



5. Маврин, В. Г. Совершенствование системы обслуживания автомобилей путем оптимизации территориального размещения автосервисных предприятий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10 / В. Г. Маврин. – М., 2010. – 31 с.
6. Слитников, К. Л. Обоснование периодичности предупредительных ремонтов автомобильных ДВС с целью сокращения эксплуатационных затрат: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10 / К. Л. Слитников. – М., 2013. – 28 с.
7. Крамаренко, Г. В. Техническая эксплуатация автомобилей – М. : Транспорт, 1983. – 487 с.
8. Ушанов, В. А. Исследование и оптимизация параметров системы технического обслуживания и ремонта машин и их использование при прогнозировании технических услуг в АПК Восточной Сибири: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.10 / В. А. Анисимович. – М., 2000. – 18 с.
9. Живов, С. В. Методика оптимизации периодичности технического обслуживания автомобилей-такси: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10 / С. В. Живов. – М., 2008. – 26 с.
10. Раков, В. А. Методика оценки технического состояния гибридных силовых установок автомобилей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10 / В. А. Раков. – СПб., 2012. – 27 с.
11. Иванов, Б. В. Управление техническим обслуживанием машин / Б. В. Иванов. – М. : Машиностроение, 2009. – 160 с.
12. Рыбаков, М. П. Как построить надежную систему из надежных элементов / М. П. Рыбаков. – М. : Гостехиздат, 2015. – 523 с.

УДК 624.04

Постнапряжение в построечных условиях

*Послед (Андропова) Е. Ю.; Зверев В. Ф., канд. техн. наук, профессор
Белорусский национальный технический университет,
220013, Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 65*

Аннотация. В последнее время в практике строительства по всему миру постнапряженные перекрытия широко используются при возведении зданий. Использование технологии постнапряжения в плоских плитах перекрытия, наряду с простотой ее реализации и высокой надежностью, позволяет снизить расход арматуры в 1,7 раза, а расход бетона – на 20–30 % по сравнению с обычными железобетонными перекрытиями. Постнапряжение позволило увеличить пролеты, повысить трещиностойкость, жесткость и значительно снизить собственный вес конструкций, сделав их более экономичными. Существенным преимуществом этой технологии является ее использование высоких прочностных свойств напрягаемой арматуры. Применение постнапряжения в построечных условиях дает возможность решать недостатки монолитного строительства за счет использования прогрессивных строительных технологий и современных конструктивных решений возведения зданий. В Республике Беларусь метод предварительного напряжения бетона в построечных условиях применялся лишь при строитель-



стве торгового центра «Galleria Minsk» (пр-т Победителей, 9, Минск) и автовокзала «Центральный» в г. Минске.

Ключевые слова: технология постнапряжения, арматурные канаты, расчетные комплексы, монолитные железобетонные перекрытия.

Post-stress in building conditions

*Posled (Andronova) E. Yu., Zverev V. F.
Belarusian National Technical University*

Annotation. Recently, in construction practice around the world, post-tensioned floors are widely used in the construction of buildings. The use of post-tensioning technology in flat floor slabs, along with the ease of its implementation and high reliability, makes it possible to reduce the consumption of reinforcement by 1.7 times, and the consumption of concrete by 20–30 % compared to conventional reinforced concrete floors. Post-tensioning made it possible to increase spans, increase crack resistance, stiffness and significantly reduce the dead weight of structures, making them more economical. A significant advantage of this technology is its use of high strength properties of prestressed reinforcement. The use of post-tensioning in construction conditions makes it possible to solve the disadvantages of monolithic construction through the use of progressive construction technologies and modern design solutions for building construction. In the Republic of Belarus, the method of prestressing concrete under construction conditions was used only in the construction of the Galleria Minsk shopping center (9 Pobediteley Avenue, Minsk) and the Central bus station in Minsk.

Keywords: post-stress technology, reinforcing ropes, calculation complexes, monolithic reinforced concrete overlap.

Введение. Постнапряжение (от англ. «post-tension» – буквально «последующее напряжение» или «post-tensioned concrete» – «бетон с последующим напряжением»). Термин вошел в строительную практику относительно недавно, вместе с распространением технологии предварительного напряжения железобетонных конструкций в построечных условиях.

В общих чертах, термины «постнапряжение» и «преднапряжение» в Республике Беларусь имеют одинаковый смысл. В зарубежной проектной терминологии процесс, при котором происходит искусственное обжатие по периметру строительной конструкции (например, перекрытия), называется постнапряжением.

Существенное отличие применяемых технологий заключается в том моменте, когда происходит натяжение арматуры. В постнапряженном бетоне натяжение арматуры происходит на площадке, во время строительства.

Бетон, к которому приложены внутренние дополнительные сжимающие усилия с целью компенсировать и уменьшить внешние растягивающие напряжения, которым он подвергается от внешних нагрузок, называется бетоном с постнапряжением. В зависимости от типа конструкции постнапряжение может выполняться как без сцепления, так и со сцеплением напрягаемой арматуры с бетоном.



Результаты и их обсуждение. Постнапряжение (обжатие) железобетона конструкции производится после заливки бетона при наборе им определенной прочности. Предварительно уложенные в конструкции арматурные канаты натягиваются и закрепляются анкерами на торцах конструкции. В результате напрягаемая арматура воспринимает нагрузки, которые оказывают на нее внешние силы в течение всего срока службы сооружения. При необходимости имеется возможность дополнительно осуществлять корректировку усилий в напрягаемой арматуре.

В случае постнапряжения без сцепления с бетоном напрягаемая арматура может свободно перемещаться в каналах (оболочках). Усилия передаются на бетон при помощи специальных анкеров, которые устанавливаются на торцы железобетонного элемента. Чтобы предотвратить сцепление арматуры с бетоном и не допустить ее коррозии, напрягаемую арматуру помещают в пластиковую оболочку, покрытую специальным слоем полимера, который способствует уменьшению трения, возникающего между арматурой и оболочкой.

При использовании метода постнапряжения со сцеплением арматуры с бетоном, конструкция (например, перекрытие) может выдержать усилия при обрыве арматуры в теле бетона. Это играет важную роль в том случае, когда есть необходимость вскрыть перекрытие или существует вероятность повреждения части конструкции при эксплуатации, террористическом акте, огневом или ином воздействии. Например, после того, как в Останкинской телевышке произошел пожар, были выполнены работы по замене канатов. Система постнапряжения при налаженном мониторинге с помощью датчиков предотвращает возможность случайного обрыва постнапряженных канатов.

На основании вышеизложенного, можно выделить следующие преимущества постнапряжения:

- 1) возможность не только уменьшить размеры поперечного сечения элементов, но и увеличить пролеты, тем самым экономя материалы и затраты;
- 2) после завершения строительства он практически не требует технического обслуживания;
- 3) уменьшение деформаций перекрытия;
- 4) снижается общий вес конструкции, что чрезвычайно важно для районов с повышенной сейсмической активностью;
- 5) благодаря уменьшению растрескивания, основной причиной которого являются именно силы растяжения, бетон становится менее чувствительным к внешним факторам, что значительно продлевает срок службы несущих элементов.

40-летняя европейская и американская практика применения постнапряженных плит перекрытия показала, что данная технология позволяет сократить толщину плиты с 1/30 пролета до 1/40–1/45 пролета. Одновременно достигается уменьшение армирования до 35 % ненапрягаемой арматуры и до 10–15 % напрягаемых канатов на кубический метр. Экономический эффект от использования технологии постнапряжения наглядно показан на диаграмме по данным ООО «Следящие ТестСистемы», РФ [15].

Среди наиболее распространенных областей применения подобных систем в практике являются конструкции фундаментных плит, монолитных перекры-



тий, а также конструкции промышленных бетонных полов производственных зданий и торговых центров.

Ярким примером применения этого метода строительства в Беларуси является многоуровневая автостоянка в комплексе с автовокзалом «Центральный» в г. Минске, а также торгово-развлекательный центр «Galleria» в г. Минске. В них плиты перекрытий были выполнены с использованием постнапряженного железобетона.

Проект уникального здания автовокзала в г. Минске был разработан проектным институтом «Моноракурс» во главе с И. П. Дубатовка при научном сопровождении БНТУ под руководством доктора технических наук, профессора Пастушкова Г. П., а также кандидата технических наук, доцента Пастушкова Г. П. После тщательного обследования, уточнения надежности и долговечности несущих элементов объекта выполнен комплекс экспериментальных исследований при натяжении напрягаемой арматуры на бетон и объект введен в эксплуатацию. Это позволило увеличить шаг колонн, необходимый для разворота автобусов. Несущие конструкции монолитных железобетонных перекрытий выполнены с предварительным напряжением в построечных условиях. Данная технология при возведении монолитных железобетонных перекрытий применена в Республике Беларусь впервые [13].

Современное строительство ставит перед проектировщиками новые, более сложные задачи при проектировании зданий и сооружений и предъявляет совсем иные требования, о которых раньше даже не задумывались.

Перечислим основные:

- 1) реконструкция и реставрация прежде возведенных зданий и сооружений;
- 2) необходимость проектирования объектов в кратчайшие сроки;
- 3) увеличение объема вновь проектируемых сооружений;
- 4) загруженность новых объектов и окружающей их инфраструктуры инженерными коммуникациями и оборудованием;
- 5) потребность в экологичном и энергоэффективном проектировании ввиду растущего уровня загрязнения окружающей среды;
- 6) неременность расчета при проектировании нового сооружения его эксплуатационных показателей;
- 7) потребность обеспечения интернациональной и международной кооперации в проектировании;
- 8) необходимость сделать проект наименее дорогостоящим и более рентабельным, стабильным в кризисной ситуации в экономике, за счет создания импортозамещения.

Все вышеуказанное ведет к тому, что в настоящее время наиболее востребована информационная модель нежели бумажный проект проектируемых зданий и сооружений. Такая модель является не только аналогом обычного макета, созданного с помощью программного обеспечения, отражающего лишь формы объекта, но и полной информационной копией здания со всей его «начинкой», с количественными геометрическими и технологическими характеристиками конструкции, материалов и оборудования. Актуальность информационной модели сохраняется во время всего жизненного цикла объекта. В соответствии с этим данные должны быть объединены в единое целое и комплексно изменять-



ся с учетом внесенных в них дополнений, автоматически влияющих на изменения во всей модели при изменении мельчайших деталей.

Однако, несмотря на очевидное наличие объективных положительных факторов использования информационных технологий при проектировании и строительстве объекта, применение данных технологий не гарантирует быстрых результатов. С помощью информационных технологий невозможно оставаться в рамках классических подходов в управлении проектами, которые разрабатывались на протяжении многих лет. Качество, глубина и сроки внедрения этих технологий в строительную индустрию имеют огромное значение.

Все программы, основанные на методе конечных элементов, можно условно разделить на 2 группы. К первой группе относятся сложные и дорогостоящие программные комплексы с отличными функциональными возможностями. Такие программы активно зарекомендовали себя благодаря высокой точности исследований, проводимых в различных отраслях. Вторая группа программ разрабатывается как частные решения для специализированных задач в необходимой области исследования. Это свидетельствует о желании разработчиков создать более простой и компактный инструмент для работы.

Такие программы, как ANSYS, ABAQUS, COSMOS, являются тяжелыми зарубежными программными комплексами, которые широко применяются в машиностроении, аэрокосмической промышленности и энергетике. Для расчетов в гражданском, промышленном и транспортном строительстве в нашей стране распространены разрабатываемые в странах СНГ специализированные пакеты, такие, как SCAD Office, «Лира», Robot и другие.

ПК ЛИРА-САПР в настоящее время применяется в качестве расчетного комплекса в Республике Беларусь, что является весомым вкладом в импортозамещение.

Рассмотрению технологии постнапряжения в строительной отрасли посвящены научные труды многих российских исследователей. Александр Морозов в своей статье [12] наглядно продемонстрировал два подхода к расчету плит перекрытия с использованием постнапряжения. Инструментарий BIM, реализованный в программе Revit Structure, позволяет создавать сложные конструкции и задавать данные для расчета постнапряжения в них, используя как метод эквивалентных сил, так и метод отрицательных температур, а затем передавать построенную модель для расчета в Robot Structural Analysis Professional.

В качестве примера была рассмотрена плита перекрытия 9×6 м без сцепления с бетоном (рис. 1).

При использовании метода эквивалентных сил (рис. 2–4) физическое моделирование каната не требуется, действие заменяется силами обжатия и отпора, приложенными в качестве внешних сил к перекрытию в Revit. Этот метод достаточно точен и активно используется для моделирования конструкций с постнапряжением.

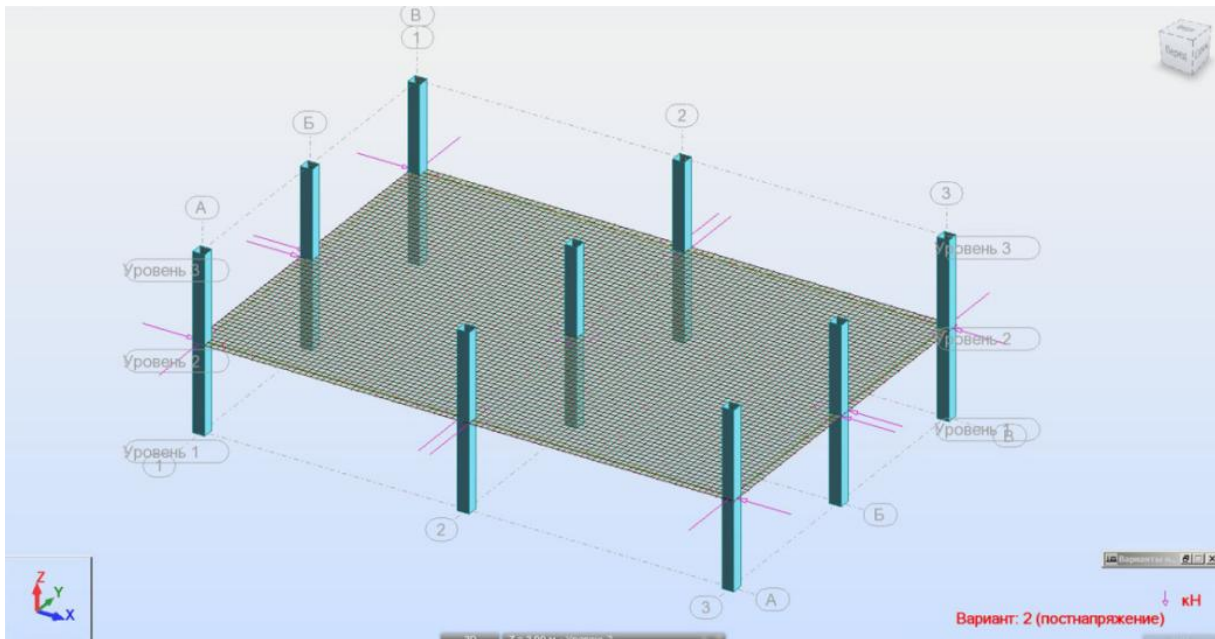


Рис. 1. Конечно-элементная модель плиты перекрытия 9×6 м с приложенными силами, моделирующими постнапряжение (без сцепления с бетоном)

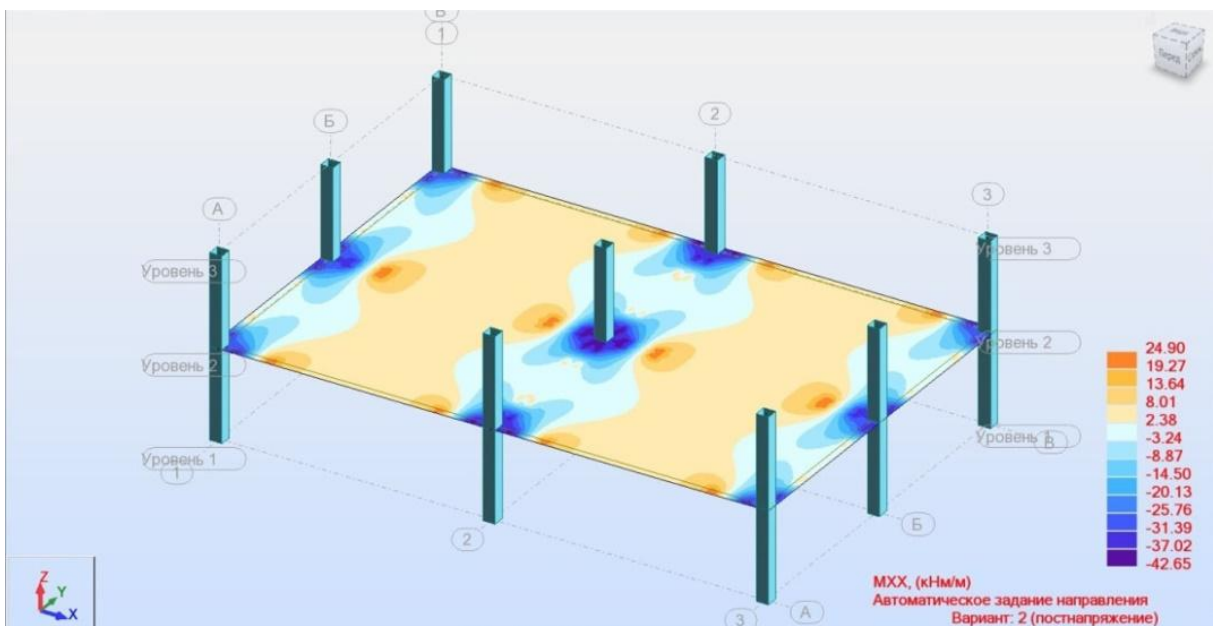


Рис. 2. Результаты расчета в Robot поля моментов M_{xx} .
Метод эквивалентных сил

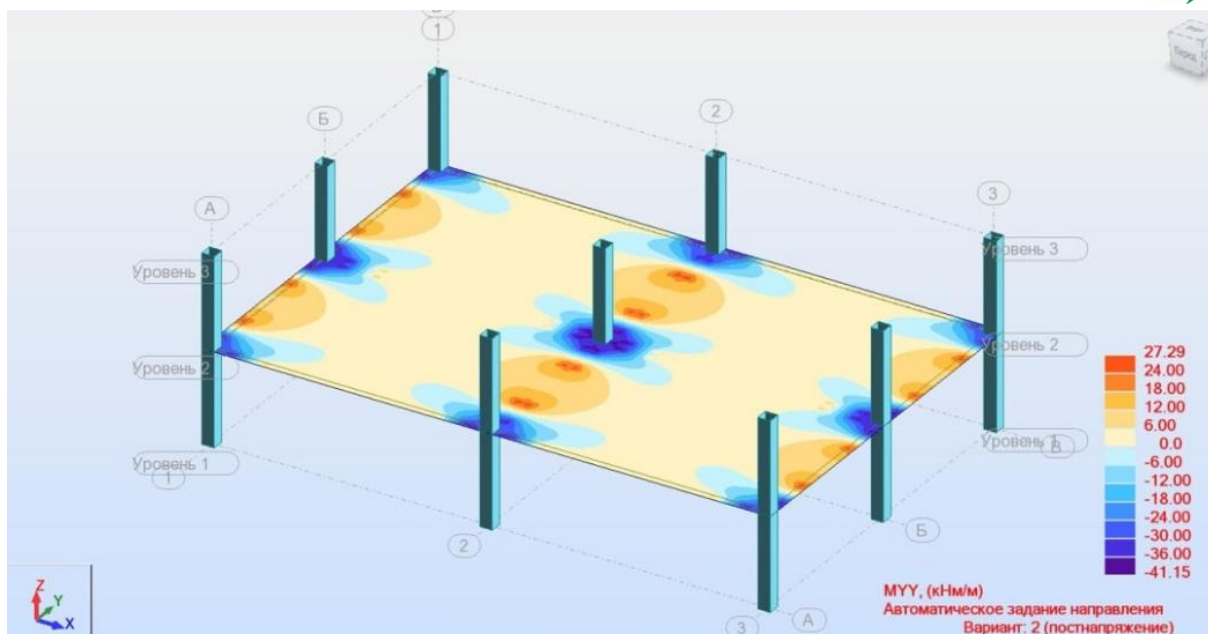


Рис. 3. Результаты расчета в Robot поля моментов M_{yy} .
Метод эквивалентных сил

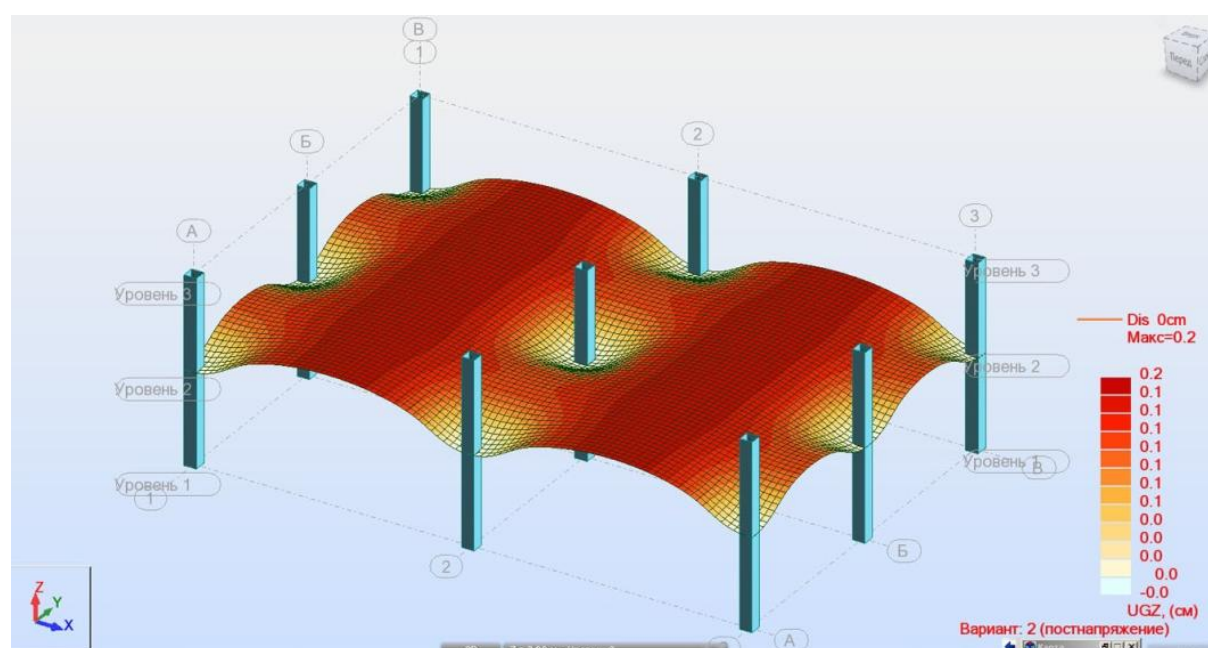


Рис. 4. Характерные деформации выгиба плиты перекрытия от постнапряжения
(деформации увеличены в 100 раз). Метод эквивалентных сил

При использовании метода отрицательных температур (рис. 5–7) моделируется напрягаемый канат со всеми характеристиками непосредственно в Revit, а затем канатам задавать предварительно рассчитанную отрицательную температуру в Robot Structural Analysis Professional. Этот метод является более точным, чем предыдущий, но и более трудоемким в использовании, так как приходится работать с моделью в Robot Structural Analysis Professional.

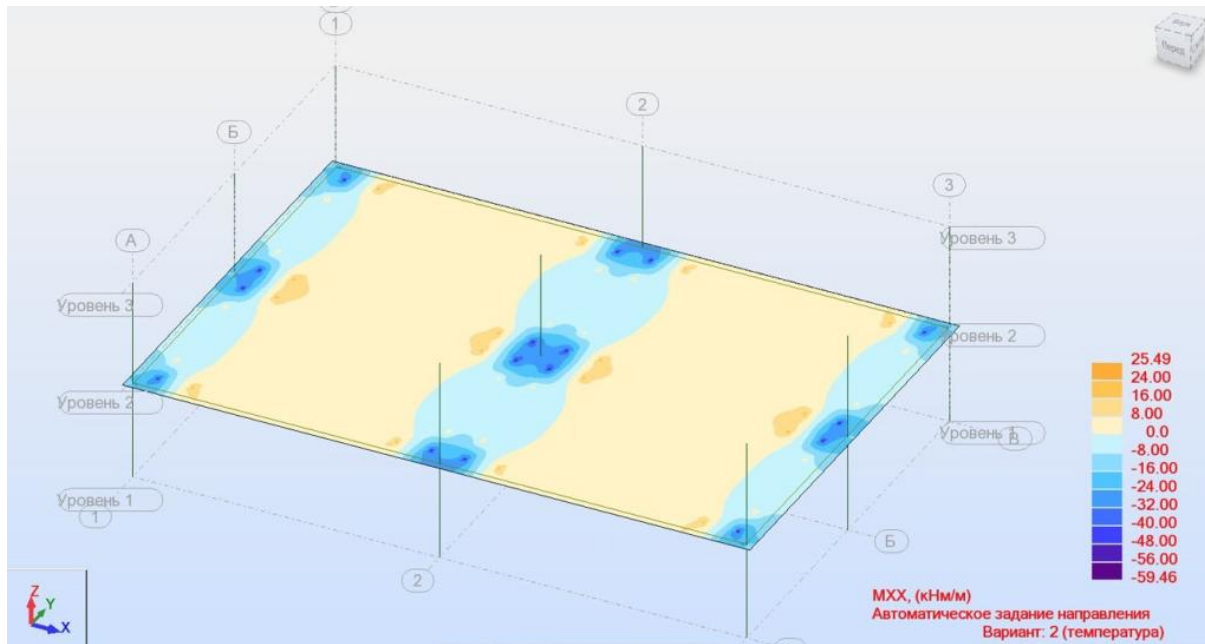


Рис. 5. Результаты расчета в Robot. Поля моментов M_{xx} .
Метод отрицательных температур

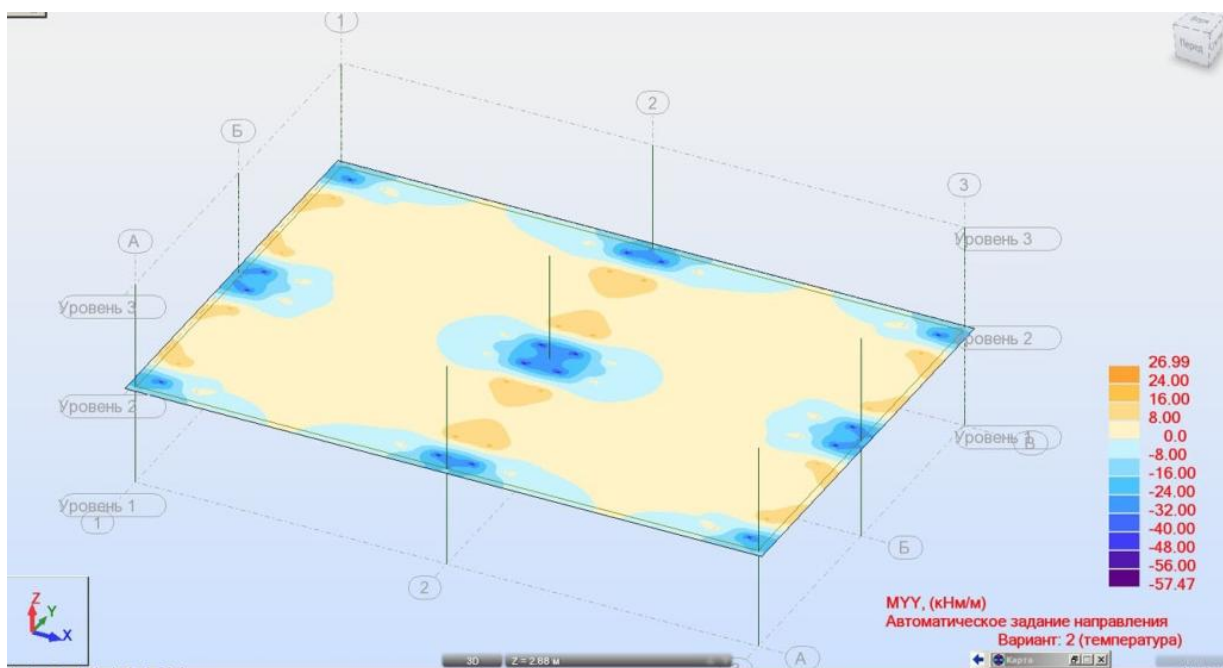


Рис. 6. Результаты расчета в Robot. Поля моментов M_{yy} .
Метод отрицательных температур

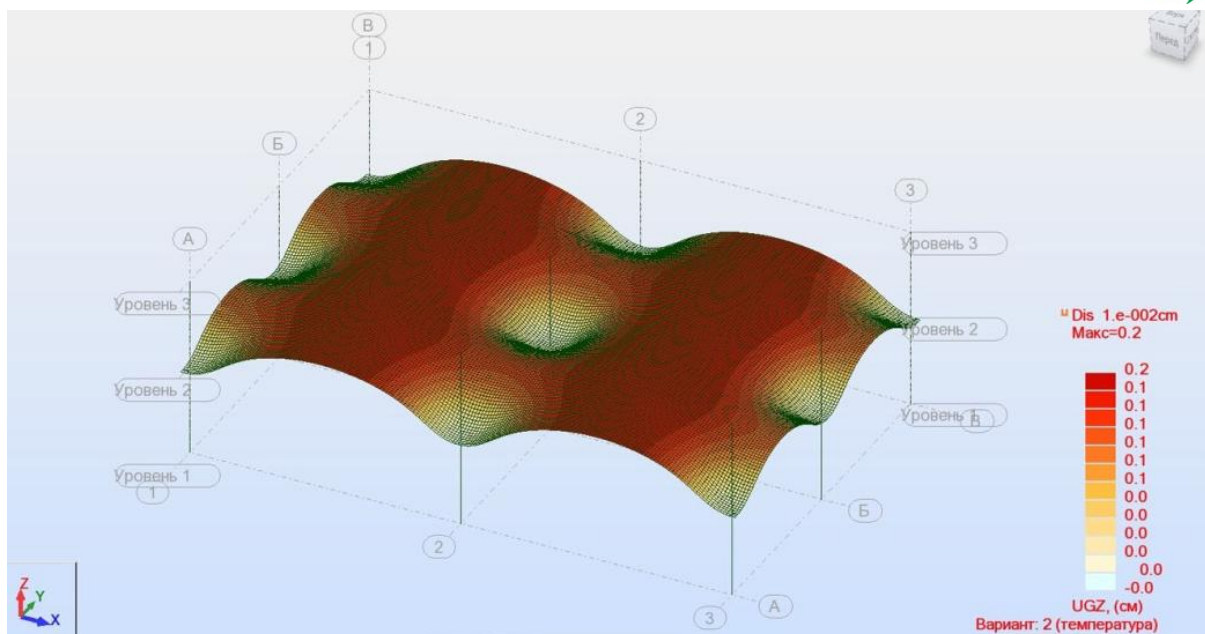


Рис. 7. Характерные деформации выгиба плиты перекрытия от постнапряжения (деформации увеличены в 100 раз). Метод отрицательных температур

При проверках предельного состояния несущей способности в расчетных сочетаниях эффектов воздействий учитывают только вторичные эффекты постнапряжения, создаваемые в конструктивной системе эквивалентными равномерно распределенными нагрузками. Первичные эффекты постнапряжения (продольные усилия и изгибающие моменты от усилия обжатия) учитывают в модели сопротивления сечений (п. 4.2.3.4 [16]).

Описание методики моделирования постнапряжения и расчет гражданских конструкций: «стены в грунте», железобетонные покрытия, а также при усилении конструкций зданий – представлены в работе Д. В. Портаева [11]. Приведены примеры расчета, основные параметры оборудования и систем преднапряжения, а также примеры реализованных конструкций. Затронуты вопросы сравнения отечественных и зарубежных расчетных методик, анализа экономической целесообразности применения преднапряженных конструкций, производства работ по преднапряжению. Особое внимание автор уделил анализу распределения деформаций в конструкциях, преднапрягаемых канатной арматурой как без сцепления с бетоном, так и со сцеплением с ним. Портаевым приведены технико-экономические сравнения преднапряженного и не преднапряженного монолитного железобетонного перекрытия и наглядно показаны эффективность и целесообразность использования методики постнапряжения в монолитных железобетонных перекрытиях.

Балушкин А. Л. в своей работе [1] подробно описал последовательность расчета постнапряженного железобетонного элемента перекрытия. Предлагаемый подход позволяет учитывать как «традиционный» – распределенный тип контакта арматуры и бетона, так и дискретный тип контакта арматурного элемента, который нашел применение в настоящее время в конструкциях с постнапряжением. Предложенный автором метод позволил определять усилие в арматуре для железобетонных элементов, имеющих разрушенный защитный слой



на торцевых участках, а также с гибридным контактом – распределенный контакт по всей длине элемента, дополнительно усиленный в дискретных точках.

Заключение. Плиты постнапряженных перекрытий, выполненных с натяжением напрягаемой арматуры на бетон, обладают целым рядом преимуществ и благодаря этому составляют значительную долю в мировой практике проектирования зданий и сооружений.

Использование технологии постнапряжения позволяет не только значительно сократить расход материалов, но и снизить собственную массу конструкций перекрытий, увеличить пролеты, а также приводит к снижению экономических затрат на строительство.

Литература

1. Балушкин А. Л. Железобетонные конструкции с различными способами фиксации арматурных элементов / А. Л. Балушкин // Умные композиты в строительстве. – 2021. – Т. 2, № 3. – С. 7–21

2. Дзюба, И. С. Усиление строительных конструкций с использованием постнапряженного железобетона [Электронный ресурс] / И. С. Дзюба, Н. И. Ватин, В. Д. Кузнецов / Инженерно-строительный журнал, № 3, 2009. – Режим доступа: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2008/1\(1\)/01.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2008/1(1)/01.pdf).

3. Денисенко, И. В. Преимущества и особенности применения технологии постнапряжения железобетонных конструкций / И. В. Денисенко // Современные вопросы технологии строительного производства : материалы 74-й студенческой научно-технической конференции, 21 мая 2018 г. / Белорусский национальный технический университет; ред. колл.: С. Н. Леонович, А. И. Сидорова, Г. Т. Широкий. – Минск : БНТУ, 2018. – С. 25–32.

4. Леонович, С. Н. Новые технологии и материалы для строительной индустрии / С. Н. Леонович // Современные проблемы внедрения европейских стандартов в области строительства : сборник Международных научно-технических статей (материалы научно-методической конференции), 27–28 мая 2014 г. В 2 ч. / ред. колл.: В. Ф. Зверев, С. М. Коледа, С. Н. Делендик. – Минск : БНТУ, 2015. – Ч. 2. – С. 54–57.

5. Леонович, С. Н. Технология предварительного напряжения железобетонных конструкций в построечных условиях / С. Н. Леонович, И. И. Передков, А. И. Сидорова. – Минск : БНТУ, 2018. – 279 с.

6. Образцов, О. Л. Опыт и перспективы выполнения предварительного напряжения конструкций в построечных условиях на примере устройства фундаментной плиты / О. Л. Образцов, Н. В. Дорогокупец / ОДО «БРИГ». – Режим доступа: <http://www.brig.by/node/10>.

7. Передков, И. И. Предложение по повышению надежности и снижению стоимости конструкций фундаментов здания паркинга / И. И. Передков, С. Н. Леонович // Современные проблемы внедрения европейских стандартов в области строительства : сборник Международных научно-технических статей (материалы научно-методической конференции), 27–28 мая 2014 г. В 2 ч. / ред. колл.: В. Ф. Зверев, С. М. Коледа, С. Н. Делендик. – Минск : БНТУ, 2015. – Ч. 1. – С. 219–223.



8. Передков, И. И. Сравнительный анализ результатов армирования монолитной железобетонной плиты перекрытия плоскими арматурными сетками и стальными канатами с предварительным напряжением в построечных условиях / И. И. Передков // Современные методы расчетов и обследований железобетонных и каменных конструкций: материалы 68-й студенческой научно-технической конференции, 15 мая 2012 г. / Белорусский национальный технический университет ; ред. В. Ф. Зверев [и др.] – Минск : БНТУ, 2012. – С. 139–143.

9. Передков, И. И. Классификация и сравнительный анализ систем предварительного напряжения железобетонных конструкций в построечных условиях / И. И. Передков, С. Н. Леонович // Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов Европейского союза в области строительства : сборник научно-технических статей, 22–23 мая 2013 г. В 2 ч. / ред. колл.: В. Ф. Зверев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2013. – Ч. 2. – С. 123–130.

10. Передков, И. И. Технология устройства облегченных пустообразователями железобетонных плит перекрытия с предварительным напряжением арматуры в построечных условиях / И. И. Передков, С. Н. Леонович // СПб. : Мир дорог, специальный выпуск «Бетоны. Оборудование. Опалубка». – 2015. – С. 44–48.

11. Портаев, Д. В. Расчет и конструирование монолитных преднапряженных конструкций гражданских зданий / Д. В. Портаев. – М. : Издательство АСВЮ, 2011. – 248 с.

12. Преднапряженный железобетон – два подхода при моделировании в Revit-Robot [Электронный ресурс] / Isicad. Ваше окно в мир САПР. – Режим доступа: https://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=15550.

13. Проектирование и строительство многоуровневой автостоянки в комплексе с автовокзалом «Центральный» в г. Минске [Электронный ресурс] / Архитектурно-строительный портал. – Режим доступа: <http://ais.by/article/proektirovanie-i-stroitelstvo-mnogourovnevoy-avtostoyanki-v-komplekse-s-avtovokzalom>.

14. Постнапряженный бетон в архитектуре и строительстве [Электронный ресурс] / Amusementlogic. – Режим доступа: <https://amusementlogic.ru/2022/12/01/postnaprjazhennyj-beton-v-arhitekture-i-stroitelstve>.

15. Следящие Тест-Системы [Электронный ресурс] / ООО «Следящие Тест-Системы». – Режим доступа: <http://www.stshydro.ru/technologies/posttensioning>.

16. СП 5.03.01-2020. Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск : Минстройархитектуры, 2020. – 237 с.

17. Технология постнапряженного армирования железобетонных конструкций / Д. И. Борисов [и др.] // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. – 2023. – Т. 2, № 1. – С. 12–21.

18. Расчет предварительно напряженных конструкций на ударную нагрузку / В. В. Лалин [и др.] // Вестник МГСУ. – 2020. – Т. 15, Вып. 4. – С. 482–495.

19. Suncoast Post-Tension [Электронный ресурс] / Suncoast Post-Tension. – Режим доступа: <https://suncoastpt.com>.