

УДК 614.841.332

## ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОГНЕСТОЙКОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММОЙ СРЕДЫ ANSYS

Ширко А.В. \*, к.ф.-м.н, Камлюк А.Н. \*\*, к.ф.-м.н., доцент,  
Полевода И.И. \*\*, к.т.н., доцент, Зайнудинова Н.В. \*\*

\*Белорусский государственный технологический университет

\*\*Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

e-mail: mail@kii.gov.by

*В работе рассмотрены основные элементы железобетонных конструкций: плиты, балки и колонны, для которых исследовано поведение под воздействием температуры стандартного пожара. Результаты моделирования в среде Ansys Workbench хорошо соответствуют экспериментальным данным. На основе критерия потери теплоизолирующих свойств предложена оценка огнестойкости моделей.*

*We have considered the behavior of the basic elements of reinforced concrete structures – slabs, beams and columns – under standard fire exposure. The simulation results, which was carried out by software Ansys Workbench, are in good correspondence with the experimental data. The fire resistance of the models has been estimated by the criterion of the loss of the thermal insulating properties.*

(Поступила в редакцию 28 августа 2013 г.)

### ВВЕДЕНИЕ

Бетон является основным строительным материалом для всех типов сооружений. Понимание основ поведения таких материалов при нагружении, термическом воздействии и влиянии окружающей среды позволяет создавать более эффективные и безопасные формы элементов, осуществлять прогнозирование эксплуатационных свойств и проводить оптимизации конструкции на основе заданных критериев. Наиболее распространенным методом является опытная проверка готовых конструкций. Однако данный способ трудоемок и дорогостоящ, причем в случае оптимизации конструкций стоимость исследований возрастает многократно.

Существуют методы аналитического прогнозирования и оценки состояния бетонных и железобетонных конструкций [1–6]. В основу математического описания поведения сложных систем положено идеализирование и упрощения реальной схемы воздействия до примитивных расчетных схем. При этом математические выражения содержат большое количество поправочных коэффициентов, выбор которых и их значений существенно зависит от конструкции элемента, специфики материала и схемы нагружения [3]. Зачастую определение величины коэффициента требует не менее трудоемких экспериментов, чем испытание готового изделия.

С целью снижения трудоемкости и повышения эффективности проведения анализа предпринимаются попытки использования метода конечных элементов (МКЭ). МКЭ позволяет анализировать сложные системы с многообразием взаимосвязей между элементами внутри модели и внешним воздействием окружающей среды.

Использование специализированных расчетных программ на стадии оптимизации конструкции и принятия решений позволяет существенно увеличить эффективность и рентабельность исследовательской работы. В настоящей работе теплотехнические задачи решались на базе платформы Ansys Workbench.

Необходимо отметить, что достоверность данных моделирования с использованием МКЭ и их ценность не может быть гарантирована без сопоставления результатов

моделирования с экспериментальными данными. Лишь соответствие показателей по всем критериям может позволить говорить об универсальности той или иной модели и ее возможностей применения для типовых конструкций.

### ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

Для определения предела огнестойкости элементов железобетонных конструкций необходимо знать распределение температур по поперечным сечениям элемента из бетона при воздействии стандартного пожара. Под стандартным пожаром понимается единая стандартная кривая изменения температуры в зависимости от времени испытаний конструкций на огнестойкость. Полагается, что температура стандартного пожара изменяется в зависимости от времени в соответствии с уравнением:

$$T_f = T_0 + 345 \lg(8t + 1), \quad (1)$$

где  $t$  – время нагрева, мин.,  $T_0 = 20$  °С – начальная температура.

Решение задачи нестационарной теплопроводности сводится к определению температуры бетона и арматуры в некоторой точке поперечного сечения элемента в заданный момент времени. Функциональная зависимость температуры описывается дифференциальным уравнением теплопроводности Фурье при нелинейных граничных условиях и сложном процессе тепло- и массопереноса. Эта задача успешно решается в модуле нестационарной теплопроводности *Transient Thermal* в пакете *Ansys*. Рассмотрим особенности теплотехнического расчета железобетонных плит, балок и колонн, геометрические модели которых показаны на рис. 1 [7, 8].

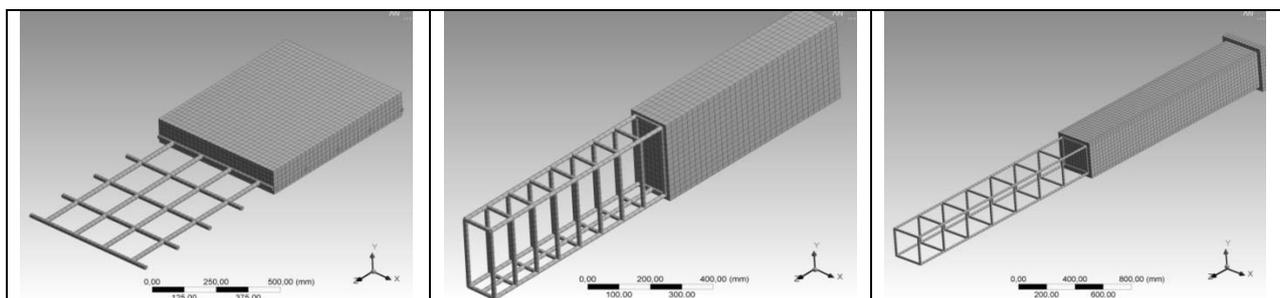


Рисунок 1 – Геометрические модели железобетонных плит, балок, колонн

#### Железобетонные плиты

Для отработки расчетных моделей оценки огнестойкости в качестве экспериментальных образцов были выбраны плиты перекрытия двух типов: П-1 и П-2 [3, 4], на основе железобетона класса В15 (легкий конструкционный керамзитобетон), армированного продольной и поперечной арматурой [3] (таблица).

Таблица – Параметры экспериментальных плит

Параметры	Плиты	
	П-1	П-2
Продольная арматура:		
– количество, шт.	8	8
– диаметр, мм	10	20
– шаг между арматурами, мм	133,3	133,3
Поперечная арматура:		
– количество, шт.	25	
– диаметр, мм	6	
– шаг между арматурами, мм	187,5	

Продолжение таблицы

Параметры	Плиты	
	П-1	П-2
Расстояние от нижней грани до центра сечения арматуры ( $a$ ), мм	25	30
Толщина защитного слоя бетона, мм	20	
Толщина плиты ( $h$ ), мм	120	
Ширина плиты ( $b$ ), мм	1200	
Длина плиты ( $l$ ), мм	3000	
Распределенная нагрузка ( $q$ ), кН/м	10,59	22,95

Нагрев плит осуществлялся равномерно по всей длине со стороны нижней поверхности (со стороны армирования), как показано на рис. 2. Температура этой поверхности соответствует температуре стандартного пожара.

Теплоотдача с необогреваемой поверхности со стороны внешней нагрузки осуществляется по двум механизмам [2]:

$$q_e = q_{ке} + q_{ле}, \quad (2)$$

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

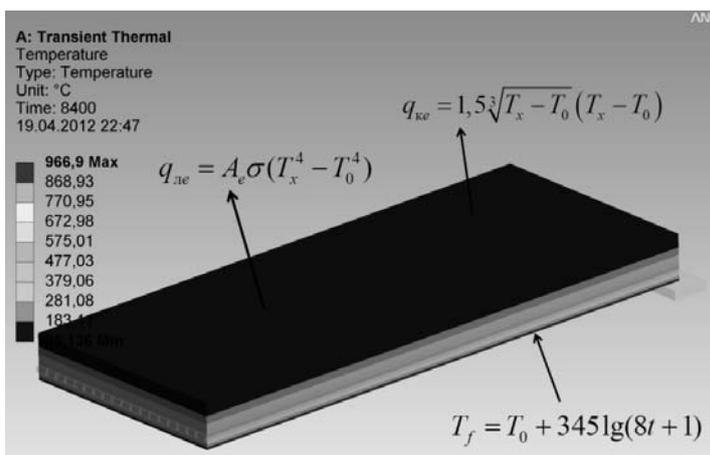


Рисунок 2 – Схема нагрева железобетонной плиты

В модельной задаче плиту нагревали в течении 180 мин. При этом температура нижней поверхности плиты изменялась согласно выражению (1). В итоге для любого момента времени нагрева были получены температурные поля в объеме плиты.

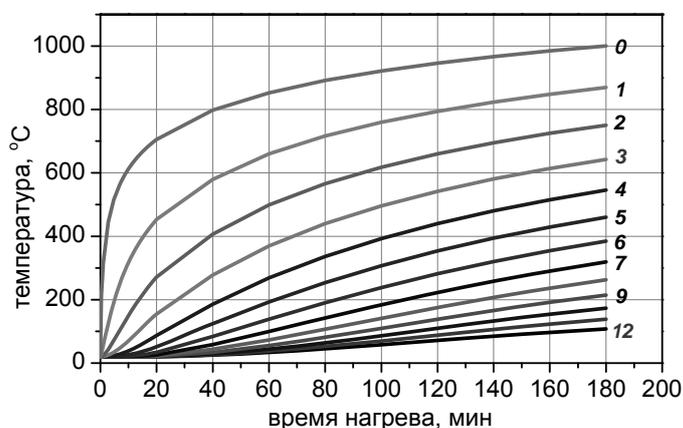


Рисунок 3 – Зависимость температуры в точках, расположенных по высоте сечения от времени нагрева

Для плиты толщиной 12 см температура в точках сечения по высоте сечения на всем интервале времени нагрева представлена на рис. 3. Значение 0 соответствует точке, находящейся на обогреваемой поверхности. В этой точке температура изменяется согласно температуре стандартного пожара. Значение 3 соответствует точке, находящейся в слое арматуры. Значение 12 соответствует точке, находящейся на необогреваемой поверхности плиты.

Главная задача моделирования на этом этапе состояла в получении температурных полей, как можно лучше соответствующих экспериментальным значениям, так как именно температурное поле в большей степени определяет последующее напряженно-деформированное состояние. Точность расчета определяется точностью моделирования теплотехнических свойств бетона и стали. Сравнение расчетных данных по температуре на поверхности плиты и в арматуре с экспериментальными данными [1, 3] приведено на рис. 4.

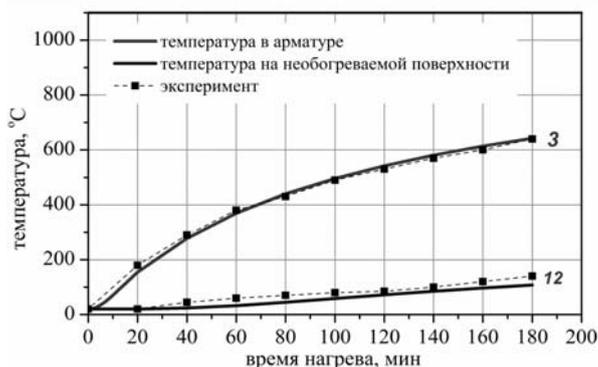


Рисунок 4 – Сравнение расчетных температур на необогреваемой поверхности плиты и в арматуре с экспериментальными данными

Как видно из рис. 4, имеет место хорошее совпадения расчетных данных с экспериментальными. Распределение температуры по высоте сечения в зависимости от времени нагрева показано на рис. 5.

На рис. 5 фактически показана плита толщиной 12 см (ось ординат) и арматура, лежащая на расстоянии 2 см от нижней плоскости плиты. Арматура диаметром 10 мм соответствует плите П-1, арматура диаметром 20 мм – плите П-2. Как видно из рис. 5, изменение температуры весьма существенно по высоте арматуры, особенно для арматуры диаметром 20 мм. Однако в расчетах это обстоятельство никак не учитывалось, поскольку арматура моделируется линейными телами и температура в ней соответствует температуре в узлах конечных элементов в бетоне, связанных с соответствующими узлами арматуры.

Температурные поля, показанные на рис. 5, фактически являются исходными данными для задачи расчета прочности, поэтому необходимо детальное сопоставление полей с экспериментальными данными [1,3]. Сопоставление расчетных температурных полей для различных времен нагрева с экспериментальными данными показано на рис. 6.

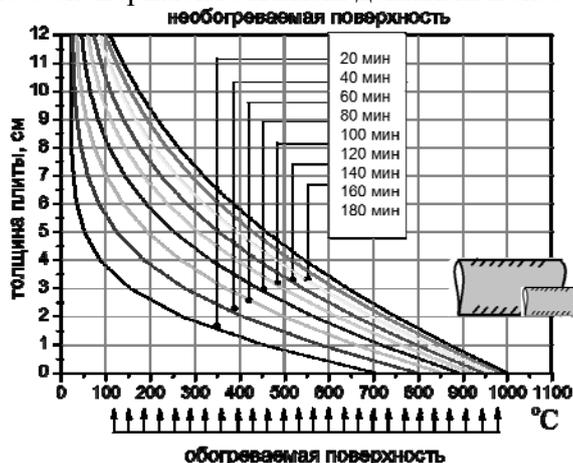


Рисунок 5 – Распределение температуры по высоте сечения в зависимости от времени нагрева

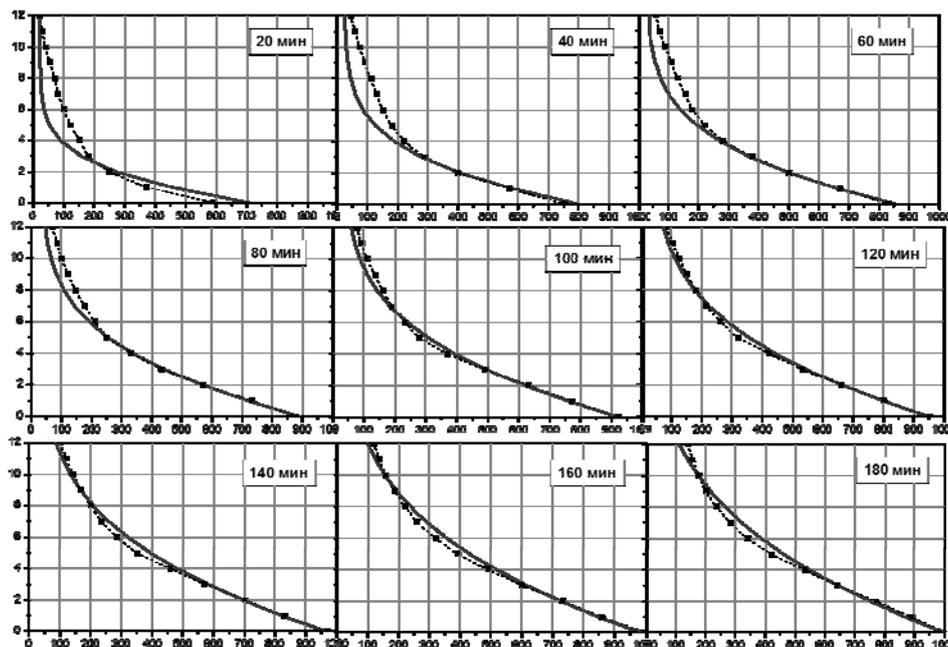


Рисунок 6 – Сравнение расчетных температурных полей с экспериментальными полями для времен нагрева 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 и 180 мин.

Как видно из рис. 6, ощутимое отклонение расчетных и экспериментальных данных имеет место на начальной стадии нагрева, при временах 20-40 мин. Экспериментальная температура поверхностных слоев плиты несколько выше, чем температура модельной задаче. Для остальных времен имеет место хорошее соответствие результатов.

Данные по температурным полям в плите позволяют дать оценку ее огнестойкости на основе критерия потери теплоизолирующих свойств. Этот критерий заключается в следующем: теплоизолирующие свойства плиты считаются утерянными, если температура на ее поверхности превышает допустимое значение. Фактически оценить предел огнестойкости плиты по потере теплоизолирующей способности можно по рис. 4 (кривая 12). По тому же рисунку косвенно можно говорить об пределе огнестойкости плиты по потере несущей способности, когда температура в арматуре (кривая 3) достигнет значения, при котором в стали начнет проявляться явление текучести, ведущее к разрушению конструкции.

### Железобетонные балки

Все заключения, сделанные при описании нестационарной теплопроводности плит, в целом остаются справедливыми и при теплотехническом расчете железобетонных балок.

Необходимо отметить, что в отличие от плит расчет нагрева балок проводился при условии, что температура стандартного пожара (1) одинакова для трех поверхностей – нижней и двух боковых, как показано на рис. 7.

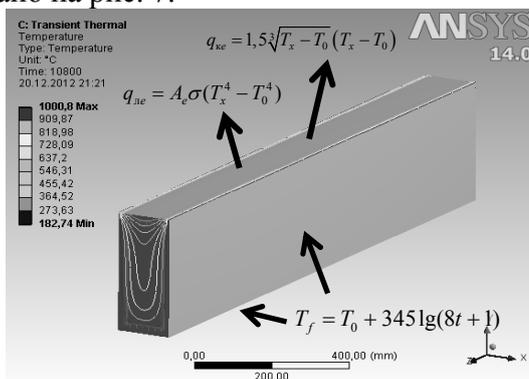


Рисунок 7 – Схема нагрева железобетонной балки

Расчет проведен для балки, геометрическая модель которой показана на рис. 1; у нее три продольные арматуры расположены внизу и две продольные арматуры – сверху.

При температурном воздействии на три поверхности балки, ее прогрев происходит более интенсивно из-за того, что в бетонном элементе появляются каналы-теплопроводы, состоящие из стержней арматуры, продольные оси которых совпадают с направлением продвижения теплового потока. Теплопроводность стали, как известно, значительно выше теплопроводности бетона. Причем, в отличие от плиты, арматурный каркас балки имеет неравномерное температурное поле по высоте каркаса (рис. 8).

Зависимость температуры на поверхности балки, а также температуры в нижней и верхней арматуре от времени нагрева представлена на рис. 9.

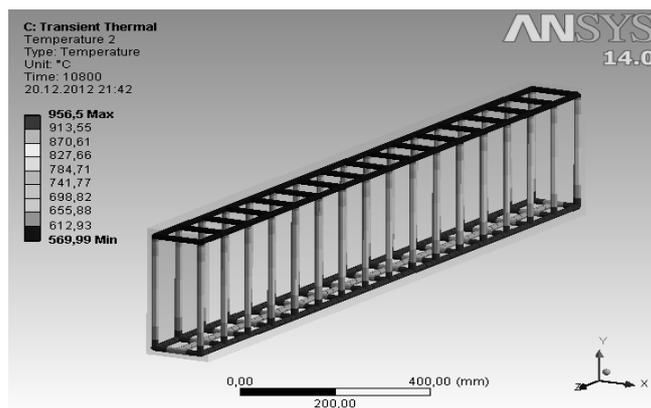


Рисунок 8 – Температурное поле каркаса арматуры в балке

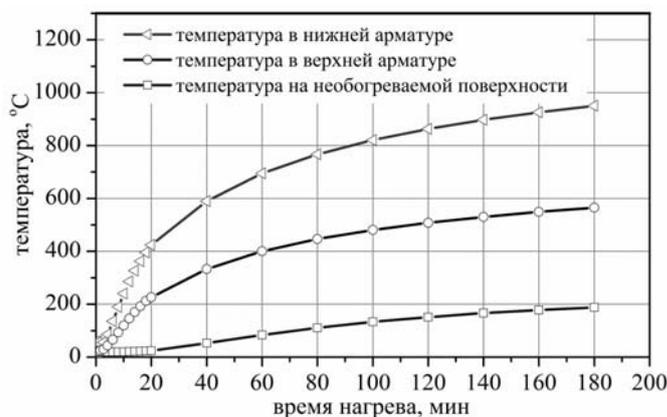


Рисунок 9 – Зависимость температуры в нижней арматуре и необогреваемой поверхности балки от времени нагрева

Из сравнения результатов расчета тепловых полей в балке и плите (рис. 9 и рис. 4) видно, что в балке арматура нагревается гораздо интенсивнее, и, таким образом, потеря ее прочности наступает раньше, и, в целом, огнестойкость балки будет ниже. Следует отметить, что если потеря прочности плиты может происходить как в следствии разрушения сжатой зоны бетона, так и в следствии текучести арматуры, то для балок потеря их прочности будет обусловлена в основном достижением предела текучести стали арматуры.

Рассмотрим температурные поля в балке при разных временах нагрева. На рис. 10 показаны поперечные сечения балки. Сечения разделены вертикальной осевой линией пополам так, чтобы можно было сопоставить температурные поля при двух временах нагрева: 20–40 мин., 60–80 мин., 100–120 и 140–160 мин. Справа на рис. 10 указана температурная шкала.

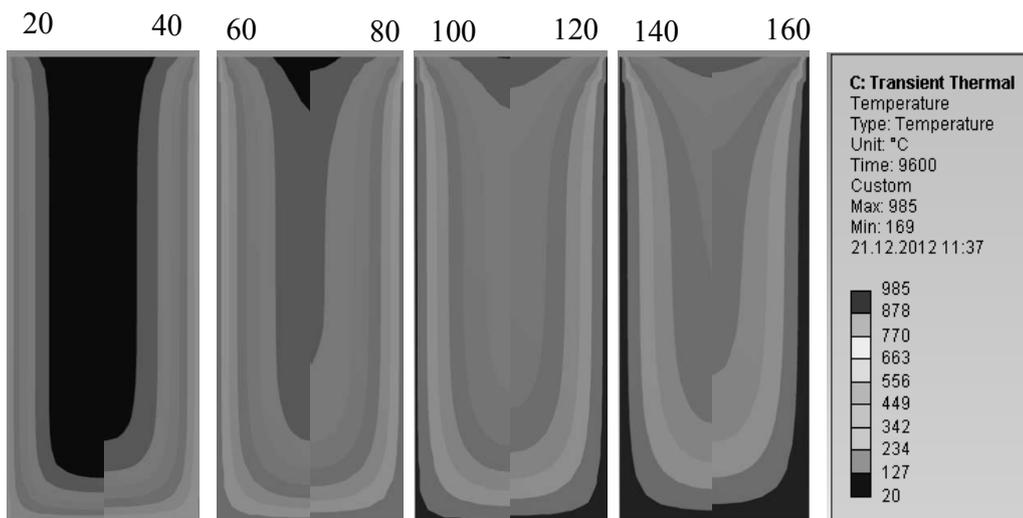


Рисунок 10 – Температурные поля в сечении балки при 20, 40, 60, 80, 100 и 120 мин. нагрева

Температурные поля, представленные на рис. 10, хорошо согласуются с экспериментальными данными для балок из керамзитобетона [1]. В последующем прочностном расчете эти поля будут накладываться на балку как внешнее воздействие. Результаты прочностной задачи напрямую зависят от точности определения температурных полей.

### Железобетонные колонны

Определим теперь температурные поля для колонны при ее четырехстороннем нагреве с помощью теплового воздействия стандартного пожара (1). Расчет проведен для колонны, геометрическая модель которой показана на рис. 1 (модель имеет четыре продольные арматуры в углах колонны и поперечную обвязку). Расчетная схема нагрева показана на рис. 11.

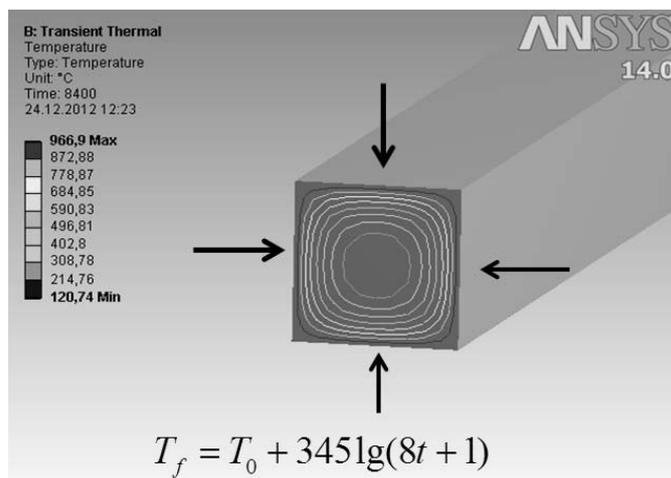


Рисунок 11 – Схема нагрева железобетонной колонны

Поскольку нагрев производится равномерно с четырех сторон колонны, то потери тепла за счет конвекции и излучение с этих поверхностей отсутствуют. Теплопередачей через торцевые поверхности колонны будем пренебрегать.

Прогрев колонны при температурном воздействии на ее четыре поверхности происходит наиболее интенсивно по сравнению с прогревом плит и балок. Это связано с тем, что в бетонном элементе появляются каналы-теплопроводы, состоящие из стержней арматуры,

продольные оси которых совпадают с направлением продвижения теплового потока (совпадают с градиентом температуры).

Так как теплопроводность стали значительно выше теплопроводности бетона, температурное поле арматурного каркаса колонны по сравнению с полем плиты более неравномерно по высоте каркаса (рис. 12).

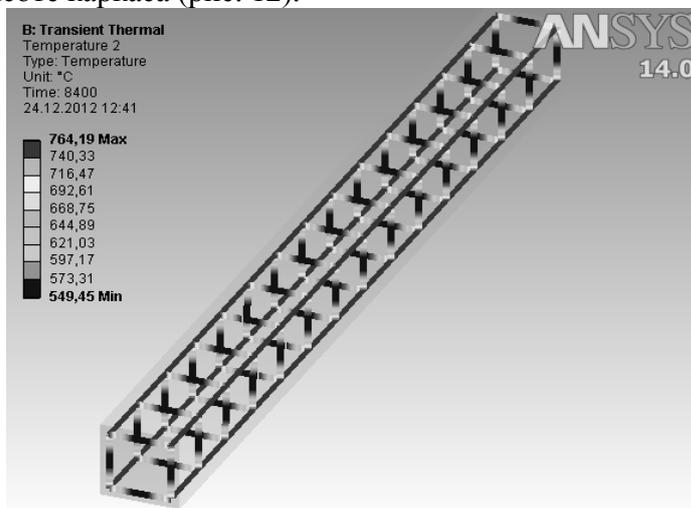


Рисунок 12 – Температурное поле каркаса арматуры в колонне

Зависимость температуры на поверхности колонны, а также температуры в продольных арматурах от времени нагрева представлена на рис. 13.

Из сравнения прогрева арматуры плит, балок и колонн (рис. 4, 9 и 13) следует, что наиболее интенсивный прогрев арматуры наблюдается в колоннах.

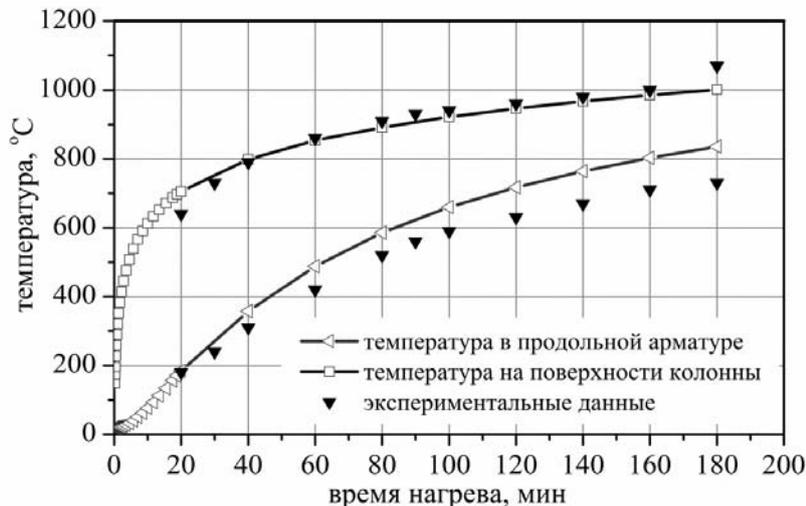


Рисунок 13 – Зависимость температуры в продольной арматуре и поверхности колонны от времени нагрева

На рис. 14 показаны поперечные сечения колонны, разделенные осевой линией пополам. Показаны температурные поля при временах нагрева: 20–40 мин., 60–80 мин., 100–120 и 140–160 мин.

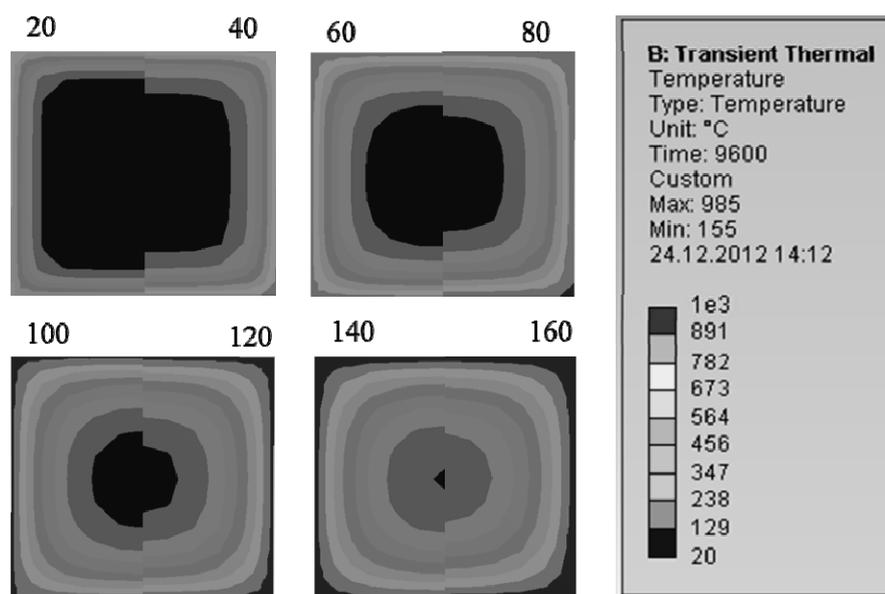


Рисунок 14 – Температурные поля в сечении колонны при 20, 40, 60, 80, 100, 120 и 160 мин. нагрева

Нами планируется последующий расчет прочности, в котором полученные температурные поля будут накладываться на колонну как внешнее воздействие.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе в системе ANSYS построены модели основных элементов железобетонных конструкций: плиты, балки и колонны. Получены температурные поля при воздействии стандартного пожара и прослежено поведение железобетонных элементов, а также по критерию потери теплоизолирующих свойств оценена их огнестойкость. Результаты моделирования хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными, что свидетельствует о возможности их применения при прогнозировании огнестойкости зданий и сооружений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Милованов, А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций / А.Ф. Милованов, – М.: Стройиздат, 1998. – 224 с.: ил.
2. Учебно-методическое пособие в помощь специалистам проектных и монтажных организаций. Раздел I: Противопожарная защита высотных зданий и уникальных объектов. ООО ПКФ «Эндемик». Москва. – 2004. – 85 с.
3. Левитский, Е.В. Диаграммный метод решения статической задачи расчета огнестойкости железобетонных конструкций [Электронный ресурс]: Дис. канд. техн. наук: 05.23.01. М.: РГБ, 2007. (Из фондов Российской Государственной Библиотеки).
4. Тимошенко, С.П. Сопротивление материалов: в 2 т. / пер. с англ. – М.: Наука, Т. 1: Элементарная теория и задачи, 1965. – 363 с.; Т. 2: Более сложные вопросы теории и задачи, 1965. – 480 с.
5. Willam, K.J. Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete / K.J. Willam, E.D. Warnke // Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering – 1975. – Vol. 19. – P. 174.
6. Wilson, E.L. Incompatible Displacement Models / E.L. Wilson, R.L. Taylor, W.P., Doherty, J. Ghaboussi // Numerical and Computer Methods in Structural Mechanics. edited by S.J. Fenves, et al.. Academic Press, Inc.. N. Y. and London. – 1973. – P. 43-57.

7. Ширко, А.В. Методика создания параметрических моделей железобетонных элементов конструкций / А.В. Ширко, А.Н. Камлюк, И.И. Полевода, А.С. Дробыш // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – 2013. – Т. 8, № 1. – С. 48–54.
8. Камлюк, А.Н. Модели материалов арматуры и бетона для теплотехнических и прочностных расчетов на примере российского стандарта / А.Н. Камлюк, А.В. Ширко, И.И. Полевода // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2013. – № 1(17). – С. 104–116.