

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОГНЕСТОЙКОСТИ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С КОНСТРУКТИВНОЙ ОГНЕЗАЩИТОЙ

Полевода И.И., к.т.н., доцент, Иваницкий А.Г., Жамойдик С.М.
Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь
ip@kii.gov.by

Для решения теплотехнической задачи в рамках определения предела огнестойкости, разработан алгоритм решения математической модели, описывающей прогрев стальных конструкций с конструктивной огнезащитой. В основу модели положен метод элементарных тепловых балансов А.П. Ваничева, адаптированный для решения задач огнестойкости А.И. Яковлевым. Для автоматизации проводимых расчетов разработано программное средство. Работоспособность алгоритма подтверждена результатами натурных огневых испытаний, проведенных на полигоне НИИ ПБиЧС МЧС Республики Беларусь.

For solving a problem of thermotechnics in the framework of finding of the limit of fire resistance, the algorithm for solving of mathematical model is developed describing warming up of steel constructions with applied fire protection. The model is based on the method of elementary thermal balances of A. Vanichev adapted for the solution of the tasks of fire resistance by A. Yakovlev. For the automation of implemented calculations the software has been developed. The availability of the algorithm is confirmed by results of natural fire tests carried out on the testing area of the Research Institute of Fire Safety and Emergencies of the Ministry of Emergency Measures of the Republic of Belarus.

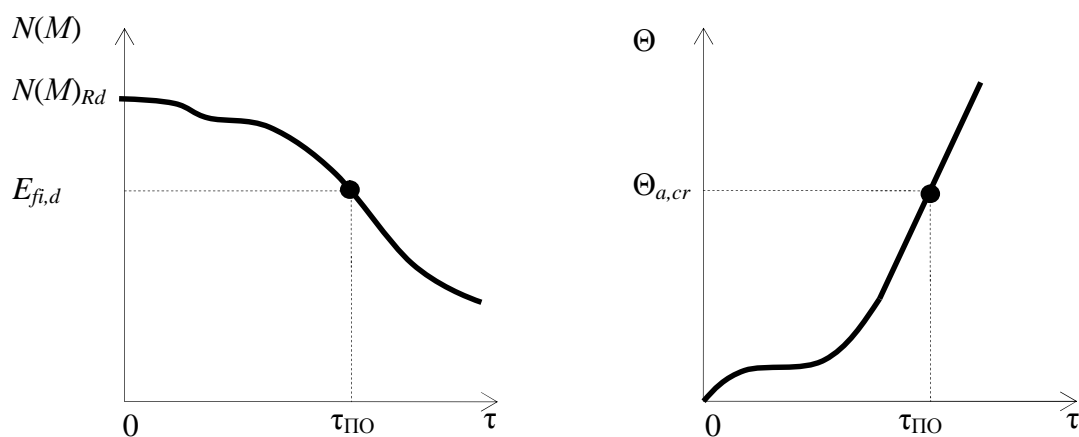
(Поступила в редакцию 2 июня 2010 г.)

ВВЕДЕНИЕ

Предел огнестойкости является одним из основных показателей, определяющий применение строительных конструкций [1]. Применение огнезащиты металлических конструкций позволяет значительно расширить область их применения.

Способы огнезащиты конструкций разнообразны и включают конструктивные методы, методы создания на поверхности элементов теплозащитных экранов и покрытий [2–4]. Широкому использованию конструктивной огнезащиты сопутствует ее превосходство в ряде случаев над другими видами огнезащиты – легкость (по сравнению с бетонированием, оштукатуриванием), устойчивость к низким температурам (по сравнению с красками, лаками, обмазками), возможность обеспечить предел огнестойкости до R240 (например, плита «Экопласт» производства «ПЧУП Дипкун»). В то же время отсутствие объективной информации о фактических пределах огнезащищенных конструкций препятствует их интенсивному применению в строительстве.

Предельное состояние R (потеря несущей способности) для стальных конструкций, как правило, наступает при снижении от теплового воздействия пожара предела текучести стали до значения действующих напряжений в сечении (что соответствует времени достижения критической температуры сечения θ_{cr}) (рис. 1).



$N(M)$ – сила (момент), действующая в сечении; $N(M)_{Rd}$ – расчетное сопротивление сечения;
 $E_{fi,d}$ – расчетное значение воздействий при пожаре; τ – длительность огневого воздействия;
 $\tau_{ПО}$ – предел огнестойкости конструкции; Θ – средняя температура в сечении; $\Theta_{a,cr}$ – критическая температура стали, соответствующая наступлению предела текучести

Рисунок 1 – График достижения предела огнестойкости по предельному состоянию R вследствие снижения сопротивления стали с огнезащитой до рабочих нагрузок (а); вследствие прогрева сечения стальной конструкции с огнезащитой до критической температуры (б)

Предел огнестойкости стальных конструкций с конструктивной огнезащитой может быть определен так же, как для незащищенных стальных конструкций, и принят равным времени прогрева сечения стальной конструкции с огнезащитой до критической температуры. Таким образом, задача по определению предела огнестойкости должна решаться в два этапа. На первом этапе на основании анализа статической схемы работы строительной конструкции необходимо определить значение коэффициента условий работы стали при пожаре, который, в свою очередь, определяет критическую температуру сечения стальной конструкции. Второй этап заключается в рассмотрении теплотехнической задачи, решение которой дает время прогрева сечения стали до критической температуры.

Настоящая статья посвящена решению теплотехнической задачи.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Решение теплотехнической задачи заключается в определении температуры во всех расчетных точках сечения конструкции в заданный момент времени τ при тепловом воздействии моделируемого пожара. Для этого необходимо составить уравнения теплового баланса элементарных ячеек, на которые разбивается сечение конструкции. Температуру каждой элементарной ячейки будем определять методом элементарных тепловых балансов А.П. Ваничева, адаптированным А.И. Яковлевым для решения задач огнестойкости. В этом методе конструкция с огнезащитой по сечению разбивается на элементарные ячейки таким образом, чтобы расчетные точки располагались на границах ячеек неоднородных материалов, а также на наружных поверхностях конструкций [5].

В результате имеем двумерную задачу, и для произвольной ячейки mn (рис. 2) уравнение изменения внутренней энергии имеет вид:

$$\Delta U_{mn}(\tau) = (C + D \cdot \Theta_{mn}(\tau)) \cdot \rho \cdot V \cdot (\Theta_{mn}(\tau + \Delta\tau) - \Theta_{mn}(\tau)), \quad (1)$$

где C – удельная теплоемкость материала при температуре 20 °С, Дж · кг⁻¹ · °С⁻¹;
 D – коэффициент изменения удельной теплоемкости материала, Дж · кг⁻¹ · °С⁻²;

$\Theta_{mn}(\tau)$ – температура ячейки в момент времени τ , °С;

ρ – плотность материала, кг·м⁻³;

V – объем элементарной ячейки, м³;

$\Theta_{mn}(\tau + \Delta\tau)$ – температура ячейки в момент времени $(\tau + \Delta\tau)$, °С.

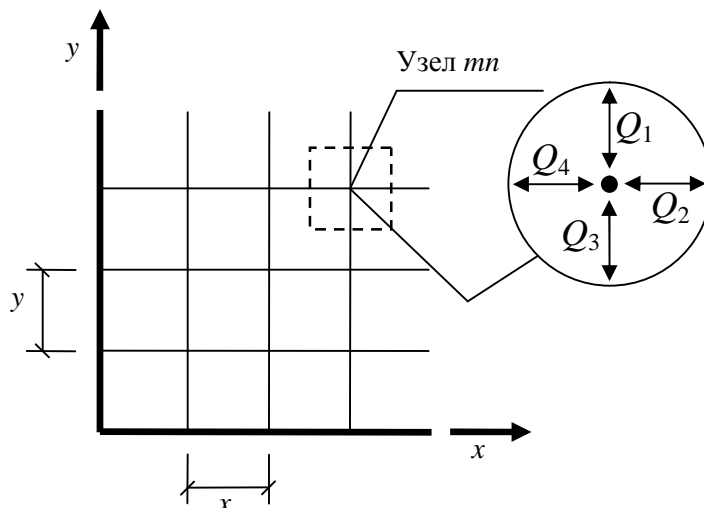


Рисунок 2 – Схема разбития конструкции на элементарные ячейки

Температура ячейки через интервал времени $\Delta\tau$, таким образом, составит:

$$\Theta_{mn}(\tau + \Delta\tau) = \Theta_{mn}(\tau) + \frac{\Delta U_{mn}(\tau)}{\rho \cdot V \cdot (C + D \cdot \Theta_{mn}(\tau))}, \quad (2)$$

При наличии в конструкции влагосодержащих материалов в уравнение теплового баланса (1) вводится член U_w , учитывающий замедление прогрева из-за расхода тепла на испарение воды при 100 °С. Принимается, что испарение воды происходит последовательно от слоя к слою без изменения влагосодержания последующих слоев. Энергия, затраченная на испарение воды в каждой ячейке, составит:

$$U_w(\tau) = \frac{\varphi \cdot r \cdot V \cdot \rho}{100}, \quad (3)$$

где φ – весовая влажность материала, %;

r – скрытая теплота парообразования воды, Дж·кг⁻¹.

С другой стороны, изменение внутренней энергии ячейки обусловлено входящими и исходящими потоками тепла Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 вдоль каждой из осей:

$$\Delta U_{mn} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4. \quad (4)$$

Для автоматизации вычисления параметров температурного прогрева стальных конструкций с конструктивной огнезащитой разработано программное средство для расчета динамики прогрева стальных строительных конструкций с конструктивной огнезащитой, позволяющее моделировать тепловое воздействие пожара на строительные конструкции. Интерфейс ввода исходных данных программного средства показан на рис. 3, 4.

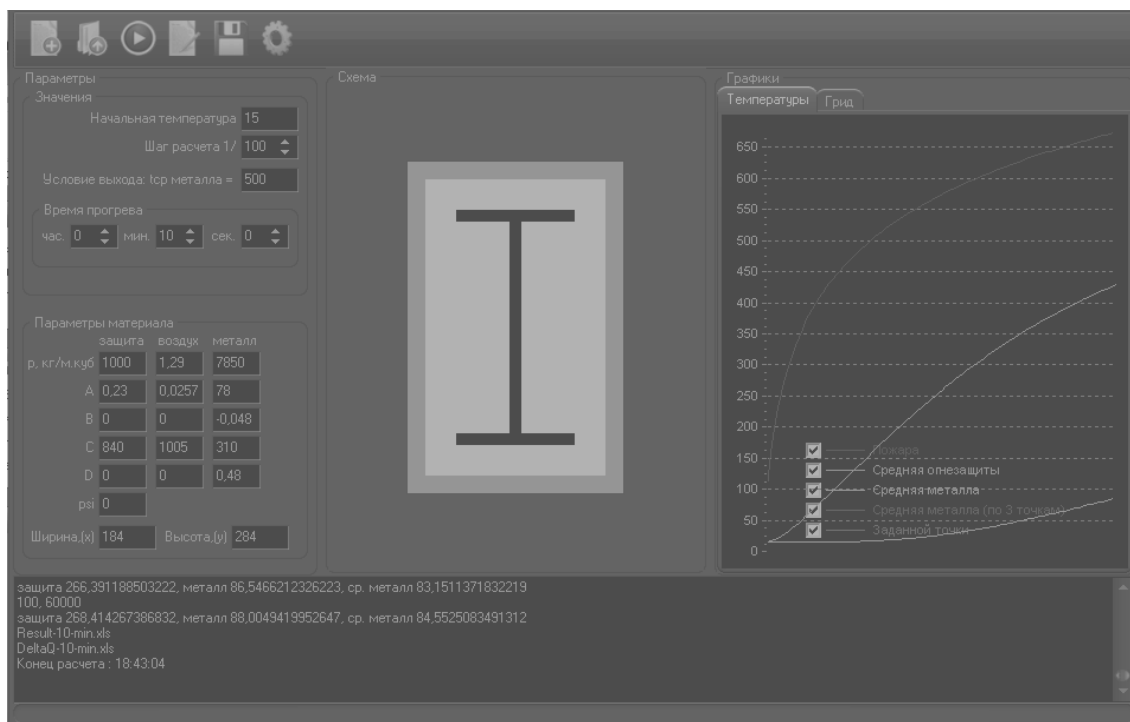


Рисунок 3 – Интерфейс ввода данных программного средства

Программное средство позволяет задавать расчетные схемы сечений стальных элементов с конструктивной огнезащитой с любыми геометрическими параметрами (за исключением круглого сечения) (рис. 4). Настройка параметров сохранения результатов расчета осуществляется пользователем через заданные промежутки времени. Результат расчета отображается как в графическом виде (рис. 5, а, б), так и виде числовых значений температур элементарных ячеек в табличной форме.

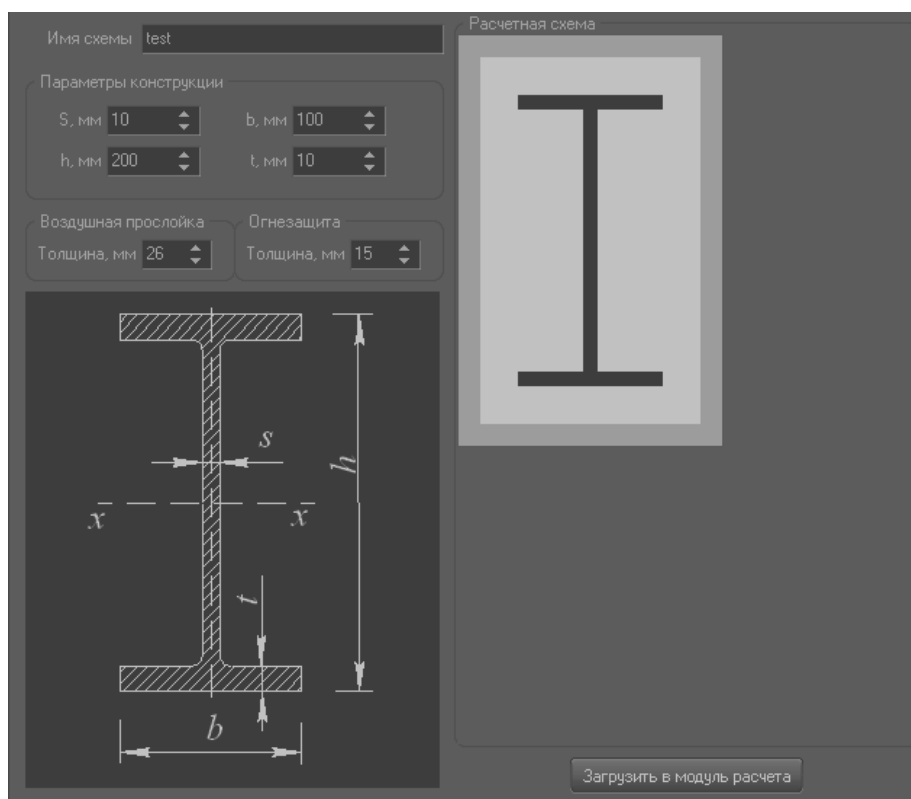


Рисунок 4 – Конструктор сечений программного средства

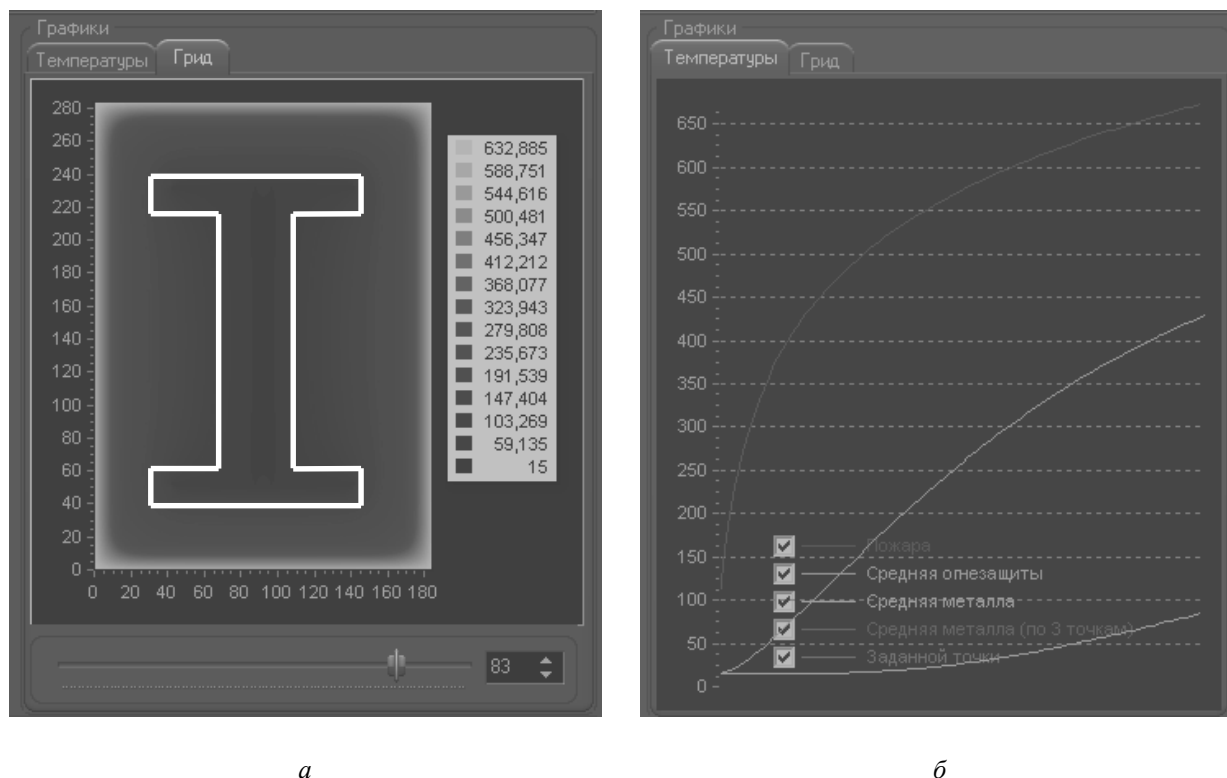


Рисунок 5 – Графическое отображение результата расчета в виде температурных полей (а), в виде графика (б)

Для проверки работоспособности разработанного алгоритма в лаборатории НИИ ПБиЧС МЧС Республики Беларусь проведены экспериментальные исследования нагрева стальной колонны с конструктивной огнезащитой при стандартном огневом воздействии. Для испытаний выбрана стальная колонна двутаврового сечения № 20 по ГОСТ 8239-89 [6], облицованная гипсовой огнестойкой плитой (ДГТО) FIREBOARD производства Knauf Gips KG.

Вокруг стальной колонны по периметру была устроена воздушная прослойка, на расстоянии 27 мм от параллельных полок двутавра – каркас из гипсовых армированных стекловолокном огнестойких плит (ДГТО) FIREBOARD производства Knauf Gips KG толщиной 15 и 25 мм (для обеспечения предела огнестойкости конструкции R60 и R90 соответственно) и оцинкованных стальных деталей, посредством которых выполнялось крепление гипсовых плит к стальной колонне. Крепление гипсовых деталей к оцинкованным стальным деталям осуществлялось посредством металлических саморезов. В местах стыков гипсовых деталей и по верхней части периметра была нанесена шпатлевка.

Испытания проводились без статической нагрузки при тепловом воздействии стандартного пожара до наступления критической температуры в сечении опытного образца. В качестве критической температуры для всех исследуемых образцов была принята температура 500 °С.

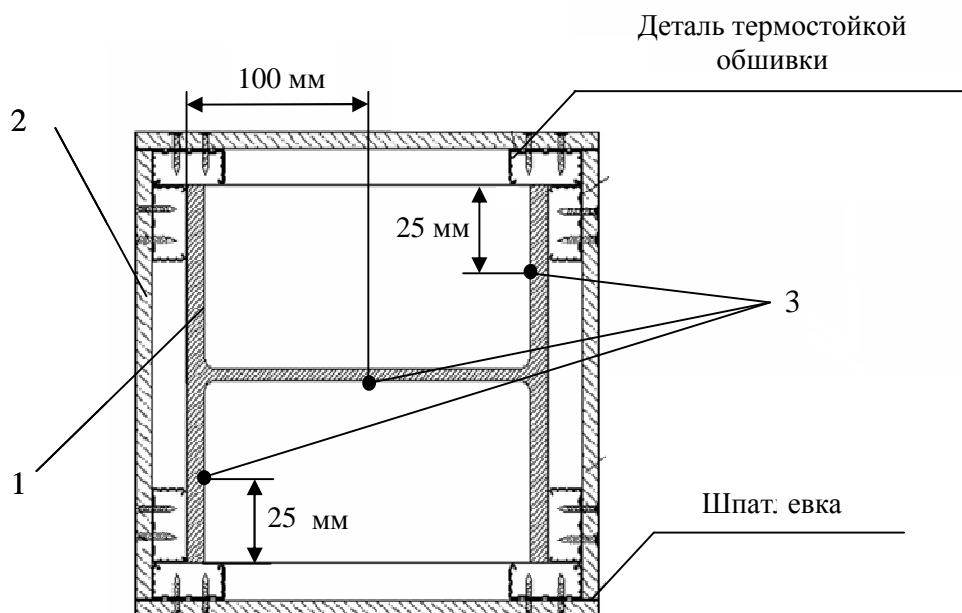
Испытания образцов с толщиной гипсовых плит 15 и 25 мм проводились при температуре окружающей среды, соответственно, при 9 и 27 °С. Температуру окружающей среды измеряли на расстоянии 1 м от поверхности гипсовых плит.

Подготовка к проведению испытаний включала расстановку термоэлектрических преобразователей (ТЭП) в печи и на образце, проверку и отладку приборов, систем подачи и сжигания топлива, установку опытного образца в печи.

Измерение толщины огнезащиты проводилось в десяти точках, рассредоточенных по периметру обогреваемой поверхности двутавра (с шагом 500 мм по высоте образца). В качестве расчетной толщины огнезащиты принято среднее арифметическое значение всех измерений.

Температура стального образца измерялась посредством ТЭП. Установка ТЭП на образце осуществлялась путем зачеканивания в среднем сечении образца на стенке и на

внутренних поверхностях полок двутавра. На каждом образце установлено три ТЭП. Схема расстановки ТЭП представлена на рис. 6.



1 – двутавр; 2 – огнезащитное покрытие; 3 – термоэлектрические преобразователи (ТЭП)

Рисунок 6 – Разрез конструктивной схемы испытуемых огнезащищенных стальных колонн толщиной гипсовой плиты 15 и 25 мм и схема расстановки термоэлектрических преобразователей

Среднее арифметическое значение показаний ТЭП принималось в качестве расчетной температуры внешнего периметра стального сечения.

На рис. 7 представлен вид конструкции после проведения огневых испытаний. Наибольшие термические повреждения наблюдаются в местах сопряжения деталей термостойкой обшивки. Следует отметить, что обугливания и масштабного расслоения конструкции при огневом воздействии не произошло.

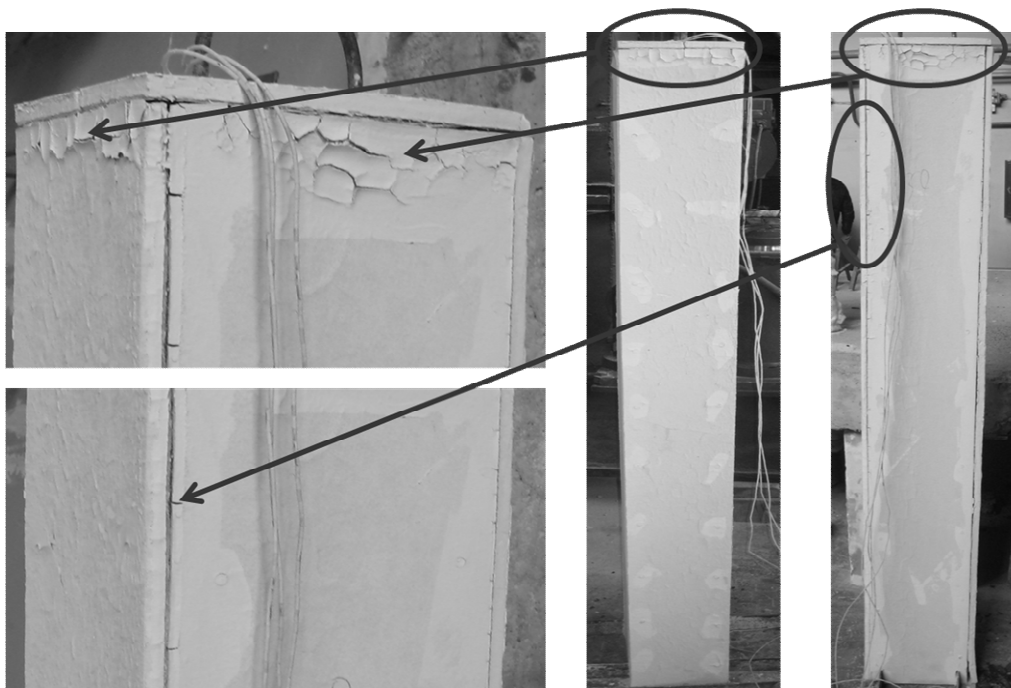


Рисунок 7 – Вид исследуемого образца после проведения огневых испытаний

При проведении экспериментальных исследований в НИИ ПБиЧС МЧС Республики Беларусь по нагреву рассматриваемых стальных колонн с конструктивной огнезащитой при стандартном огневом воздействии были установлены следующие значения времени прогрева до температуры 500 °С: для колонн с толщиной огнезащиты 15 и 25 мм, соответственно, 65 и 94 мин стандартного огневого воздействия (см. рис. 8, 9).

Расчет с использованием разработанной программы дал следующие результаты: средняя температура 500 °С на поверхности стальных колонн с огнезащитой толщиной 15 и 25 мм была достигнута на 54-й и 77-й минуте соответственно (см. рис. 8, 9).

Анализ результатов испытаний выявил, что во время проведения испытаний, когда средняя температура термопар, закрепленных на образце, показывала значения в диапазоне 90–100 °С (см. рис. 8, 9), происходило замедление прогрева исследуемой конструкции (плато на рис. 8, 9). При защите колонны гипсокартоном толщиной 15 мм промежуток времени замедления прогрева конструкции составил 10 минут, а при защите гипсокартоном толщиной 25 мм – 27 минут. Этот результат связан с тем, что подводимое тепло от пожара расходовалось на испарение воды из конструкции.

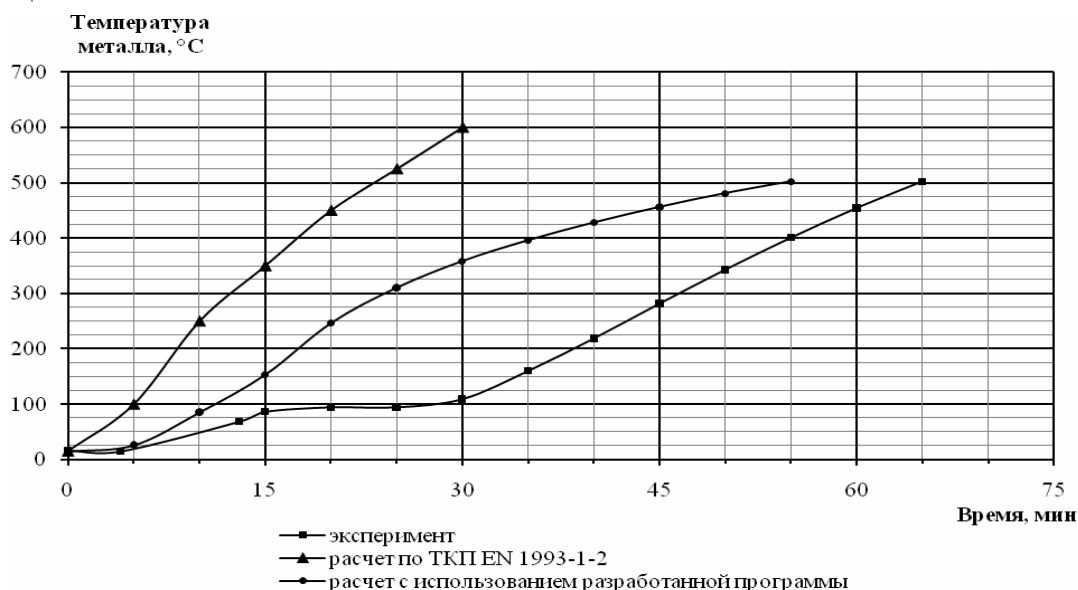


Рисунок 8 – Изменение средней температуры сечения образца, защищенного гипсовым листом толщиной 15 мм, в условиях стандартного температурного режима

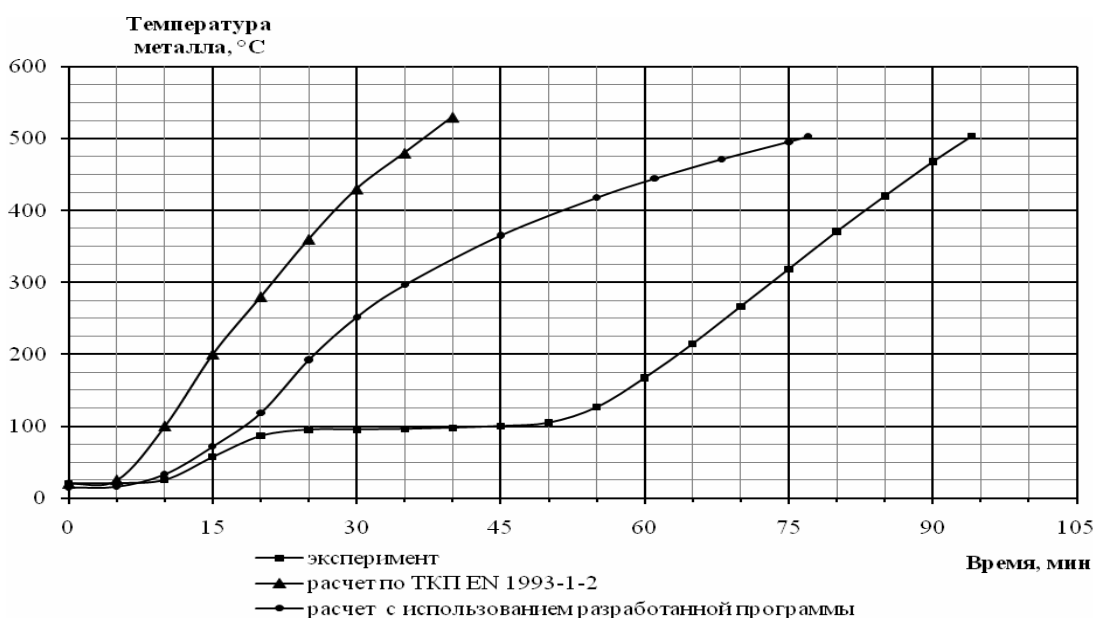


Рисунок 9 – Изменение средней температуры сечения образца, защищенного гипсовым листом толщиной 25 мм, в условиях стандартного температурного режима

С другой стороны, на этапе проверки разработанного алгоритма, в уравнение изменения внутренней энергии ячейки не была учтена энергия, затраченная на нагрев и испарение воды, которая, безусловно, идет в запас огнестойкости. Как результат, расхождение теоретически определенных и экспериментально полученных временных параметров теплового прогрева рассматриваемых образцов до температуры 500 °С с толщиной огнезащиты 15 и 25 мм составляет 17 и 18,1 % соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Для описания температурного прогрева металлической конструкции с конструктивной огнезащитой использован метод элементарных тепловых балансов А.П. Ваничева, адаптированный для решения задач огнестойкости А.И. Яковлевым [2]. Разработанное по этой модели программное средство позволяет определять значения температуры расчетных ячеек в заданный момент времени, что необходимо при определении времени прогрева сечения конструкции до критической температуры. Разработанное программное средство позволяет моделировать воздействие пожара на строительные конструкции (за исключением круглого сечения) с любыми геометрическими параметрами.

2. На полигоне НИИ ПБиЧС МЧС Республики Беларусь проведены экспериментальные исследования конструктивной огнезащиты стальных колонн гипсовыми плитами с воздушной прослойкой. Для проведения эксперимента была взята стальная колонна двутаврового сечения № 20 по ГОСТ 8239-89, облицованная гипсовой огнестойкой плитой (ДГТО) FIREBOARD производства Knauf Gips KG.

3. Получено, что расхождение экспериментально полученных и теоретически рассчитанных значений температурного прогрева испытуемых конструкций до 500 °С не превышает 20 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Национальный комплекс технических нормативных правовых актов в области архитектуры и строительства. Пожарно-техническая классификация зданий, строительных конструкций и материалов = Нацыянальны комплекс тэхнічных прававых актаў у вобласці архітэктурны і будаўніцтва. Пажарна-тэхнічная класіфікацыя будынкаў, будаўнічых канструкцый і матэрыялаў : СНБ 2.02.01-98. – Введ. 12.01.2001. – Минск : М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2001. – 11 с.
2. Ройтман, М.Я. Противопожарное нормирование в строительстве / М.Я. Ройтман. – 2-е изд. – М. : Стройиздат, 1985. – 590 с.
3. Кудаленкин, В.Ф. Пожарная профилактика в строительстве : учебник / В.Ф. Кудаленкин ; ВИПТШ МВД СССР. – М., 1985. – 452 с.
4. Романенков, И.Г. Огнестойкость строительных конструкций из эффективных материалов / И.Г. Романенков, В.Н. Зегернкорн. – М. : Стройиздат, 1984. – 140 с.
5. Яковлев, А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций / А.И. Яковлев. – М. : Стройиздат, 1988. – 143 с.
6. Двутавры стальные горячекатаные. Сортамент: ГОСТ 8239-89. – Введ. 27.09.89. – М. : Гос. комитет СССР по стандартам : Центр. науч.-исследоват. ин-т строительных конструкций, 1989. – 4 с.
7. Система противопожарного нормирования и стандартизации. Нормы пожарной безопасности Республики Беларусь. Огнезащитные средства для стальных конструкций. Общие требования. Методы определения огнезащитной эффективности : НПБ 12-2000. – Введ. 1.03.2000. – Минск : Науч.-исследоват. ин-т пожарной безопасности МЧС Респ. Беларусь, 2000. – 8 с.