

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СРЕДСТВАМИ САПР

Аннотация. Рассматривается моделирование теплопередачи в системах со сложными граничными условиями. Приведены примеры моделей, разработанные авторами, со статическими и динамическими граничными условиями, выполненные с помощью современных средств моделирования, а также их влияние на прочностные параметры изделий.

Ключевые слова: моделирование систем, сложные граничные условия.

Abstract. We describe heat transfer modeling of systems with complex boundary conditions. Described examples of models with static and dynamic boundary conditions designed with CAE. All models created by authors.

Keywords: modeling of systems, complex boundary conditions.

Современные изделия предъявляют все более жесткие требования к прочности, износостойкости, долговечности и, не в последнюю очередь, к материалоемкости и массе изделий. В условиях жесткой конкуренции не всегда возможно проведение натурных испытаний, как из-за сжатых сроков, так и из-за отсутствия материальной базы. В таких условиях математическое моделирование начинает играть очень важную роль, выступая в качестве средства оптимизации и прогнозирования.

В процессе проектирования можно построить математическую модель детали и просчитать все нагрузки и напряжения, возникающие в процессе эксплуатации. При этом производится оптимизация геометрии изделия: на участках с низкой нагрузкой с целью экономии материала и уменьшения массы делаются технологические отверстия или уменьшается толщина материала. В местах, испытывающих сильную деформацию и высокую степень нагружения, напротив, добавляются ребра жесткости и увеличивается толщина.

Однако процесс проектирования не ограничивается конструкторской деятельностью – на параметры изделия очень сильно влияет технология его изготовления и применяемый инструмент.

В условиях автоматизированного малолюдного производства надежное функционирование станков с ЧПУ возможно только при применении систем диагностирования, которые осуществляют контроль работы основных элементов оборудования. Одним из элементов, ограничивающих надежность работы станка с ЧПУ, является режущий инструмент. Его неконтролируемый предельный износ или поломка могут привести к браку изделия и разрушению узлов станка. В связи с этим моделирование технологических процессов и выбор оптимальных режимов резания приобретают очень большое значение, особенно для прецизионной обработки, предъявляющей жесткие требования к режущему инструменту [1].

Однако традиционная реализация средств математического моделирования с помощью языков программирования высокого уровня (Fortran, C++) или математических САПР, таких как MathCAD, MATLAB и Maple оправдывает себя только при решении или очень простых, или, наоборот, очень спе-

цифических задач. Вызвано это тем, что трудозатраты растут в геометрической прогрессии при усложнении задачи.

Выходом из данной ситуации является применение Computer Assisted Engineering (CAE) – систем автоматического проектирования, специально предназначенных для решения инженерных задач, связанных с прочностью, деформациями, разрушением, теплообменом и другими областями расчетов [2].

Почти все специализированные САПР используют метод конечных элементов (МКЭ) – численный метод решения задач прикладной механики, широко используемый для решения задач механики деформируемого твердого тела, теплообмена, гидродинамики и электромагнитных полей. С точки зрения вычислительной математики идея метода конечных элементов заключается в том, что минимизация функционала вариационной задачи осуществляется на совокупности функций, каждая из которых определена на своей подобласти, для численного анализа системы позволяет рассматривать его как одну из конкретных ветвей диакоптики – общего метода исследования систем путем их расчленения [3].

Расчет комбинированного воздействия – температуры и механических напряжений – очень важен для узлов и деталей, работающих в сложных условиях. При больших приложенных усилиях и нагреве в металле возникают явления ползучести и текучести. Модель Джонсона-Кука описывает пластические напряжения, возникающие в материале, как функцию величины деформации, интенсивности деформаций и температуры, определяемую уравнением (1) [4].

$$\bar{\sigma} = \left[A + B(\bar{\epsilon})^n \right] \left[1 + C \cdot \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_H}{T_{пл} - T_{ком}} \right)^m \right], \quad (1)$$

где A , B , C , n и m – коэффициенты; $\bar{\epsilon}$ – эквивалентное пластическое напряжение; $\dot{\bar{\epsilon}}$ – скорость деформации; $\dot{\bar{\epsilon}}_0$ – начальная скорость деформации; T – температура; $T_{пл}$ – температура плавления; T_H – начальная температура.

Тела вращения, имеющие сложную форму и технологические отверстия для крепления, вентиляции и т.д., являются типовыми и могут применяться во многих изделиях, в частности, это может быть крышка с отверстиями для болтов. В процессе работы может возникнуть ситуация, когда деталь будет нагреваться неравномерно, создавая недопустимые механические напряжения и деформации.

Первым этапом является построение геометрической модели и разбиение на конечные элементы (КЭ) (рис. 1).

Предположительно, отверстия будут являться концентраторами напряжений, поэтому возле них требуется задать сгущение сетки КЭ для более точного расчета.

Так как в нормальном состоянии крышка закреплена болтами, то одним из граничных условий будет фиксация перемещения внутренних поверхностей отверстий по осям x , y и z . Вторым граничным условием будет наличие источника тепла с температурой 800 °С (рис. 2).

Следующим шагом будет определение параметров материала крышки. В качестве материала возьмем сталь 45, распространенный конструкционный

материал. В данном случае модель стали будет гомогенной и изотропной, со следующими характеристиками:

Коэффициент теплового расширения α (мкм/м·°C).....	11
Плотность (кг/м ³).....	7800
Коэффициент Пуассона.....	0,3
Теплоемкость (Дж/Кг/°C).....	432,6
Теплопроводность (Вт/м·°C).....	47,7
Модуль Юнга (ГПа).....	200

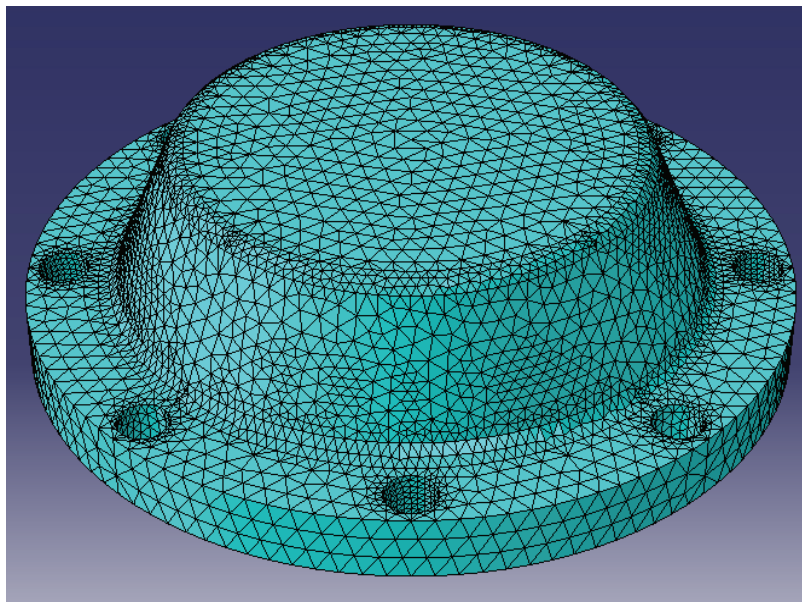


Рис. 1 Разбиение модели на КЭ

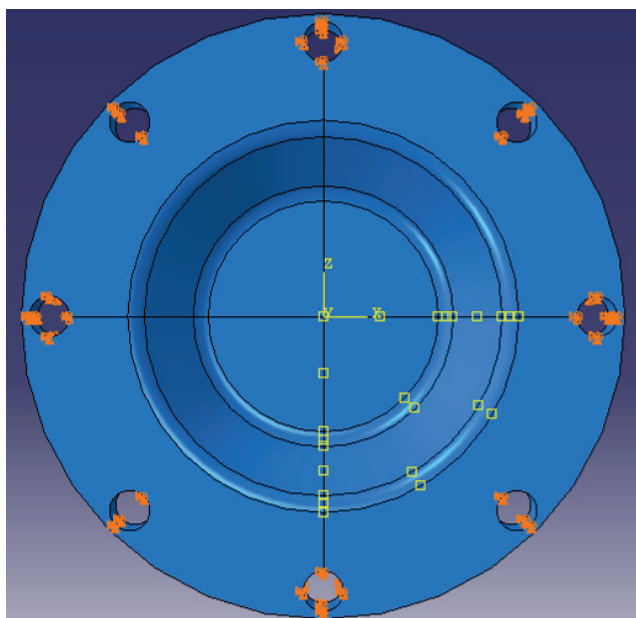


Рис. 2 Механические и тепловые граничные условия

Для выбранного материала коэффициенты в формуле (1) будут принимать следующие значения: $A = 551,3$ МПа; $B = 600,8$ МПа; $n = 0,234$; $C = 0,013$; $m = 1$.

Примем время моделирования 10 с: за это время успеет прогреться только часть крышки и механические напряжения, вызванные градиентом температур, будут максимальными.

Результат расчета показан на рис. 3, 4. Крышка показана в разрезе с учетом деформаций.

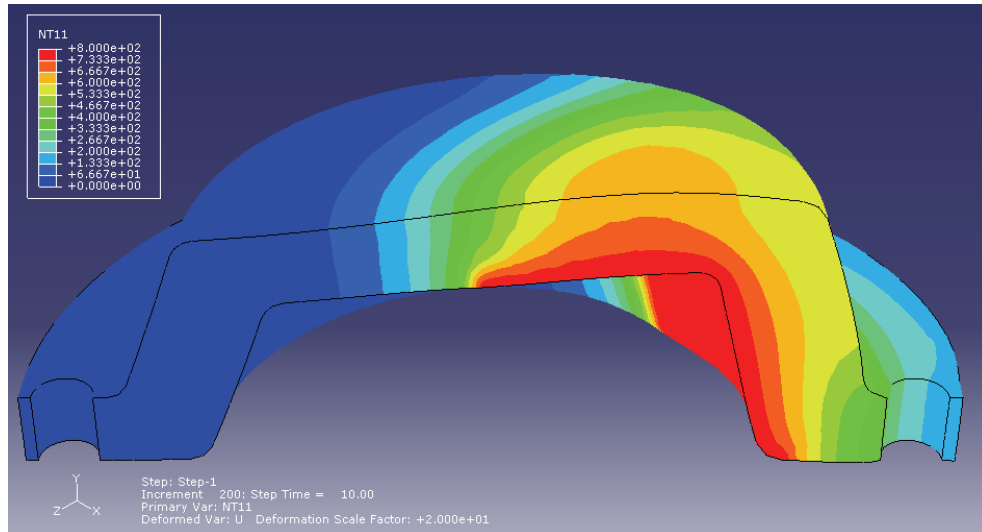


Рис. 3 Распределение теплового поля в теле крышки

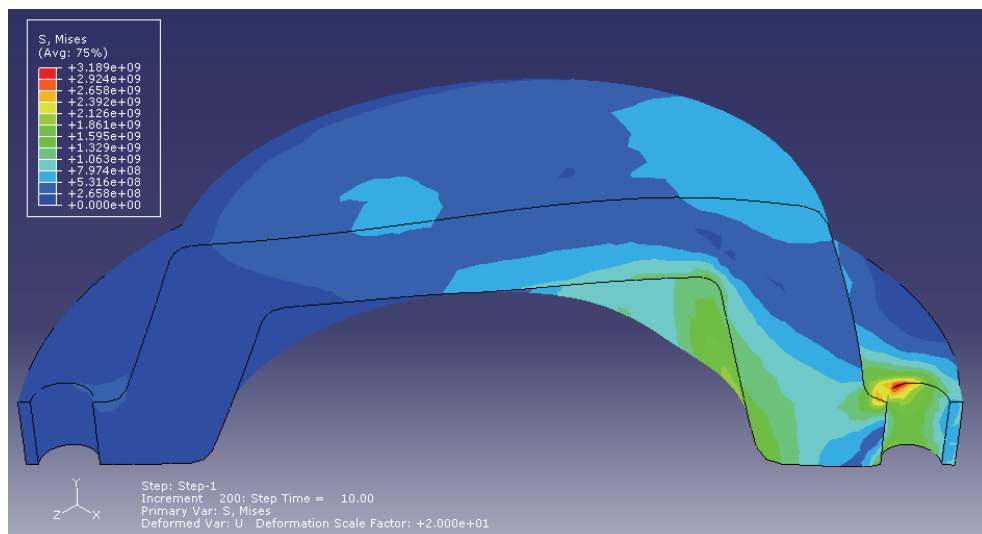


Рис. 4 Распределение напряжений в теле крышки

Из рис. 4 хорошо видно, что отверстия для болтов являются, как и предполагалось, концентраторами напряжений: величина напряжений в них достигает 3,189 ГПа, в то время как предел прочности стали 45 составляет

0,6 ГПа. Таким образом, с помощью модели удалось установить, что прочность детали при данном типе нагрева недостаточна.

Однако для определения параметров прочности и износостойкости требуется учитывать и технологические процессы, применяемые при изготовлении. Например, перегрев режущего инструмента может приводить к его повышенному износу, и, как следствие, отклонению параметров обрабатываемых поверхностей от заданных. Неоптимальный выбор параметров резания может вызвать недопустимую деформацию детали в процессе обработки, появление микротрещин и т.д., поэтому следующей задачей явилось построение модели механической обработки металла резанием.

При моделировании резания металлов деформации и их интенсивность могут достигать очень больших значений, при этом всегда требуется учитывать как пластическую, так и упругую составляющие.

Авторами было проведено исследование зависимости ЭДС естественной термопары сверло–деталь от износа режущего инструмента. Для подтверждения теоретических выкладок были проведены натурные эксперименты и построена математическая модель сверления цилиндрической заготовки (рис. 5) [6].

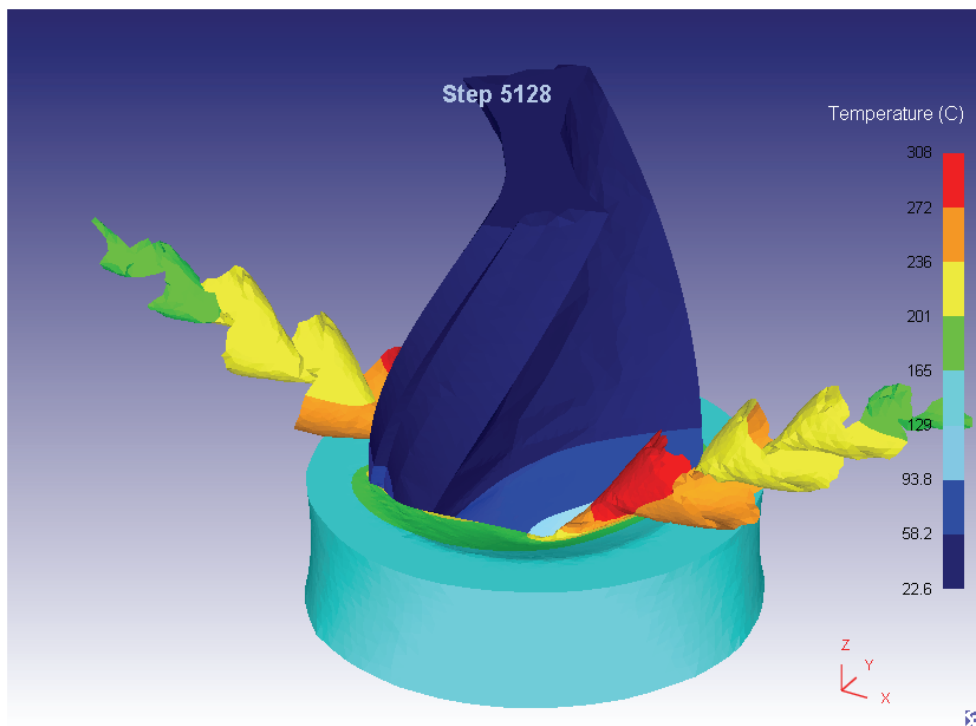


Рис. 5 Модель сверления цилиндрической заготовки

При построении данной модели были учтены следующие граничные условия: тепловой поток возникает при упругопластической деформации металла заготовки и трении стружки о переднюю режущую поверхность сверла.

Напряжение, возникающее при пластической деформации металла, является функцией деформации $\bar{\epsilon}$, интенсивности деформации $\dot{\bar{\epsilon}}$ и температуры T . Металл начинает деформироваться пластически, когда возникающее

напряжение начинает превышать величину ползучести или текучести (критерий Губера-Мизеса) [7].

Для расчета пластического напряжения в сталях наиболее точные результаты дает табличный метод, основанный на экспериментальных данных:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T).$$

На рис. 6 представлены зависимости пластического напряжения от деформации и температуры при разных значениях интенсивности деформаций [8].

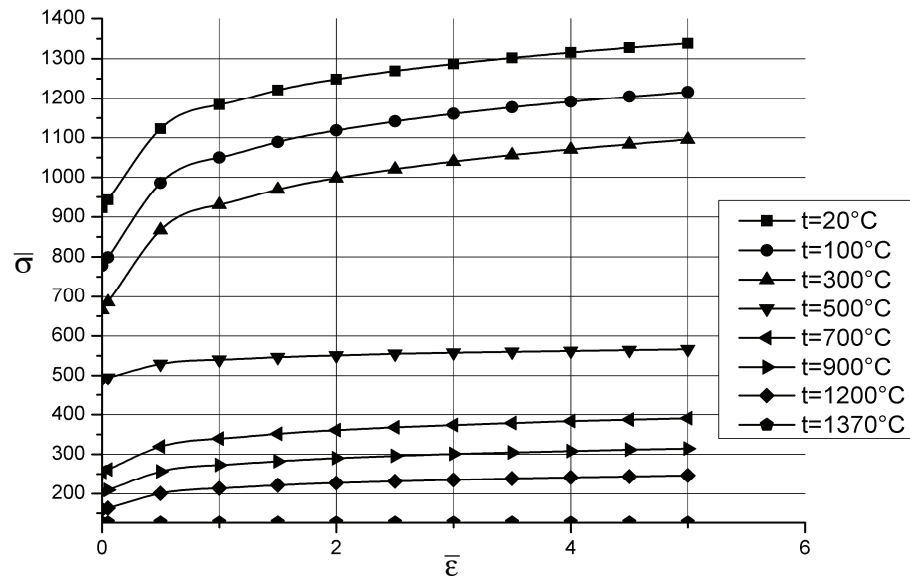


Рис. 6 Зависимость пластического напряжения от деформации при $\dot{\bar{\epsilon}} = 1$

Теплопередача при обработке металлов резанием осуществляется как между инструментом и материалом заготовки, так и между передней режущей поверхностью и стружкой, причем количество тепла, отдаваемое в стружку, может превышать отдачу в тело заготовки в несколько раз.

Стружка же, в свою очередь, охлаждается посредством конвекции, и ее температура снижается по мере удаления от зоны резания, что хорошо видно на рис. 5.

В процессе металлообработки тепловые потоки не являются стационарными: стружка, через которую происходит значительный теплоперенос, постоянно скалывается и деформируется. Геометрия контактирующих поверхностей изменяется при врезании инструмента, изменяя тем самым условия теплопередачи. Теплоемкость и теплопроводность как самого инструмента, так и обрабатываемой детали нелинейно зависят от температуры.

Таким образом, линейная задача теплопередачи при наложении сложных граничных условий приобретает значительную нелинейность.

Результаты моделирования представлены на рис. 7, 8.

Из графика на рис. 7 видно, что максимальная температура на режущей кромке сверла составляет 192 °С, что является допустимым для инструментальной стали Р6М5.

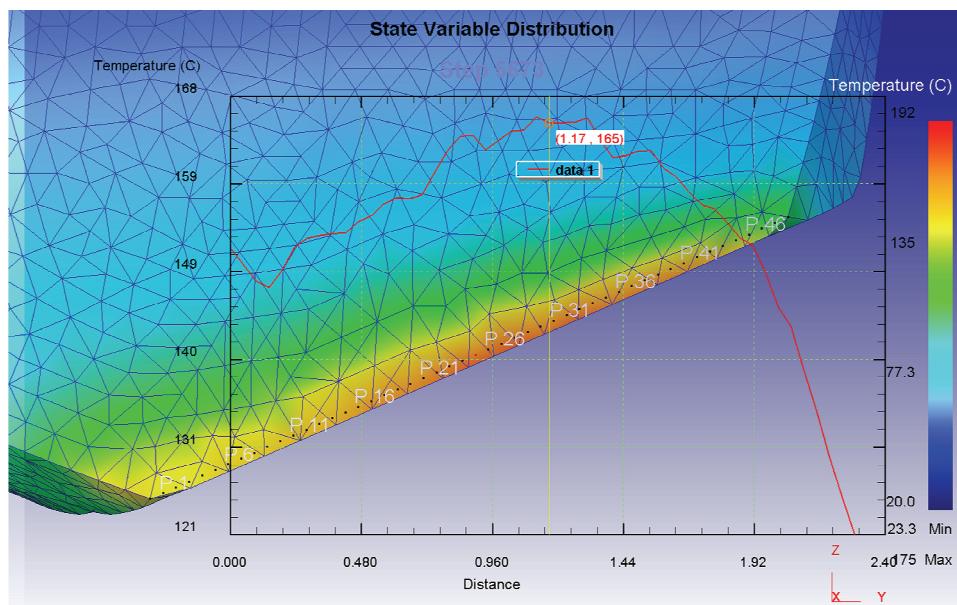


Рис. 7 Распределение теплового поля по режущей кромке и передней режущей поверхности сверла

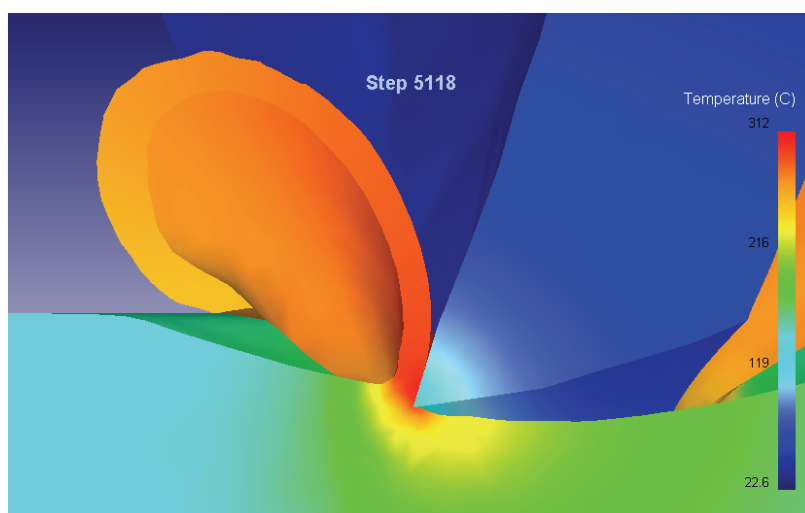


Рис. 8 Распределение теплового поля в теле сверла на расстоянии 2 мм от оси вращения

Данные, полученные с помощью математического моделирования, достаточно точно совпадают с экспериментальными [9].

Основным преимуществом данного метода, по сравнению с традиционными, такими как моделирование с помощью языков программирования высокого уровня и математическими САПР, является радикальное уменьшение трудозатрат и сокращение времени, требующегося для проектирования.

Список литературы

- 1 Тимофеев, В. Ю. Неразрушающая диагностика металлорежущего инструмента методом измерения сигнала термоЭДС / В. Ю. Тимофеев, А. А. Зайцев // Тео-

- рия и практика производства листового проката : сборник научных трудов. Ч. 2. – Липецк : Изд-во ЛГТУ, 2008. – С. 231–237.
- 2 **Ли, К.** Основы САПР (CAD, CAM, CAE) / К. Ли. – СПб. : Питер, 2004. – 560 с.
- 3 **Галлагер, Р.** Метод конечных элементов. Основы : пер. с англ. / Р. Галлагер. – М. : Мир, 1984. – 428 с.
- 4 **Johnson, G. R.** A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures / G. R. Johnson, W. H. Cook // Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. – Hague, Netherlands, 1983. – P. 541–547.
- 5 Abaqus Analysis User's Manual. – Dassault Systèmes, 2008.
- 6 **Тимофеев, В. Ю.** Исследование изменения термоЭДС резания в процессе износа инструмента / В. Ю. Тимофеев, А. А. Зайцев // Необратимые процессы в природе и технике : сборник научных трудов. Ч. 2. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – С. 220–223.
- 7 **Варданян, Г. С.** Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности / Г. С. Варданян, В. И. Андреев, Н. М. Атаров, А. А. Горшков. – М. : АСВ, 1993. – 573 с.
- 8 **Eckart, D.** Fließkurvenatlas metallischer Werkstoffe / D. oege Eckart, Heinz Meyer-Nolkemper, Imtiaz Saaed. – München : Hanser, 1986. – 224 с.
- 9 **Резников, А. Н.** Теплофизика резания / А. Н. Резников. – М. : Машиностроение, 1969. – 288 с.
-

Тимофеев Василий Юрьевич
аспирант, Елецкий государственный
университет им. И. А. Бунина

Timofeev Vasily Yuryevich
Postgraduate student,
Eletsk State University
named after I. A. Bunin

Зайцев Андрей Анатольевич
кандидат физико-математических наук,
доцент, проректор, Елецкий
государственный университет
им. И. А. Бунина

Zaytsev Andrey Anatolyevich
Candidate of physico-mathematical
sciences, associate professor, vice rector,
Eletsk State University
named after I. A. Bunin

УДК 517.9 + 536.212

Тимофеев, В. Ю.

Моделирование тепловых полей в сложных динамических системах средствами САПР / В. Ю. Тимофеев, А. А. Зайцев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2009. – № 2 (10). – С. 115–122.