

**РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ
УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОЙ ГРАНИЦЫ СТЕРЖНЕЙ ПРОКАТНОГО ПРОФИЛЯ**

С. И. Сенашов, А. В. Кондрин

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: sen@sibsau.ru

Разработана информационная система для нахождения упруго-пластической границы стержней прокатного профиля. Стержни такого профиля широко используются в машиностроении и в ракетно-космической отрасли в частности. До недавнего времени не существовало методик, позволяющих определить аналитическим путем упруго-пластическую границу в скручиваемом стержне. А это значит, были необходимы многочисленные эксперименты для определения таких границ для стержней разного профиля и для разных скручивающих моментов. Авторами получены аналитические выражения, позволяющие вычислять упруго-пластические границы для скручиваемых стержней, профиль которых ограничен кусочно-гладкими кривыми. Эти формулы приведены в работе. На основе полученных аналитических выражений написаны программы для ЭВМ, получившие свидетельства о государственной регистрации. На основе этих программ была разработана информационная система, предназначенная для нахождения упруго-пластической границы стержней прокатного профиля. Использование информационной системы позволит сократить время нахождения упруго-пластической границы стержней прокатного профиля, увеличит точность и достоверность результатов и позволит обойтись без использования дорогостоящего экспериментального оборудования.

Информационная система разработана в среде Google App Engine на языке Python. При разработке использована открытая библиотека символьных вычислений SymPy.

Ключевые слова: упруго-пластическое кручение стержня, прокатный профиль, информационная система для нахождения упруго-пластической границы стержней прокатного профиля, Python, GAE.

**DEVELOPMENT OF AN INFORMATION SYSTEM FOR DETERMINATION
OF ELASTIC-PLASTIC BOUNDARY OF RODS OF ROLLED PROFILES**

S. I. Senashov, A. V. Kondrin

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: sen@inbox.ru

An information system for determination of elastic-plastic boundary of rods of rolled profiles was developed. Rods of rolled profiles are widely used in mechanical engineering and in the space industry specifically. There were no analytical methods that allow determining the elastic-plastic boundary of torsion rod until recently. Numerous experiments were necessary to determine the boundaries of the rods for different profiles for different torsional moments. The authors derived analytical expressions allowing to calculate the elastic-plastic boundary of rods of rolled profiles whose profile is limited by piecewise smooth curves. These formulas are given in this article. Computer programs are written based on the derived analytical expressions and the certificates of state registration of software are obtained. An information system for determination of elastic-plastic boundary of rods of rolled profiles was developed based on these computer programs. Use of the information system will reduce the time of the survey; increase the accuracy and reliability of the results. There is no need in expensive equipment for determination of elastic-plastic boundary of rods of rolled profiles due to information system.

An information system for determination of elastic-plastic boundary of rods of rolled profiles on the platform of Google App Engine in Python has been developed. An open library of symbolic computation SymPy was used in the development of information system.

Keywords: an information system for determination of elastic-plastic boundary of rods of rolled profiles, the problem of torsion of a rod, an automated system, rolled profiles, Python, GAE.

Введение. Нахождение упруго-пластической границы в скручиваемых металлических стержнях – важная научная задача. Ее решение, с одной стороны, позволяет более точно определять прочностные характеристики скручиваемого стержня, которые широко используются в различных конструкциях и механизмах. А это, в свою очередь, приводит к облегчению конструкций и повышает их эксплуатационные характеристики. С другой стороны, пластические деформации, которые возникают при скручивании, приводят к упрочнению стержней. Такой процесс широко используется в промышленной обработке элементов конструкций. При этом очень важно, чтобы пластическому деформированию подвергались только близкие к внешней поверхности слои металла и чтобы в процессе деформирования не произошло разрушение упругого изделия и не ухудшились его эксплуатационные характеристики.

Перечисленные проблемы приводят к задаче нахождения упруго-пластической границы скручиваемых стержней [1]. До работ авторов [2–4] не существовало метода, который позволял бы решать эту задачу для стержней прокатного профиля. Использование законов сохранения для решения дифференциальных уравнений пластичности и упругости позволило получить аналитические формулы для нахождения упруго-пластической границы скручиваемых стержней. А это, в свою очередь, привело к созданию информационной системы, которая позволила бы использовать результаты научных исследований в практической работе инженеров-расчетчиков.

В работе [2] предложены формулы для аналитического определения величины касательных напряжений $\tau_{xz} = u$, $\tau_{yz} = v$ во всех внутренних точках стержня для случая кусочно-гладкой ориентированной границы поперечного сечения. Эти формулы выводятся из закона сохранения для уравнений упругости и пластичности и имеют вид

$$u(x_0, y_0) = \frac{1}{\pi} \int_0^T \left(\frac{(f(t) - x_0) \sqrt{(f'(t))^2 + (\varphi'(t))^2}}{\sqrt{(f(t) - x_0)^2 + (\varphi(t) - y_0)^2}} + \right. \\ \left. + a f'(t) \operatorname{arctg} \frac{\varphi(t) - y_0}{f(t) - x_0} \right) dt; \\ v(x_0, y_0) = \frac{1}{\pi} \int_0^T \left(\frac{(\varphi(t) - y_0) \sqrt{(f'(t))^2 + (\varphi'(t))^2}}{\sqrt{(f(t) - x_0)^2 + (\varphi(t) - y_0)^2}} + \right. \\ \left. + \frac{a}{2} f'(t) \ln((f(t) - x_0)^2 + (\varphi(t) - y_0)^2) \right) dt,$$

где $a = -2G\theta$; θ – постоянная; G – модуль упругости при сдвиге; $x = f(t)$, $y = \varphi(t)$ $0 \leq t \leq T$ – уравнение граничного контура.

Точки, в которых выполняется условие $u^2 + v^2 \geq 1$, принадлежат пластической области, а те, в которых это выражение меньше единицы, – упругой.

Разработка информационной системы. Разнообразие видов поперечных сечений стержней и параметра, характеризующего кручение, требует сложных аналитических вычислений для каждого нахождения упруго-пластической границы стержня при кручении.

В [3; 4] авторами написаны программы для ЭВМ, позволяющие находить упруго-пластическую границу для стержней некоторых сечений при кручении.

Использование этих программ для расчетов показало, что непосредственное их применение не совсем удобно и требует дополнительной работы программиста, поэтому на их базе было решено разработать информационную систему для нахождения упруго-пластической границы стержней различных прокатных профилей, наиболее часто встречающихся на практике.

При разработке информационной системы пришлось столкнуться как с проблемами технического характера (выбор языка программирования, написание алгоритмов), так и с приведением формул расчета, выведенных авторами [2], к виду, приемлемому для использования в алгоритмах.

Первые расчеты производились с использованием системы компьютерной алгебры Sage [5; 6] – открытого программного обеспечения, альтернативного системам Magma, Maple, Mathematica и MATLAB.

Символьные вычисления – это преобразования и работа с математическими равенствами и формулами как с последовательностью символов. Они отличаются от численных расчетов, которые оперируют приближенными численными значениями, стоящими за математическими выражениями. Системы компьютерной алгебры могут быть использованы для символьного интегрирования и дифференцирования, подстановки одних выражений в другие, упрощения формул и т. д.

Компьютерная алгебра (в отличие от численных методов) занимается разработкой и реализацией аналитических методов решения математических задач на компьютере и предполагает, что исходные данные, как и результаты решения, сформулированы в аналитическом (символьном) виде.

Выбор был сделан в пользу Sage, так как планировалось, что в будущем будет создаваться информационная система. В системе компьютерной алгебры Sage используется язык программирования Python [7–9], и алгоритмы, написанные для Sage, можно использовать при разработке информационной системы при минимальных изменениях. Помимо этого, был произведен анализ готовых библиотек, предоставляющих возможность использовать символьные вычисления. Была выбрана библиотека SymPy [10; 11], которая представляет собой открытую библиотеку символьных вычислений на языке Python.

Планировалось, что информационная система будет со временем развиваться – возможно добавление новых видов профилей, например с отверстием. Поэтому при создании информационной системы встал выбор, в каком виде создавать информационную систему.

В [12; 13] рассматривается, что в настоящее время активно развивается технология, получившая название облачные вычисления (Cloud Computing). Основная ее идея – предоставить пользователю программные и компьютерные ресурсы как интернет-сервисы, расположив при этом все приложения и их данные, необходимые для работы, на удаленном сервере в Интернете.

Различные модели облачных вычислений представлены на рис. 1. Software as a Service (SaaS) и Platform as a Service (PaaS) предоставляют программные компоненты, остальные – аппаратное обеспечение, серверы, сети и пр. SaaS объединяет так называемые законченные приложения, например, почтовые клиенты, текстовые и табличные редакторы, редакторы презентаций, карты различного назначения, онлайн-вые платежные системы, игры, виртуальные миры, поисковые системы, чаты и др. В отличие от SaaS, предназначенной для конечного пользователя, PaaS предоставляет сервисы разработчикам программного обеспечения.

Типичными примерами сред, представленных на рынке и основанных на концепции облачных вычислений, являются: Amazon AWS, Microsoft Azure, Google App Engine, Stax, 10gen, Google Wave, Force.com и др. Эти среды предназначены для профессиональных разработчиков программного обеспечения, поддерживают один или несколько языков программирования и, в некоторых случаях, специализированную платформу для разработки. Эти среды являются либо универсальными, либо ориентированы на какой-либо тип приложений. Так, универсальная среда Google App Engine поддерживает язык программирования Python и Java. Предлагаемая компанией среда исполнения включает полную реализацию возможностей самого языка Python и большинство функций из стандартной библиотеки языка. Универсальные среды Engineyard.com и Heroku.com. Engineyard, основанные на Amazon EC2 и Amazon S3, поддерживают язык программирования Ruby, Azure Services Platform предоставляет микрософт-ориентированную инфраструктуру и инструменты разработки: в ней изначально присутствует поддержка Windows, NET Framework и среды разработки Visual Studio. Эта среда также поддерживает PHP, MySQL, Ruby, Python, Java, Eclipse и Zend.

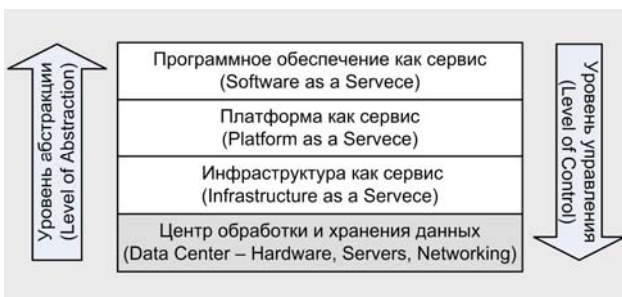


Рис. 1. Модели облачных вычислений [14]

При разработке было решено использовать среду Google App Engine (GAE), так как она предоставляет возможность использовать язык Python и библиотеку SymPy при разработке информационной системы [15]. В связи с тем, что математические расчёты крайне требовательны к аппаратным ресурсам, а у среды GAE есть ограничения для бесплатной версии [16], было решено развернуть GAE на локальном сервере. К примеру, время построения упруго-пластической границы при кручении стержня с сечением вида двутавр составляет около 20 мин на рабочей станции с четырехядерным процессором Intel Core i5 – 3330.

Такое решение позволило максимально упростить доступ к информационной системе – любой человек, имеющий персональный компьютер или даже мобильное устройство, через веб-браузер получает доступ к информационной системе.

ПОСТРОЕНИЕ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОЙ ГРАНИЦЫ

ВЫБЕРИТЕ ВИД СЕЧЕНИЯ СТЕРЖНЯ

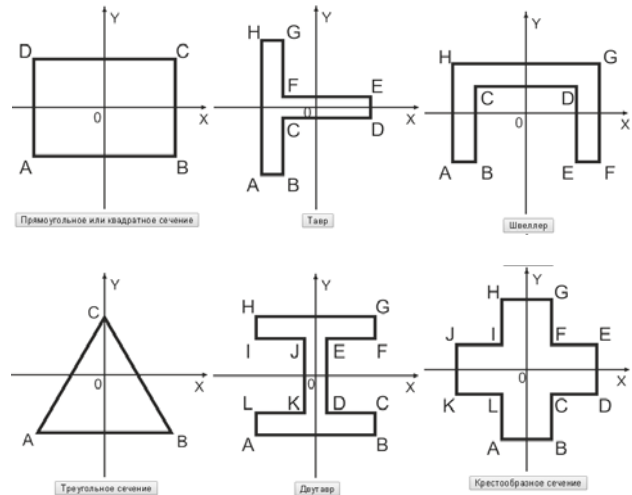


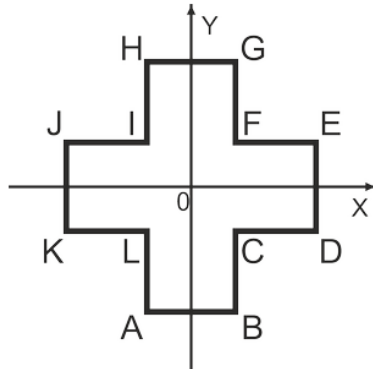
Рис. 2. Начальный интерфейс автоматизированной системы научных исследований по нахождению упруго-пластической границы стержней различных сечений

На рис. 2 представлен начальный интерфейс информационной системы для нахождения упруго-пластической границы стержней различных сечений. На рис. 3 представлен интерфейс задания границы стержня крестообразного сечения. На рис. 4 представлена расчетная задача для стержня прямоугольного сечения при $a = -1,6$. На рис. 5 представлена расчетная задача для стержня с треугольным сечением при $a = -4,2$. На рис. 6 представлена расчетная задача для стержня крестообразного сечения при $a = -0,5$. На рис. 7 представлен интерфейс задания границы для стержня с сечением вида тавр при $a = -0,7$. На рис. 8 представлена расчетная задача для стержня с сечением вида двутавр при $a = -1,4$. На рис. 9 представлена расчетная задача для стержня с сечением вида швеллер при $a = -0,5$. Звездами выделена пластическая область, круглыми точками – упругая область.

Примечание. При работе программы пластическая область выделяется красным, а упругая – синими точками.

Заключение. Приведенная в работе информационная система является полезным инструментом при экспериментальном определении упруго-пластических границ, поскольку из-за различных вкраплений и дефектов ее очень трудно определить визуально даже при наличии большого опыта проведения такого рода экспериментов. Работа в этом направлении еще не закончена. Следующим шагом будет информационная система, которая позволит определять упруго-пластические границы для стержней, сечение которых не является одноосевым.

ПОСТРОЕНИЕ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОЙ ГРАНИЦЫ ДЛЯ СТЕРЖНЯ КРЕСТООБРАЗНОГО СЕЧЕНИЯ



[Пример1](#) [Пример2](#) [Пример3](#) [Пример4](#) Центр тяжести фигуры должен располагаться в точке (0,0).

Введите координаты точек A, B, C, D, E, F, G, H как на рисунке выше.

Время расчета может занимать длительное время. Время расчета каждого из приведенных примеров около 14 минут.

A (,) B (,) C (,) D (,) E (,) F (,)
G (,) H (,) I (,) J (,) K (,) L (,)

Введите параметр характеризующий кручение, меньше 0

Красные точки соответствуют пластической области, синие – упругой области.

Рис. 3. Интерфейс задания границы

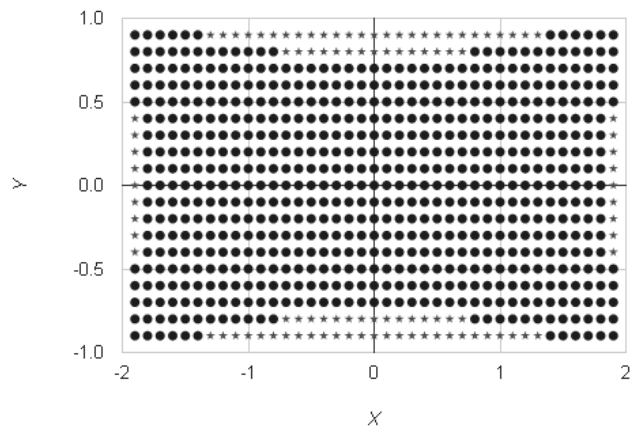


Рис. 4. Упруго-пластические границы стержня с прямоугольным сечением

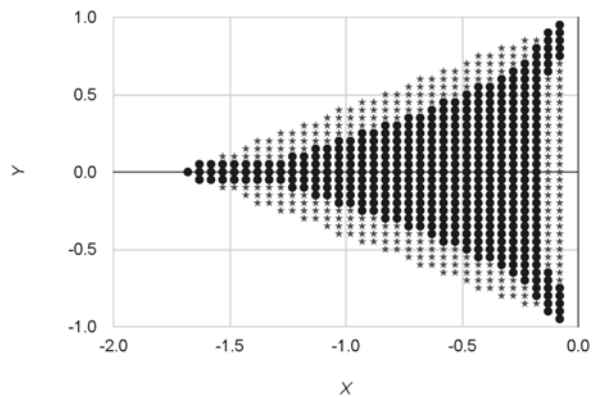


Рис. 5. Упруго-пластические границы стержня с треугольным сечением

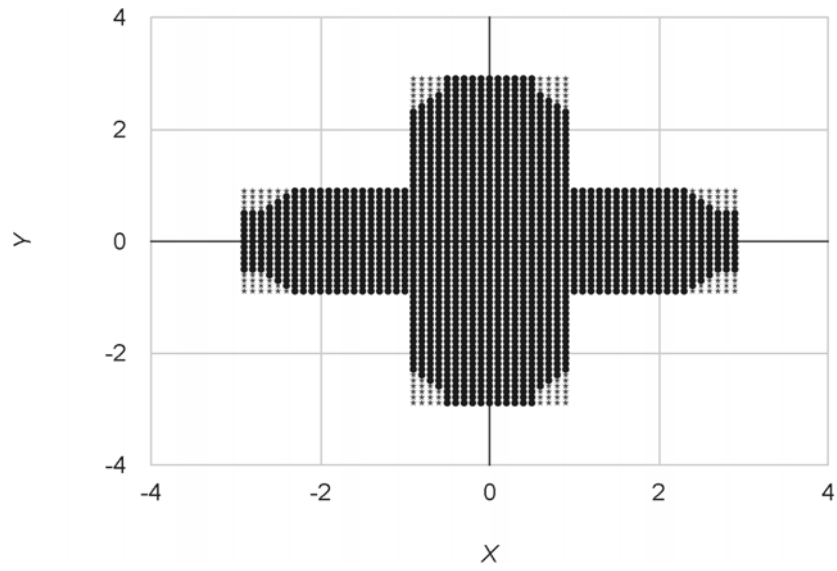


Рис. 6. Упруго-пластические границы стержня крестообразного сечения

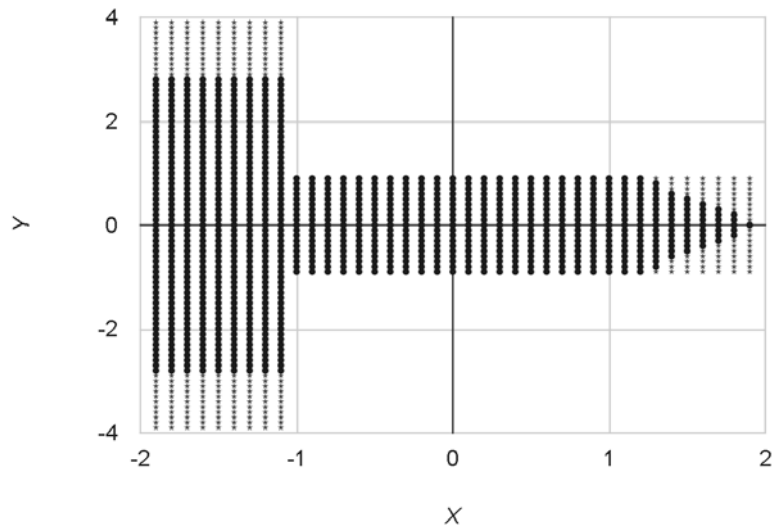


Рис. 7. Упруго-пластические границы стержня с сечением вида тавр

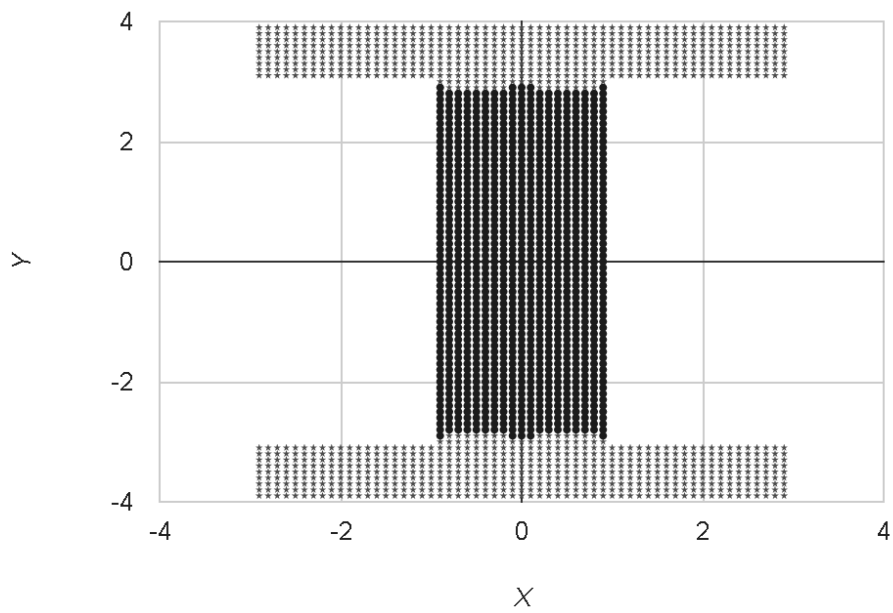


Рис. 8. Упруго-пластические границы стержня с сечением вида двутавр

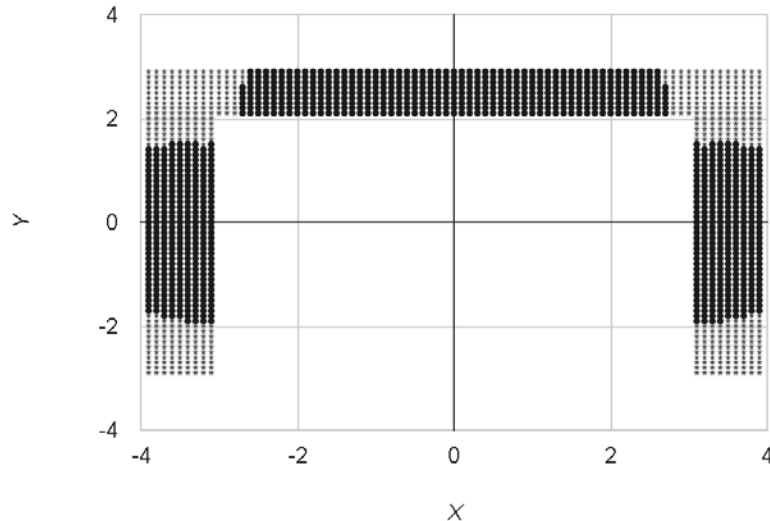


Рис. 9. Упруго-пластические границы стержня с сечением вида швеллер

Благодарности. Работа поддержана Министерством образования и науки РФ № Б -180-14.

Acknowledgments. This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation № Б -180-14.

Библиографические ссылки

1. Аннин Б. Д., Черепанов Г. П. Упруго-пластическая задача. Новосибирск : Наука, 1983. 239 с.

2. Сенашов С. И., Черепанова О. Н., Кондрин А. В. Об упругопластическом кручении стержня // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 3 (49). С. 100–103.

3. Расчет напряженного состояния во внутренних точках упруго-пластического стержня постоянного сечения : а. с. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013618484 / А. В. Кондрин, С. И. Сенашов, Е. В. Филюшина, О. Н. Черепанова. Дата рег. 10.09.2013.

4. Построение упруго-пластической границы, возникающей при кручении прямолинейного стержня с сечением прямоугольной формы : а. с. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013618484 / А. В. Кондрин, С. И. Сенашов, Е. В. Филюшина, О. Н. Черепанова, А. Н. Яхно. Дата рег. 25.06.2014.

5. Система компьютерной алгебры Sage [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sagemath.org/> (дата обращения: 01.11.2014).

6. Eröcal B., Stein W. The sage project: unifying free mathematical software to create a viable alternative to magma, maple, mathematica and MATLAB // Mathematical Software—ICMS 2010. Springer Berlin Heidelberg, 2010. P. 12–27.

7. Millman K. J., Aivazis M. Python for scientists and engineers // Computing in Science & Engineering. 2011. Vol. 13, Iss. 2. P. 9–12.

8. Perez F., Granger B. E., Hunter J. D. Python: an ecosystem for scientific computing // Computing in Science & Engineering. 2011. Vol. 13, Iss. 2. P. 13–21.

9. Python in Computational Science: Applications and Possibilities / M. G. Rashed et al. // International

Journal of Computer Applications. 2012. Vol. 46, Iss. 20. P. 26–30.

10. Документация библиотеки SymPy [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.sympy.org/latest/index.html> (дата обращения: 01.11.2014).

11. Open source computer algebra systems: SymPy / D. Joyner et al. // ACM Communications in Computer Algebra. 2012. Vol. 45, Iss. 3/4. P. 225–234.

12. Облачная платформа для разработки и управления интеллектуальными системами / В. В. Грибова [и др.] // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем (OSTIS-2011) : Междунар. науч.-техн. конференция. Минск : БГУИР, 2011. С. 5–14.

13. Cusumano M. Cloud computing and SaaS as new computing platforms // Communications of the ACM. 2010. Vol. 4, Iss. 53. P. 27–29.

14. Meier J. D. Software as a Service, Platform as a Service, and Infrastructure as a Service [Электронный ресурс]. URL: <http://blogs.msdn.com/jmeier/archive/2010/02/11/software-as-a-service-saas-platform-as-a-service-paas-and-infrastructure-as-a-service-iaas.aspx> (дата обращения: 01.11.2014).

15. Zahariev A. Google app engine // Helsinki University of Technology. 2009.

16. How to use Google App engine for free computing / M. Malawski et al. // Internet Computing, IEEE. 2013. Vol. 17, Iss. 1. P. 50–59.

References

1. Annin B. D., Cherepanov G. P. *Uprugo-plasticheskaya zadacha*. [The elastic-plastic problem.]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983, 239 p.

2. Senashov S. I., Cherepanova O. N., Kondrin A. V. [On elastoplastic torsion rod]. *Vestnik SibGAU*, 2013, No. 3 (49), P. 100–103 (In Russ).

3. Kondrin A. V., Senashov S. I., Filyushina Ye. V., Cherepanova O. N. *A. s. o gos. registratsii programmy dlya EVM № 2013618484 "Raschet napryazhennogo*

sostoyaniya vo vnutrennikh tochkakh uprugoplasticheskogo sterzhnya postoyannogo secheniya” [A. p. of state. registration of the computer No. 2013618484 “Calculation of the stress state in the interior of elastic-plastic rod of constant cross section”]. 10.09.2013.

4. Kondrin A. V., Senashov S. I., Filyushina Ye. V., Cherepanova O. N., Yakhno A. N. *A. s. o gos. registratsii programmy dlya EVM № 2013618484 “Postroenie uprugoplasticheskoi granitsy, voznikayushchei pri kruchenii pryamolineinogo sterzhnya s secheniem pryamougol'noi formy”* [A. p. of state. registration of the computer number 2013618484 “Building the elastic-plastic boundary problems arising torsional straight rod with a cross section of rectangular shape”]. 25.06.2014.

5. *Sistema komp'yuternoi algebrы Sage* [Sage Mathematics Software]. Available at: <http://www.sagemath.org/> (accessed 01.11.2014).

6. Eröcal B., Stein W. The sage project: unifying free mathematical software to create a viable alternative to magma, maple, mathematica and MATLAB. *Mathematical Software—ICMS 2010*. Springer Berlin Heidelberg, 2010, P. 12–27.

7. Millman K. J., Aivazis M. Python for scientists and engineers. *Computing in Science & Engineering*, 2011, Vol. 13, Iss. 2, P. 9–12.

8. Perez F., Granger B. E., Hunter J. D. Python: an ecosystem for scientific computing. *Computing in Science & Engineering*, 2011, Vol. 13, Iss. 2, P. 13–21.

9. Rashed M. G. et al. Python in Computational Science: Applications and Possibilities *International Journal of Computer Applications*, 2012, Vol. 46, Iss. 20, P. 26–30.

10. *Dokumentatsiya biblioteki SymPy*. [Documentation of a Python library for symbolic mathematics SymPy]. Available at: <http://docs.sympy.org/latest/index.html> (accessed 01.11.2014).

11. Joyner D. et al. Open source computer algebra systems: SymPy. *ACM Communications in Computer Algebra*, 2012, Vol. 45, Iss. 3/4, P. 225–234.

12. Gribova V. V. et al. [Cloud platform for the development and management of intelligent systems] *Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya “Otkrytye semanticheskie tekhnologii proektirovaniya intellektual'nykh sistem” (OSTIS-2011)*. [International Scientific Conference “Open semantic technologies for designing intelligent systems” (OSTIS-2011)]. Minsk, BGUIR, 2011, P. 5–14 (In Russ.).

13. Cusumano M. Cloud computing and SaaS as new computing platforms. *Communications of the ACM*. 2010. Vol. 4, Iss. 53. P. 27–29.

14. Meier J. D. Software as a Service, Platform as a Service, and Infrastructure as a Service. Available at: <http://blogs.msdn.com/jmeier/archive/2010/02/11/software-as-a-service-saas-platform-as-a-service-paas-and-infrastructure-as-a-service-iaas.aspx> (accessed 01.11.2014).

15. Zahariev A. Google app engine. *Helsinki University of Technology*. 2009.

16. Malawski M. et al. How to use Google App engine for free computing. *Internet Computing, IEEE*. 2013, Vol. 17, Iss. 1, P. 50–59.