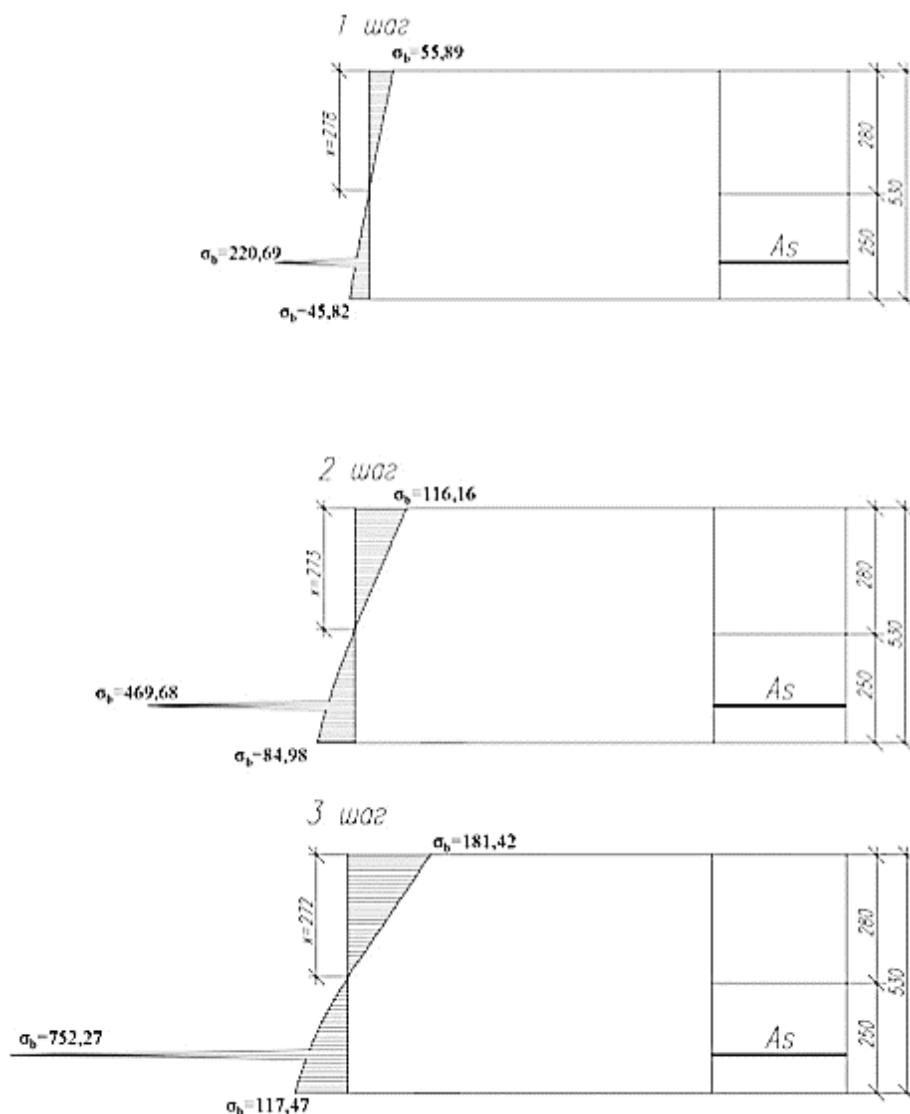


Рис. 5. Эпюры распределения усилий по высоте сечения центрального пролета

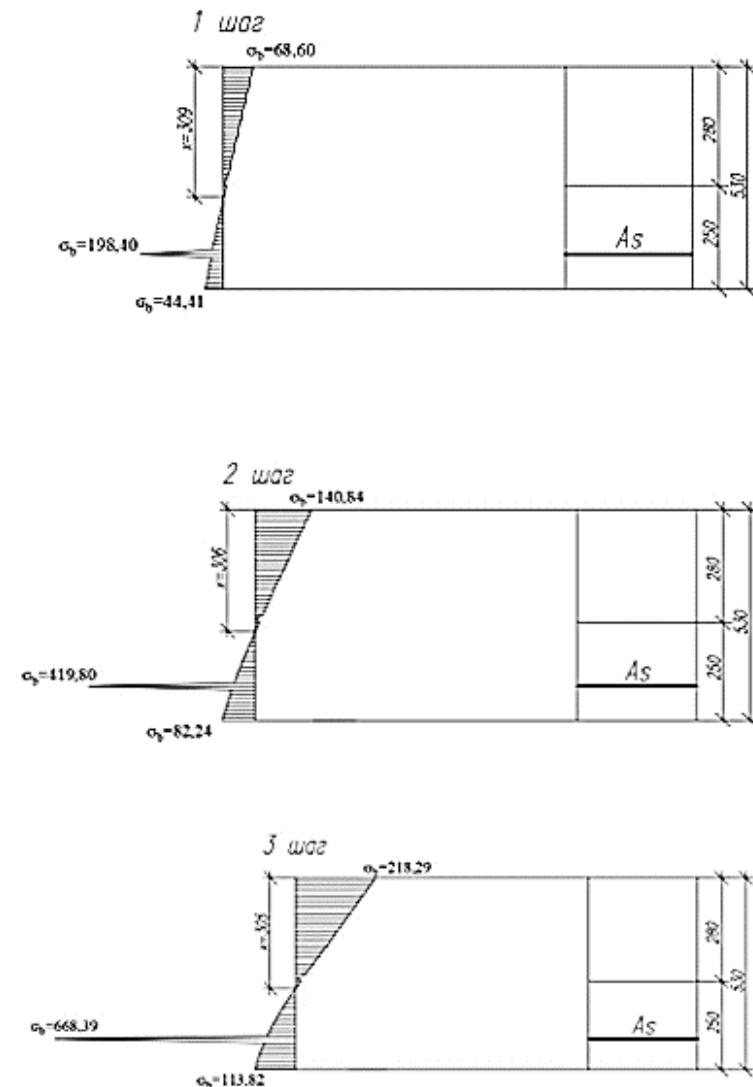


Рис. 6. Эпюры распределения усилий по высоте сечения крайнего пролета

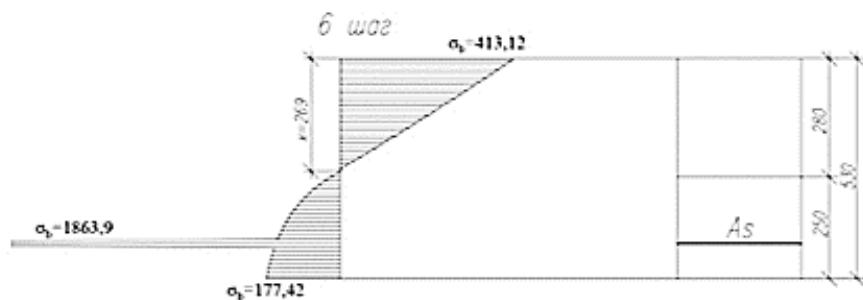
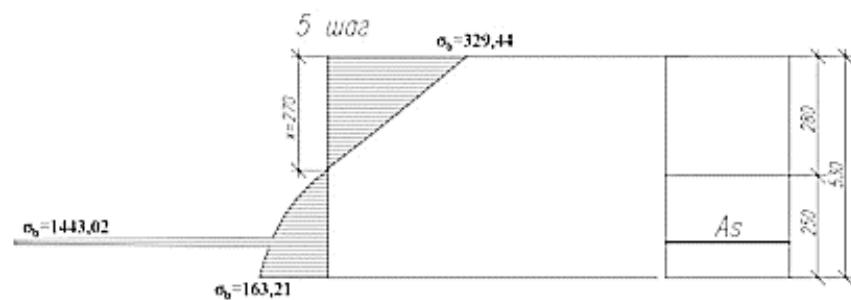
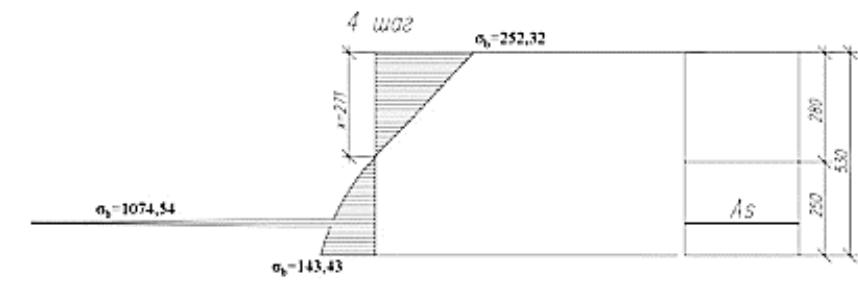


Рис. 7. Эпюры распределения усилий по высоте сечения центрального пролета

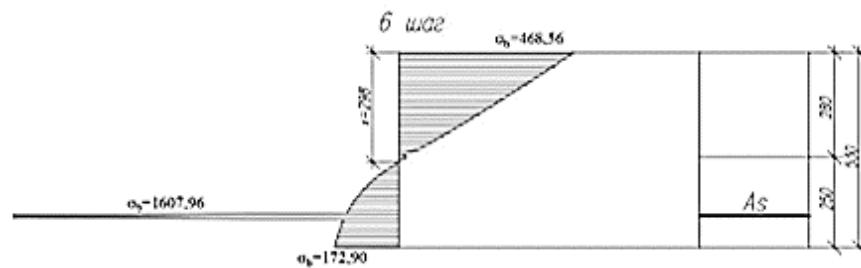
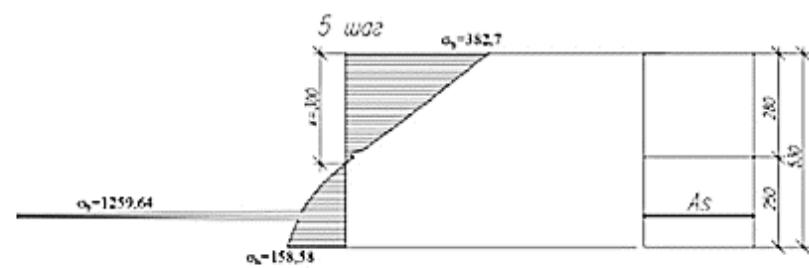
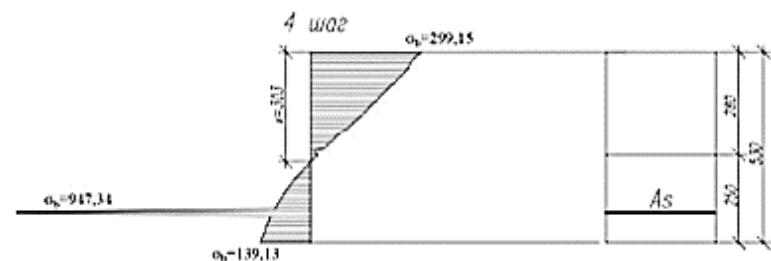


Рис. 8. Эпюры распределения усилий по высоте сечения крайнего пролета

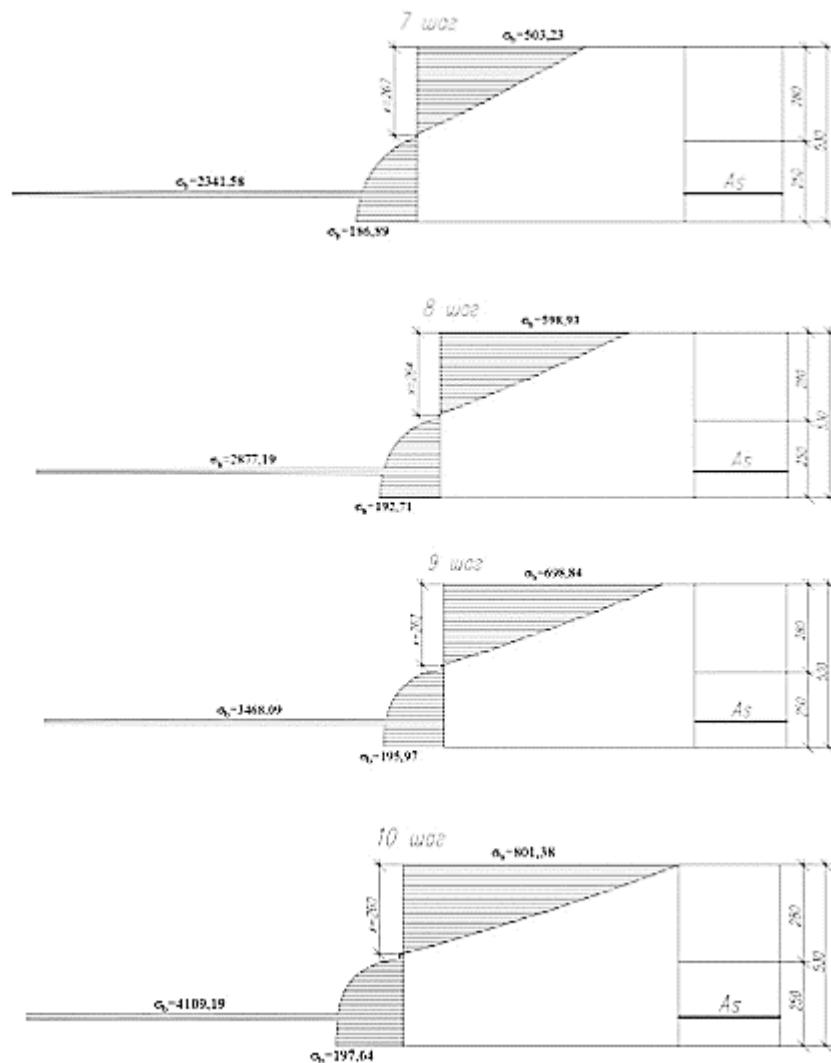


Рис. 9. Эпюры распределения усилий по высоте сечения центрального пролета

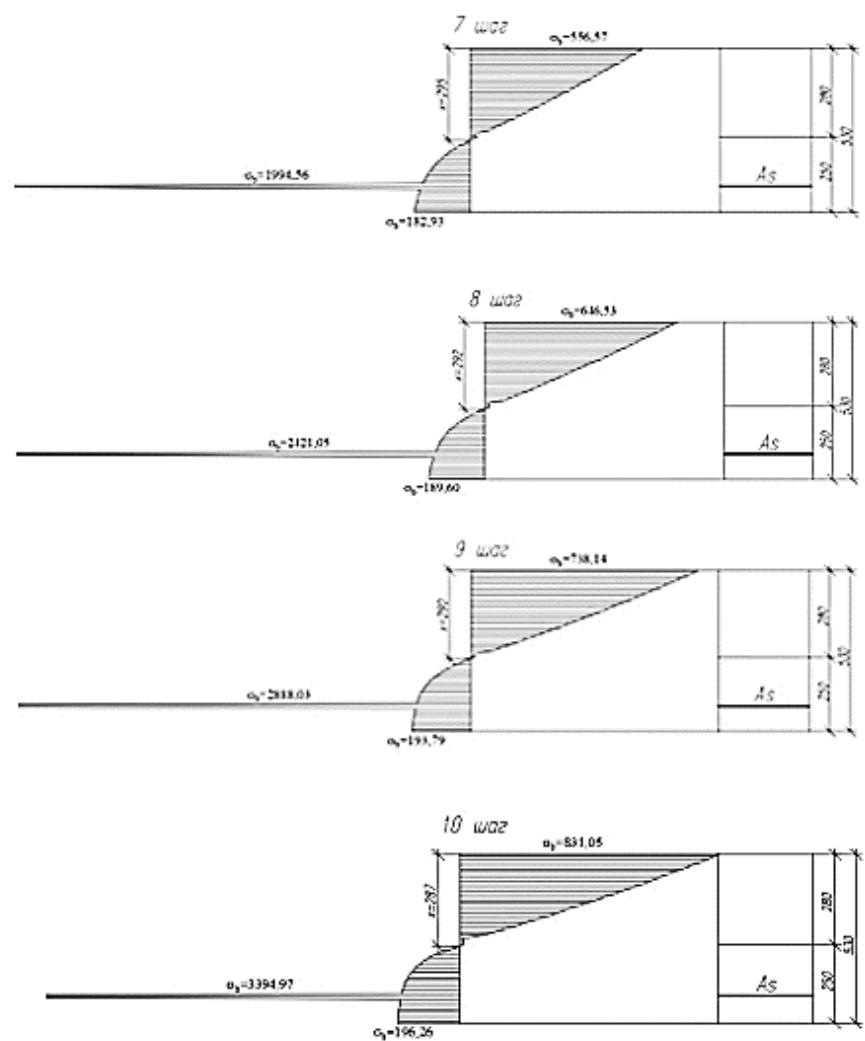


Рис. 10. Эпюры распределения усилий по высоте сечения крайнего пролета

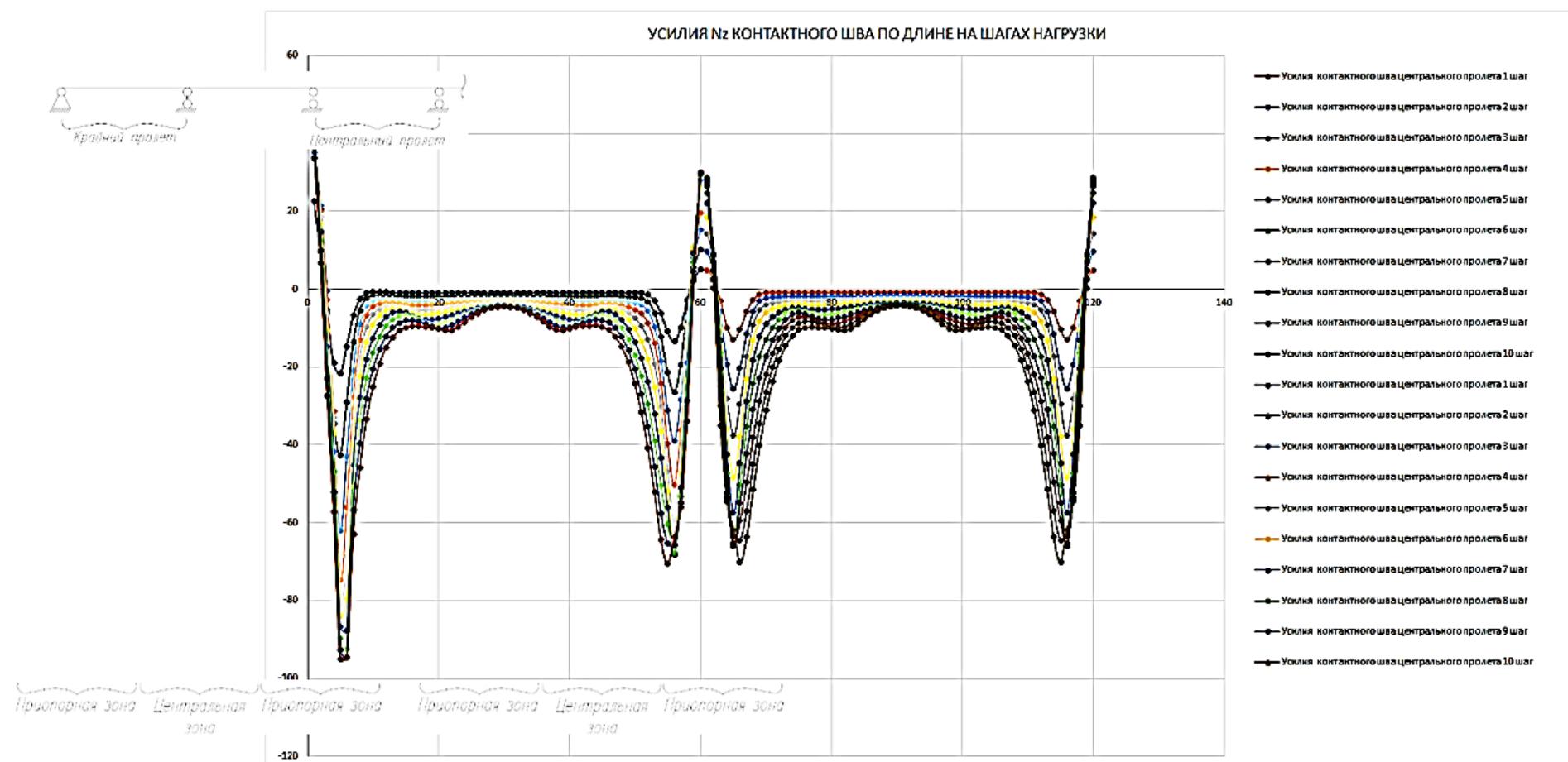


Рис. 11

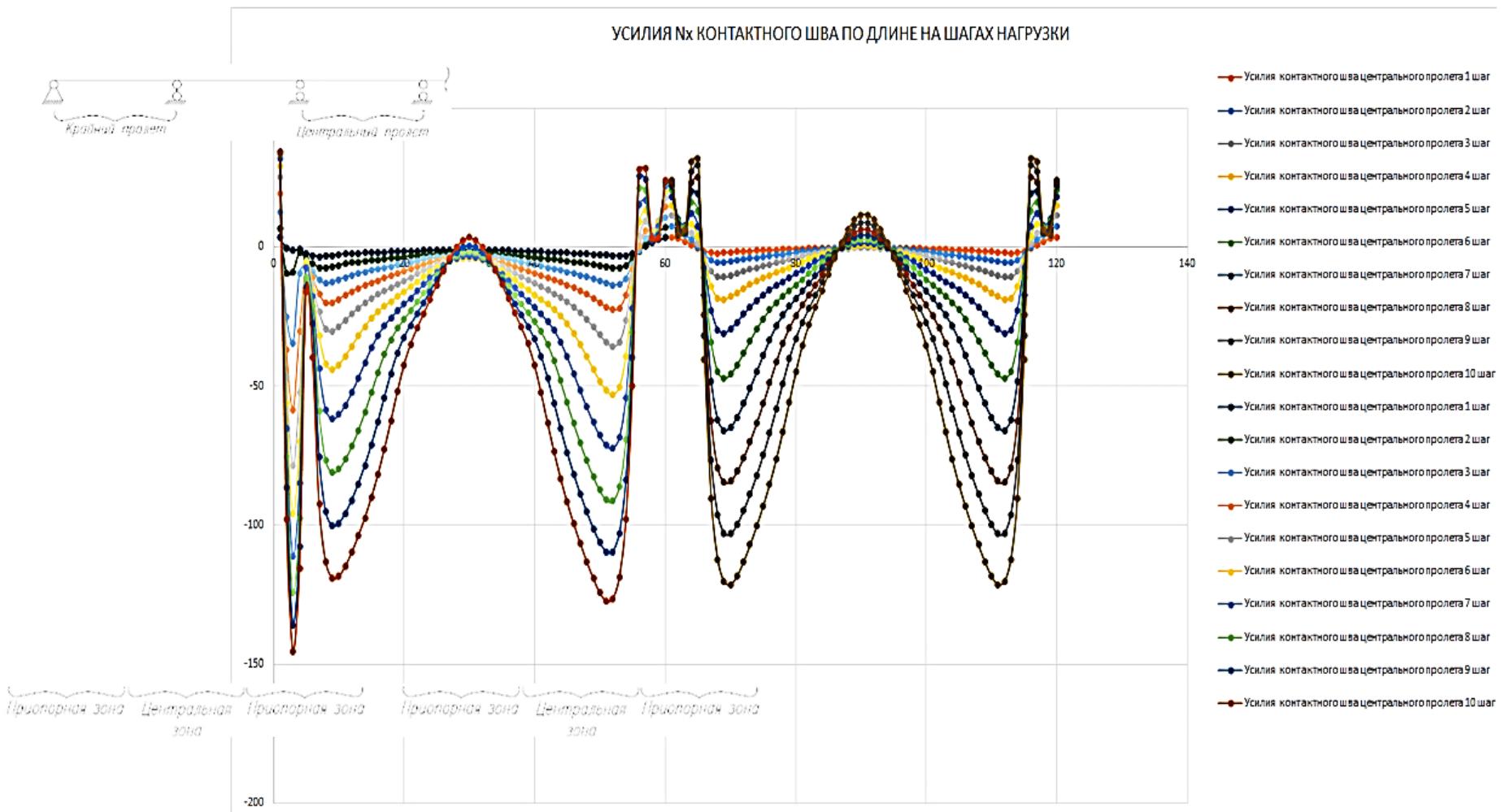


Рис. 12

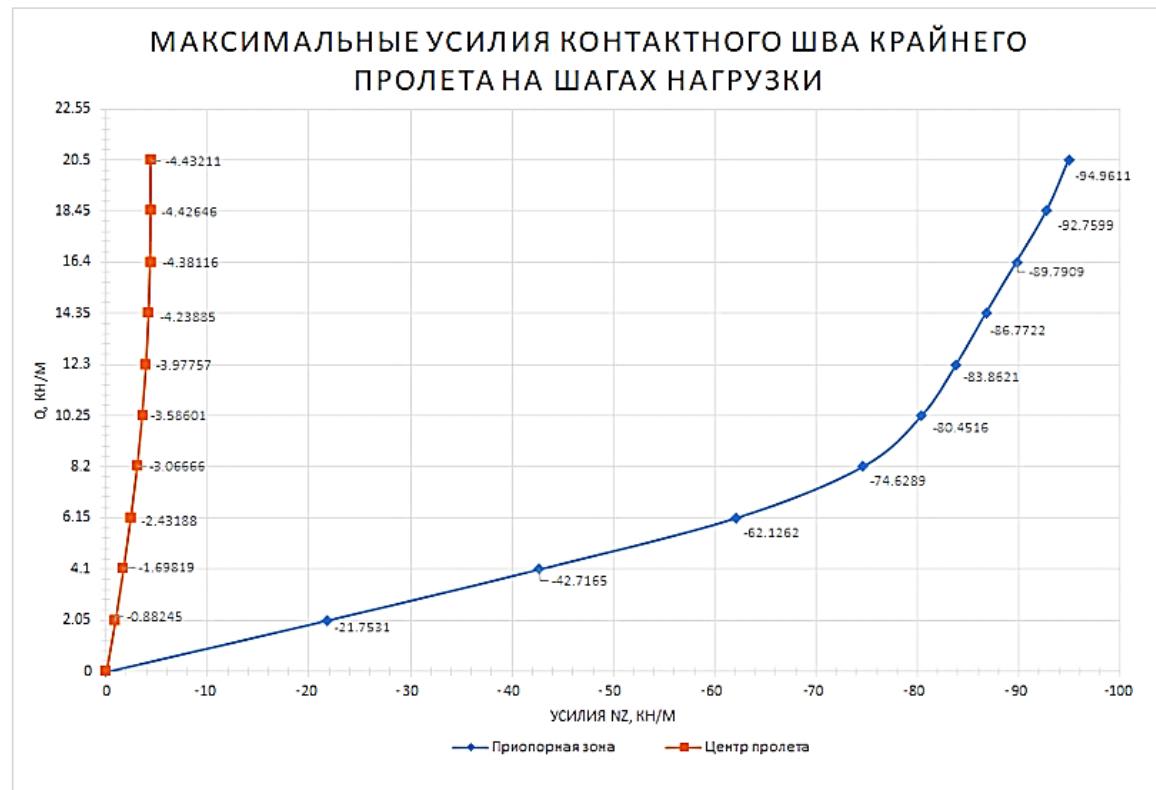


Рис. 13

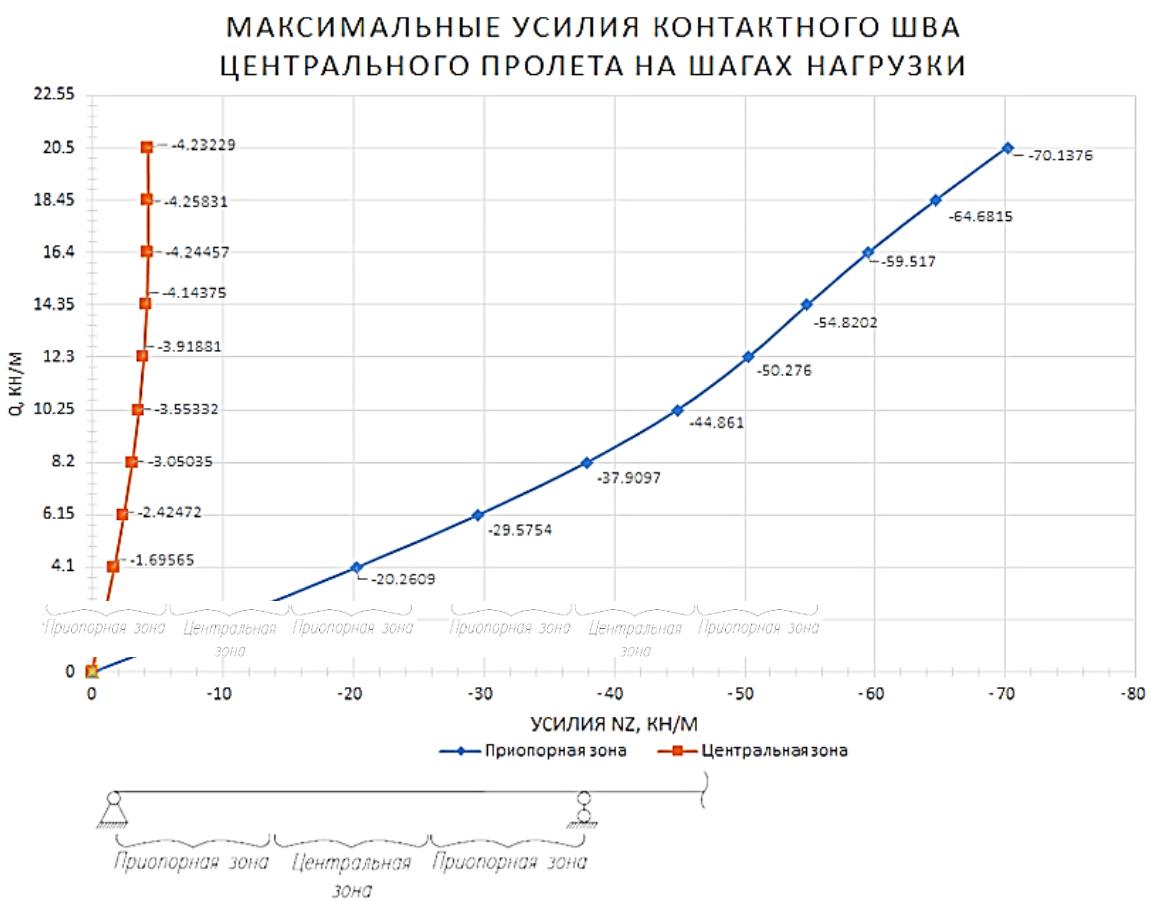


Рис. 14

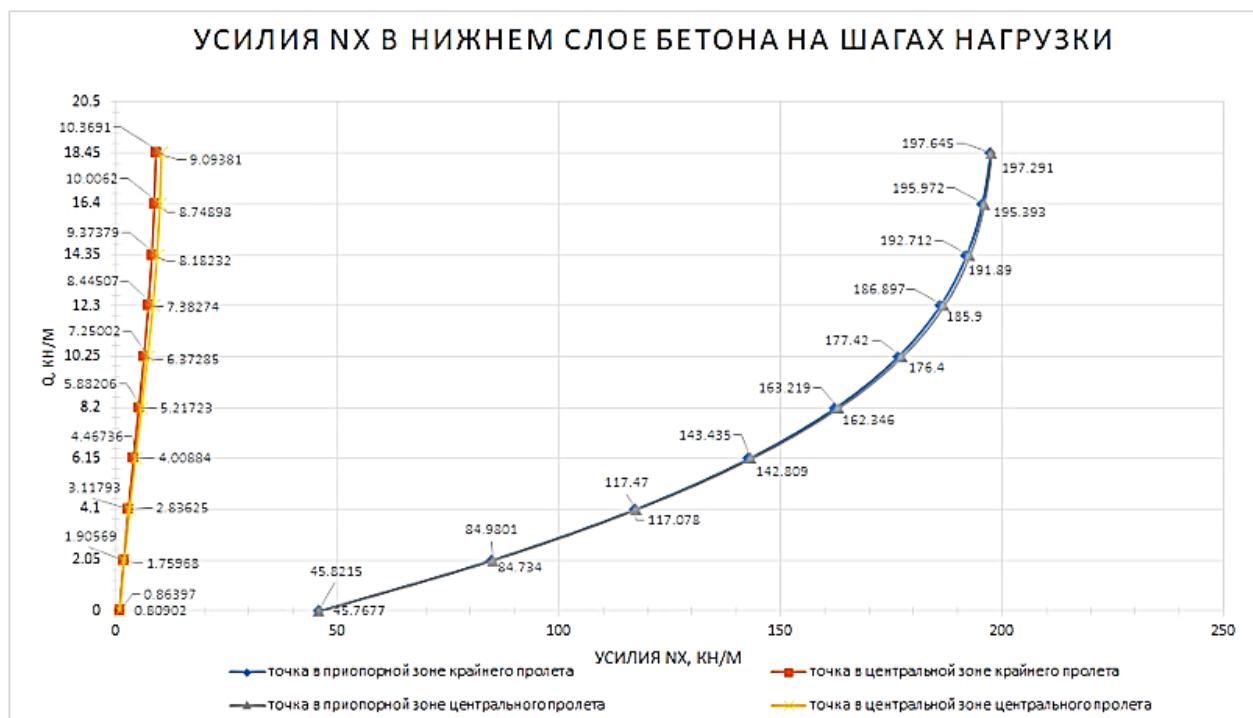


Рис. 15

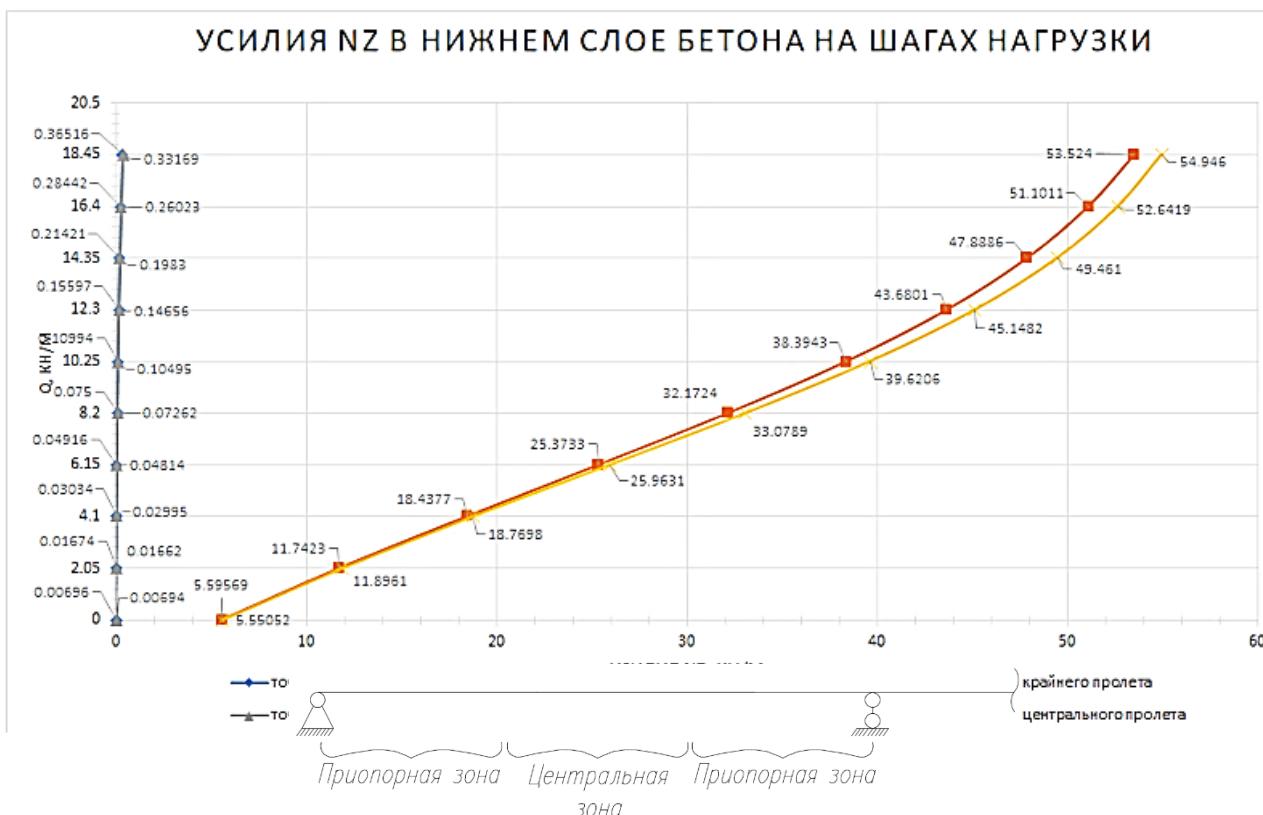


Рис. 16

МАКСИМАЛЬНЫЕ УСИЛИЯ КОНТАКТНОГО ШВА КРАЙНЕГО ПРОЛЕТА НА ШАГАХ НАГРУЗКИ

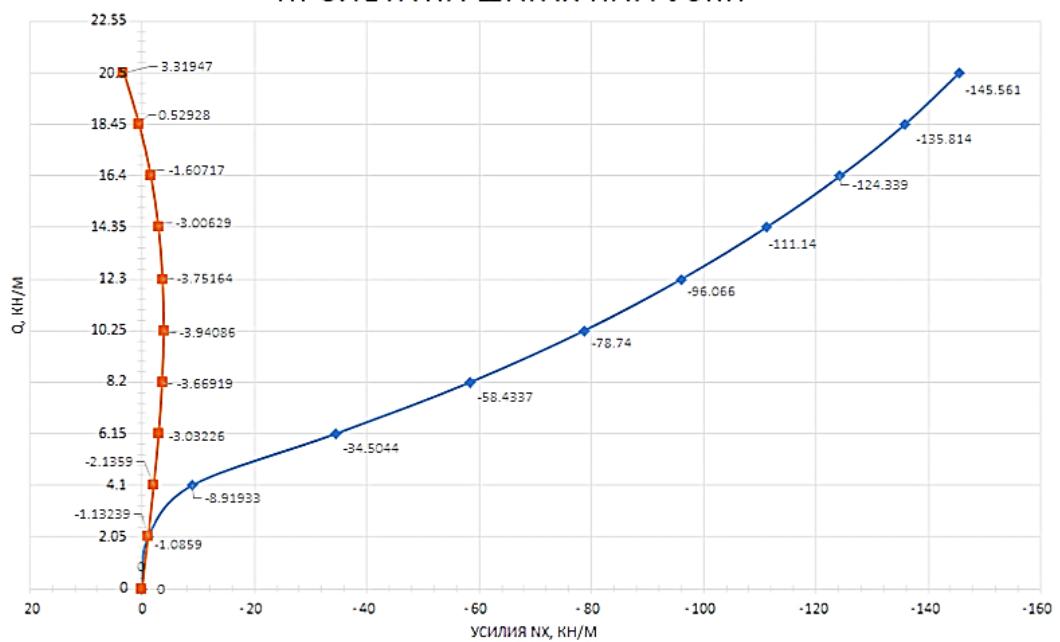


Рис. 17

МАКСИМАЛЬНЫЕ УСИЛИЯ КОНТАКТНОГО ШВА ЦЕНТРАЛЬНОГО ПРОЛЕТА НА ШАГАХ НАГРУЗКИ

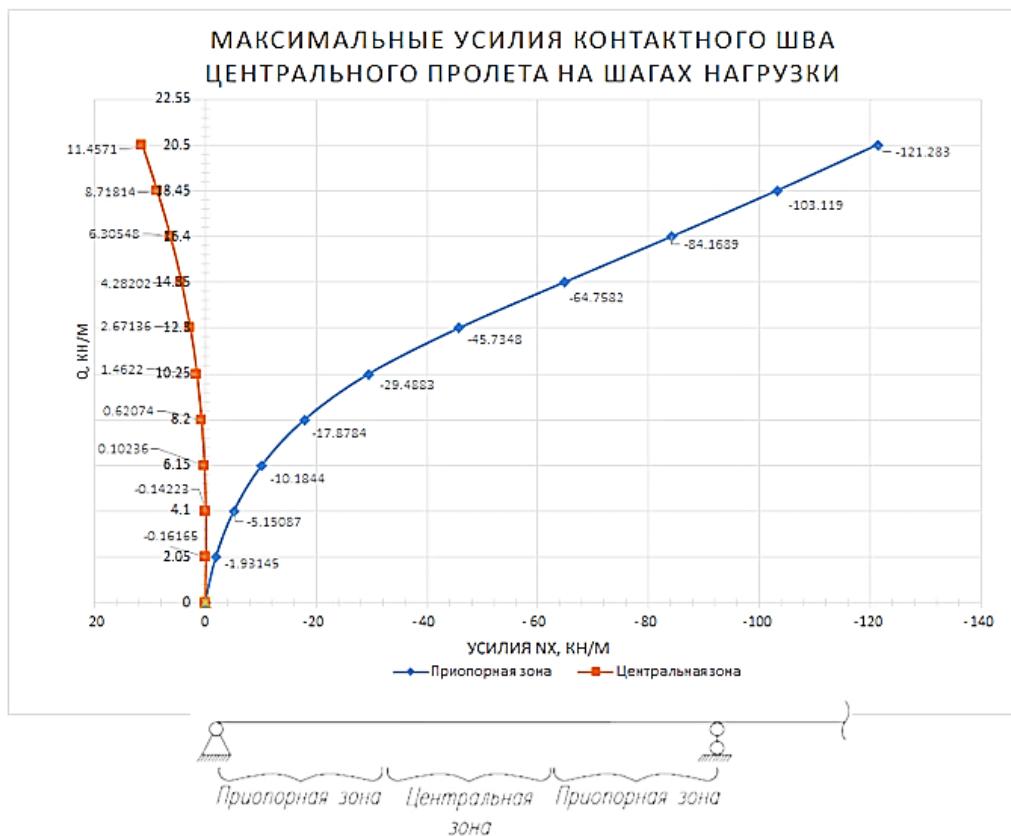


Рис. 18

На основании построенных графиков, зависимости прогиба балки от нагрузки, можно обратить внимание на то, что они носят достаточно упругий характер. Прогибы крайнего пролета больше, чем прогибы центрального пролета, причем максимальная разница прогибов зафиксирована на 6 шаге 0,14789 мм. Максимальный прогиб центрального пролета составил 2,25404 мм, крайнего пролета 2,36418 мм.

Графики зависимости деформации в бетоне от нагрузки по своему характеру схожи с графиками зависимости прогиба балки от нагрузки. Максимальные деформации крайнего пролета 0,03294мм, а в центральном пролете 0,0380 мм.

В графиках зависимости деформаций в арматуре от нагрузки на шагах нагрузки максимальная разница деформаций попадает на 9 шаг 0,00188 мм. Максимальные деформации также наблюдаются в арматуре крайнего пролета 0,02241 мм, а в центральном пролете 0,0214 мм.

На графиках Усилий Nx и Nz в нижних слоях бетона на шагах нагрузки наблюдаются максимальные усилия крайнем пролете.

Высота сжатой зоны испытуемой многопролетной балки понижается с увеличением нагрузки. В крайнем пролете максимальное сжатие бетона составляет 309мм., минимальное значение 287 мм. В центральном пролете максимальное сжатие бетона составляет 278 мм, минимальное значение 260 мм. Все графики, расположения высоты сжатой зоны в зависимости от нагрузки, носят не линейный характер. Нельзя не отметить работу арматурного каната, на всех эпюрах распределений усилий отчетливо наблюдается скачек усилий.

Лабораторные опыты двухслойных изгибаемых конструкций, для определения прочности шва на сдвиг с предварительным напряжением, были проведены С.Н. Медведевым [3]. Выводом научной работы является, что изменение класса бетона сборного элемента мало сказывается на величине прочности шва сопряжения, а минимальное количество поперечной арматуры, проходящей через шов, значительно повышает его прочность на сдвиг.

В компьютерном опыте контактный шов был замоделирован как бетон В3,5. Для теоретических исследований двухслойных балок предлагается использовать

нормативную методику с некоторыми изменениями, связанными с учётом предварительного выгиба сборного элемента, и гипотезу о монолитной связи слоев.

После построения всех эпюр распределений усилий в крайнем пролете, в области шва, наблюдается значительный понижающий скачок напряжений, что нельзя сказать про контактный шов центрального пролета [1].

На первых этапах нагружений нарастание горизонтальных смещений торца балки в районе шва сдвига для образца был практически незначительным, и соответствующий участок эпюра выглядит линейным.

Основываясь на диаграммах Усилий контактного шва по длине видно, что максимальные усилия возникают в приопорных зонах пролета, а минимальные в центральной зоне пролета. Максимальные усилия N_z в приопроной зоне крайнего пролета составляют -94.96 кН/м , в центре пролета -4.43 кН/м . Максимальные усилия N_z в приопроной зоне центрального пролета составляют -70.13 кН/м , в центре пролета -4.23 кН/м . Максимальные усилия N_x в приопроной зоне крайнего пролета составляют -145.56 кН/м , в центре пролета -3.94 кН/м . Максимальные усилия N_x в приопроной зоне центрального пролета составляют -121.28 кН/м , в центре пролета 11.45 кН/м . Так же можно сделать вывод что максимальные усилия, на приопорном участке, располагаются в сжатой зоне бетона. Приближаясь к центральной зоне пролета наблюдается перераспределение усилий из сжатой зоны, приопорной зоны, в растянутую зону, в центре пролета. Именно такое перераспределение начинается на 7 шаге нагрузки в крайнем пролете и на 4 шаге в центральном пролете.

Количественные значения горизонтальных смещений для крайнего и центрального пролета разнятся, что связано с различиями в величинах достигнутых максимальных напряжений. Условно выделенный второй участок эпюра начинается после заметного понижения деформирования в характерной точке, соответствующей нагрузке, при которой происходит образование нормальных трещин в нижнем брусе, а именно на четвертом шаге нагрузки. На этом участке еще не наблюдается значительного прироста значений горизонтальных перемещений. Резкое прогрессирующее увеличение горизонтальных смещений начинается с

пятого шага нагрузки. Значительный рост горизонтальных перемещений на этом участке связан и с тем, что работа арматуры переходит в пластическую стадию. Данный вывод работы контактного шва подтверждается в научных трудах И.Ф. Образцова [4] и А.В. Харченко [5].

Существующие нормативные документы, предназначенные для проектирования железобетонных конструкций, учитывают не все факторы, которые влияют на деформативность и трещиностойкость сборно-монолитных изгибающихся элементов до приобретения монолитной части заданной прочности. На сегодняшний день отсутствуют практические методы расчета сборно-монолитных изгибающихся элементов, которые учитывают предварительное загружение сборного элемента при статическом нагружении, учитывая физическую нелинейность бетона и арматуры. В следствии этого появилась необходимость в разработке практического метода, который будет учитывать напряженно – деформативное состояние сборно – монолитных изгибающихся элементов при статическом нагружении, включая в себя учет физической нелинейности бетона и арматуры.

После проведения исследования по разработке деформационной модели и программы расчета напряженно-деформированного состояния железобетонной двухслойной многопролетной балки, которая учитывает нелинейность деформирования бетона и арматуры, работу контактного шва по его длине, были сделаны следующие выводы:

1. Испытуемая деформационная модель двухслойной многопролетной балки, в напряженном состоянии, положительно описывает реальную работу материалов под действием шаговых нагрузок. При проведении расчёта наблюдается физическая нелинейность бетона и арматуры в процессе появления и развития трещин, а также нелинейное деформирование сжатой и растянутой зоны бетона. Особенно важно отметить работу контактного шва, максимальные усилия которых, возникали в припорных зонах.

2. Используя реальные диаграммы деформирования материалов, действительная работа бетона и арматуры под нагрузкой учитывается в виде обобщенной аналитической зависимости.

3. Основываясь на данной деформационной модели был применен шагово-итерационный алгоритм и компьютерная программа для расчета напряженно деформированного состояния двухслойной многопролетной балки методом конечных элементов. Разработанный алгоритм расчета обеспечивает сходимость итерационных процессов при нагрузке, близкой к разрушающей, когда работа конструкции сопровождается перераспределением усилий в конструкции и текучестью арматуры.

4. Проведенный анализ показывает, что критерий несущей способности и разрушения напряженно-деформированной сборно-монолитной балки, которая имеет податливый шов сдвига, можно определить с помощью жесткости шва сдвига, структурой составного сечения, уровнем предварительного напряжения. Основываясь на научных исследованиях для повышения жесткости шва сдвига, необходимо добавление шероховатости поверхности сборного элемента и дополнительной продольной арматуры.

5. После проведения расчетов можно сделать вывод, что данная методика позволяет детально исследовать работу напряженно – деформированного состояния железобетонной конструкции, включающая в себя схему образования и развитие трещин, при шаговом нагружении элемента, и произвести оценку эффективности армирования конструкции и другие конструктивные характеристики. Разработанная деформационная модель, двухслойной многопролетной балки, рекомендуются для применения в научно-исследовательской практике и проектировании строительных конструкций.

Список литературы

1. Аринина Н.Н. Моделирование методом конечных элементов перераспределение усилий в нормальном сечении слоистой железобетонной балки / Н.Н. Аринина, А.Н. Плотников // Новая наука: теоретический и практический взгляд: Международное научное периодическое издание по итогам Международной научно-практической конференции (04 августа 2016 г., г. Ижевск). – Стерлитамак: АМИ, 2016. – С. 205–21.

2. Кадышев Е.Н. Затраты на качество / Е.Н. Кадышев, В.В. Никитин // Сборник научных статей докторантов, аспирантов и соискателей. – Чебоксары, 2005. – С. 54–60.
 3. Медведев С.Н. Исследование сборно-монолитных предварительно напряженных железобетонных конструкций: Дис. ... канд. техн. наук. – Горький, 1955.
 4. Образцов И.Ф. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов / И.Ф. Образцов, Л.М. Савельев, Ч.С. Хазанов. – М.: Высшая школа, 1985. – 392 с.
 5. Харченко А.В. Исследование прочности сборно-монолитных изгибаемых конструкций по нормальным сечениям: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1978.
-

Никитин Евгений Владимирович – магистрант ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», Россия, Чебоксары.

Аринина Надежда Николаевна – старший преподаватель ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», Россия, Чебоксары.
