

стадии проектирования в зависимости от требуемой точности ИЦММ. Основное внимание уделено комплексному использованию дистанционных методов получения пространственной информации: космическая съемка, съемка с БПЛА, аэрофотосъемка и лазерное сканирование.

**Заключение.** Вопрос разработки и совершенствования нормативной базы для проектирования, строительства и реконструкции автомобильных дорог с использованием BIM-технологий остается открытым. Для его успешного решения требует привлечения знаний и опыта широкого круга специалистов занятых в области дорожного строительства.

#### **Список цитированных источников**

1. Инженерные изыскания для объектов дорожного строительства: ТКП 45-1.02-233-2011 (02250)). – Введ. 24.03.11 (с отменой с отменой П2-03 к СНБ 1.02.01-96). – Минск : Минстройархитектуры, 2011. – 85 с.
2. Инженерные изыскания для строительства: СН 1.02.01-2019. – Введ. 26.12.19 (с отменой с отменой СНБ 1.02.01-96). – Минск : Минстройархитектуры, 2020. – 108 с.
3. Дороги автомобильные общего пользования. Требования к проведению топографо-геодезических изысканий: ГОСТ 32869-2014. – Введ. РБ 01.04.2017. – Москва : Стандартиформ, 2016. – 44 с.
4. Методические рекомендации по организации взаимодействия участников разработки проектной и рабочей документации на пилотных проектах строительства, капитального ремонта и реконструкции автомобильных дорог с применением BIM-технологии: ОДМ 218.3.105-2018. – Москва : Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2018. – 86 с.

*Лазовский Д. Н., Глухов Д. О., Лазовский Е. Д.*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОД НАГРУЗКОЙ**

**Введение.** Современный этап развития теории сопротивления железобетона внешним воздействиям характеризуется широким применением сложных математических моделей его работы и вычислительных средств для расчетов. Применяемые методы расчета основных параметров сопротивления железобетонных конструкций: деформационная расчетная модель поперечного сечения на основе диаграмм деформирования бетона и арматуры, блочная модель на основе закона сцепления арматуры с бетоном и метод конечных элементов для вычисления внутренних усилий.

Цель настоящей работы: методически объединить методы расчета отдельных параметров железобетонной конструкции для их вычисления на любой стадии ее работы с учетом их взаимного влияния, избегая использования эмпирических зависимостей.

### **Деформационная расчетная модель поперечного сечения элемента**

Распределение деформаций по высоте поперечного сечения изгибаемого железобетонного элемента до появления трещин подчиняется гипотезе плоских сечений. Для железобетонных элементов, имеющих трещины в растянутой

зоне, гипотеза плоских сечений используется в качестве допущения для осредненных продольных деформаций растянутой и сжатой зоны.

### **Метод конечных элементов для вычисления внутренних усилий**

Для вычисления внутренних усилий и деформаций от действия внешних нагрузок в изгибаемых балочных конструкциях применяются стержневые конечные элементы. Напряженно-деформированное состояние железобетонной конструкции определяется уравнением метода конечных элементов.

**Сопоставление результатов моделирования и экспериментальными данными.** В качестве экспериментальных данных для сравнения с результатами расчета принята шарнирно опертая на крайних опорах неразрезная двухпролетная железобетонная балка с расстоянием между осями опор 1800 мм поперечным сечением 120 x 190 мм, загруженная сосредоточенными силами в третях пролетов. Ширина стальных пластин опор балки равна 100 мм. Балка симметрично армирована в верхней и нижней зонах продольной стержневой арматурой (по 2 $\varnothing$ 12 мм,  $A_s = A_{s1} = 226,19$  мм<sup>2</sup> с пределом текучести 528,7 МПа, временным сопротивлением 592,8 МПа и относительным удлинением при разрыве 7,6 %. Расстояние от верхней и нижней граней балки до центра тяжести поперечного сечения арматуры составляет 25 мм. Призменная прочность бетона при сжатии  $f_{cm} = 32,6$  МПа, начальный модуль упругости при сжатии 31,38 ГПа, прочность бетона при растяжении  $f_{ctm} = 2,53$  МПа. Бетон балки изготовлен на бездобавочном портландцементе с гранитным щебнем крупностью 5...20 мм.

Сопоставление основных параметров неразрезной железобетонной балки: изгибающего момента образования трещин; раскрытия трещин после их появления; прогибов; сосредоточенных усилий, соответствующих несущей способности (прочности) – свидетельствует об их удовлетворительной сходимости.

**Заключение.** На примере неразрезной двухпролетной железобетонной балки продемонстрирована возможность методического объединения деформационной и блочной модели совместно с методом конечных элементов для вычисления параметров железобетонной конструкции на любой стадии ее работы.

Кроме того, расчетная схема чувствительна к деталям (моделирование площадок опирания балок, ширины зоны передачи сосредоточенных нагрузок, точность в размерах). Например, в предельном состоянии для одной и той же балки с моделью опирания на площадку шириной 100 мм и моделью с идеализированным точечным опиранием предельное значение нагрузки отличается более чем на 10 %.

Моделирование процесса трещинообразования статически неопределимой конструкции показало, что область трещинообразования существенно шире точечного шарнира на неразрезной опоре в моделях статически неопределимых железобетонных конструкций.

### **Список цитированных источников**

1. Карпенко, С. Н. Модели деформирования железобетона в приращениях и методы расчета конструкций: автореферат дисс... докт. техн. наук / С. Н. Карпенко. – Москва: Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, 2010 – 48с.

2. Статически неопределимые железобетонные конструкции. Диаграммные методы автоматизированного расчета и проектирования: (методическое пособие) / Н. И. Карпенко [и др.] – Москва : Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, – 2017. – 197 с.

3. Westergaard, H. M. Computation of Stresses in Bridge Slabs Due to Wheel Loads. – Public Roads / 1930. H. M. Westergaard – Vol.11, № 1. – March. – P. 1–23.

4. Васильев, П. И. Раскрытие швов и трещин в массивных бетонных конструкциях / П. И. Васильев, Е. Н. Пересыпкин // Аннотации законченных в 1967 г. научно-исследовательских работ по гидротехнике. – Ленинград : Энергия, 1968. – С. 292–294.

5. Lowes, L. N., Concrete-Steel Bond Model for Use in Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures / L. N. Lowes, J. P. Moehle, S. Govindjee. – ACI Structural Journal. – 2004. July-August. – P. 501–511.

6. Лазовский, А. Д. Сопротивление изгибу железобетонных многопустотных плит перекрытий безопалубочного формования в составе платформенных стыков зданий: Дисс.... канд. техн. наук / А. Д. Лазовский. – Новополюцк. – 2017. – 152 с.

7. Тур, В. В. Прочность и деформации бетона в расчетах конструкций / В. В. Тур, Н. А. Рак. – Брест: Издательство БГТУ, 2003. – 252 с.

*Лазовский Д. Н., Глухов Д. О., Лазовский Е. Д.*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА С ТРЕЩИНАМИ ПРИ ИЗГИБЕ**

**Введение.** В изгибаемом железобетонном элементе до появления трещин в бетоне сопротивление растяжению оказывает бетон и продольная арматура. Относительные деформации растянутого бетона и арматуры, благодаря сцеплению между ними, равны между собой. С увеличением нагрузки в зоне максимальных изгибающих моментов на наиболее ослабленных участках (вследствие неоднородности структуры бетона и частично арматуры) растягивающие относительные деформации в бетоне приближаются к предельным и появляются трещины. В сечении с трещиной и вблизи него сцепление нарушается, растягивающие усилия воспринимаются арматурой. После образования трещины напряжения (относительные деформации) по краям трещины в бетоне становятся равными нулю, и возникает разность относительных деформаций бетона и арматуры. В соответствии с законом сцепления [1, 2] эта разность деформаций на расстоянии  $L$  от трещины уменьшается до нуля или до области, где относительные деформации в бетоне достигают предельных значений на растяжение. Если разбить участок сдвига арматуры и бетона растянутой зоны на ряд элементарных фрагментов, то на каждом  $i$ -м фрагменте участка сдвига разность относительных деформаций имеет значение, что определяет в арматуре дополнительное напряжение. Величина дополнительного напряжения изменяется по длине растянутого бетонного блока в зависимости от его значения в поперечном сечении с трещиной и значения взаимного сдвига арматуры и бетона.

**Моделирование напряженно-деформированного состояния железобетона после образования трещин.** Дополнительное напряжение в арматуре, обусловленное возникшей разностью относительных деформаций между растянутой арматурой и бетоном, приводит к новому равновесному состоянию попе-