

УДК 614.84

*С. А. Вамболь, В. Ю. Колосков, Ю. Ф. Деркач*

Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков, Украина

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОГНЕСТОЙКОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ  
ЗДАНИЯ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ВО ВРЕМЯ ПОЖАРА**

Построена усовершенствованная математическая модель прочности элемента несущей конструкции при комплексном термо-силовом нагружении, переменном во времени. Разработан критерий оценивания уровня безопасности при имитационном моделировании системы обеспечения безопасности во время пожара при условии пластических деформаций элементов несущих конструкций.

**Ключевые слова:** прочность, термо-силовое нагружение, имитационная модель, критерий безопасности, упругопластическое деформирование.

*S. A. Vambol, V. Yu. Koloskov, Yu. F. Derkach***MODELLING OF FIRE RESISTANCE OF BUILDING CARRYING CONSTRUCTION  
ELEMENTS TAKING INTO ACCOUNT INFLUENCE OF PLASTIC DEFORMATIONS  
DURING THE FIRE**

The improved mathematical model of strength of carrying construction element under complex time-varying thermal and force loading is built. Criterion of safety level estimation at imitation modeling of safety provision system during the fire on condition of plastic deformations of carrying structures' elements.

**Keywords:** strength, thermal and force loading, imitation model, safety provision system.

В динамике развития пожара при применении средств пожаротушения зависимости значения температуры элементов конструкции, а также нагрузок, оказываемых на эти элементы, существенно усложняются. Суммарный результат их влияния на несущую способность, потеря которой является одним из граничных предельных состояний при определении пределов огнестойкости, зависит от условий прогресса и изменяется с течением времени в зависимости от множества различных факторов.

В то же время, показатели огнестойкости экспериментальным путем определяются в условиях стандартного температурного режима, а значит, требуют уточнения для случая комплексного нагружения сложной временной динамики. Для преодоления указанных трудностей актуальным является применение при разработке средств и мероприятий по сохранению несущей способности элементов конструкции во время пожара, а также при определении условий их разрушения, методов имитационного моделирования.

В европейских стандартах системы Еврокод, посвященных, в частности, вопросам расчета конструкций из различных материалов на огнестойкость, представлены математические модели, описывающие зависимости свойств строительных материалов от температуры. Точность приведенных моделей является вполне достаточной для решения задачи проектирования зданий и сооружений, однако предложенные в стандартах Еврокод зависимости определялись для температурных режимов пожара, аналогичных стандартному, а потому не могут быть использованы при более сложных зависимостях температуры от времени без серьезного уточнения.

В работах многих авторов [1-3, 10-12, 14] представлены различные подходы к созданию уточненных методов определения огнестойкости материалов несущих конструкций, однако явно недостаточно внимания уделяется анализу прочности в динамике восприятия элементами конструкции внешнего термо-силового воздействия. В работе [11] описан уточненный экспериментально-расчетный метод, однако и в ней внимание изменениям величины нагружения элементов конструкции во время пожара практически не уделяется. Общий подход к созданию моделей, используемый авторами в процессе исследований, изложен в работе [13]. Результаты приложения данного подхода для отдельных случаев решения проблем обеспечения безопасности, как общего характера, так и для конкретных задач, изложены в работах [5-9]. В частности в работах [8, 9] была сформирована имитационная модель системы управления безопасностью во время пожара, а также были предложены критерии оценивания уровня безопасности по прочности несущей конструкции при условии равномерного и неравномерного нагрева ее элементов по длине, а также сохранения упругого характера деформаций в них:

$$\chi_1 = \max_{0 \leq z \leq l} \left( \frac{\sigma(z, t)}{[\sigma](z, t)} \right) \leq 1; \quad (1)$$

$$\chi_2 = \max_{0 \leq z \leq l} \left( \frac{\tau(z, t)}{[\tau](z, t)} \right) \leq 1; \quad (2)$$

$$\chi_3 = \max_{0 \leq z \leq l} \left( \frac{\sigma_{\text{экв}}(z, t)}{[\sigma](z, t)} \right) \leq 1. \quad (3)$$

где  $\sigma(z, t)$ ,  $\tau(z, t)$ ,  $\sigma_{\text{экв}}(z, t)$  – нормальные, касательные и эквивалентные напряжения в поперечном сечении элемента с координатой  $z$  в момент времени  $t$ ;  $l$  – длина элемента.

Результаты моделирования прочности балки перекрытия, представленные в работе [8] для случая сохранения упругого характера деформаций, указывают на нахождение критических температур для различных марок сталей в диапазоне 80...90°C. В то же время в некоторых источниках приведены гораздо большие значения критических температур, полученные в экспериментах при нормативной эксплуатационной нагрузке. К примеру, в работе [12] для сталей различных марок указаны критические значения температуры в диапазоне 470...550°C. При испытании образцов на огнестойкость нагрузка устанавливается с учетом лишь постоянных и временных длительных напряжений. Методы расчета критических температур и пределов огнестойкости элементов конструкций, использующие такой подход, широко известны [10, 12]. Однако, в работе [8] было показано, что временные нагружения от температурных деформаций элементов конструкций, а также веса огнетушащей смеси при определенных условиях могут превышать указанные выше нагрузки, учитываемые при расчетах. Следовательно, в подобных случаях определенные по используемым методикам значения критических температур оказываются завышенными и требуют корректировки с учетом всех условий протекания пожара, в том числе способа его тушения и применяемых для этого средств.

Одной из возможных причин существенного расхождения в полученных данных может быть пренебрежение резервом прочности, связанным с неупругим деформированием элементов несущей конструкции. Представленная авторами работа посвящена решению задачи определения влияния пластических деформаций в перегруженном элементе на увеличение его предела огнестойкости.

Во время пожара при применении средств пожаротушения в элементах несущей конструкции возникает сложное напряженно-деформированное состояние, которое можно определить, как комбинацию продольного сжатия вследствие развития температурных деформаций а также поперечного изгиба под действием нагрузки от размещенных на поверхности перекрытия объектов, а также остатков огнетушащей смеси. Используя принцип суперпозиции действующих сил, получаем зависимости от времени  $t$  значений внутренних силовых факторов – продольного усилия сжатия  $N_z$ , поперечного усилия среза  $Q_y$ , изгибающего момента  $M_x$ :

$$N_z(t) = \sigma_T(t) \cdot A = \varepsilon_\kappa(t) \cdot E(T_\kappa(t)) \cdot A; \quad (4)$$

$$Q_y(t) = (\tau_0(t) + \tau_M(t)) \cdot A; \quad (5)$$

$$M_x(t) = (\sigma_0(t) + \sigma_M(t)) \cdot W_x, \quad (6)$$

где  $\sigma_T$  – значение нормального напряжения продольного сжатия вследствие нагревания элемента;  $T_\kappa(t)$  – значение температуры элемента в нагруженном сечении в момент времени  $t$  от начала пожара;  $E$  – модуль упругости материала элемента;  $\varepsilon_\kappa$  – относительная линейная деформация элемента конструкция, в общем случае определяемая некоторой функцией от значения относительной линейной деформации расширения материала  $\varepsilon_T$ :

$$\varepsilon_\kappa(t) = \Psi(\varepsilon_T(T_\kappa(t))), \quad (7)$$

вид которой определяется расчетной схемой несущей конструкции в целом, а также способом закрепления элемента;  $\sigma_0$ ,  $\tau_0$  – значения нормальных и касательных напряжений, связанных с нагрузкой от расположенных в помещении объектов и самого перекрытия;  $\sigma_M$ ,  $\tau_M$  – значения нормальных и касательных напряжений от нагрузки остатками огнетушащей смеси;  $A$  – площадь поперечного сечения элемента;  $W_x$  – его осевой момент сопротивления.

Принимая в качестве допущения условия выполнения гипотез о неизменности контура поперечного сечения элемента, нагружения его по нейтральной оси, а также малости зоны пластического деформирования, представим условия равновесия в виде:

$$\begin{cases} N_z = \int_A \sigma \cdot dA; \\ M_x = \int_A \sigma \cdot y \cdot dA; \\ Q_y = \int_A \tau \cdot dA, \end{cases} \quad (8)$$

где  $\sigma$  – значение нормального напряжения на соответствующем малом элементе  $dA$  сечения;  $N_z$ ,  $M_x$  та  $Q_y$  – значения внутренних силовых факторов, рассчитанные методами теории сопротивления материалов.

В случае упругого изгиба опасным считается такое напряженно-деформированное состояние элемента, при котором напряжения в крайних точках сечения достигают предела пропорциональности. Однако же при этом мгновенного разрушения элемента не происходит, поскольку в перегруженном сечении возникает зона пластической деформации, распространяющаяся далее по сечению при дальнейшем росте нагрузки. При дальнейшем росте температуры усилие продольного сжатия продолжит расти, при этом одновременно уменьшаются значения пределов пропорциональности  $\sigma_{пл}$  и текучести  $\sigma_{тек}$  (рис. 1), что приводит к ускорению перераспределения напряжений в сечении.

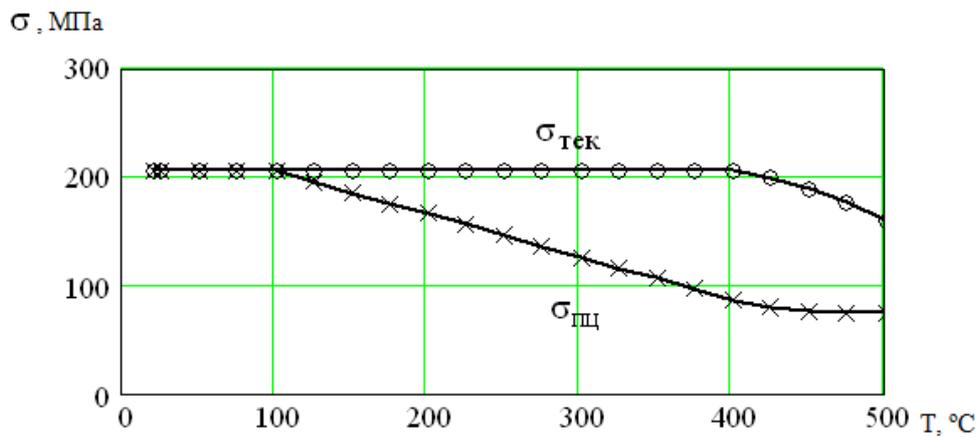


Рис. 1. Зависимости пределов пропорциональности  $\sigma_{пл}$  и текучести  $\sigma_{тек}$  от температуры для углеродистой стали [15]

Все вышеуказанное вместе приводит к появлению зоны пластических деформаций у сжатых волокнах сечения, а затем соответствующей зоны в растянутых волокнах, которые должны встретиться на некоторой границе, создав пластический шарнир [4].

Решение задачи определения времени  $t_{разр}$  разрушения элемента конструкции представим в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} N_z(t_{разр}) = \sigma_{тек}(T_k(t_{разр})) \cdot (A_{сж} - A_p); \\ M_x(t_{разр}) = \sigma_{тек}(T_k(t_{разр})) (S_{сж} + S_p), \end{cases} \quad (9)$$

где  $A_{сж}$ ,  $A_p$  – площади сжатой и растянутой зон пластической деформации;  $S_{сж}$ ,  $S_p$  – соответствующие статические моменты сопротивления относительно нейтральной оси сечения.

При условии симметричности сечения:

$$A_{сж} = A - A_p; \quad (10)$$

$$S_{сж} = S_p, \quad (11)$$

откуда получаем условия сохранения элементом несущей способности:

$$\begin{cases} N_z(t_{разр}) \leq \sigma_{мек}(T_k(t_{разр})) \cdot (A - 2 \cdot A_p); \\ M_x(t_{разр}) \leq \sigma_{мек}(T_k(t_{разр})) \cdot 2 \cdot S_p; \\ Q_y(t_{разр}) \leq \tau_B(T_k(t_{разр})) \cdot A. \end{cases} \quad (12)$$

Первое из условий (12) позволяет определить размер зоны пластического растяжения на момент образования пластического шарнира. С учетом (4) получим следующее уравнение:

$$\varepsilon_k(T_k(t_{разр})) \cdot E(T_k(t_{разр})) \cdot A = \sigma_{мек}(T_k(t_{разр})) \cdot (A - 2 \cdot A_p), \quad (13)$$

откуда площадь зоны пластического растяжения:

$$A_p = \frac{\sigma_{мек}(T_k(t_{разр})) - \varepsilon_k(T_k(t_{разр})) \cdot E(T_k(t_{разр}))}{2 \cdot \sigma_{мек}(T_k(t_{разр}))} \cdot A. \quad (14)$$

Определив из геометрических соображений при рассчитанном значении  $A_p$  величину расстояния  $h_s$  от нейтральной оси сечения до границы зон пластических деформаций, получаем возможность вычислить значение  $S_p$  и проверить выполнение условий сохранения несущей способности элементом

$$(\sigma_0(t_{разр}) + \sigma_M(t_{разр})) \cdot W_x \leq \sigma_{мек}(T_k(t_{разр})) \cdot 2 \cdot S_p; \quad (15)$$

$$(\tau_0(t_{разр}) + \tau_M(t_{разр})) \cdot W_x \leq \tau_B(T_k(t_{разр})) \cdot A. \quad (16)$$

На основании полученных зависимостей был предложен критерий оценивания уровня безопасности по требованию сохранения несущей способности элемента конструкции с учетом наличия упругопластического деформирования под действием факторов пожара в следующем формализованном виде:

$$\begin{cases} \frac{\varepsilon_k(T_k(t)) \cdot E(T_k(t))}{\sigma_{мек}(T_k(t))} \leq 1; \\ \frac{(\sigma_0(t) + \sigma_M(t)) \cdot \frac{W_x}{2 \cdot S_p(A_p)}}{\sigma_{мек}(T_k(t))} \leq 1; \\ \frac{(\tau_0(t) + \tau_M(t)) \cdot \frac{W_x}{2 \cdot S_p(A_p)}}{\tau_B(T_k(t))} \leq 1, \end{cases} \quad (17)$$

где  $S_p(A_p)$  – устанавливаемая из геометрических соображений зависимость между значением статического момента зоны пластического растяжения относительно нейтральной оси сечения и площадью указанной зоны.

**Выводы.** Предложенный критерий оценивания уровня безопасности может быть использован для определения пределов огнестойкости несущих конструкций зданий и сооружений во время пожаров, а также при определении параметров режимов функционирования систем и средств, используемых для ликвидации пожаров. Моделирующие зависимости, определенные для прочности элемента несущей конструкции, соответствуют требованиям к математическим моделям огнестойкости конструкций. Для повышения точности оценивания результатов моделирования необходимо создать моделирующие зависимости теплообмена в динамике течения пожара, происходящего между окружающей средой и элементами конструкции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов В. В., Семенов К. В., Ренев И. А. Огнестойкость железобетонных конструкций: модели и методы расчета // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 6. С. 58-61.

2. Васильченко А. В., Золочевский Н. Б., Хмыров И. М. Оценка предела огнестойкости изгибаемых железобетонных элементов, усиленных фиброматериалами // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. 2013. Вып. 33. Х.: НУГЗУ. С. 27-32. URL: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol33/vasilchenko.pdf> (дата обращения: 24.10.2016).
3. Гуліда Е. М., Ренкас А. А. Вогнестійкість залізобетонних плит перекриття житлових та адміністративних будівель // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. 2012. Вып. 32. Х.: НУГЗУ. С. 62-73. URL: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol32/gulida.pdf> (дата обращения: 24.10.2016).
4. Иванов, П.С. Упругопластический расчет и оптимизация моностальных и бистальных балок: монография. Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2013. 220 с. URL: [http://portal.tsuab.ru/Nauch\\_2013-1/003.pdf](http://portal.tsuab.ru/Nauch_2013-1/003.pdf) (дата обращения: 24.10.2016).
5. Колосков В. Ю. Имитационная модель системы жизнеобеспечения аэрокосмического производства // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: Сб. науч. тр. 2003. Вып. 18. Х.: Нац. аэрокосмич. ун-т. С. 87-93.
6. Колосков В. Ю. Критерий оценки безопасности влияния производственных факторов на человека // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». 2006. Вып. 46(3). Х.: Нац. аэрокосмич. ун-т. С. 71-77.
7. Колосков В. Ю. Метод прогнозування адаптації оператора до дії шкідливих факторів машинобудівного виробництва: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01. Х., 2007. 178 с.
8. Колосков В. Ю. Моделирование прочности несущих конструкций будівель за умов локалізованої пожежі // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. 2016. Вып. 39. Х.: НУЦЗУ. С. 142-151. URL: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol39/Koloskov.pdf> (дата обращения: 24.10.2016).
9. Колосков В. Ю. Моделирование прочности несущих конструкций будівель під час пожежі // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. 2015. Вып. 38. Х.: НУЦЗУ. С. 83-90. URL: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol38/Koloskov.pdf> (дата обращения: 24.10.2016).
10. Мосалков И. Л., Плюснина Г. Ф., Фролов А. Ю. Огнестойкость строительных конструкций. М.: ЗАО «СПЕЦТЕХНИКА», 2001. 496 с.
11. Поздеев С. В. Верификация результатов уточненного расчетного метода определения пределов огнестойкости железобетонных конструкций // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. 2011. Вып. 29. Х.: НУГЗУ. С. 141-148. URL: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol29/> (дата обращения: 24.10.2016).
12. Ройтман В. М. Инженерные решения по оценке огнестойкости. М.: Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. 382 с.
13. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М.: Мир, 1978. 418 с.
14. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1988. 143 с.
15. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. К.: Мінрегіонбуд України, 2012. 98 с.

УДК 614.841

**А. В. Волосач**

Филиал «ИППК» Университета гражданской защиты МЧС Республики Беларусь

#### **ВОЗМОЖНОСТЬ ПОИСКА ОЧАГА ПОЖАРА НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ ГАЗОСИЛИКАТНЫХ БЛОКОВ**

Показана возможность использовать результаты измерения глубины внедрения индентора и ультразвукового исследования газосиликатных блоков предварительно подвергнутых воздействию температур, для восстановления картины температурного поля на пожарах.

**Ключевые слова:** силикатные блоки, очаг пожара, ультразвуковое исследование, глубина внедрения индентора.

*A. V. Volosach*

#### **ABILITY TO SEARCH FIRE SITE BASED HARDNESS MEASUREMENT SILICATE BLOCKS**

The possibility to use a measurement of depth of the indenter and the introduction of ultrasound silicate blocks previously subjected to temperatures to restore the picture of the temperature field on fire.

**Keywords:** silicate blocks, fire site, ultrasonography, the depth of the indenter introduction.