

УДК [614.841.332:672.112-027/267]:624.04

МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ОГНЕСТОЙКОСТИ СТАЛЬНЫХ КОЛОНН С КОНСТРУКТИВНОЙ ОГНЕЗАЩИТОЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ ПО ПЕРИМЕТРУ ПОМЕЩЕНИЯ

Жамойдик С.М.

Разработана методика температурного прогрева, использующая математическую модель передачи тепла методом элементарных тепловых балансов, предложенную Ваничевым А.П. и адаптированную для решения задач огнестойкости Яковлевым А.И. Работоспособность методики температурного прогрева подтверждена результатами модельных испытаний. Разработана методика и проведены натурные огневые исследования совместной работы ограждающих конструкций и примыкающей к ней конструктивной огнезащиты, позволяющая учесть влияние перемещения сочленяемых конструкций на огнестойкость стальных колонн при высокотемпературном воздействии. На основании натурных огневых исследований усовершенствована методика определения температурного прогрева стальных колонн с конструктивной огнезащитой, расположенных по периметру помещения. Разработана инженерная методика расчета пределов огнестойкости стальных колонн с конструктивной огнезащитой при двух- и трехстороннем огневом воздействии, учитывающая ускорение прогрева стальных колонн с конструктивной огнезащитой в результате разрушения ограждающих конструкций.

Ключевые слова: огнестойкость, конструктивная огнезащита, критическая температура, ограждающая конструкция, инженерная методика.

(Поступила в редакцию 25 мая 2016 г.)

Введение. При проектировании, строительстве и эксплуатации зданий обеспечение огнестойкости металлоконструкций является актуальной и важной задачей, поскольку их обрушение в ряде случаев приводит к гибели людей и значительному материальному ущербу [1, 2]. Учитывая, что металлоконструкции вследствие их негорючести относят к классу пожарной опасности К0 [3], то основным показателем, определяющим их область применения, является предел огнестойкости. Огнестойкость незащищенных конструкций, выполненных из конструкционной стали составляет, как правило, 15 минут [4] и вследствие чего область их применения ограничена зданиями VII-VIII степени огнестойкости (в общем случае). Для ее расширения используется огнезащита. На наш взгляд, исходя из условий долговечности и надежности, конструктивная огнезащита является более оптимальной для защиты стальных конструкций.

Состояние проблемы на современном этапе. Значительное количество колонн в зданиях расположены по периметру помещения и в результате пожара подвергаются трех- и двухстороннему огневому воздействию. Часть таких элементов защищается от воздействия пожара огнезащитой, а другая ограждающими конструкциями помещения.

Гипотеза. Совместная работа ограждающей конструкции и примыкающей к ней конструктивной огнезащиты стальной колонны оказывает негативное влияние на огнестойкость колонны.

Испытания рассматриваемых конструктивных схем на огнестойкость не проводятся и малоизучены. Испытания по ГОСТ 30247.1 являются показателем огнестойкости модельной конструкции, а испытания по СТБ 11.03.02 – лишь показателем теплопроводности конструкции. Как правило вышеуказанные испытания проводятся для одиночных элементов, в результате чего отсутствует возможность воспроизвести совместную работу сочленяемых конструкций [5-7]. Это связано с тем, что проведение испытаний по ГОСТ 30247.1 ограничивает геометрические параметры испытываемых конструкций, габаритами огневой камеры. Испытания по СТБ 11.03.02 проводятся без статической нагрузки до момента времени достижения температуры в сечении образца 500 °С.

Расчетные и расчетно-экспериментальные методы определения огнестойкости, также, как и испытания, рассматривают прогрев одиночного элемента и основаны лишь на теплофизических характеристиках целостной конструкции [8, 9]. В процессе расчета не учитывается влияние на время прогрева, деформации и возможное нарушение целостности конструктивной огнезащиты вследствие разрушения смежных конструкций.

Такой недостаток расчетных и экспериментальных исследований огнестойкости стальных колонн с конструктивной огнезащитой полностью исключается при поведении

натурных огневых испытаний. На основании которых в дальнейшем разрабатывается методика температурного прогрева, позволяющая рассчитывать огнестойкость испытанных конструктивных схем [5-7].

Проведенные исследования посвящены разработке методики температурного прогрева стальных колонн, учитывающей ускорение их прогрева вызванное пространственным перемещением ограждающих конструкций, к которым примыкает конструктивная огнезащита и основанная на результатах модельных и крупномасштабных натурных огневых испытаниях.

В результате проведенных исследований решены следующие задачи:

1. Разработана методика температурного прогрева одиночного элемента целостной конструкции.

2. Для подтверждения работоспособности методики спланированы и проведены огневые испытания модельных образцов.

3. Для учета влияния на огнестойкость стальных колонн пространственного перемещения ограждающих конструкций, к которым примыкает конструктивная огнезащита, разработана методика и проведены натурные огневые исследования их совместной работы при высокотемпературном огневом воздействии близкому к стандартному пожару.

4. Усовершенствована методика расчета температурного прогрева стальных колонн с конструктивной огнезащитой расположенных по периметру помещения, позволяющая учитывать ускорение прогрева стальных колонн с конструктивной огнезащитой в результате перемещения ограждающих конструкций.

5. Разработан инженерный метод расчета огнестойкости стальных колонн с конструктивной огнезащитой с учетом перемещения ограждающих конструкций.

Задача 1. Методика определения температурного прогрева целостной конструкции. Для расчетного определения времени прогрева целостной конструкции стальной колонны с конструктивной огнезащитой, разработана методика температурного прогрева, использующая математическую модель передачи тепла методом элементарных тепловых балансов (далее – МЭТБ). Применяемая математическая модель разработана Ваничевым А.П. и адаптирована для решения задач огнестойкости Яковлевым А.И., методика температурного прогрева описана в [4, 5]. В указанной методике усовершенствован способ учета влаги в материале огнезащиты, а также выведены формулы для определения изменения температуры всех расчетных ячеек при решении двумерной задачи передачи тепла. Целью разработанной методики, являлось получение инструмента для прогнозирования температурного прогрева одиночного элемента целостной конструкции.

Сущность методики заключается в следующем: изменение внутренней энергии ячейки с одной стороны обусловлено изменением ее температуры, с другой стороны – входящими и исходящими тепловыми потоками (рисунок 1-а). В результате чего температура ячейки через интервал времени Δt определяется исходя из уравнения изменения внутренней энергии ячейки. Расчетные комбинации точки для определения входящих и исходящих тепловых потоков представлены на рисунке 1-б.

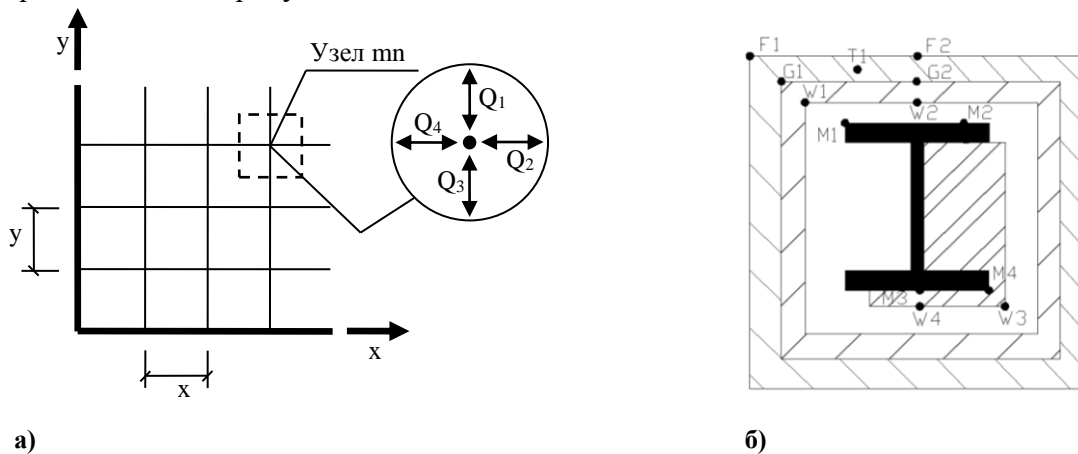


Рисунок 1 – Расчетная схема прогрева:

а) схема разбития конструкции на элементарные ячейки;

б) возможные варианты расчетных комбинаций

Для автоматизации расчета, на основании разработанной методики, подготовлен алгоритм определения температурного прогрева одиночного элемента целостной конструкции,

который положен в основу разработанного программного средства. Внешний вид программного продукта представлен на рисунке 2.

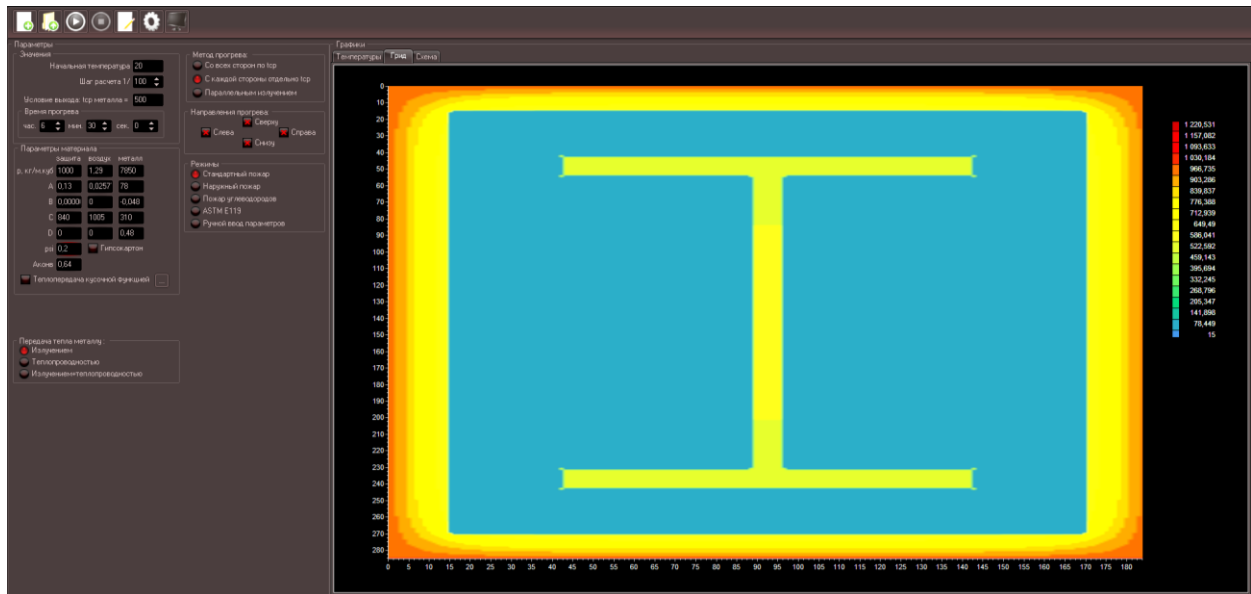


Рисунок 2 – Внешний вид рабочего окна программного продукта

Задача 2. Для проверки работоспособности разработанной методики спроектированы, построены и испытаны три модельных конструкции (рисунок 3). Целью испытаний являлось определение теплофизических характеристик конструктивной огнезащиты и способности огнезащиты оставаться целостной при воздействии стандартного пожара.

Модельная конструкция представляет собой стальную колонну двутаврового сечения № 20 по ГОСТ 8239, высотой 1700 мм, облицованную с четырех сторон гипсовыми армированными стекловолокном плитами на каркасе из тонкостенных профилей. Испытания проводились без статической нагрузки, при тепловом воздействии, характеризуемом изменением температуры пожара соответствующего кривой стандартного пожара, до момента времени прогрева сечения стального образца до температуры 500 °С. Температура образца определялась как среднееарифметическое значение трех термопар, установленных на образце. Схема установки представлена на рисунке 3.

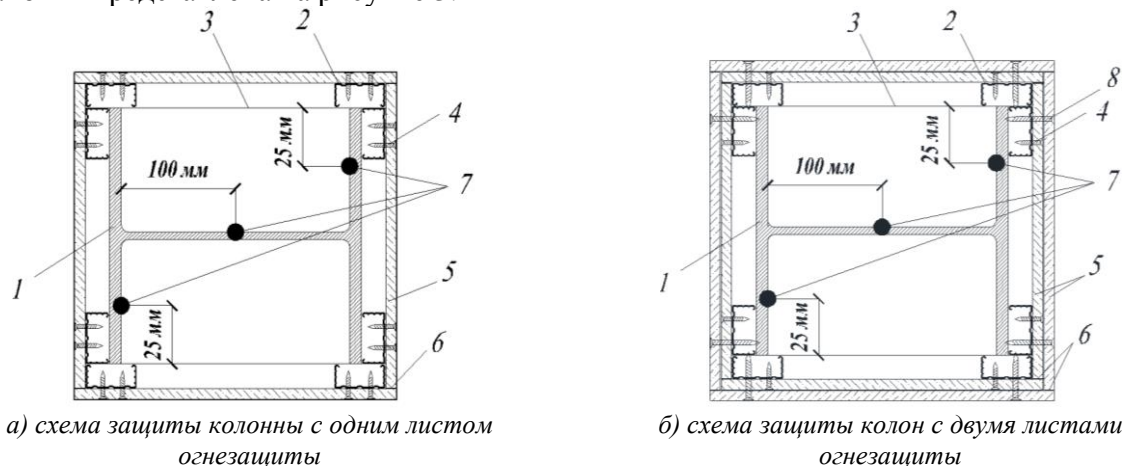


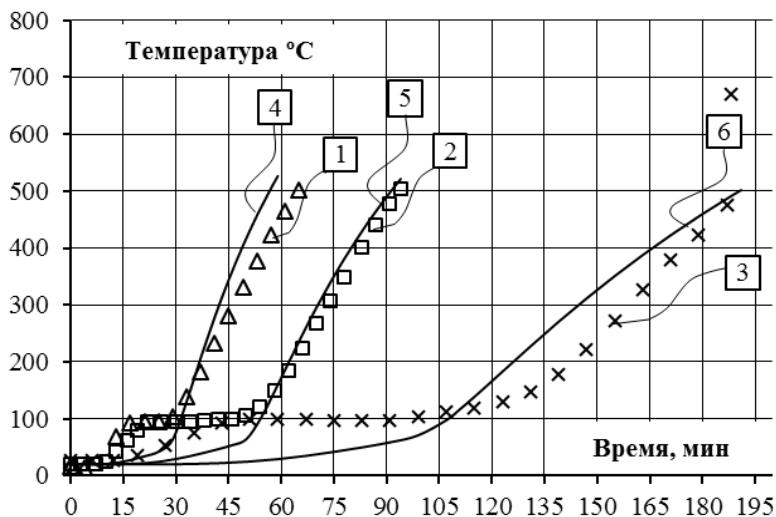
Рисунок 3 – Схема огнезащищенных стальных колонн

- 1 – двутавр; 2 – оцинкованный профиль ПП 27×60; 3 – оцинкованный профиль ППН 27×28;
 4 – металлический саморез TN 25; 5 – огнезащитное покрытие; 6 – шпатлевка;
 7 – термоэлектрические преобразователи; 8 – металлический саморез TN 75

Результаты модельных огневых испытаний. В соответствии с ГОСТ 8.207 значения среднеобъемной температуры определялись как среднееарифметическое из показаний термоэлектрических преобразователей, максимальная погрешность измерений составляла $\pm 15,5$ °С. В ходе проведения огневых испытаний по определению огнезащитной эффективности внутри огневой камеры поддерживался температурный режим близкий стандартному по

ГОСТ 30247.0. Отклонения среднеобъемной температуры от значения ГОСТ 30247.0 в ходе огневых испытаний после 5 минуты находились в области допустимых отклонений.

Анализ результатов огневых испытаний показал, что во время их проведения, когда средняя температура термопар, закрепленных на образце испытуемых конструкций находилась в диапазоне 90-100 °С, происходило замедление прогрева исследуемой конструкции (плато на рисунке 4). Этот результат связан с тем, что подводимое тепло от пожара расходовалось на нагрев и испарение воды из влагосодержащих слоев испытуемой конструкции.



Экспериментальные данные температурного прогрева испытуемых образцов с толщиной огнезащиты: 1 – 15 мм; 2 – 25 мм; 3 – 50 мм.

Расчетные данные температурного прогрева испытуемых образцов с толщиной огнезащиты: 4 – 15 мм; 5 – 25 мм; 6 – 50 мм.

Рисунок 4 – Расчетные и экспериментальные данные прогрева модельных конструкций

После испарения влаги из конструкции с толщиной огнезащиты 15 и 25 мм наблюдается ровная скорость нарастания температуры на испытуемых образцах, которая свидетельствует о том, что разрушения конструкции огнезащиты не произошло. Резкий скачок температуры на 188 минуте наблюдался при проведении огневых испытаний на образце с толщиной огнезащиты 50 мм (две огнестойкие гипсовые плиты толщиной по 25 мм каждая) (рисунок 4), что свидетельствует о раскрытии швов в конструкции огнезащиты, через которые тепловые потоки оказывали непосредственное воздействие на стальную колонну. Прогрев испытуемой конструкции наступил из-за прекращения эффективной работы материала огнезащиты. Таким образом, время огнезащитной эффективности материала огнезащиты для образцов 1 и 2 наступило из-за их прогрева целостной конструкции, а образца 3 – из-за разрушения конструкции огнезащиты.

Результаты экспериментальных исследований и расчета по разработанной методике температурного прогрева модельных конструкций представлены на рисунке 4.

Расхождение результатов расчета с экспериментальными данными составляет: для испытуемых образцов с толщиной огнезащиты: 15 мм – 16,1%; 25 мм – 3,3%; 50 мм – -2,1%. Результаты расчета показывают удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными, на основании этого можно сделать вывод о том, что данная методика применима для прогнозирования температурного прогрева модельных целостных конструкций.

Задача 3. Крупномасштабные огневые испытания. Для определения влияния на огнестойкость стальных колонн с конструктивной огнезащитой пространственного перемещения ограждающих конструкций к которым примыкает огнезащита спланированы и проведены крупномасштабные огневые испытания. Целью испытаний являлось определение влияния перемещений ограждающих конструкций и стального каркаса на огнестойкость примыкающих к ним стальных колонн с конструктивной огнезащитой.

Для достижения поставленной цели, запроектировано здание размерами в плане 6×6 м и высотой 3 м, шаг и пролет колонн равен 3 м (рисунок 5). Схема экспериментального сооружения позволяет на основании полученных результатов прогнозировать поведение стальных каркасных конструкций с конструктивной огнезащитой при изменении вида сечения и геометрических параметров.

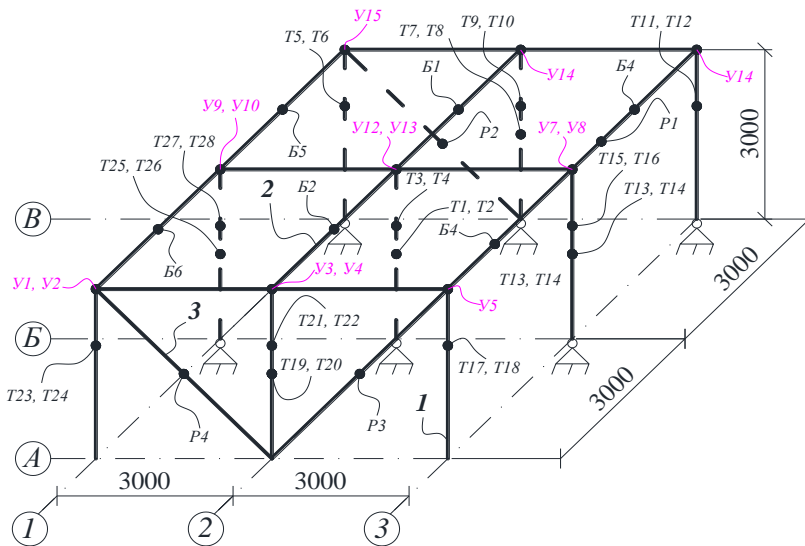


Рисунок 5 – Внешний вид каркаса экспериментального сооружения

- 1 – колонна (двутавры № 12);
- 2 – балка покрытия (швеллеры № 6,5);
- 3 – раскос (уголки № 4);

T1-T28 – термоэлектрические преобразователи установленные на колоннах;

Y1-Y15 – термоэлектрические преобразователи установленные в узловых соединениях;

B1-B6 – термоэлектрические преобразователи установленные на несущих балках

Для повышения огнестойкости стальных каркасных конструкций предусмотрены огнестойкие плиты «KNAUF FIREBOARD». Толщина огнестойких плит для колонн, расположенных в осях составляет: 1, А-Б – 2×20 мм; 1, В – 2×25 мм; 2, А и 2, В – 25 мм; 2, Б – 2×25 мм; 3, А и 3, В – 20 мм; 3, Б – 15 мм (рисунки 5, 6).

Огнезащита металлоконструкций осуществляется согласно [10]. Балки экспериментального сооружения защищены подвесным потолком, выполненным из огнестойких плит «KNAUF FIREBOARD» в два слоя толщиной каждый 25 мм. Покрытие запроектировано из металлического профилированного настила. Пространство между огнестойкими плитами и профилированным настилом заполнено минеральной ватой. В качестве наружных ограждающих конструкций используются ячеистобетонные блоки с элементами жесткости из стальных профилей. В осях 1-2, В ячеистобетонная перегородка защищена от воздействия пожара противопожарной облицовкой из гипсовых армированных стекловолокном плит толщиной 40 мм, в осях 2-3, В; 3, А-В; 1-2, А и 1, А-Б – толщиной 20 мм, в осях 1, Б-В защищена цементной плитой «Аквапанель» толщиной 12,5 мм. Пространство между ячеистобетонными блоками и противопожарными облицовками заполнено минеральной ватой толщиной 50 мм. Ячеистобетонные блоки в осях в осях 2-3, А дополнительной защиты не подвергались.

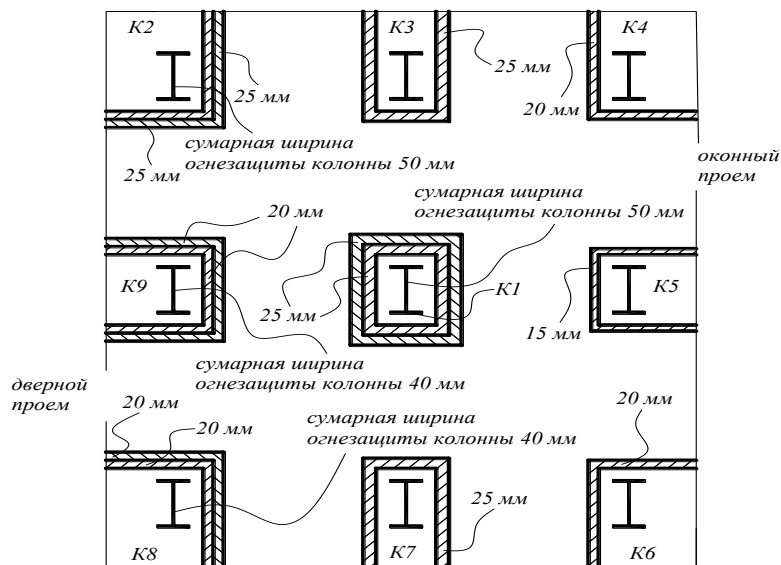


Рисунок 6 – Схема расположения стальных колонн и толщины конструктивной огнезащитой

В процессе проведения экспериментальных исследований регистрировались температура и перемещения стальных каркасных конструкций, узловых соединений, изменение среднеобъемной температуры газовой среды внутри исследуемого здания. Схема расстановки термодатчиков на стальных каркасных конструкциях приведены на рисунке 5.

Огневое воздействие внутри экспериментального сооружения основано на положениях ГОСТ 30247.0. Отклонение результата измерения от истинного значения измеряемых величин определено с учетом погрешности измерений по ГОСТ 8.207.

В соответствии с ГОСТ 8.207 значения среднеобъемной температуры определялись как среднеарифметическое из показаний термоэлектрических преобразователей, максимальная погрешность измерений составляла $\pm 15,5$ °С. В ходе проведения огневых испытаний внутри экспериментального сооружения поддерживался температурный режим близкий к стандартному по ГОСТ 30247.0.

Ограждающие конструкции, выполненные из ячеистых блоков в начальной стадии пожара, не имели значительных повреждений. Однако в дальнейшем были зафиксированы локальные повреждения стен, вызванные температурным выгибом элементов жесткости.

Наибольшие повреждения перегородки наблюдались по оси 1-3, А. Очевидно, что выгиб был вызван неравномерным прогревом стального двутавра в теле стены. К 30 минуте испытаний через трещины стало пробиваться пламя. Начиная с этого момента и вплоть до разрушения фрагмента выгиб элемента жесткости стены не претерпел видимых изменений и сохранялся в значении порядка 300 мм от исходной плоскости стены. Для остальных стен локальные разрушения принимали аналогичный характер, но с меньшим масштабом повреждений. Это было обусловлено наличием сплошной конструктивной огнезащиты. При этом характер выгиба стен по оси В-А, 1 и А-В, 3 был равномерно распределен по длине стены (не имел V-образную форму). Это было обусловлено наличием двух элементов жесткости стены, которые нагревались приблизительно с одинаковой скоростью по мере выхода из строя огнезащиты. Поэтому трещины в указанных стенах были сконцентрированы в угловых участках стен, что в конечном привело к отрыву рассматриваемых стен в верхней половине высоты и их независимому деформированию.

Для учета влияния на целостность конструктивной огнезащиты определяли перемещения стальных колонн в ходе огневых испытаний: к колоннам на высоте +2.000 (в месте ожидаемого максимального прогиба) перпендикулярно колонне приваривался уголок, на котором были закреплены геодезические марки. По периметру здания установлены 5 станций стояния с электронными тахеометрами, при помощи которых производилась фиксация перемещений геодезических марок на уголке. Перемещения конструкций во время огневого воздействия определялись нахождением уравнения прямой в пространстве.

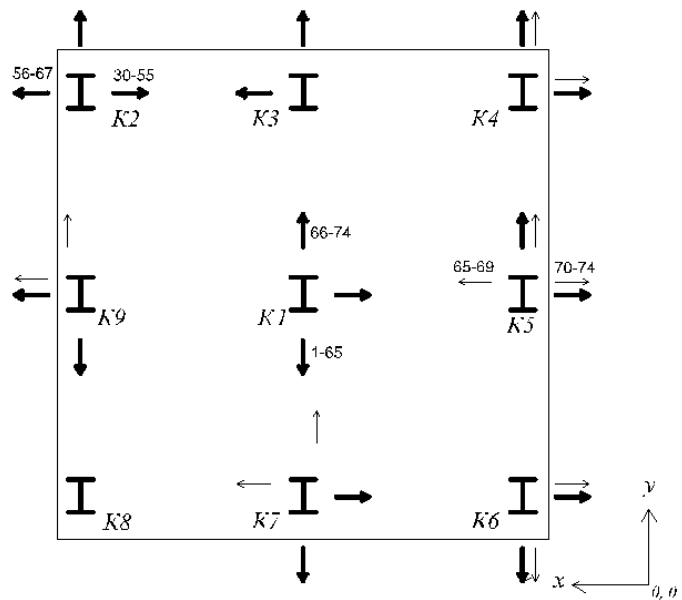


Рисунок 7 – Направления перемещения контрольных точек на конструкциях

Анализ результатов перемещений контрольных точек на стальных каркасных конструкциях (рисунок 7) показал, что они увеличиваются по мере нарастания температуры металлоконструкции. Все перемещения, как правило, направлены по направлению наружу от экспериментального сооружения. Ячеистобетонные блоки, используемые в качестве ограждающих конструкций, располагались на расстоянии не менее 20 см от стального каркаса сооружения. Этого расстояния было достаточно для того, чтобы они не оказывали механического воздействия на них. Таким образом, при рассмотренной конструктивной схеме, пере-

мещения металлоконструкций не оказывают влияния на целостность конструктивной огнезащиты стальных колонн.

В ходе проведения огневых испытаний выявлено ускорение прогрева сечения всех стальных колонн с конструктивной огнезащитой (за исключением К1 и К2) по сравнению с испытаниями по определению огнезащитной эффективности (рисунки 10, 11). Перемещение и разрушение перегородок, к которым примыкает конструктивная огнезащита колонн, расположенных по периметру экспериментального сооружения, привело к проникновению тепловых потоков внутрь огнезащищенной конструкции, и, следовательно, ускорению ее прогрева. В результате чего прогрев стальных колонн происходил за счет прогрева конструктивной огнезащиты, а также через образовавшиеся щели в местах сочленения огнезащиты и ограждающей конструкции.

Время начала ускорения прогрева у всех колонн различна. Это обусловлено тем, что перегородки, к которым примыкает конструктивная огнезащита, имели отличающийся друг от друга предел огнестойкости, следовательно, и время начала их перемещения различно.

Окончание огневых испытаний наступило вследствие обрушения конструкций экспериментального сооружения.

Результаты натурных огневых испытаний показали, что при реальном пожаре наблюдается ускорение прогрева стальных колонн с конструктивной огнезащитой вызванное перемещением смежных конструкций. Перемещения перегородок не учитывается в полной мере при расчете температурного прогрева целостной конструкции. Следовательно, необходима корректировка разработанной методики с учетом возможного ускорения прогрева.

Задача 4. Методика определения предела огнестойкости стальных колонн с конструктивной огнезащитой с учетом ускорения их прогрева вызванного возможным разрушением ограждающих конструкций основана на методике определения времени прогрева одиночных элементов целостной конструкции [4, 5, 7]. Последняя методика усовершенствована. Дополнительно в нее, вводится прогрев стальной конструкции от прямого огневого воздействия. Расчетная комбинация точки (M5) для определения изменения температуры рассчитываемой ячейки представлена на рисунке 8. Общий алгоритм расчета температурного прогрева (рисунок 9) происходит следующим образом: до момента наступления фактического предела огнестойкости ограждающей конструкции, примыкающей к конструктивной огнезащите, расчет температурного прогрева колонны происходит как целостной; в момент наступления фактического предела огнестойкости ограждающей конструкции в расчете дополнительно вводится периметр колонны, который начинает прогреваться от прямого огневого воздействия.

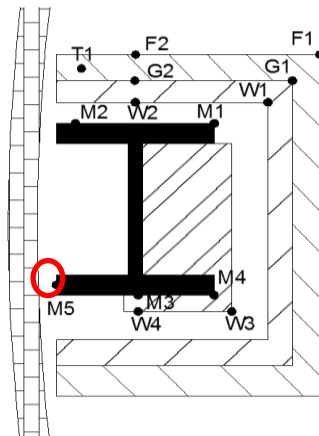


Рисунок 8 – Расчетная комбинация точки для периметра, подвергнутого прямому огневому воздействию

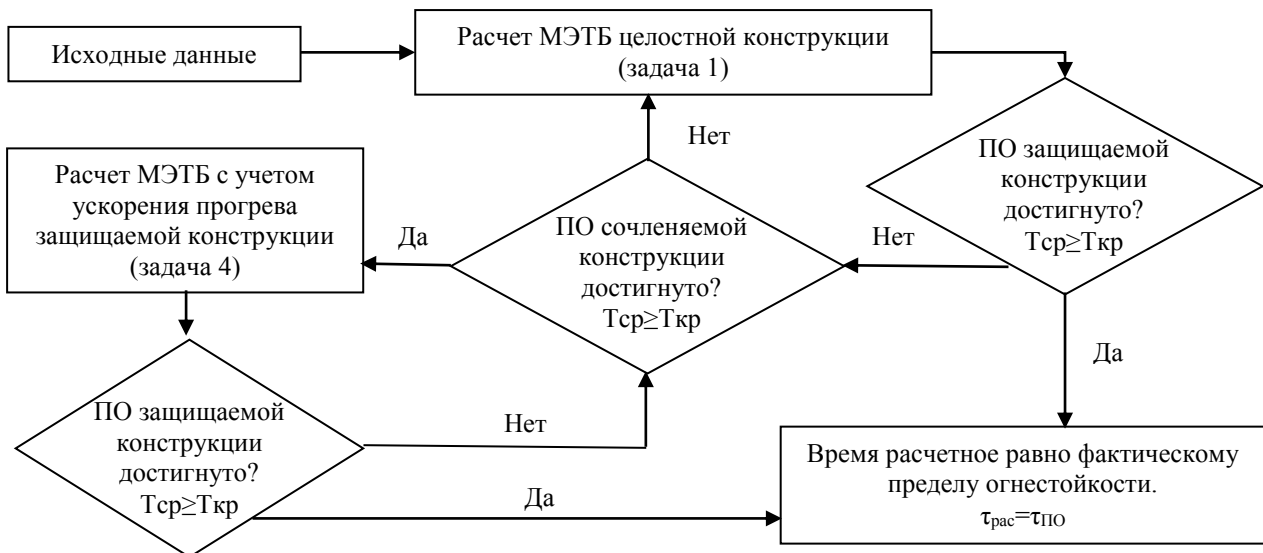


Рисунок 9 – Общий алгоритм определения температурного прогрева стальных каркасных конструкций с конструктивной огнезащитой

Для проверки работоспособности усовершенствованной методики произведены расчеты колонн К3, К4, К6, К7 и К8 экспериментального сооружения (рисунки 10, 11).

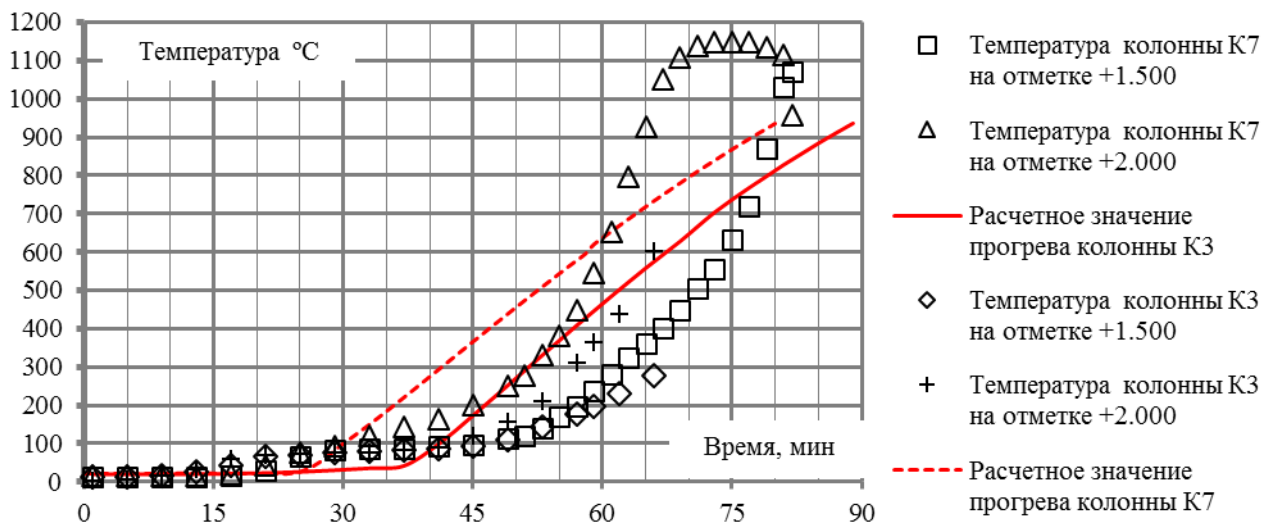


Рисунок 10 – Экспериментальные и расчетные значения температуры колонн К3 и К7

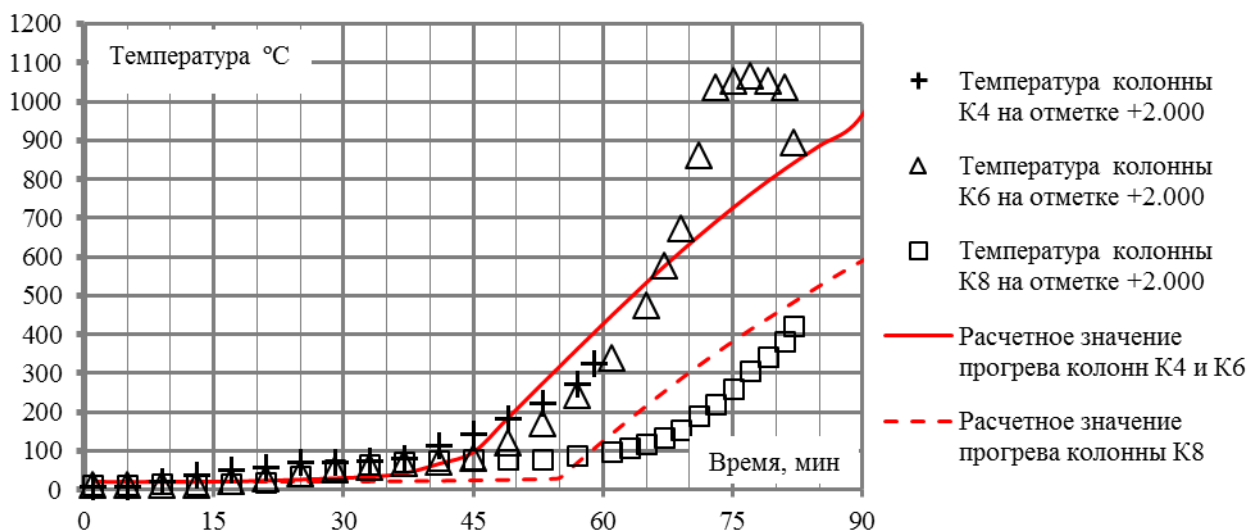


Рисунок 11 – Экспериментальные и расчетные значения температуры колонн К4, К6 и К8

Имеется расхождение расчетных и экспериментальных значений времени прогрева до 500 °С сечения колонны экспериментального сооружения. Для колонны К7 на отметке +2.000 это расхождение составляет 8,62 %, на отметке +1.500 – 25,35 %. Для колонны К3 на отметке +2.000 – 3,12 %, на отметке +1.500 ускорение прогрева не наблюдается, прогрев конструкции практически полностью совпадает с расчетом по математической модели, не учитывающей разрушение ограждающей конструкции. Далее для колонны К4 на отметке +2.000 расхождение составляет 5,08 %, для К6 на отметке +2.000 – 3,03 %, для К8 на отметке +2.000 – 3,45 %. Результаты проведенных расчетов показывают удовлетворительную сходимость с результатами натурных огневых испытаний. Значительное расхождение между расчетными и экспериментальными данными для конструкций К7 и К3 на отметке +1.500 обусловлены тем, что нарушение целостности мест стыков конструктивной огнезащиты и ограждающей конструкции на отметке +2.000 имели более значительные повреждения, чем на отметке +1.500.

Однако данная методика сложна для использования в проектных организациях, поэтому необходимо разработать инженерный метод оценки огнестойкости рассмотренных конструктивных схем.

Задача 5. Предел огнестойкости стальных колонн с конструктивной огнезащитой, с учетом ускорения их прогрева вызванного возможным разрушением ограждающих конструкций, может быть выражен следующей зависимостью:

$$ПО = \tau_{кр} \cdot k_a,$$

где $\tau_{кр}$ – время прогрева стальных каркасных конструкций с конструктивной огнезащитой до критической температуры, мин;

k_a – коэффициент ускорения прогрева стальных колонн с конструктивной огнезащитой от возможного разрушения ограждающих конструкций.

С учетом введения в решение теплотехнической задачи уравнений, позволяющих определять ускорение прогрева стальных колонн с конструктивной огнезащитой, была разработана методика определения коэффициента k_a ускорения прогрева стальных колонн с конструктивной огнезащитой вызванного возможным разрушением ограждающих конструкций. Коэффициент определен для части сортамента стальных конструкций, которые могут применяться в качестве колонн с конструктивной огнезащитой в зависимости от их геометрических размеров и схемы обогрева, по следующей методике:

1. Рассчитывается время прогрева $\tau_{кр}$ стальной колонны с различными толщинами конструктивной огнезащиты до 500 °С по изложенной в [5] методике. Расчет ведется без учета ускорения прогрева. Итогом расчета является зависимость «время огневого воздействия – температура конструкции» при двух- и трехстороннем огневом воздействии.

2. Используя усовершенствованную методику температурного прогрева, рассчитывается предел огнестойкости тех же конструкций, но уже с учетом ускорения прогрева вызванного возможным разрушением ограждающих конструкций. Последовательно рассчитываются сценарии, при которых происходит разрушение ограждающей конструкции на 15 минуте, при этом время разрушения ограждающей конструкции для каждого нового сценария увеличивается с шагом в 15 минут (15, 30, 45...90). Временем окончания расчета является время достижения в сечении колонны средней температуры 500 °С (наступает предел огнестойкости).

3. В результате проведенных расчетов получены зависимости «время огневого воздействия – температура конструкции» в случаях присутствия и отсутствия ускорения прогрева. На основании полученных зависимостей определен коэффициент ускорения прогрева стальной колонны с конструктивной огнезащитой вызванного возможным разрушением ограждающих конструкций на 15, 30, 45, 60, 75 и 90 минуте при двух- и трехстороннем огневом воздействии (рисунки 12 и 13). На графике по оси абсцисс указано время прогрева конструкции до критической температуры без учета ускорения прогрева, а по оси ординат – время прогрева конструкции до критической температуры с учетом ускорения прогрева. Далее проведена аппроксимация рассчитанных коэффициентов.

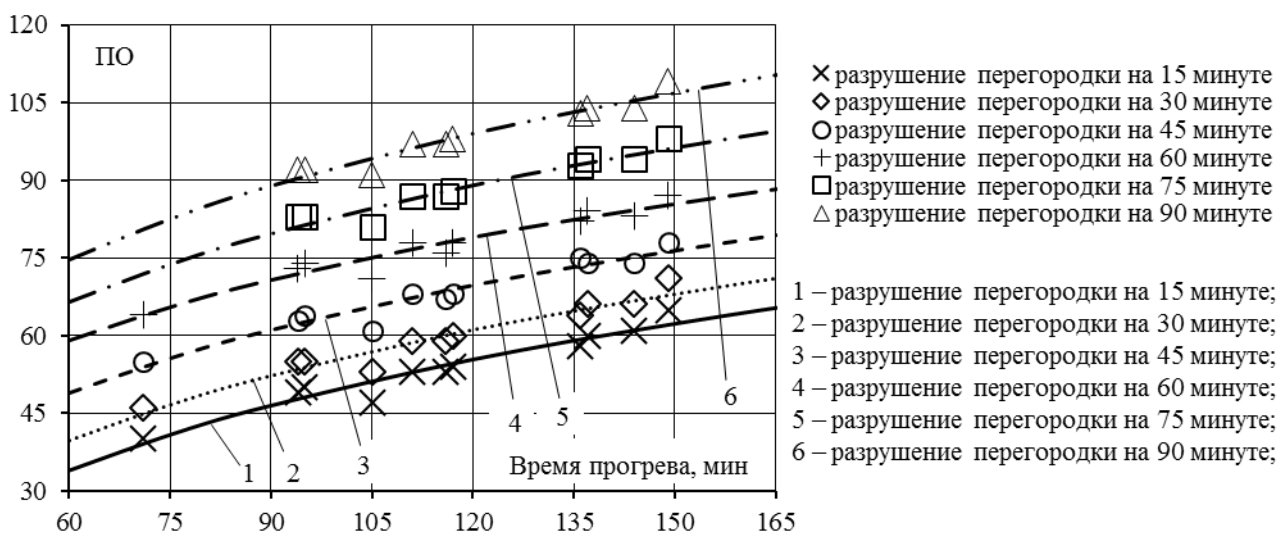


Рисунок 12 – Зависимость коэффициента ускорения прогрева k_a от времени прогрева целостной конструкции при двухстороннем огневом воздействии и предела огнестойкости ограждающей конструкции

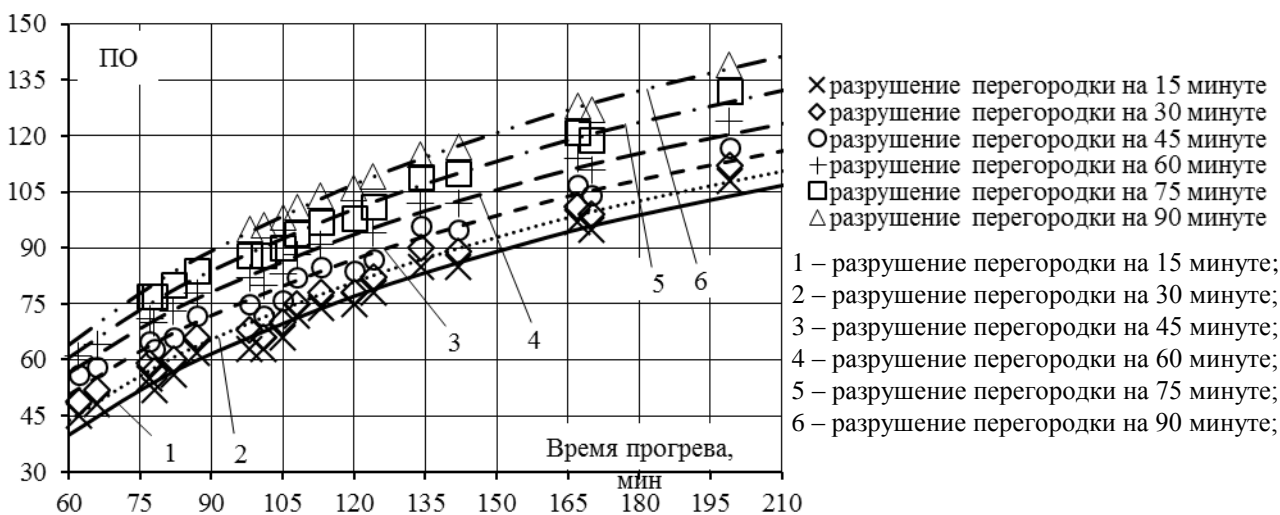


Рисунок 13 – Зависимость коэффициента ускорения прогрева k_a от времени прогрева целостной конструкции при трехстороннем огневом воздействии и предела огнестойкости ограждающей конструкции

Из рисунков 12 и 13 видно, что изменение значения коэффициента k_a происходит по логарифмической зависимости. Это позволяет получить выражение, описывающее изменение коэффициента в зависимости от времени прогрева стальной колонны до критической температуры и времени наступления предела огнестойкости ограждающей конструкции. С учетом полученных зависимостей разработан инженерный метод расчета, согласно которому, для определения огнестойкости стальных конструкций с конструктивной огнезащитой необходимо:

1. В зависимости от условий огневого воздействия на стальную колонну (двух- или трехстороннее огневое воздействие) определить время их прогрева до критической температуры, $\tau_{кр}$ (без учета ускорения прогрева).

2. Определить фактический предел огнестойкости ограждающей конструкции, к которой примыкает конструктивная огнезащита.

3. Фактический предел огнестойкости стальных колонн с конструктивной огнезащитой определяется по одной из номограмм (рисунки 14 и 15), исходя из времени прогрева целостной конструкции до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ и предела огнестойкости ограждающей конструкции. Номограммы построены в координатах «Время прогрева целостной конструкции до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ » – «Предел огнестойкости».

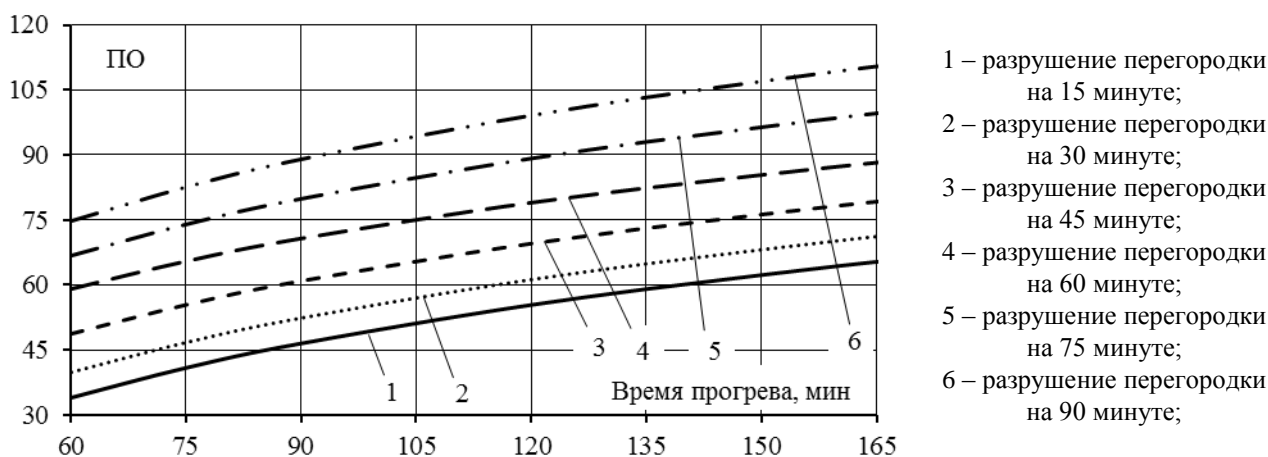


Рисунок 14 – Номограмма для определения огнестойкости стальных колонн с конструктивной огнезащитой при двухстороннем огневом воздействии

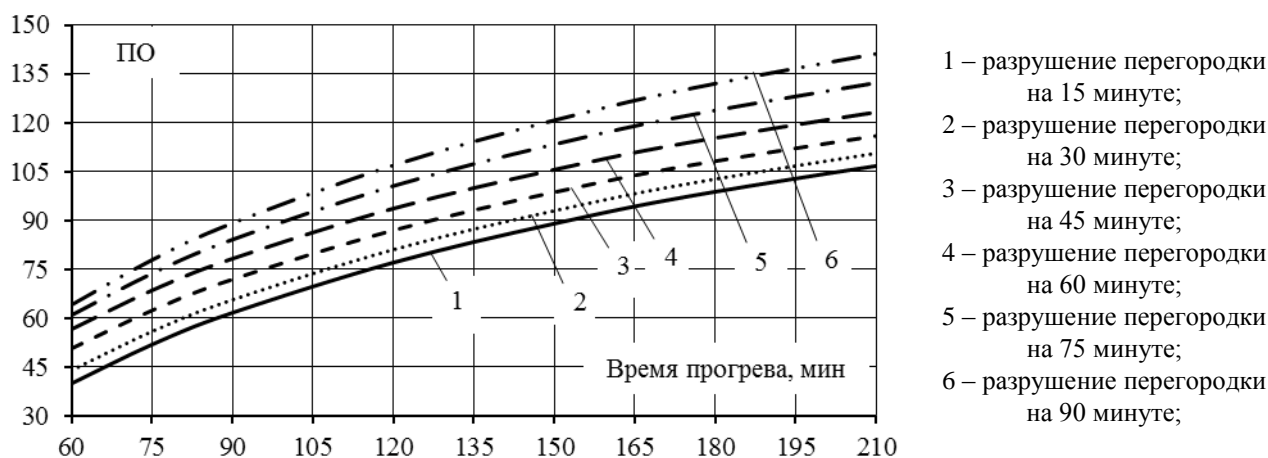


Рисунок 15 – Номограмма для определения огнестойкости стальных колонн с конструктивной огнезащитой при трехстороннем огневом воздействии

Заключение.

1. Проведены огневые испытания по определению температурного прогрева модельных конструкций стальных колонн с различной толщиной конструктивной огнезащиты. В результате испытаний установлено время температурного прогрева сечения модельных конструкций до температуры 500 °С, а также способность их оставаться целостными при продолжительном высокотемпературном огневом воздействии.

2. Разработана методика температурного прогрева, использующая математическую модель передачи тепла методом элементарных тепловых балансов. Применяемая математическая модель разработана Ваничевым А.П. и адаптирована для решения задач огнестойкости Яковлевым А.И. В указанной методике усовершенствован способ учета влаги в материале огнезащиты, а также выведены формулы для определения изменения температуры всех расчетных ячеек при решении двумерной задачи передачи тепла. На основании методики разработан алгоритм расчета температурного прогрева модельных конструкций, который положен в основу разработанного программного средства. Работоспособность методики подтверждена результатами модельных испытаний.

3. Разработана методика и проведены натурные огневые исследования, направленные на получение данных о совместной работе ограждающих конструкций и примыкающей к ней конструктивной огнезащиты, которые позволяют учитывать влияние перемещения сочленяемых конструкций на огнестойкость стальных колонн при высокотемпературном воздействии. Получены экспериментальные данные температурного прогрева стальных колонн с различной толщиной конструктивной огнезащиты при двух-, трех- и четырехстороннем огневом воздействии, а также перемещения контрольных точек стальных каркасных конструкций. Экспериментально установлено, что перемещение ограждающих конструкций, к которым примыкает конструктивная огнезащита стальных колонн, приводят к ускорению их про-

грева. Ускорение носит плавный характер и увеличивается по мере разрушения ограждающих конструкций.

4. На основании результатов натурных огневых испытаний, усовершенствована методика определения температурного прогрева стальных колонн с конструктивной огнезащитой, расположенных по периметру помещения. В методику дополнительно введены уравнения, которые учитывают прямое огневое воздействие на стальную конструкцию, что позволяет определять ускорение прогрева стальных колонн с конструктивной огнезащитой в результате перемещения ограждающих конструкций.

5. С использованием доработанной методики рассчитан коэффициент ускорения прогрева стальных колонн с конструктивной огнезащитой, обусловленный разрушением ограждающих конструкций. Проведена аппроксимация рассчитанных коэффициентов, что позволило получить зависимости изменения коэффициента от времени прогрева целостной конструкции до 500 °С и предела огнестойкости сочленяемой конструкции. Установлено что изменение коэффициента имеет логарифмическую зависимость. На основании полученных зависимостей разработана инженерная методика расчета пределов огнестойкости стальных колонн с конструктивной огнезащитой при двух- и трехстороннем огневом воздействии учитывающая ускорение прогрева стальных колонн с конструктивной огнезащитой в результате разрушения ограждающих конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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).
2. ТР 2009/013/ВУ Здания и сооружения, строительные материалы и изделия. Безопасность // 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. СТБ 1961-2009 Конструкции строительные. Методы определения пожарной опасности // 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).
4. Яковлев, А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций / А.И. Яковлев. – Москва: Стройиздат, 1988. – 143 с.
5. Полевода И.И., Иваницкий А.Г., Жамойдик С.М. Моделирование огнестойкости стальных элементов с конструктивной огнезащитой / И.И. Полевода, А.Г. Иваницкий, С.М. Жамойдик // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2010. – №2. – С. 39–46.
6. Полевода И.И., Кудряшов В.А., Жамойдик С.М. Экспериментальные исследования огнестойкости стальных каркасных конструкций с конструктивной огнезащитой / И.И. Полевода, В.А. Кудряшов, С.М. Жамойдик, Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2016. – № 1. – С. 13–27.
7. Жамойдик С.М. Методик определения предела огнестойкости стальных колонн с конструктивной огнезащитой с учетом ускорения их прогрева от возможного разрушения ограждающих конструкций / С.М. Жамойдик, Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация – 2016. – № 1.
8. ТКП EN 1993-1-2-2009 Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-2. Общие правила определения 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).
9. ENV 13381-4:2002 Prüfverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen. Teil 4. Brandschutzmaßnahmen für Stahlbauteile Deutsche Fassung.
10. Термостойкие обшивки строительных конструкций: ТУ ВУ 101208195.002. – Введ. 24.05.2013 – Минск. – 2013.

METHODOLOGY OF FIRE RESISTANCE EVALUATION OF STEEL COLUMNS WITH FIRE STRUCTURAL PROTECTION, LOCATED ON THE PERIMETER OF THE PREMISES

Zhamoidik Siarhei

The state educational establishment «Institute for Command Engineers» of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus

Purpose. The paper is devoted to engineering method for structural steel columns with fire protection for two- and three-sided fire exposure fire resistance design, with regard to the warming up of steel caused by the destruction of adjacent walling.

Methods. Based on full-scale fire research the method of steel columns with structural fire protection warming up was improved, set around a premise (building).

Findings. The method of steel structures warming up, using the elementary heat balance mathematical model was developed. The technique was worked out and full-scale fire research of structural fire protection and adjacent structures mutual interaction was conducted.

Research application field. The obtained experimental and theoretical study data could be used in fire resistance design of steel structures with structural fire protection.

Conclusions. The steel warming up factor for columns with structural fire protection due to the adjacent walling destruction was revealed.

Keywords: fire resistance, structural fire protection, critical temperature, adjacent walling, engineering technique.

(The date of submitting: May 25, 2016)

REFERENCES

1. 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)
2. Technical Regulations 2009/013/BY Buildings and structures, building materials and products. Safety, available at <http://sertis.by/files/reglament.pdf> (accessed : December 20, 2015). (rus)
3. Belarus State Standard 1961-2009. Building structures. Fire hazard test methods. 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)
4. Yakovlev A.I. Raschet ognestoykosti stroitel'nykh konstruksiy [Building constructions fire resistance design]. Moscow : Stroyizdat, 1988. 143 p. (rus)
5. Polevoda I.I., Ivanitskiy A.G., Zhamoydik S.M. Modelirovanie ognestoykosti stal'nykh elementov s konstruktivnoy ognezashchitoy [Simulation of fire resistance of steel elements with structural fire protection]. Vestnik Komandno-inzhenerenogo instituta MChS Respubliki Belarus'. 2010. No. 2 (12). Pp. 39–46. (rus)
6. Polevoda I.I., Kudryashov V.A., Zhamoidik S.M. Eksperimental'nye issledovaniya ognestoykosti stal'nykh karkasnykh konstruksiy s konstruktivnoy ognezashchitoy [Experimental study of fire resistance of steel frame structures of the structural fire protection] / I.I. Palevoda, V.A. Kudryashov, S.M. Zhamoidik. Vestnik of the Institute for Command Engineers. 2016. № 1(23). P. 13–27. (rus)
7. Zhamoidik SM. Fire resistance design technique for steel columns with structural fire protection, with regard to steel warming up from possible adjacent walling destruction / SM Zhamoidik, Emergency Situations: Prevention and Elimination - 2016. - №1. Pp. 15–27. (rus)
8. European Standard 1993-1-2-2009 Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-2. General rules. Structural fire design // 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)
9. ENV 13381-4:2002 Prüfverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen. Teil 4. Brandschutzmaßnahmen für Stahlbauteile Deutsche Fassung.
10. Heat-resistant cladding of constructions: TU BY 101208195.002. - Enter. 05/24/2013 - Minsk: -2013.