

СОЗДАНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ В МАТЕМАТИЧЕСКОМ ПАКЕТЕ COMSOL MULTIPHYSICS

Кухтик М.П.

ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград, Россия (400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28), e-mail: app@vstu.ru

Разработана конечно-элементная модель температурного поля рабочего пространства методической печи. В качестве среды разработки выбран математический пакет COMSOL Multiphysics. Численное решение задачи уточнено за счёт выделения дополнительных расчётных областей: греющей среды, кладки печи и корундового пода. Учтено влияние пламени горелок на распределение температуры. В результате создания модели получен трёхмерный график температурного поля, который может отображаться в различных режимах. В статье этот график представлен в режимах продольных и поперечных сечений, а также в режиме распределения температуры на всех граничных поверхностях. Разработанная модель позволяет выявлять основные физические закономерности поведения температурных полей и анализировать распределение температуры в слябах. Данная модель может быть использована при решении задач оптимального управления температурными полями в процессе нагрева заготовок перед прокаткой.

Ключевые слова: методическая печь, температурное поле, трёхмерный график, нагрев заготовок, метод конечных элементов.

CREATION OF A FINITE ELEMENT MODEL FOR TEMPERATURE FIELD OF CONTINUOUS FURNACE OPERATING SPACE IN MATHEMATICAL PACKAGE COMSOL MULTIPHYSICS

Kukhtik M.P.

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia (400005, Volgograd, Lenin avenue, 28), e-mail: app@vstu.ru

A finite element model for temperature field of continuous furnace operating space has been developed. Mathematical package COMSOL Multiphysics has been chosen as a development environment. Numerical solution of problem has been refined at the expense of discrimination of additional calculated domains: heating medium, furnace lining and corundum hearth. Torches flame influence on temperature distribution has been allowed. As a result of a model creation the three-dimensional plot of temperature field has been obtained, which can be represented in different modes. In the article this plot is represented in the modes of longitudinal and cross sections as well as in the mode of temperature distribution on all boundary surfaces. The developed model enables to bring to light main physical regularities of temperature fields' behaviour and to analyze temperature distribution in slabs. This model can be used at solution of temperature fields optimal control problems during the process of stocks heating before rolling.

Keywords: continuous furnace, temperature field, three-dimensional plot, stocks heating, finite element method.

Для нагрева заготовок перед обработкой давлением в металлургии и машиностроении широко применяют печи непрерывного действия, которые называют методическими. Моделирование процессов нагрева металла является составной частью общей задачи построения автоматизированной системы управления нагревом металла [7]. Оно позволяет изучать в широких пределах температурных диапазонов общие закономерности, присущие данному классу методических печей, а также рассматривать вопросы, связанные с определённой печью или сортаментом заготовок. Применение моделей нагрева для выбора

наилучших технологических режимов позволяет значительно сократить объём экспериментальных работ, проводимых на объекте, но не исключает и не заменяет их [1; 2].

Целью настоящей работы является разработка модели температурного поля рабочего пространства методической печи. Модель реализована в математическом пакете COMSOL Multiphysics, предназначенном для решения дифференциального уравнения теплопроводности методом конечных элементов [4; 8; 9]:

$$\nabla \cdot (-k \nabla T) = Q + q_s T - \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T, \quad (1)$$

где ∇ – оператор Гамильтона, $\nabla = (\partial_x, \partial_y, \partial_z)$; k – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); T – абсолютная температура, К; Q – внутренний источник тепла, Вт/м³; q_s – коэффициент выделения/поглощения, Вт/(м³·К); ρ – плотность, кг/м³; C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К); \mathbf{u} – вектор скорости, м/с.

В модели приняты следующие допущения.

1. Рабочее пространство печи задавалось двумя прямоугольными параллелепипедами: первый моделирует методическую и сварочные зоны, второй – томильную зону.

2. Горелки моделируются цилиндрами, а влияние их пламени учитывается заданием теплового потока на соответствующих граничных поверхностях цилиндров.

3. В качестве расчётных областей не рассматривались слой окалины [6], обезуглероженный слой стали, глиссажные и опорные трубы.

4. Слябы в садке принадлежат к одной группе нагрева, имеют одинаковые геометрические и теплофизические параметры.

5. Ввиду симметрии печи в модели рассматривается только левая половина рабочего пространства и только один из двух рядов слябов.

6. Для задания теплофизических параметров греющей среды использовались табличные данные для дымовых газов [5].

7. Коэффициент излучения, коэффициент теплоотдачи и среднемассовая температура кладки печи считаются равными соответствующим параметрам слябов.

8. Тепловыделение, происходящее внутри слябов при фазовом переходе во время нагрева, не учитывалось.

9. Для задания геометрии рабочего пространства печи была выбрана методическая печь стана 2000 металлургического завода «Красный Октябрь» (Волгоград).

Создание модели начинается с выбора размерности в окне навигатора моделей – 3D. После этого выбираем модуль теплопередачи, в нём раздел общей теплопередачи и подраздел стационарного анализа, так как рассматриваем стационарную задачу теплопроводности.

Геометрия рабочего пространства включает в себя 70 расчётных областей: 59 слябов, 5 областей греющей среды и 5 областей кладки, соответствующие 5 зонам печи, а также область корундового пода. Расчётные области созданы с помощью трёхмерных геометрических объектов: прямоугольных параллелепипедов и цилиндров, к некоторым из которых применялась операция вычитания из команды «Создать составной объект».

Для каждой расчётной области были заданы следующие теплофизические параметры из режимных карт нагрева и справочной литературы [3; 5]: коэффициент теплопроводности, плотность, удельная теплоёмкость, среднemasсовая температура. Для каждой граничной поверхности были указаны граничные условия, в данном случае граничные условия третьего рода, характеризующие закон теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой:

$$-\mathbf{n} \cdot (-k\nabla T) = q_0 + h(T_{inf} - T) + \varepsilon\sigma(T_{amb}^4 - T^4), \quad (2)$$

где \mathbf{n} – вектор нормали к граничной поверхности; q_0 – тепловой поток, направленный внутрь, Вт/м³; h – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); T_{inf} – температура поверхности тела, К; ε – коэффициент излучения; σ – постоянная Стефана–Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); T_{amb} – температура окружающей среды, К.

При этом были заданы следующие теплофизические параметры: коэффициент теплоотдачи, температура поверхности, коэффициент излучения, температура окружающей среды.

Таким образом, в модели описывается теплообмен тремя способами: теплопроводностью, конвекцией и излучением.

На следующем этапе рабочее пространство печи разбивается на конечные элементы в форме тетраэдров. Плотность сетки можно настроить выбором одного из девяти предустановленных режимов: от чрезвычайно точного до чрезвычайно грубого. Для более мелких конечных элементов плотность разбиения повышается автоматически. Если необходимо дополнительно сгустить сетку в какой-либо области, то это можно сделать вручную с помощью соответствующей команды. На рисунке 1 представлено разбиение рабочего пространства методической печи сеткой конечных элементов. Элементы закрашены оттенками серого цвета: чем темнее цвет, тем выше плотность сетки. На рисунке 2 показан фрагмент данной конечно-элементной сетки в области томильной зоны, пода и конца сварочных зон.

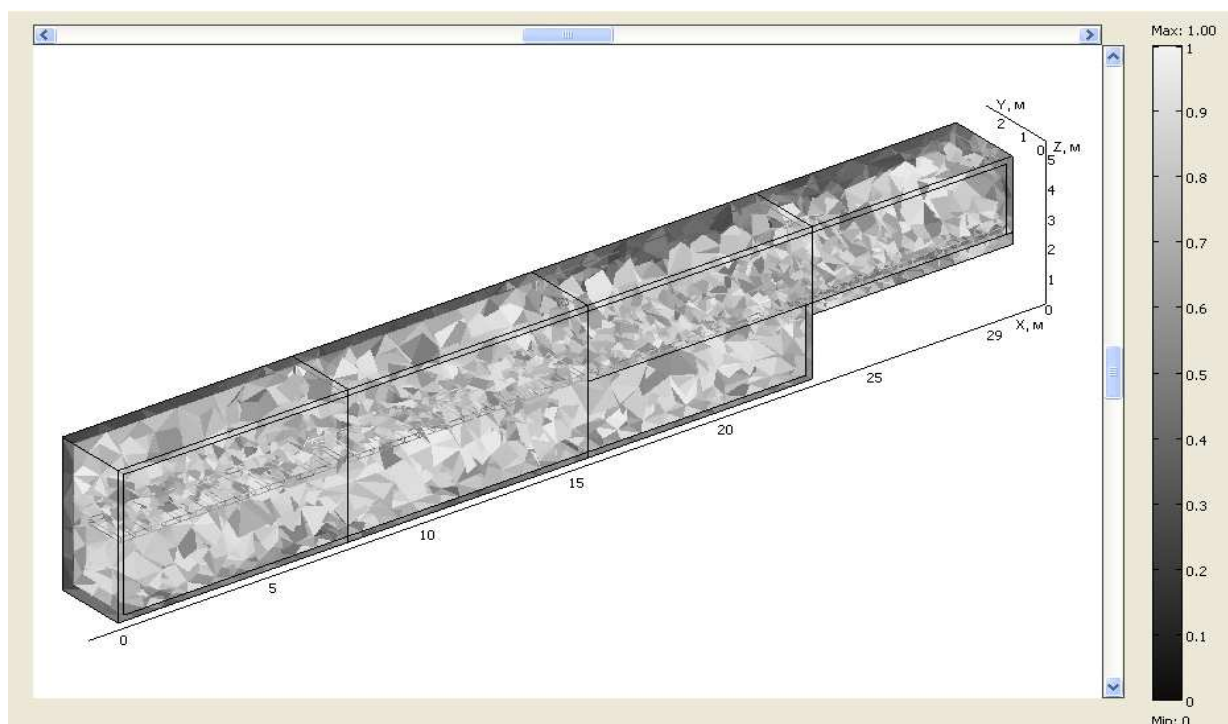


Рис. 1. Разбиение рабочего пространства методической печи сеткой конечных элементов.

Далее определяем параметры решающего устройства. Выбираем стационарный нелинейный решатель, поскольку рассматриваемая задача стационарна и в ней учитывается теплообмен излучением. После завершения работы решающего устройства автоматически включается режим постобработки, в котором можно наблюдать результаты расчётов [4].

В результате создания модели получен трёхмерный график температурного поля рабочего пространства печи, который может отображаться в различных режимах.

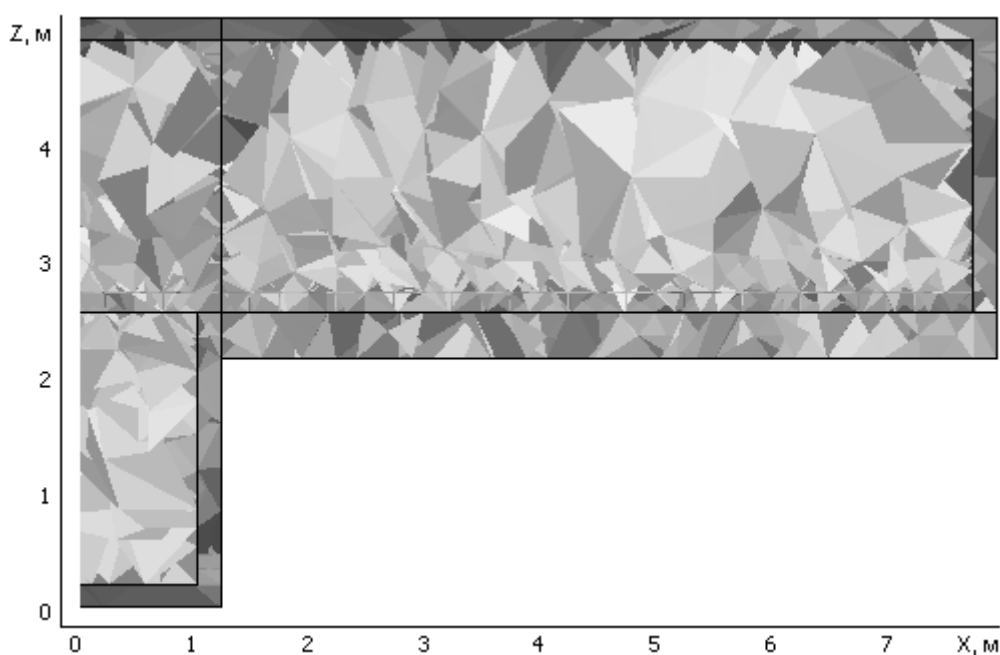


Рис. 2. Фрагмент конечно-элементной сетки.

На рисунке 3 представлено температурное поле в режиме продольных сечений, а на рисунке 4 – в режиме поперечных сечений, в котором особенно хорошо заметно влияние пламени горелок на распределение температуры.

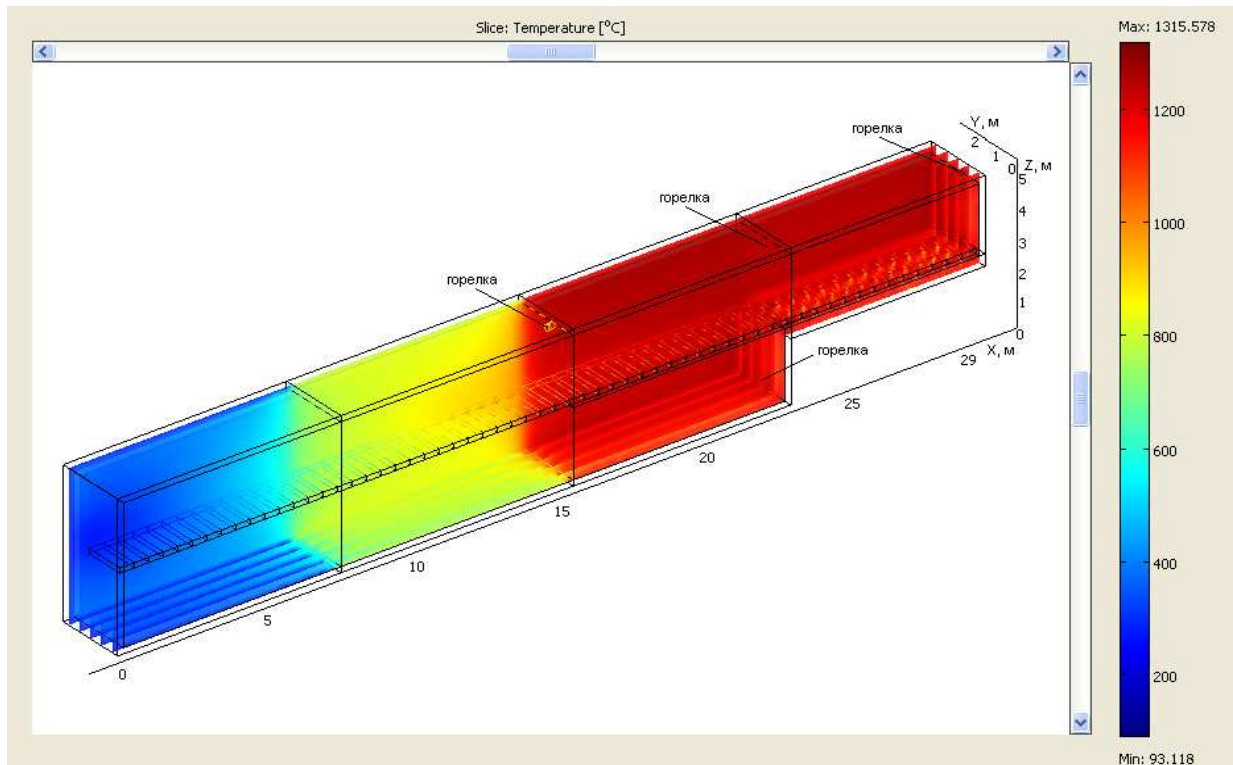


Рис. 3. Температурное поле рабочего пространства печи в режиме продольных сечений.

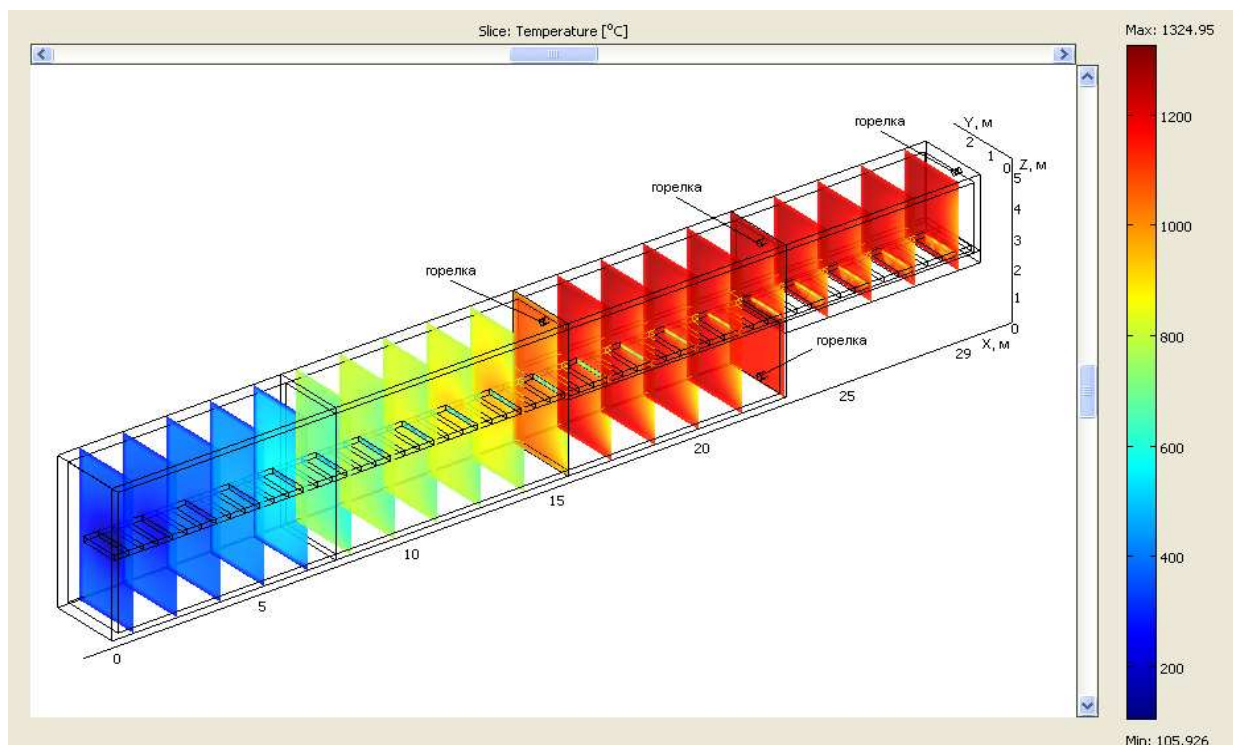


Рис. 4. Температурное поле рабочего пространства печи в режиме поперечных сечений.

На рисунке 5 представлено температурное поле рабочего пространства печи в режиме распределения температуры на всех граничных поверхностях.

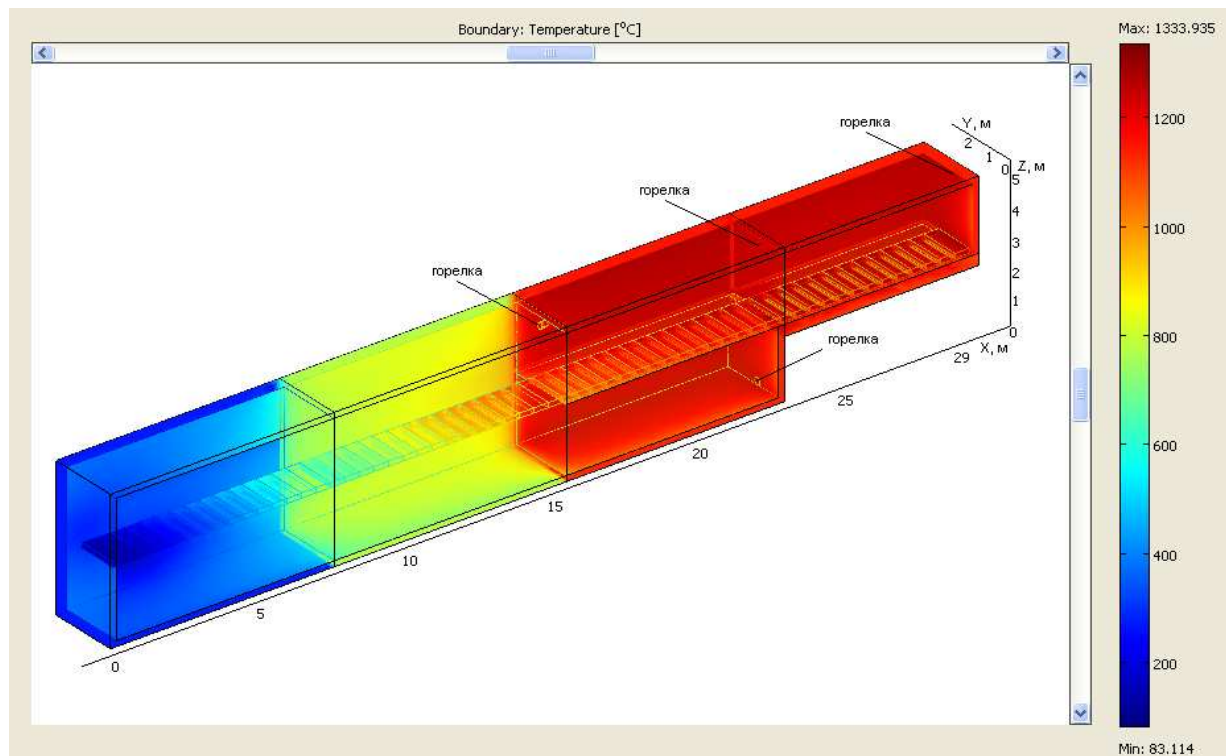


Рис. 5. Температурное поле рабочего пространства печи в режиме распределения температуры на всех граничных поверхностях.

В пакете COMSOL Multiphysics существует возможность экспортировать значения температуры, рассчитанные в узлах сетки конечных элементов, в отдельный текстовый файл в табличной форме.

Разработанная модель позволяет выявлять основные физические закономерности поведения температурных полей и анализировать распределение температуры в слябах. Данная модель может быть использована при решении задач оптимального управления температурными полями в процессе нагрева заготовок перед прокаткой.

Список литературы

1. Автоматизация методических печей / Л. И. Буглак [и др.]. – М. : Metallurgy, 1981. – 196 с.
2. Алёхин А.Г., Кухтик М.П. Оптимальное управление многозонной нагревательной печью // Известия ВолгГТУ. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». Вып. 4 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – № 9. – С. 54-56.

3. Губинский В.И. Metallurgical furnaces : учеб. пособие ; НМетАУ. – Днепропетровск, 2006. – 85 с.
4. Егоров В.И. Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности : учеб. пособие. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2006. – 77 с.
5. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача : учеб. для вузов. – М. : Энергия, 1975. – 488 с.
6. Кухтик М.П., Сердобинцев Ю.П. Математическое моделирование процесса нагрева слябов в методической печи // Известия ВолгГТУ. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». Вып. 7 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – № 13. – С. 80-83.
7. Сердобинцев Ю.П., Бурлаченко О.В., Схиртладзе А.Г. Перспективные направления повышения качества функционирования технологического оборудования : монография. – Старый Оскол : ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2010. – 412 с.
8. COMSOL Multiphysics User's Guide [Electronic resource]. – URL: <http://math.nju.edu.cn/help/mathhpc/doc/comsol/guide.pdf> (дата обращения: 20.03.2012).
9. Hanke M. Short Introduction to Comsol Multiphysics [Electronic resource]. – URL: <http://www.nada.kth.se/kurser/kth/2D1266/femlabcrash.pdf> (дата обращения: 20.03.2012).

Рецензенты

Бурлаченко О.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Технологии строительного производства», проректор по учебно-воспитательной работе, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, г. Волгоград.

Перфилов В.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Нефтегазовые сооружения» Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, г. Волгоград.