

УДК [614.841.332+539.422.22]:693.56

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ПЛИТ БЕЗ СЦЕПЛЕНИЯ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS

Полева И.И., Зайнудинова Н.В.

Построена модель железобетонной предварительно напряженной плиты без сцепления арматуры с бетоном. Исследовано поведение модели под воздействием стандартного пожара. Определен предел огнестойкости по несущей способности данных конструкций. По результатам натурных испытаний и решения обратной задачи по определению огнестойкости найдена критическая температура для арматуры. Предложена оценка огнестойкости модели. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными данными.

Ключевые слова: огнестойкость, предел огнестойкости, стандартный температурный режим пожара, железобетонные предварительно напряженные плиты без сцепления арматуры с бетоном.

(Поступила в редакцию 20 октября 2017 г.)

Введение. Здания и сооружения, возводимые на территории Республики Беларусь, должны соответствовать существенным требованиям в области безопасности, одним из которых является соблюдение требований в области пожарной безопасности в соответствии с п. 1 статьи 5 [1]. Одним из направлений существенных требований в области пожарной безопасности являются мероприятия по снижению вероятности возникновения пожара, минимизации ущерба, нанесенного пожаром, и по противопожарной защите [1], к которым относится применение строительных конструкций и материалов с нормированными пожарно-техническими характеристиками, сохраняющих свои несущие и ограждающие функции в течение времени, необходимого для обеспечения безопасности людей. Таким образом, конструкции, применяемые при строительстве, должны соответствовать противопожарным требованиям в части пределов огнестойкости и классов пожарной опасности, которые и определяют область применения любой строительной конструкций [2]. Предел огнестойкости конструкции – характеристика огнестойкости конструкции, определяемая временем (в часах или минутах) от начала стандартного огневого испытания до наступления нормируемых для данной конструкции предельных состояний по огнестойкости [3]. К основным предельным состояниям относятся: потеря несущей способности (R), потеря целостности (E), потеря теплоизолирующей способности (I). Для определения предельных состояний применяются два подхода: расчетный метод и проведение натурных огневых испытаний. Температурные пожары в помещениях зданий и сооружений различного функционального назначения могут существенно отличаться [4], поэтому для определения пределов огнестойкости строительных конструкций в основном применяют режим «стандартного» огневого воздействия.

В Республике Беларусь действует ряд технических нормативных правовых актов, в том числе адаптированных европейских стандартов, таких как ТКП EN 1992–1–1, ТКП EN 1992–1–2 [5-7], позволяющие аналитическим методом определить огнестойкость железобетонных строительных конструкций, при этом в данных стандартах приведены общие случаи расчета наиболее распространенных конструкций.

В настоящее время при монолитном строительстве в сборных перекрытиях получили широкое распространение преднапряженные многопустотные плиты высотой 220 мм и пролетом до 9 м с уменьшенной приведенной толщиной бетона в 1,5-2 раза по сравнению с монолитными плитами сплошного сечения. При изготовлении данных конструкций наиболее эффективным является предварительное напряжение на бетон без сцепления. Стоит отметить, что методики оценки огнестойкости, приведенные в [5-7], не в полном объеме

учитывают конструктивные особенности многопустотных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном, применяемых при монолитном строительстве, тем самым завышая предел огнестойкости данных конструкций. На основании сформулированных принципов огнестойкости были запланированы и проведены натурные огневые испытания.

Натурные огневые испытания. За основу для исследований огнестойкости строительных конструкций приняты предварительно напряженные железобетонные плиты перекрытия без сцепления арматуры с бетоном, в которых в качестве арматуры использованы канаты в полимерной оболочке. Целью экспериментальных исследований является изучение поведения данных конструкций в условиях пожара, а также получение теплотехнических характеристик, необходимых для моделирования поведения конструкций при огневом воздействии. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Разработана конструкция железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном на основе типовых плит серии Б1.041.1-3.08. Геометрические размеры плиты: длина 6 000 мм, ширина 1490 мм, высота 220 мм, с круглыми пустотами диаметром 159 мм. Класс бетона $C^{25}/_{30}$ (B30). В качестве рабочей арматуры применен арматурный семипроволочный спиральный канат класса К-7 (S1400) диаметром 15,7 мм, заключенный в заводских условиях в пластиковую оболочку. Расстояние между поверхностью пластиковой оболочки канатов и ближайшей поверхностью бетона выдержано в пределах 30 ± 5 мм.

2. На заводе пустотных изделий ОАО «Минскжелезобетон» изготовлены экспериментальные образцы железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном [8].

3. Проведено огневое испытание по методикам, изложенным в [9-10], на испытательной печи для горизонтальных строительных конструкций, используемой Научно-исследовательским институтом пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций для сертификационных испытаний на огнестойкость. На 33 минуте огневое воздействие прекращено, в связи с наступлением предела огнестойкости по потере целостности и несущей способности. Для предварительно напряженных железобетонных плит без сцепления арматуры с бетоном экспериментально определен предел огнестойкости по потере целостности, несущей и теплоизолирующей способности, который составил REI 30. Достоверность полученных результатов подтверждается применением сертификационного оборудования, прошедшего поверку.

Результаты экспериментальных исследований. Обработка результатов измерений температуры проводилась по методике ГОСТ 8.207-76, стандартный температурный режим создан с точностью до 15 % в период до 10 минут и с точностью 10 % с 10 минуты и до завершения испытания, т. е. находился в пределах допустимых отклонений, что указывает на однородность огневой среды, воздействующей на конструкции, а также на соответствие требованиям [9-10]. Полученные результаты испытаний возможно сопоставлять с результатами других авторов, проводивших испытания с соблюдением стандартного температурного режима, а также оценивать огнестойкость экспериментальных образцов в соответствии с требованиями ТНПА Республики Беларусь и требованиями европейских стандартов.

В ходе проведения испытаний установлено, что для предварительно напряженных железобетонных плит без сцепления арматуры с бетоном, влажность которых составляла 0,9–1,1 %, при огневом воздействии характерно сильное хрупкое разрушение в сжатой зоне конструкции. При оценке хрупкого разрушения конструкций рассмотрены три подхода: оценка весовой влажности, критерия хрупкого разрушения, величины напряжения сжатия в бетоне. Стоит отметить, что для железобетонных предварительно напряженных конструкций оценка весовой влажности и критерий хрупкого разрушения, который в данном случае составил 5,1, носят поверхностный характер и не отражают результатов совокупности явлений, которые происходят в бетоне при огневом воздействии. Аналогичные результаты

были получены Д.А. Литвиновским, при исследовании феномена хрупкого разрушения высокопрочных бетонов. Следовательно, при оценке хрупкого разрушения в исследуемых конструкциях необходимо учитывать сжимающие напряжения, вызванные обжатием бетона арматурой и предусматривать дополнительное конструктивное армирование при наличии напряжения сжатия в бетоне $\sigma_{сж}$.

При определении расчетным методом предела огнестойкости конструкций, допускается выполнять расчет на сопротивление изгибающему моменту от внешней нагрузки только для среднего расчетного сечения, так схема разрушения экспериментальных образцов, а именно разрушение в середине пролета плиты, соответствовала стандартной схеме разрушения предварительно напряженных плит со сцеплением арматуры с бетоном, опертым по двум противоположным сторонам, при одностороннем прогреве.

Результаты натурных огневых испытаний конструкций позволили получить зависимости температуры на обогреваемой и необогреваемых поверхностях конструкций, температуру арматуры, прогиб от времени огневого воздействия, при этом скорректирована критическая температура для канатов, заключенных в заводских условиях в пластиковую оболочку, при применении расчетного метода определения огнестойкости железобетонных конструкций без сцепления арматуры с бетоном. Установлено, что для определения огнестойкости следует принимать критическую температуру 230 °С.

Численное моделирование поведения железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном. С использованием платформы ANSYS Workbench создана расчетная программа, которая позволяет моделировать поведение элементов железобетонных конструкций, находящихся под воздействием стандартного огневого воздействия. Расчетная программа построена на четырех этапах моделирования: построение геометрической модели, построение моделей физических свойств материалов, моделирование процесса, анализ результатов.

Так как продольные размеры арматуры значительно превышают поперечные, канатная арматура смоделирована линейными телами (Line Body). Бетонные элементы выполнены твердотельными трехмерными телами (Solid). В результате получена геометрическая модель железобетонной плиты, представленная на рисунке 1. В рассматриваемых моделях совпадение узлов достигается за счет применения вспомогательных направляющих линий и определением размеров конечных элементов. Разбиение на сетку конечных элементов осуществляется в модулях теплопроводности и прочности независимо друг от друга. При этом для импорта тепловых полей из тепловой задачи в прочностную, сетка конечных элементов создана единичной.

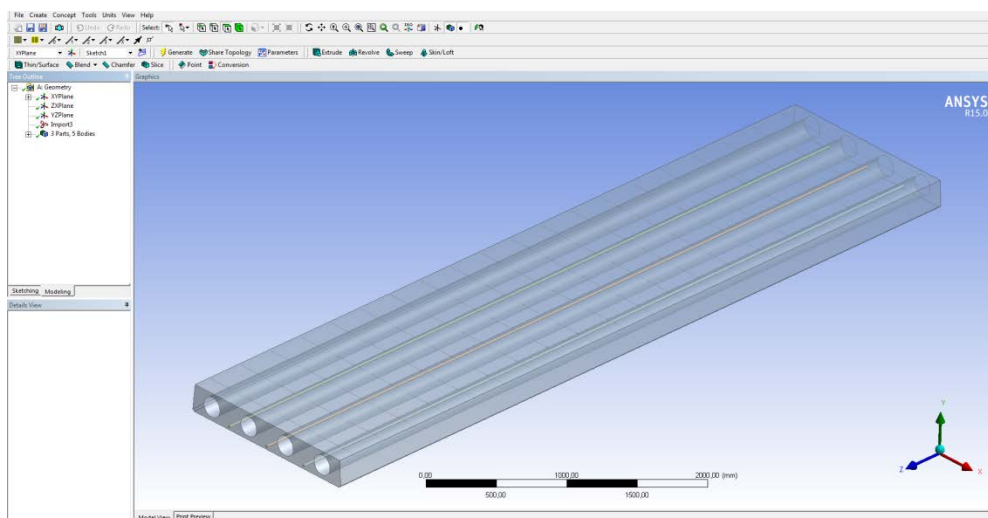


Рисунок 1. – Геометрическая модель плиты

Нагрев плит осуществлялся равномерно по всей длине со стороны нижней поверхности (со стороны армирования), как показано на рисунке 2. Температура этой поверхности соответствует температуре стандартного огневого воздействия. Теплоотдача с необогреваемой поверхности (со стороны внешней нагрузки) осуществляется по формуле:

$$q_e = q_{ке} + q_{ле}, \quad (1)$$

где $q_{ке}$ – тепловой поток за счет конвективного теплообмена, $q_{ле}$ – тепловой поток за счет излучения. Теплообмен по боковым поверхностям плиты не учитывается.

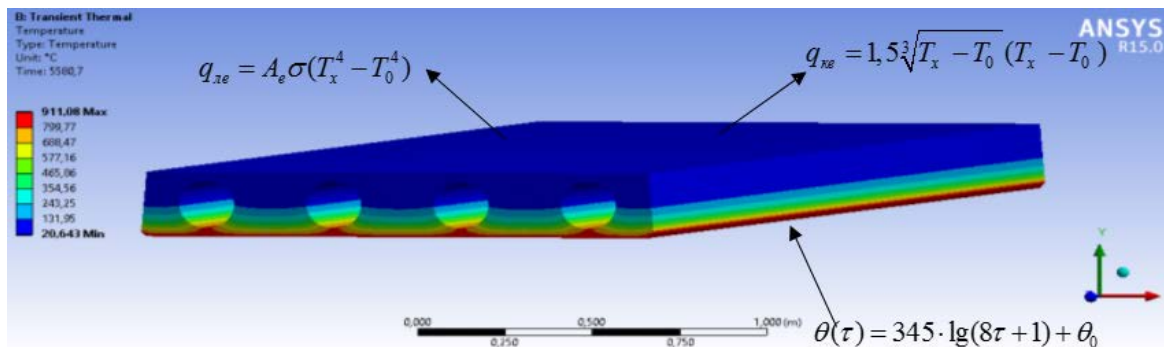
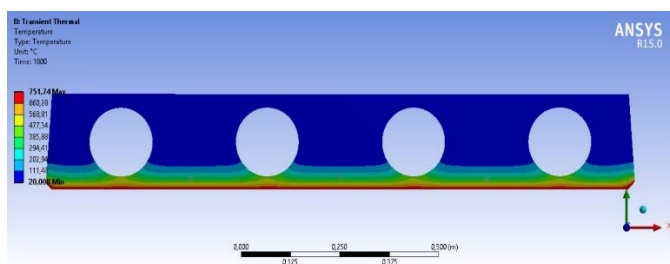


Рисунок 2. – Схема нагрева железобетонной плиты

Решение задачи нестационарной теплопроводности сводилось к определению температуры бетона и арматуры в любой точке поперечного сечения элемента в заданный момент времени. импортуются в модуль прочностных расчетов. Полученные в теплотехническом расчете температурные поля импортировались в прочностной модуль, и производился расчет напряженно-деформированного состояния за весь временной интервал нагрева элементов железобетонных конструкций. В модельной задаче плиту нагревали в течении 90 мин. При этом температура нижней поверхности плиты изменялась согласно стандартному огневому воздействию.

Результаты прогрева плиты на 30 минуте на момент разрушения конструкции представлены на рисунке 3.



а) прогрев плиты на 30 минуте



б) разрушение защитного слоя экспериментальных образцов

Рисунок 3. – Прогрев и разрушение экспериментальных образцов

В прочностном расчете для моделирования поведения бетона применен тип конечного элемента – SOLID65, который используется для 3D моделирования твердых тел с наличием или без армирующих элементов. Данный элемент позволяет учитывать растрескивание материала при растяжении и дробление при сжатии, что позволяет моделировать поведение бетонов под действием нагрузок.

Реализованная математическая модель позволяет учесть запредельное поведение бетона (при напряжениях и деформациях выше критических) с учетом его пластичности и возможных сдвиговых деформаций, что наиболее полно описывает поведение материала при нагружении изгибом с учетом арматуры.

Основные результаты, полученные при численном моделировании:

– проведен анализ компонентов вычислительной среды ANSYS, определены их возможности по учету температурных и силовых воздействий, возникающих в конструкциях при пожаре;

– осуществлен подбор и систематизация экспериментальных данных поведения железобетонных плит при огневом воздействии;

– разработаны параметрические модели железобетонных плит, построены нелинейные модели материалов бетона и арматурной стали, включающие упруго-пластические, температуразависимые диаграммы деформирования, а также трещинообразование в бетоне.

Хорошее согласование результатов моделирования с экспериментальными данными позволяет применять данную модель для оценки огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном.

Заключение. В ходе проведения исследований, получены следующие результаты:

1. Получены экспериментальные данные в ходе проведения огневых испытаний по определению предела огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном на испытательной печи для горизонтальных строительных конструкций. В результате испытаний определено, что для предварительно напряженных железобетонных плит без сцепления арматуры с бетоном при огневом воздействии характерно сильное хрупкое разрушение в сжатой зоне конструкции, вызванное обжатием бетона арматурой. Установлено, что для исключения хрупкого разрушения необходимо предусматривать дополнительное конструктивное армирование. Предел огнестойкости по потере целостности, несущей и теплоизолирующей способности составил REI 30.

2. Получены зависимости температуры на обогреваемой и необогреваемых поверхностях конструкций, температура арматуры, прогиб от времени огневого воздействия. Для предварительно напряженных железобетонных плит без сцепления арматуры с бетоном экспериментально и расчетным методом определена критическая температура, которая составляет 230 °С.

3. В программном комплексе ANSYS создана модель, позволяющая учесть в расчетах напряжения и деформации бетона выше критических с учетом пластичности и возможных сдвиговых деформаций, что наиболее полно описывает поведение материала при нагружении изгибом с учетом арматуры. Результаты теоретических исследований могут быть использованы при проведении расчетов огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном, так как полученные данные хорошо согласуются с экспериментальными.

ЛИТЕРАТУРА

1. ТР 2009/013/ВУ. Технический регламент Республики Беларусь. Здания и сооружения, строительные материалы и изделия. Безопасность. – Введ. 31.12.2009 г. – Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 2015. – 28 с.
2. ТКП 45-2.02-142-2011 Здания, строительные конструкции, материалы и изделия. Правила пожарно-технической классификации // Полнотекстовая информационно-поисковая система «СтройДОКУМЕНТ» [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. и прогр. (700 Мб). – Минск, НПП РУП «Стройтехнорм», 2007. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
3. Система стандартов пожарной безопасности. Пассивная противопожарная защита. Термины и определения: СТБ 11.0.03-95 – Введ. 16.03.95. – Минск: Белстандарт, 1995. – 12 с.
4. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. – М.: Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001 г. – 382 с.
5. ТКП 45-2.02-110-2008 Строительные конструкции. Порядок расчета пределов огнестойкости // Полнотекстовая информационно-поисковая система «СтройДОКУМЕНТ» [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. и прогр. (700 Мб). – Минск, НПП РУП «Стройтехнорм», 2007. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
6. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий [Текст] = Еўракод 2. Праектаванне жалезабетонных канструкцый. Частка 1-1. Агуль-

- ных правил і правил для будынкаў: ТКП EN 1992-1-1-2009. – Введ. 01-01-10. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2015. – 206 с. – (Национальный комплекс технических нормативных правовых актов в области архитектуры и строительства).
7. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-2. Общие правила определения огнестойкости [Текст] = Еўракод 2. Праектаванне жалезабетонных канструкцый. Частка 1-2. Агульныя правілы вызначэння вогнеўстойлівасці: ТКП EN 1992-1-2-2009. – Введ. 01-01-10. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2010. – 86 с. – (Национальный комплекс технических нормативных правовых актов в области архитектуры и строительства).
 8. Полевода, И.И. Результаты испытания на огнестойкость железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном / И.И. Полевода, Н.В. Зайнудинова, Н.И. Чайчиц // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2016. – № 1 (23). – С. 37-44.
 9. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции: ГОСТ 30247.1-94. – Введ. 01.10.98. – Минск: Минсктиппроект, 1998. – 7 с.
 10. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования: ГОСТ 30247.0-94. – Введ. 01.10.98. – Минск: Минсктиппроект, 1998. – 12 с.

MODELLING OF THE BEHAVIOR OF CONCRETE SLABS WITH UNBONDED REINFORCEMENT IN THE ANSYS PROGRAM COMPLEX

Ivan Palevoda, PhD in Technical Sciences, Associate Professor

Natallia Zainudzinava

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Minsk, Belarus

Purpose. The article is dedicated to the features of determination of fire resistance of prestressed concrete slab with unbonded reinforcement.

Methods. The fire test of concrete slabs with unbonded reinforcement of fire resistance. Computer modelling of concrete slabs with unbonded reinforcement of fire resistance.

Findings. The fire resistance limit of prestressed concrete slab with unbonded reinforcement and critical temperature for reinforcement are determined. Critical temperature for the reinforcement is defined according to the results of field tests and solving the inverse problem. The calculation of fire resistance of concrete slab with unbonded reinforcement is fulfilled in the ANSYS.

Application field of research. The obtained research data could be used in calculation and design of prestressed concrete slab with unbonded reinforcement.

Conclusions. In the article the model of reinforced concrete slabs with unbonded reinforcement is constructed. The behavior of the model under standard fire exposure is studied. The fire resistance limit of prestressed concrete slab with unbonded reinforcement and critical temperature for reinforcement are determined. The fire resistance of the model is estimated. The simulation results are compared with the experimental data.

Keywords: fire resistance, fire resistance limits, temperature regime, prestressed concrete slab with unbonded reinforcement.

(The date of submitting: October 20, 2017)

REFERENCES

1. Technical Regulations 2009/013/BY. *Buildings and structures, building materials and products. Security.* The full-text information retrieval system «StroyDOKUMENT». Electronic text data and programs (700 Mb). Minsk, RUE «Stroytechnorm», 2007. 1 electronic optical disc (CD-ROM). (rus)
2. Technical Code of Good Practice 45-2.02-142-2011 *Buildings, building designs, materials and products. Rules of fire-technical classification.* The full-text information retrieval system «StroyDOKUMENT». Electronic text data and programs (700 Mb). Minsk, RUE «Stroytechnorm», 2007. 1 electronic optical disc (CD-ROM). (rus)
3. Belarus State Standart 11.0.03-95 *Fire safety standards system. Passive fire protection. Terms and Definitions. Affirmed 16.03.1995.* Minsk: Belstandart, 1995. 12 p. (rus)
4. Roytman V.M. *Inzhenernyye resheniya po otsenke ognestoykosti proektiruemykh i rekonstruiruemykh zdaniy.* Moscow: Assotsiatsiya «Pozharnaya bezopasnost' i nauka», 2001. 382 p.
5. Technical Code of Good Practice 45-2.2.02-110-2008 *Building constructions. Calculation procedures of fire resistance limits.* The full-text information retrieval system «StroyDOKUMENT». Electronic text data and programs (700 Mb). Minsk, RUE «Stroytechnorm», 2007. 1 electronic optical disc (CD-ROM). (rus)
6. Technical Code of Good Practice EN 1992-1-1-2009 *Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for Affirmed 01.01.2010.* Minsk: The Ministry of Architecture and Building, 2015. – 206 p. (rus).
7. Technical Code of Good Practice EN 1992-1-2-2009 *Plain concrete structures.* Affirmed 01.01.2010. Minsk: The Ministry of Architecture and Building, 2010. 86 p. (rus)
8. Polevoda I.I., Zaynudinova N.V., Chaychits N.I. Rezul'taty ispytaniya na ognestoykost' zhelezobetonnnykh predvaritel'no napryazhennykh plit bez stsepleniya armatury s betonom [The results of the fire test concrete slabs with unbonded reinforcement of the fire resistance]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'.* 2016. No. 1 (23). Pp. 37-44. (rus)
9. Interstate Standard 30247.1-94 *Elements of building constructions. Fire resistance tests methods. Load-bearing and separating constructions Affirmed 01.10.1998.* Minsk: Minsktiproekt, 1998. 7 p. (rus)
10. Interstate Standard 30247.0-94 *Building constructions. Fire resistance tests methods. General requirements.* Affirmed 01.10.1998. Minsk: Minsktiproekt, 1998. 12 p. (rus)