

## Раздел VI. Огнезащита материалов и конструкций

УДК 614.84

**В.В. Агафонова**

### **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ОЦЕНКАХ ОГНЕСТОЙКОСТИ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОГНЕЗАЩИТЫ ИЗ ВЕРМИКУЛИТОВЫХ ПЛИТ**

*Представлены результаты компьютерного моделирования задач по оценке огнестойкости незащищенных стальных колонн, а также стальных колонн с огнезащитой из вермикулитовых плит. На первом этапе исследования была проведена оценка достоверности численного моделирования стальной колонны без огнезащиты. Результаты решения теплофизической и прочностной задачи сравнивались с результатами натурных огневых испытаний. На втором – оценка влияния толщины огнезащитного покрытия на огнестойкость стальных колонн. В результате решения последней задачи был разработан ряд подпрограмм (на языке APDL), позволяющих производить параметрический расчет огнестойкости стальных колонн с различной приведенной толщиной.*

*Математическое моделирование; численные методы; метод конечных элементов; стальные колонны; огнестойкость строительных конструкций; огнезащита; вермикулитовые плиты.*

**V.V. Agafonova**

### **COMPUTATIONAL MODELING DURING ASSESSMENT OF FIRE RESISTANCE OF STEEL CONSTRUCTIONS WITH THE USE VERMICULITE FIRE PROTECTION**

*This article presents the results of a computer simulation for the evaluation of fire resistance of unprotected steel columns and steel columns with fire protection of vermiculite boards. At the first stage of the study was to assess the reliability of the numerical modeling of steel columns without fire protection. The results of the sayings of the thermophysical and strength tasks were compared with the results of full-scale fire tests. On the second - the assessment of the impact of fire-retardant coating thickness on the fire resistance of steel columns. The solution of the latter problem, a set of routines (the language APDL), allowing to perform parametric calculation of fire resistance of steel columns with different reduced thickness.*

*Mathematical modeling; computational methods; finite elements method; fire resistance of constructions; vermiculite fire protection.*

**Введение.** Строительство зданий промышленного и гражданского назначения является актуальной сферой деятельности как у нас в стране, так и во всем мире. Нередко в качестве основных применяются конструкции из композитных материалов, чаще всего из стали, чугуна и алюминиевых сплавов. Стальные конструкции отличаются высокой прочностью, надежностью, легкостью, индустриальностью в изготовлении, удобстве при монтаже. Вместе с тем несущая способность конструкций, выполненных из стали не уступает железобетонным конструкциям.

Пожары в зданиях промышленного и гражданского назначения, к сожалению, являются не редкостью, в ряде случаев приводит к большим человеческим жертвам и значительному материальному ущербу.

В связи с этим возникает необходимость в производстве исследований поведения стальных колонн с различными огнезащитными покрытиями в условиях пожара методом численного моделирования.

В данной работе расчет проведен на примере стальных колонн с применением в качестве огнезащиты традиционного строительного материала – вермикулитовых плит. Огнезащитные составы на основе вспученного вермикулита находят широкое применение в гражданском строительстве как у нас в стране, так и за рубежом (чаще в США, Германии, Англии, Франции, Японии, Канаде). Химический состав вермикулита приблизительно выражается следующей формулой  $(Mg+2, Fe+2, Fe+3)_3 [(Si,Al)_4O_{10}] \cdot (OH)_2 \cdot 4H_2O$ . Кроме огнезащитных свойств вермикулитовые плиты отличаются удобством при монтаже, экологичностью, хорошим звукопоглощением и теплоизоляцией.

В настоящее время существует достаточно много программных продуктов, способных решать прочностные и теплофизические задачи на высоком уровне. Одним из наиболее мощных программных комплексов является ANSYS [1–2]. Отличительной особенностью ПК ANSYS является его способность решать в сопряженной постановке различные задачи, в том числе прочностную задачу совместно с теплофизической. ANSYS поддерживает следующие виды теплообмена: теплопроводность, конвекция, излучение, а также позволяет учесть нелинейность изменения различных теплофизических характеристик. Кроме этого, ANSYS имеет богатый набор математических моделей физически нелинейных деформируемых материалов, в том числе располагает значительной библиотекой уравнений ползучести стали [4–7].

Исходя из вышеперечисленных характеристик, данный программный комплекс был выбран в качестве инструмента при исследовании особенностей поведения стальных колонн без огнезащиты и с огнезащитой в виде вермикулитовых плит в условиях высокотемпературного воздействия.

**1. Оценка достоверности численного моделирования.** Натурные испытания строительных конструкций дают возможность изучить ряд вопросов, связанных с особенностями поведения строительных конструкций в реальных условиях высокотемпературного воздействия.

Результаты таких испытаний позволяют проводить оценку точности как расчетных методов, так и методов численного (компьютерного) моделирования.

На первом этапе решалась задача по оценке достоверности компьютерного моделирования поведения стальных колонн при воздействии нестационарных тепловых воздействий. Для сравнительного анализа были использованы результаты огневых испытаний, проведенных начальником отдела ВНИИПО МЧС, к.т.н. Федоренко В.С. [3].

Характеристика исследуемой колонны:

Стальная колонна – сквозной стержень, составленный из двух ветвей широкополочных прокатных швеллеров (№ 22б), соединенных между собой планками, организуя замкнутую форму сечения. Облицовка отсутствовала. Высота колонн – 3500 мм. Марка стали – Ст-3. Центрально приложенная нагрузка на колонну составляла  $N=104400$  кг.

Метод решения:

Решение задачи огнестойкости стальной колонны производится в два этапа:

1. Решение теплофизической задачи.
2. Решение прочностной задачи, учитывая результаты расчетов, полученные при решении теплофизической задачи.

Наступление предела огнестойкости испытуемой колонны оценивалось с помощью показателя скорости нарастания вертикальной деформации (10 мм/мин).

В ходе сравнительного анализа был выполнен расчет в программном комплексе ANSYS поведения стальных колонн при воздействии пожара. Результаты представлены на рис. 1, 2.

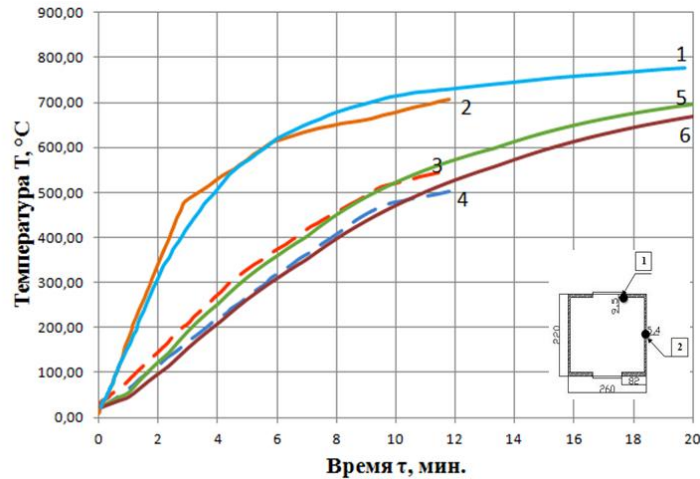


Рис. 1. График сравнения кривых прогрева стальной колонны без огнезащиты, по результатам натурального испытания (кривые 3, 4) и в результате расчета в программном комплексе ANSYS (кривые 5, 6): 1 – «стандартный» режим пожара; 2 – температурный режим в печи; 3 – кривая прогрева колонны в точке 1 (по результатам натуральных испытаний); 4 – кривая прогрева колонны в точке 2 (по результатам натуральных испытаний); 5 – кривая прогрева колонны в точке 1 (по результатам расчета в ANSYS); 6 – кривая прогрева колонны в точке 2 (по результатам расчета в ANSYS)

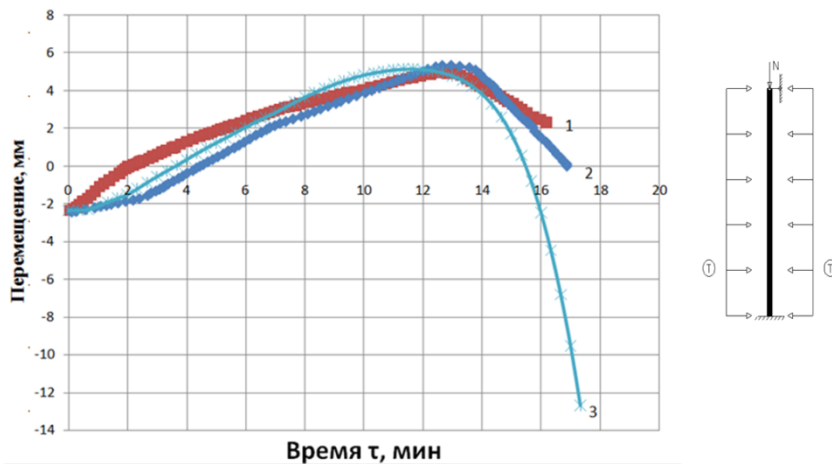


Рис. 2. График перемещений стальной колонны, полученных в результате расчета в программном комплексе ANSYS (3) и натуральных испытаний (1, 2)

На рис. 1 представлены результаты решения теплофизической задачи. Кривые прогрева стальной колонны, полученные при решении задачи в ANSYS, имеют идентичный характер с кривыми, построенными по результатам натурного эксперимента. На рис. 2 представлены результаты решения прочностной задачи. Таким образом, сопоставление данных, полученных при решении задачи по определению предела огнестойкости стальной колонны, с помощью метода конечных элементов в программном комплексе ANSYS с результатами огневых испытаний Федоренко В.С. [3] показало хорошую сходимость.

Это дало возможность приступить к дальнейшим исследованиям влияния различных параметров огнезащитного покрытия на огнестойкость стальных колонн.

**2. Полученные результаты.** Была решена задача оценки огнестойкости стальных колонн с учетом различных вариантов толщины огнезащитного покрытия. Материал – вермикулитовые плиты. Были рассмотрены три варианта колонн: без огнезащитного покрытия, с огнезащитным покрытием толщиной 20 и 40 мм. Изополя температур и кривые прогрева приведены на рис. 3 и 4.

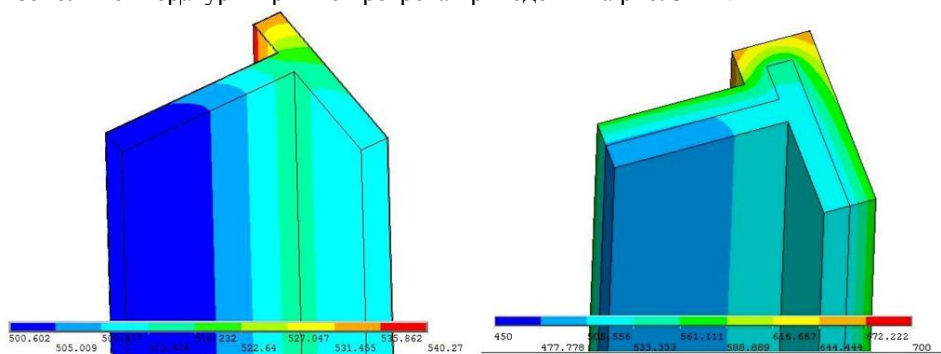


Рис. 3. Изополя температур прогрева колонн с учетом наличия и отсутствия огнезащиты из вермикулитовых плит

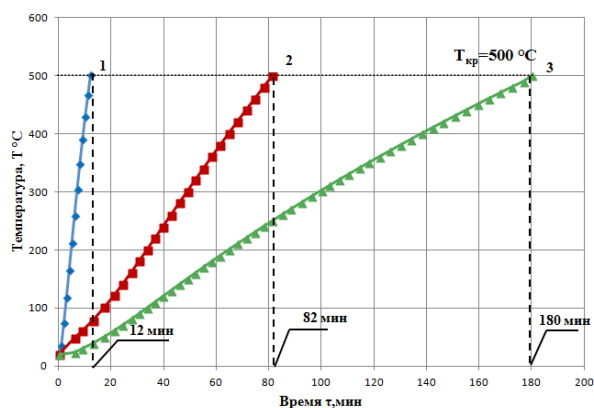


Рис. 4. Кривые прогрева стальных колонн с учетом различной толщины огнезащитного покрытия: 1 – стальная колонна без огнезащиты; 2 – стальная колонна с толщиной защитного слоя (вермикулитовые плиты)  $\delta=20$  мм; 3 – стальная колонна с толщиной защитного слоя (вермикулитовые плиты)  $\delta=40$  мм

**Выводы.** В результате проведенного исследования поведения стальных колонн при пожаре методом численного моделирования:

- ◆ была произведена оценка достоверности численного моделирования поведения стальных колонн при высокотемпературном воздействии;
- ◆ выполнен расчет примерной стальной колонны с различной толщиной огнезащиты, с целью определения требуемой толщины для обеспечения огнестойкости здания в течении времени, необходимого для своевременной эвакуации людей;
- ◆ разработан ряд подпрограмм (на языке APDL), позволяющих производить параметрический расчет огнестойкости стальных колонн с различными сечениями, толщиной огнезащиты, меняя геометрические характеристики;
- ◆ данные результаты численного моделирования будут применены при решении более сложных задач поведения зданий, выполненных из стальных конструкций в условиях пожара.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Structural Analysis Guide, Documentation for ANSYS, Release 14. 2012.
2. Thermal Analysis Guide, Documentation for ANSYS, Release 14. 2012.
3. *Федоренко В.С.* Исследование огнестойкости стальных центрально сжатых колонн: дис. ... канд. техн. наук. – М.: Моск. инж.-строит. ин-т им. В.В. Куйбышева, 1961. – 215 с.
4. *Kozlowski P.F., Thomas B.G., Wang H.* Simple Constitutive Equations for Steel at High Temperature // Metallurgical Transactions. – 1992. – № 23A. – P. 903-918.
5. *Wray P.J.* Effect of Carbon Content on the Plastic Flow of Plain Carbon Steels at Elevated Temperatures // Metallurgical Transactions. – 1982. – № 13A. – P. 125-134.
6. *Suzuki T., Tacke K.H., Wunnenberg K.* Creep Properties of Steel at Continuous Casting Temperatures // Ironmaking and Steelmaking. – 1988. – Vol. 15, № 2. – P. 90-100.
7. *Иванов А.В.* Выбор и определение параметров физических соотношений моделей сплошных сред, описывающих физико-механические свойства сталей при высоких гомологических температурах // Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции "Машиностроительные технологии", 16-17 декабря 2008. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – С. 138-139.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.П. Савостьянов.

**Агафонова Вера Валерьевна** – ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет» (МГСУ); agafonova-vv@yandex.ru; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; тел.: +79267096513; кафедра комплексной безопасности в строительстве; ассистент.

**Agafonova Vera Valeryevna** – FSBEU NPE «Moscow state university of civil engineering» (MSUCE); e-mail: agafonova-vv@yandex.ru; 26, Jaroslavl'skoe hw., Moscow, 129337, Russia; phone +79267096513; the department of complex safety in construction; assistant.