

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫХ ЭТАПОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ОТЛИВОК ЦИЛИНДРОВ ДИЗЕЛЕЙ МЕТОДОМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

А.В. Груничев, Д.В. Павлов, А.Н. Подъемщиков, Р.Н. Хмелев

Представлены результаты исследования процесса получения чугуновой отливки цилиндра дизеля 1Ч9,5/8,0 с воздушным охлаждением с использованием математических моделей процесса литья и образования дефектов в процессе кристаллизации и остывания расплава в форме с применением программного комплекса СКМ ЛП «ПолигонСофт».

Ключевые слова: цилиндр дизеля, отливка, вычислительный эксперимент, СКМ ЛП «ПолигонСофт»

В настоящее время наиболее перспективным способом создания деталей и узлов поршневых двигателей внутреннего сгорания (ПДВС) является использование СИМ-технологий (Computer Integrated Manufacturing – комплексное автоматизированное производство [1]). Важнейшим элементом СИМ-технологий являются проблемно-ориентированные программные комплексы САЕ (Computer-Aided Engineering – интегрированные программные средства моделирования функционирования проектируемого объекта [1]), базирующиеся на современных математических моделях.

Современный этап теоретических исследований в области двигателестроения характеризуется большим разнообразием применяемых математических моделей, сложность которых постоянно возрастает. Эволюция моделирования ПДВС в настоящее время происходит в направлении все более детального учета множества различных факторов, повышения точности и придания моделям натуральных свойств. При этом модели способны давать информацию о ПДВС, которую затруднительно или невозможно получить экспериментальным путем [2].

В данной статье приведены результаты исследования процесса получения чугуновой отливки 1Ч9,5/8,0 цилиндра дизеля с воздушным охлаждением. Цилиндр является одной из наиболее ответственных деталей ПДВС и работает в условиях переменных давлений и температур в надпоршневой полости [3].

К отливке цилиндра предъявляются высокие требования износостойкости, прочности при ограниченных размерах в диаметрах, по высоте и толщине цилиндра [3].

Вычислительные эксперименты процессов литейного производства рассматриваемых цилиндров осуществлялись с помощью программы СКМ ЛП «ПолигонСофт» 16.5 [4]. Система компьютерного моделирования ли-

тейных процессов СКМ ЛП «ПолигонСофт» позволяет разработать и/или оптимизировать некоторые наиболее важные этапы технологического процесса не на реальной отливке, а на ее цифровом прототипе, что снижает затраты на проектирование и доводку литейной технологии и себестоимость продукции.

Рассматриваемый программный комплекс позволяет моделировать перенос тепла (теплопроводностью, конвекцией, излучением) при кристаллизации, образование усадочных дефектов (раковины, макро- и микропористость), заполнение формы расплавом, напряжения и деформации после затвердевания отливки [4].

В данной работе для технологического процесса получения отливок цилиндра 1Ч9,5/8,0 дизеля были решены следующие задачи:

- анализ проливаемости формы;
- установление закономерностей падения температуры расплава в процессе заполнения формы и характера затвердевания отливки;
- установление закономерностей образования усадочных раковин, макро- и микропористости и остаточных напряжений.

Решение перечисленных выше задач направлено на уменьшение процента брака отливок, а также сокращения сроков отработки технологических процессов литейного производства.

При математическом моделировании процесса получения отливки использовались следующие исходные данные:

- трехмерная геометрическая модель формы;
- конечно-элементная сетка, подготовленная во внешнем генераторе ANSYS;
- теплофизические свойства формы и сплава (определялись на основе базы данных модуля «Сплав» СКМ ЛП «ПолигонСофт»);
- усадочные свойства сплава (определялись на основе базы данных модуля «Сплав» СКМ ЛП «ПолигонСофт»);
- механические свойства сплава [5 - 8];
- начальные и граничные условия (определялись на основе технологической документации процесса получения отливок).

В ходе моделирования процесса получения отливки цилиндра дизеля были получены следующие результаты:

1. Поля скоростей течения при заполнении формы расплавом (файл гидродинамики);
2. Распределение температурных и фазовых полей в процессе остывания отливки (файл температур);
3. Поля микро и макро пористости (файл пористости);
4. Поля интенсивности напряжений, деформации и перемещений (файл деформаций).

Файл гидродинамики формируется в модуле Эйлер и представляет собой визуализацию процесса заполнения формы расплавом с расчетом полей скоростей течения. На рис 2 приведены изображения с частичным и полным заполнением модели отливки цилиндра расплавом.

Результаты, показанные на рис. 1 б являются исходными данными для расчетов температурных и фазовых полей. Из рис. 1 видно, что форма полностью проливается, однако скорость расплава в орехрении близка к 0, что может быть причиной непроливов ребер при конструктивном увеличении длины и уменьшении проходного сечения ребра цилиндра.

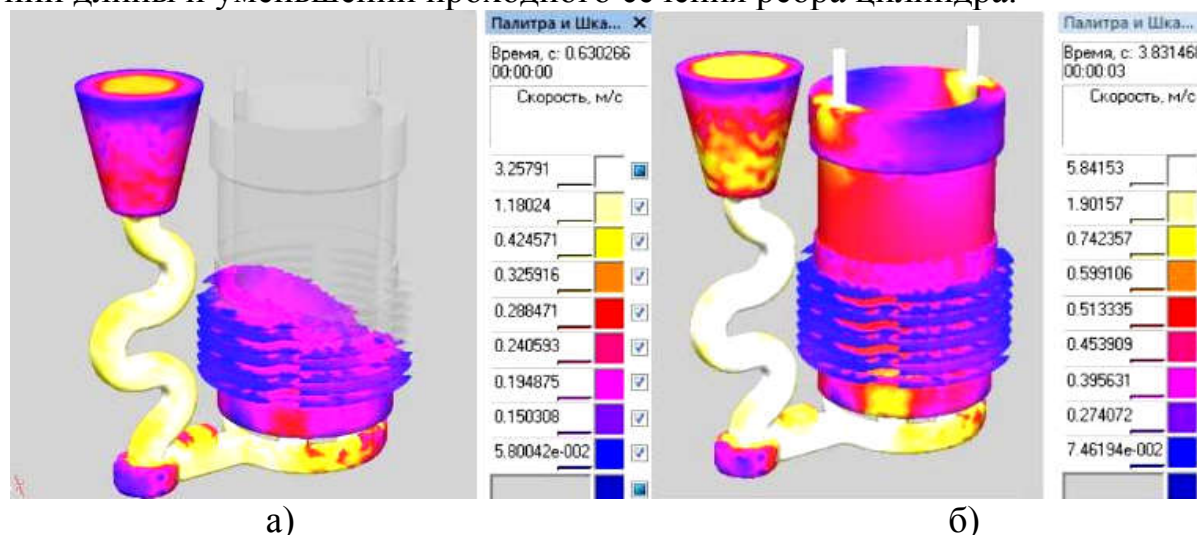


Рис. 1. Визуализация процесса заполнения формы расплавом: а – форма частично заполненная расплавом; б – форма полностью заполненная расплавом.

Сформированный в программе файл пористости демонстрирует образование макро и микро пористости в динамике при остывании отливки, с момента полного заполнения формы расплавом.

Используемые а программе математические модели учитывают появление двух видов усадочных дефектов: первый – макропористость и раковины, второй – микропористость. Каждый из них имеет свой собственный механизма образования [9].

Макропористость образуется при недостатке питания во время усадки при кристаллизации расплава выше зеркала расплава или его условного эквивалента в двухфазной зоне. В математической модели образования макропористости, реализованной в программе СКМ ЛП «ПолигонСофт», решается задача возникновения и движения зеркал расплава. Макропористость может достигать величин 10-30 % и в пределе образует концентрированную раковину (100 % пористости).

Микропористость образуется при недостатке давления ниже зеркала, то есть в области потенциально достаточного питания жидким расплавом. Падение давления в таких зонах с относительно хорошим питания вызван следующими факторами: суммарной объемной усадкой, затрудненным

фильтрационным характером движения жидкой части металла в двухфазной зоне с образовавшимся дендритным каркасом, изоляцией от внешнего давления при формировании твердой фазы на границах приложения давления. Для адекватного расчета распределения давления в математической модели выполняется решение дифференциального уравнения фильтрационного течения. Падение давления ниже некоторого критического значения, создают условия для появления поверхности раздела и формирования микропоры, которая далее будет расти в соответствии с объемной усадкой. Микропористость не может быть много больше величины объемной усадки при затвердевании, которая обычно составляет 3-5 %. На рис. 2 изображены результаты расчета пористости отливки рассматриваемой детали.



а)



б)

в)

г)

Рис. 2. а) – распределение полей пористости (произвольное сечение);
изображение изометрических поверхностей пористости:

б) – 0,2572 %; в) – 0,8543 %; г) – 1,25 %

Температурный расчет и расчет пористости выполняются одновременно. Таким образом, можно сопоставить по времени при какой температуре происходит образование пористости той или иной величины.

Также, были сопоставлены результаты расчета микро и макро пористости с результатами не симметричной разноплотности внутренней структуры чугуна цилиндра, приведенными в работе [9] и полученными в результате томографических исследований внутренней структуры цилиндра.

На рис. 3 приведена рентгенограмма заготовки рассматриваемого цилиндра с протомографированными сечениями 1, 2, 3 [9].

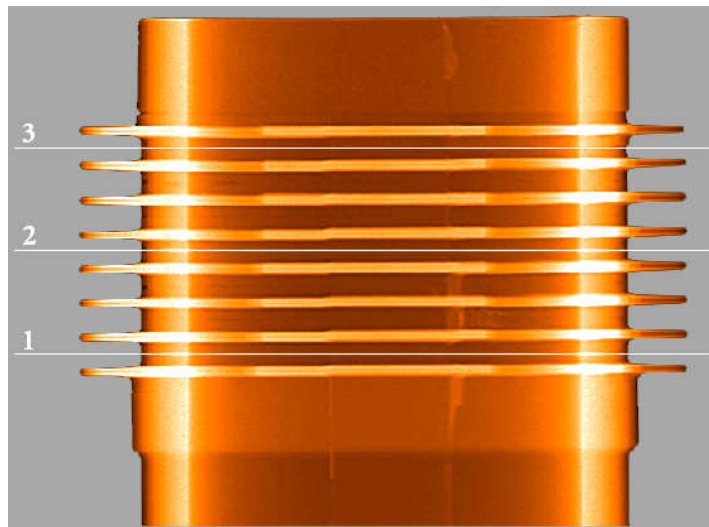


Рис. 3. Рентгенограмма заготовки цилиндра с протомографированными сечениями 1, 2, 3 [9]

Сечение 3 на рентгенограмме и на модели находится в зоне самого высокого давления порядка 80 атмосфер и температур порядка 1300 – 1400 °С. Сечения рентгенограмм представляют собой матрицы плотностей элементарных ячеек трансформированные с помощью специальной программы в уровни серого [9].

Расчетные сечения представляют собой области элементной сетки, трансформированные программой в уровни цветового градиента. Каждому градиенту соответствует процентное соотношение пористости.

Сравнение соответствующих сечений рентгенограмм [9] с результатами расчета пористости приведено на рис. 4.

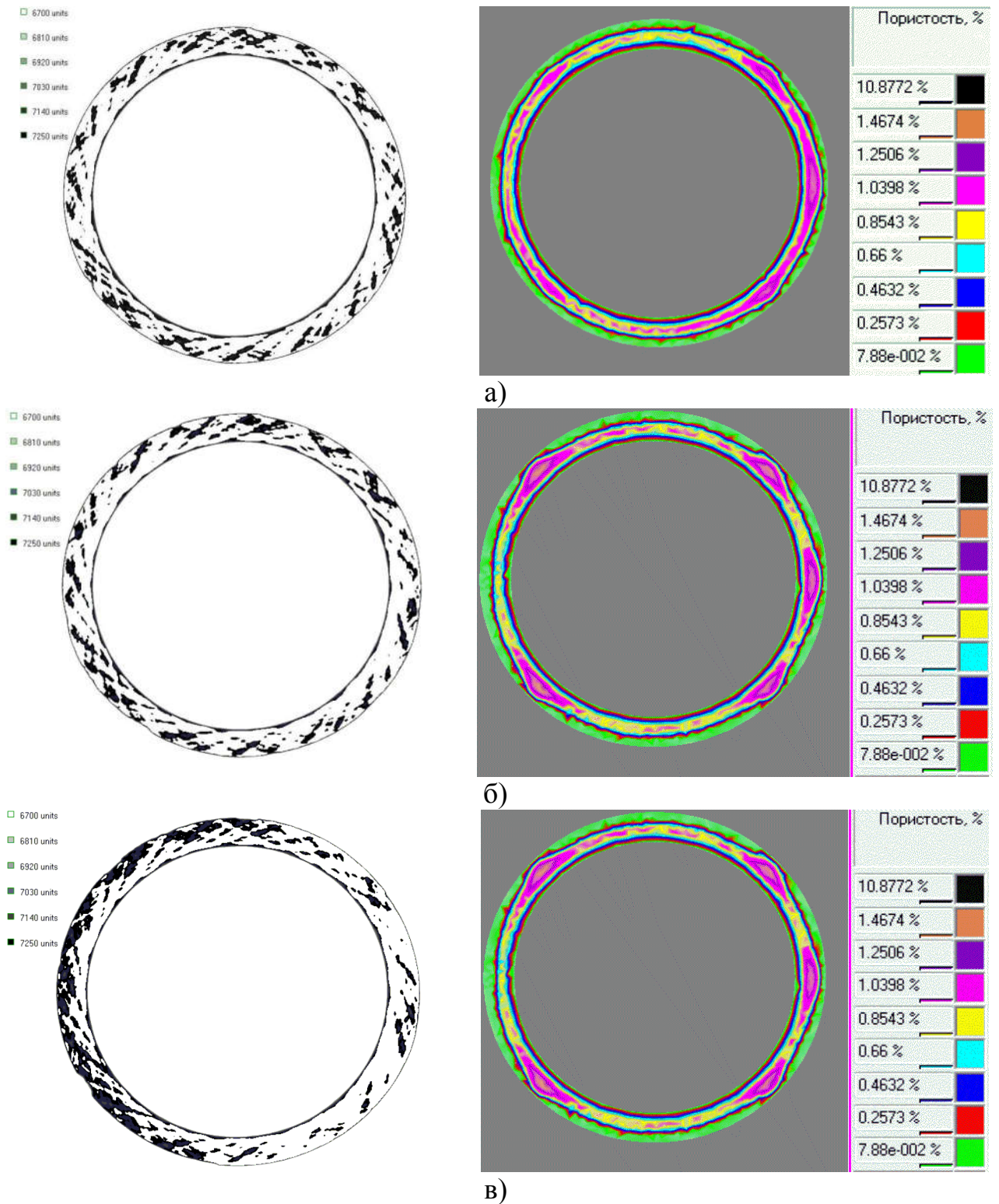


Рис. 4. Сравнение сечений рентгенограмм с результатами расчета пористости:

а) – сечение 1; б) – сечение 2; в) – сечение 3

Результаты, приведенные на рис. 4 показывают, что области малых плотностей предположительно располагаются вдоль характеристик – ли-

ний пластического течения, которые наблюдаются в образцах кольцевых (трубчатых) деталей при пластических деформациях. Такой результат свидетельствует о необходимости поиска механизмов образования областей малой плотности при отливке заготовок цилиндра, связанных с пластическими деформациями при затвердевании.

Файл расчетных деформаций был получен в модуле Гук и демонстрирует поля интенсивности деформаций во времени, поля интенсивности напряжений (см. рис. 5), поля отклонения геометрических размеров. Расчет синхронизирован по времени с тепловым расчетом для сопоставления полей напряжений и пористости в результате остывания отливки.

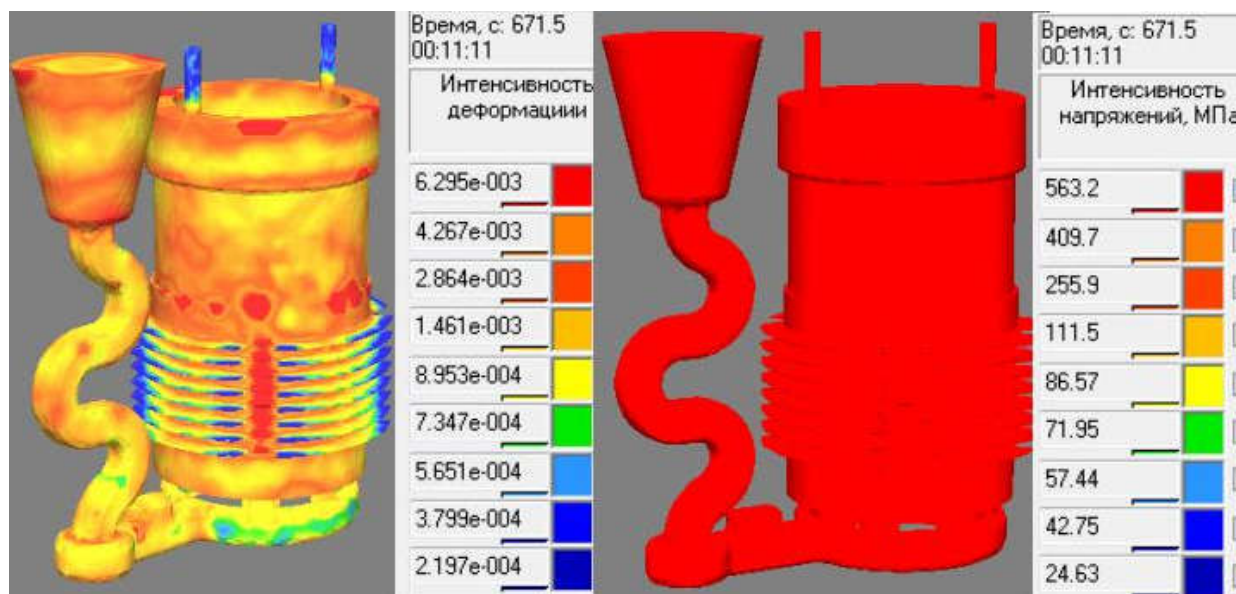


Рис. 5. Результаты расчета интенсивности деформации и сформировавшегося напряжения в отливке

Полученные с помощью программы СКМ ЛП «ПолигонСофт» результаты вычислительных экспериментов являются основой для дальнейших исследований, направленных на уменьшение процента брака отливок, а также сокращения сроков отработки технологических процессов литейного производства цилиндров дизелей.

Список литературы

1. Яманин А.И. Компьютерно-информационные технологии в двигателестроении: учебное пособие / А.И. Яманин [и др.]. М.: Машиностроение, 2005. – 480 с.
2. Хмелев Р.Н. Математическое и программное обеспечение системного подхода к исследованию и расчету поршневых двигателей внутреннего сгорания: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – 229 с.

3. Луканин В.Н., Алексеев И.В., Шатров М.Г. и др. Двигатели внутреннего сгорания. Динамика и Конструирование: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2007. 400 с.: ил.
4. СКМ ЛП ПолигонСофт. [Электронный ресурс] URL: <http://www.poligonsoft.ru/poligonsoft/> (дата обращения 20.01.2020)
5. Металлические материалы: Справочник. Минск: Высш. шк., 1987. – 368 с.
6. Металлы. Методы испытаний на растяжение. ГОСТ 1497-84. Введ. 01.01.86. – М.: Стандартиформ, 2005. – 24 с.
7. Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах. ГОСТ 9651-84. Введ. 01.01.86. – 6 с.
8. МР 1 03-83. Методические рекомендации. Расчёты и испытания на прочность. Экспериментальные методы определения напряженно-деформированного состояния элементов машин и конструкций. Определение макронапряжений рентгеновским методом. - М.: ВНИИНМАШ, 1983. - 48 с.
9. Тихомиров М.Д. Моделирование тепловых и усадочных процессов при затвердевании отливок из высокопрочных алюминиевых сплавов и разработка системы компьютерного анализа литейной технологии: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2005. – 20 с.
10. Дронов Е.А. Применение рентгеновской вычислительной томографии для определения причины заклинивания цилиндра дизельного двигателя / Е.А. Дронов, В.И. Барахов, В.Н. Самочкин // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 12. Ч. 2. – С. 39-46.

Груничев Александр Владимирович, канд. техн. наук, доц., aiah@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Павлов Денис Викторович, аспирант. aiah@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Подъёмщиков Александр Николаевич, канд. техн. наук, доц., aiah@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Хмелев Роман Николаевич, д-р. техн. наук, проф., aiah@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

*THE STUDY OF THE FINAL STAGES OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS
OF PRODUCING CYLINDERS CASTINGS OF DIESEL ENGINES BY THE
METHOD OF CALCULATING EXPERIMENT*

A.V. Grunichev, D.V. Pavlov, A.N. Podyemshikov, R.N. Khmelev

The results of the study of the process of obtaining cast iron casting of air-cooled diesel cylinder are described using mathematical models of the casting process and the forming of defects in the process of crystallization and cooling of the melt in the form using the software complex CSS PoligonSoft.

Key words: diesel cylinder, casting, computational experiment, CSS PoligonSoft.

Grunichev Alexander Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, aiah@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Pavlov Denis Viktorovichs, graduate student, aiah@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Podyemshikov Alexander Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, aiah@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Khmelev Roman Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, aiah@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University.