

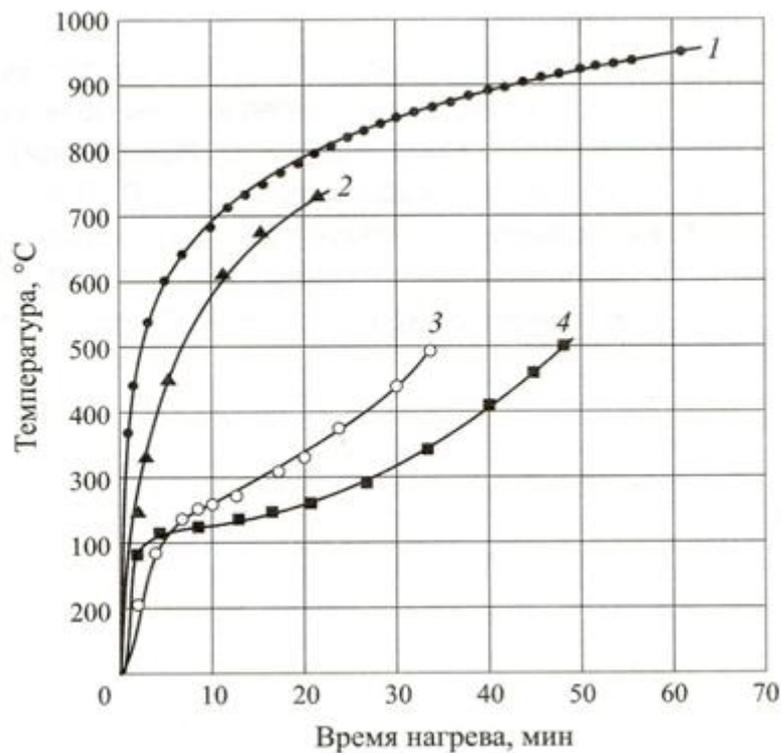
## К вопросу об оценке долговечности огнезащитных покрытий

Проф., д.т.н. Ройтман Владимир Миронович  
Щербина Сергей Викторович  
Габдулин Рустам Шайдуллович  
Руководитель отдела технологий огнезащиты  
ООО «СтройЗащита».  
r\_gabdulin@stroyzashita.ru  
тел. +7(495) 988-17-26

В последнее время наблюдается повышенный интерес к изучению механизма огнезащитного эффекта, вспучивающихся при пожаре, покрытий строительных конструкций [1-4]. Результаты экспериментального изучения в лабораторных условиях макрокинетики поведения, вспучивающегося при нагреве, покрытия металлической пластины приведены в работе [1]. Огнезащитное покрытие наносилось на металлическую пластину, которая моделировала защищаемую металлическую конструкцию. Режим нагрева испытуемого образца соответствовал так называемому стандартному температурному режиму, применяемому для испытаний конструкций на огнестойкость [6]. Во время огневого испытания регистрировалась температура нагрева металлической пластины. «Предельное время огнезащиты» фиксировалось по достижению на металлической пластине температуры 5000С. Были получены зависимости «предельного времени огнезащиты» от исходной толщины вспучивающегося при нагреве покрытия. Авторы отметили развитие в слое, вспучивающегося при нагреве, покрытия структурной неоднородности образующегося «пенококса», которая может служить источником дефектов, напряжений, приводящих кразного рода изменениям структуры и геометрии вспучивающегося слоя.

Динамика «вспенивания» огнезащитных покрытий на основе органо-неорганических составов была рассмотрена в работе [2]. Использовалась методика испытаний, описанная в [1]. При достижении заданной температуры нагрева образцов, нагрев прекращали, образцы охлаждали и после этого на срезах вспученного покрытия изучали толщину вспененного слоя и отличающиеся цветом слои вспененной массы. Было отмечено, что в условиях прогрева по режиму стандартного пожара, имеет место определенная эволюция структуры вспенивающихся органо-неорганических покрытий при нагреве. Эта эволюция включает образование «мультиячеистой» фазы, сопровождаемое увеличением объема, снижением теплопроводности и отъемом тепла. Далее происходит кокование и твердение пены, т.е. образование собственно «пенококса» Затем происходит «озоление» слоя пенококса. Последняя стадия эволюции структуры – это удаление (испарение, абляция) материала с поверхности покрытия, связанное с выгоранием поверхностных слоев покрытия. Все эти процессы влияют на изменение теплопроводности вспучивающегося покрытия и на его огнезащитную эффективность. Причем, на этой последней стадии эволюции структуры покрытия при нагреве происходит уменьшение объема пены, достигающего примерно половины от максимума вспененного объема.

Механизм формирования вспучивающихся покрытий, используемых для огнезащиты металлических конструкций, рассмотрен в [3]. Отмечается важность изучения особенностей формирования огнезащитного «пенококсового» слоя, его теплофизических характеристик и их стабильности при воздействии пламени. На рис.1 [3] представлены характерные особенности изменения температуры прогрева металлической пластины в условиях моделирующих воздействие стандартного пожара, при наличии и отсутствии вспучивающегося покрытия.



**Рис. 1. Особенности прогрева металлической пластины в условиях моделирующего воздействия пожара**

1- режим прогрева, моделирующий воздействие «стандартного» пожара;  
 2- кривая прогрева незащищенной пластины;  
 3- кривая прогрева пластины, защищенной слоем вспучивающейся краски (тип 1);  
 4- кривая прогрева пластины, защищенной слоем вспучивающейся краски (тип 2).  
 Эти особенности прогрева защищаемого элемента, можно представить [6] в виде нескольких характерных стадий прогрева, которые зависят от особенностей формирования слоя вспучивающегося покрытия.

Первая стадия, до начала процесса вспучивания защитного покрытия (100-140°C). На этой стадии, которая длится 3-5 минут, происходит быстрый прогрев защищаемой металлической пластины (см. кривые 3,4 рис.1).

Вторая стадия воздействия пожара: на этой стадии теплового воздействия прогрев защищаемой пластины резко замедляется за счет начала и развития процесса вспучивания защитного покрытия (см. кривые 3,4 рис.1 до момента времени прогрева 30-35 минут).

Третья стадия: прогрев защищаемой пластины опять ускоряется (см. кривые 3,4 рис.1 после момента времени прогрева 30-35 минут) за счет уменьшения толщины вспученного слоя защитного покрытия при его деструкции и разрушении. Момент времени достижения температурой металлической плиты критического значения, равного 500°C, характеризует «огнезащитную эффективность» (ОЭЭ) покрытия металла.

В силу возникшей необходимости применения огнезащитных вспучивающихся покрытий для повышения огнестойкости не только для металлических, но и железобетонных конструкций [4], возникла также необходимость в изучении особенностей формирования огнезащитного эффекта вспучивающихся покрытий и для случая защиты ими железобетонных конструкций. Для достижения этой цели в данной работе были решены следующие задачи:  
 1. Экспериментальное исследование особенностей прогрева при пожаре элементов железобетонных конструкций, защищаемых вспучивающимся покрытием и без него.  
 2. Оценка огнезащитной эффективности (ОЭЭ) вспучивающегося при нагреве покрытия железобетонных конструкций.  
 3. Изучение формирования слоя защитного вспучивающегося покрытия железобетонных конструкций методами компьютерного моделирования.

**Методы** и **объекты** **исследования**

Экспериментальные исследования проводились на специальных огневых установках [4]. Общий вид огневой установки для испытания железобетонных плит представлен на рис.2. Огневое

воздействие на плиту осуществлялось со стороны огнезащитного покрытия по режиму «стандартного» пожара [5]. За предельное состояние образца, при проведении испытаний, принималось достижение температуры на рабочей арматуре плиты, равной 500 °С [5].



**Рис.2. Общий вид огневой установки и испытуемого образца железобетонной плиты**

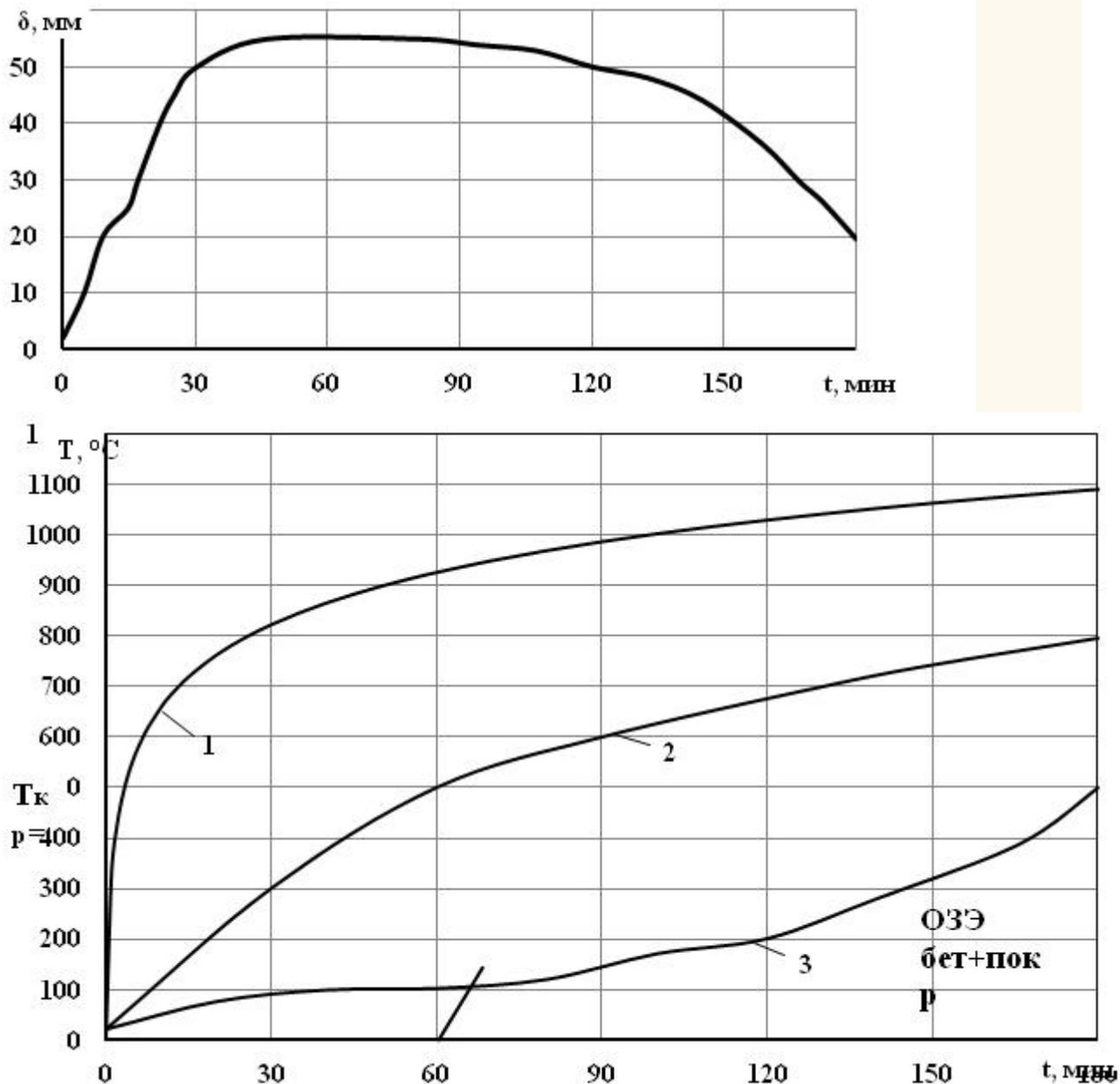
Для оценки изменения толщины вспучивающегося слоя покрытия, во время проведения огневых испытаний, проводилась визуальная фиксация изменения положения наружной плоскости вспучивающегося покрытия, относительно выбранной неподвижной отметки, непосредственно в огневой камере печи.

Образцы испытанных железобетонных плит имели размеры 1100 x 1100 x 200 мм. Защитный слой бетона до рабочей арматуры 20 мм. Класс применяемого бетона В 60, плотностью 2300 кг/м<sup>3</sup>. Опытные образцы изготавливались по заводской технологии. Каркас плит собирался с применением арматуры периодического профиля АIII, сечением 10 мм – продольное армирование и проволока, сечением 5 мм – поперечное армирование. Для регистрации изменения температуры рабочей арматуры плиты во время огневого испытания, в процессе изготовления плит, на рабочую арматуру устанавливались термопары типа ХК. Плиты после распалубки, перед проведением огневых испытаний выдерживались при нормальных условиях в течение 100 дней. Влажность бетона, составила 3,4 %. Часть образцов покрывалась огнезащитным вспучивающимся покрытием толщиной 2 мм.

Изучение формирования слоя защитного вспучивающегося покрытия железобетонных плит при их прогреве производилось также методом компьютерного моделирования с помощью многофункционального программного комплекса «ANSYS» методом конечно-элементных расчетов.

### **Результаты экспериментальных испытаний**

Результаты экспериментальных исследований особенностей прогрева при пожаре железобетонных плит, защищенных вспучивающимся покрытием и без него, представлены на рис.3.



**Рис.3. Результаты экспериментальных исследований огнезащитной эффективности (ОЗЭ) вспучивающихся покрытий железобетонных конструкций.**

- а) Изменение толщины слоя вспучивающегося покрытия железобетонной плиты в зависимости от времени воздействия «стандартного» пожара.
- б) Изменение температуры рабочей арматуры железобетонной плиты в зависимости от времени воздействия «стандартного» пожара.
- 1-температурный режим «стандартного» пожара;
- 2-прогрев рабочей арматуры плиты, не защищенной огнезащитным покрытием [9];
- 3-Прогрев рабочей арматуры плиты, защищенной вспучивающимся покрытием «Джокер М» толщиной 2 мм.

Необходимо, прежде всего, обратить внимание на визуально зафиксированные особенности формирования слоя вспучивающегося покрытия железобетонной плиты в условиях воздействия «стандартного» пожара (см. рис.3а). До воздействия пожара толщина слоя огнезащитного покрытия составляла всего 2 миллиметра. В процессе теплового воздействия по стандартному режиму (кривая 1 рис.3б) начинается процесс вспучивания испытуемого огнезащитного покрытия. Это приводит к увеличению толщины

огнезащитного покрытия до 50-55 мм к 50 минуте теплового воздействия (см. рис.3а) и формированию пористой структуры слоя вспученного покрытия. Возникшая пористая структура имеет низкие значения коэффициента теплопроводности и высокое термическое сопротивление, что и определяет его огнезащитную эффективность. Затем (рис.3а) наблюдается стадия стабильного существования вспученного слоя защитного покрытия на поверхности защищаемой конструкции. Эта стадия продолжается с 50-ой до 80-ой минуты теплового воздействия (рис. 3а). На этой стадии нагрева образца, продолжающиеся процессы вспучивания менее прогретых слоев покрытия уравниваются начавшимся процессом разрушения поверхностных слоев защитного покрытия. Последняя стадия эволюции вспучивающегося покрытия характеризуется уменьшением толщины вспученного слоя покрытия за счет преобладания процессов разрушения его структуры при дальнейшем повышении температуры прогрева. К 180-ой минуте теплового воздействия «стандартного» пожара, толщина слоя вспученного покрытия уменьшается до 20 мм., что составляет около 40% от максимальной толщины этого слоя (50—55 мм) (см. рис. 3а). Отмеченные выше, стадии эволюции толщины вспученного слоя защитного покрытия, соответственно, влияют на особенности прогрева рабочей арматуры защищаемой железобетонной плиты и, в конце концов, определяют значение огнезащитной эффективности (ОЗЭ) покрытия.

Оценка огнезащитной эффективности (ОЗЭ) вспучивающегося при нагреве покрытия железобетонных конструкций проводилась по достижению температуры рабочей арматуры испытываемой плиты критического значения, равного 500°С. Момент времени, когда температура рабочей арматуры плиты во время огневых испытаний достигала значения 500°С, определял «огнезащитную эффективность» (ОЗЭ) покрытия конструкции. Рассмотрение рис.3б (кривая 2) дает представление о том, что защитный слой бетона рабочей арматуры плиты имеет значение огнезащитной эффективности» (ОЗЭ) равное 60 мин. При наличии защитного слоя бетона рабочей арматуры и вспучивающегося защитного покрытия на поверхности плиты значение «огнезащитной эффективности» (ОЗЭ) возрастает до значения 180 мин (см. кривую 3 рис.3б). Если обозначить «огнезащитную эффективность» (ОЗЭ) защитный слой бетона рабочей арматуры плиты как  $OZЭ_{бет}$ , а суммарную «огнезащитную эффективность» защитного слоя бетона арматуры и вспучивающегося покрытия как  $OZЭ_{бет+покр.}$ , то «огнезащитная эффективность» вспучивающегося покрытия  $OZЭ_{покр.}$  будет определяться из соотношения:

$$OZЭ_{покр.} = \frac{OZЭ_{бет+покр.} - OZЭ_{бет}}$$

Значение «огнезащитной эффективности» вспучивающегося покрытия  $OZЭ_{покр.}$  для конкретного огневого испытания, представленного на рис.3, таким образом, будет равно:  $OZЭ_{покр.} = 180 \text{ мин.} - 60 \text{ минут} = 120 \text{ минут}$  Таким образом, наличие защитного слоя бетона у рабочей арматуры элементов железобетонных конструкций, по температуре которой предлагается фиксировать «огнезащитную эффективность» (ОЗЭ) вспучивающихся и других покрытий, создает дополнительный защитный эффект, который суммируется с огнезащитным эффектом вспучивающегося покрытия.

Суммарный защитный эффект вспучивающегося покрытия и защитного слоя бетона позволяет повышать огнестойкость железобетонных конструкций до величин 180 минут и более. Это дает возможность отказаться от неэффективного и дорогостоящего увеличения рабочего сечения несущих железобетонных конструкций для обеспечения их необходимой огнестойкости при проектировании высотных, уникальных и особо ответственных объектов.

## Результаты

## компьютерного

## моделирования

В силу достаточно упрощенной и приблизительной визуальной фиксации изменения толщины слоя вспучивающегося покрытия железобетонных конструкций во время их огневых испытаний, особенности формирования слоя этого вспучивающегося покрытия при прогреве дополнительно исследовались с помощью методов компьютерного моделирования с применением программного комплекса «ANSYS»

В процессе этих исследований проводилась оценка вклада различных факторов (изменения тепловых характеристик материалов от температуры нагрева, степени черноты поверхностей обогреваемой конструкции, влажности бетона, динамики изменения толщины вспучивающегося слоя покрытия и др.) на характер прогрева рабочей арматуры железобетонных плит — показателя, определяющего «огнезащитную эффективность» покрытия.

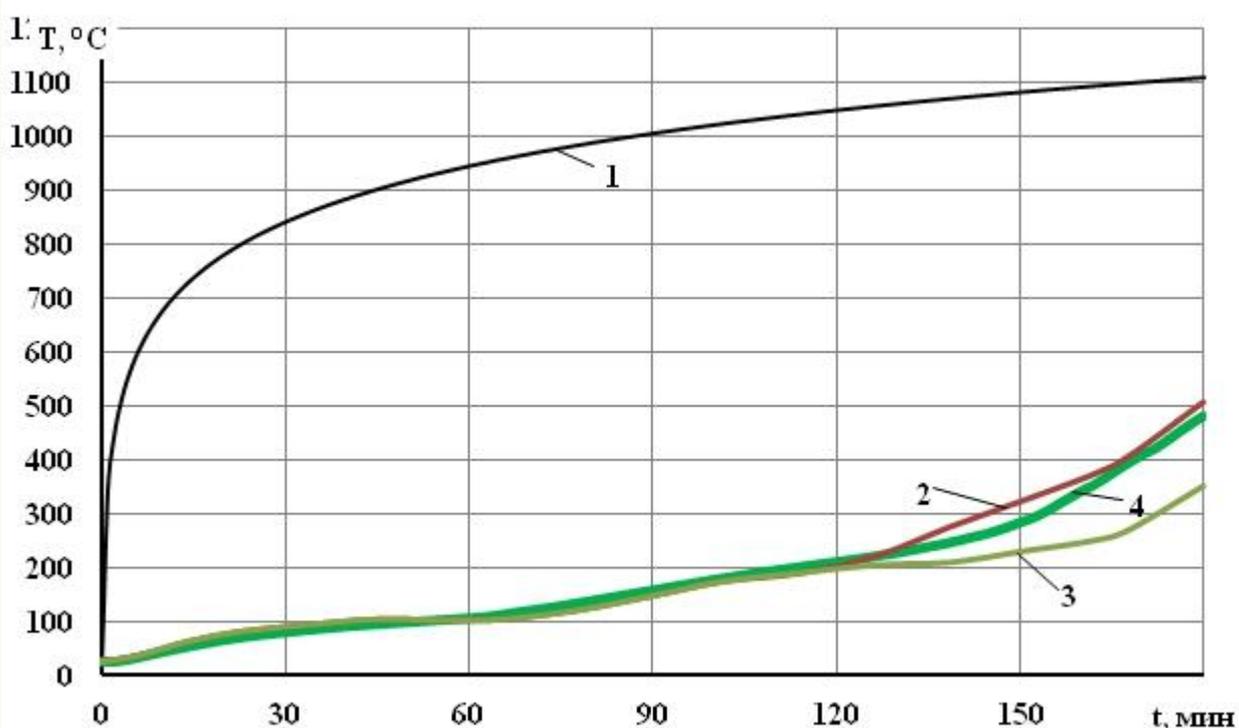
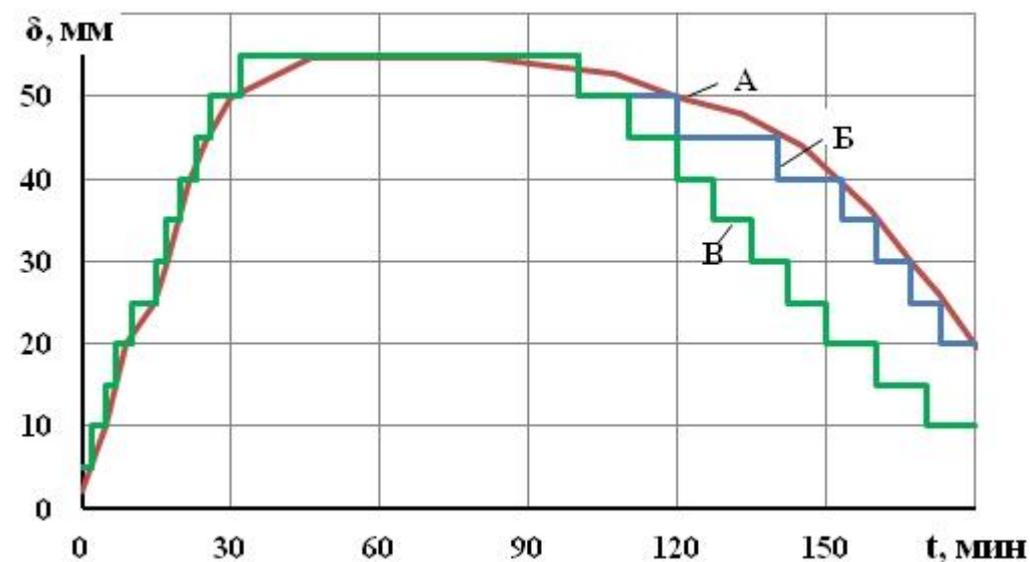


Рис.4 Результаты компьютерного моделирования особенностей формирования слоя огнезащитного вспучивающегося покрытия «Джокер М» железобетонной плиты в условиях воздействия «стандартного» пожара.

а) Изменения толщины слоя огнезащитного покрытия железобетонной плиты в зависимости от времени воздействия «стандартного» пожара.

б) Изменение температуры рабочей арматуры плиты в зависимости от времени воздействия «стандартного» пожара.

1- температурный режим «стандартного» пожара;

2- экспериментальная кривая прогрева рабочей арматуры испытуемой плиты, имеющей огнезащитное вспучивающееся покрытие;

3- кривая прогрева рабочей арматуры плиты, полученная с помощью компьютерного моделирования, при аппроксимации «Б» эволюции толщины слоя вспучивающегося слоя покрытия, полученной визуальным путем во время огневых испытаний (кривая «А»);  
 4- кривая прогрева рабочей арматуры плиты, полученная с помощью компьютерного моделирования, при аппроксимации «В»(рис.4а) эволюции толщины слоя вспучивающегося слоя покрытия.

Компьютерное моделирование реализовывалось путем введения значений перечисленных выше

факторов, с учетом различных вариантов их переменности в рассматриваемых условиях, в математическую модель задачи, реализуемую с помощью программного продукта «ANSYS» Путем последовательного введения различных итераций кривой эволюции вспучивающегося покрытия при прогреве железобетонной плиты, удалось уточнить динамику формирования и деструкции слоя вспучивающегося покрытия, по сравнению с приблизительной, визуальной оценкой во время огневых испытаний (рис.4). Совпадение расчетных кривых прогрева рабочей арматуры плиты с результатами огневых испытаний на участке ускоренного прогрева на 130-180-х минутах огневого воздействия на конструкцию, было достигнуто при итерации «В» кривой эволюции толщины вспучивающегося слоя (см. рис.4б). Это означает, что, в реальности, деструкции вспученного слоя происходила быстрее, чем это было приблизительно зафиксировано при огневых испытаниях, что могло приводить к недооценке реальной опасности пожара.

## Выводы

1. Выявлены особенности формирования огнезащитного вспучивающегося покрытия, применительно к защите ими железобетонных конструкций.
2. Показано, что наличие защитного слоя бетона у рабочей арматуры элементов железобетонных конструкций, по температуре которой предлагается фиксировать огнезащитную эффективность вспучивающихся и других покрытий, создает дополнительный защитный эффект, который суммируется с огнезащитным эффектом вспучивающегося покрытия. Суммарный защитный эффект вспучивающегося покрытия и защитного слоя бетона позволяет повышать огнестойкость железобетонных конструкций до величин 180 минут и более. Это позволяет отказаться от неэффективного и дорогостоящего увеличения рабочего сечения несущих железобетонных конструкций при проектировании высотных, уникальных и особо ответственных объектов.
3. Компьютерное моделирование особенностей формирования слоя вспучивающегося защитного покрытия железобетонных конструкций при воздействии пожара позволило уточнить результаты визуальных наблюдений этого процесса во время огневых испытаний, которые приводили к недооценке опасности пожара.
4. Показана возможность и эффективность применения методов компьютерного моделирования, на основе современных программных комплексов, не только для изучения особенностей формирования защитного вспучивающегося покрытия железобетонных конструкций, но и для перехода к экспериментально – расчетной и расчетной оценке огнезащитной эффективности различных огнезащитных покрытий строительных конструкций.

## Список

## литературы:

1. Ненахов С.А., Пименова В.П. Экспериментальное изучение влияния толщины вспенивающихся покрытий на огнезащитную эффективность // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т.20, № 5. – С. 2-9.
2. Ненахов С.А., Пименова В.П. Динамика вспенивания огнезащитных покрытий на основе органических составов // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т.20, № 8. – С. 17-24.
3. Халтуринский Н.А., Крупкин В.Г. О механизме образования огнезащитных вспучивающихся покрытий // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т.20, № 10. – С. 33-36
4. Кривцов Ю.В., Ламкин О.Б., Рубцов В.В., Габдулин Р.Ш. Тонкослойная огнезащита бетона // Промышленное и гражданское строительство – 2006. - №6. – С 42-44.
5. ГОСТ 30247.0-94. Конструкции строительные. Методы испытания на огнестойкость. Общие требования: введ. 01.01.96. – М. : Изд-во стандартов, 1996.
6. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. – М.: Пожнаука, 2001. – 382 с.
7. EN 1990: 2002 (Е). EUROCODES structuraux.
8. СТО 36554501-006-2006. Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций. – М.: НИИЖБ, 2006. –81 с.

**Источник: статья была опубликована в ежеквартальном научном журнале «Наука и безопасность» № 4, март-май, 2012**