

УДК 517.962.26

А.А. Матолыгин, А.Д. Истомин, М.Д. Носков, А.А. Чеглоков

## Программный комплекс для моделирования процесса прессования изделий из порошков

Представлен программный комплекс, предназначенный для моделирования процесса прессования изделий из порошковых материалов. Комплекс состоит из модулей подготовки данных, расчета, визуализации и хранилища данных. Программный комплекс позволяет рассчитывать напряженно-деформированное состояние прессовки при формовании. В статье описывается методика использования программного комплекса для оптимизации процесса компактирования изделий из порошковых материалов.

**Ключевые слова:** программный комплекс, математическое моделирование, методы механики сплошной среды, прессование, порошки.

doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-1-90-95

### Задача прессования изделий из порошковых материалов

Прессование – важнейший метод формования изделий из порошковых и волокнистых материалов. Под прессованием обычно подразумевается прямое или компрессионное прессование, когда загрузка материала, его формование в изделие осуществляются непосредственно в полости пресс-формы [1]. Геометрия пресс-формы и пуансонов может варьировать в значительных пределах, что позволяет получать готовые изделия либо заготовки, требующие минимума дополнительных операций обработки до готового изделия. Как правило, пресс-формы имеют осевую симметрию (рис. 1).

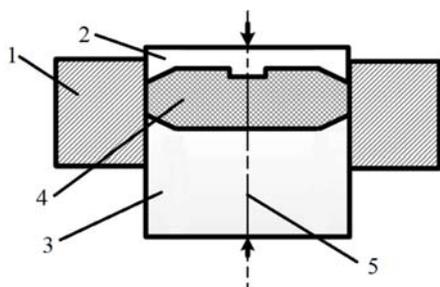


Рис. 1. Схема прессования: 1 – пресс-форма; 2 – верхний пуансон; 3 – нижний пуансон; 4 – пресс-порошок; 5 – ось симметрии

Качество получаемых прессовок определяется множеством параметров, таких как количество подвижных пуансонов; трибологические свойства пресс-инструмента; свойства, состав и структура пресс-порошков; параметры движения пуансонов; производительность пресс-машин и др. В прессовании, для улучшения свойств прессуемого тела, участвуют два пуансона – верхний и нижний (см. рис. 1) [1]. Для оптимизации описанных технологических параметров прессования технолог может применять различные методики – как экспериментальные, так и теоретические. С точки зрения затрат на проведение оптимизации технологических параметров прессования целесообразно применять математическое моделирование. Для моделирования процесса прессования

применяются модели разного рода, например: эмпирические модели прессования [2], статистические [3], контактные [4]. Наиболее перспективным подходом к моделированию прессования является описание порошкового тела как сплошной среды с некоторыми эффективными характеристиками [5–7].

Моделирование процессов прессования можно проводить с помощью универсальных программных комплексов, предназначенных для решения инженерных задач, например ANSYS [8], ABAQUS [9] и др. Использование универсальных комплексов предполагает высокий уровень подготовки пользователя и требует значительных затрат на подготовку исходных данных и настройку модели. Таким образом, актуальной задачей является создание программного обеспечения, позволяющего проводить компьютерное моделирование процесса прессования порошковых материалов. Программное обеспечение должно обеспечить минимальные требования к квалификации пользователя, уменьшить затраты на подготовку исходных и расчетных данных. В работе представлены математическая модель и разработанное на ее основе оригинальное программное обеспечение для моделирования процесса прессования керамических порошков.

### Формулировка модели

Модель прессования основана на фундаментальных законах сохранения массы, импульса и энергии в рамках механики деформируемого твердого тела [5–7]. Процесс прессования рассматривается как квазистатический, поскольку скорость деформирования прессовки не превышает  $10^{-1} \text{ с}^{-1}$ , что значительно ниже скоростей распространения упругих волн. Деформация  $\varepsilon$  элементарного объема складывается из двух частей: упругой  $\varepsilon^e$  и пластической  $\varepsilon^p$ . Закон сохранения массы имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV = 0, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность прессовки;  $V$  – объем прессовки.

Закон сохранения импульса в квазистатической постановке имеет вид

$$\int_V \sum_j \left( \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x^j} - \sum_k \Gamma_{ij}^k \sigma_{ik} \right) dV = 0, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – тензор напряжений;  $x^j$  – координаты;  $\Gamma_{ij}^k$  – символы Кристоффеля.

Закон сохранения энергии записывается в следующей форме:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \Pi dV = \int_S \sum_{ij} \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial t} \sigma_{ji} dS, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_{ij}$  – тензор деформаций;  $n$  – нормаль к внешней поверхности;  $\Pi$  – удельная внутренняя энергия системы;  $S$  – площадь поверхности прессовки;  $t$  – время.

В качестве замыкающих уравнений в модели используются следующие соотношения. Связь компонент тензора напряжений  $\sigma_{ij}$  с компонентами тензора деформаций  $\varepsilon_{ij}$  в прессовке описывается законом Гука в виде

$$\sigma_{ij} = 2G(\rho) \left( \varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^p \right) + \delta_{ij} \Lambda(\rho) (\theta - \theta^p), \quad (4)$$

где  $\theta = \sum \varepsilon_{ii}$  – дилатансия, описывающая объемные деформации;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $G(\rho) = E(\rho) / 2(1 + \mu(\rho))$ ,  $\Lambda(\rho) = \mu(\rho) E(\rho) / (1 + \mu(\rho))(1 - 2\mu(\rho))$  – коэффициенты Ламэ ( $\mu(\rho)$  – коэффициент Пуассона;  $E(\rho)$  – модуль упругости). Все механические характеристики пресс-порошка являются функциями плотности.

Для описания перехода упругого деформирования в пластическое необходимо сформулировать критерий этого перехода. К текущему моменту большинство материальных моделей, описывающих такой переход, основаны на модели, предложенной в работе Друкера [10], которая определяла особенности деформирования пористых грунтов. На основе данной работы различными авторами предложен ряд аналогичных критериев [6, 11–14]. Критерии описывают новые модели, описывающие особенности деформирования различных пористых материалов, например: неслипающихся порошков [6], конгломератов порошков [11], металлических слипающихся порошков [12], слипающихся порошков [13], фармацевтических таблеток [14]. В настоящей работе в качестве критерия текучести используется несимметричная поверхность течения следующего вида [11]:

$$F(\sigma, \rho) = \left( A(1 - \rho)^m I_1 \right)^2 + J_2 - \rho^{2n} \sigma_{ef} = 0, \quad (5)$$

где  $I_1 = 3P = \sum \sigma_{ii}$  – первый инвариант тензора напряжений ( $P$  – шаровая часть тензора напряжений), который отвечает за объемные механизмы деформирования;  $J_2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 S_{ij} S_{ij}$  – второй инвариант тензора девиатора напряжений, отвечающий за сдвиговые механизмы деформирования;  $S_{ij} = \sigma_{ij} - P \delta_{ij}$  – девиаторная часть тензора напряжений;  $A, m, n, \sigma_{ef}$  –

константы, характеризующие пластические свойства материала.

Начальные условия для моделирования соответствуют случаю, когда пресс-порошок свободно насыпан в пресс-форму. При этом прессуемое тело не содержит напряжений ( $\sigma = 0$ ) и деформаций ( $\varepsilon = 0$ ). Насыпная плотность прессовки предполагается одинаковой по всему объему прессовки  $\rho = \rho_0$ .

Граничные условия на стенках матрицы пресс-формы соответствуют нулевым значениям нормальных к поверхности компонент вектора перемещений. На границах поверхности пуансонов задаются значения перемещений на каждом шаге нагружения, согласно параметрам движения пуансонов. Кроме этого, на границах вычисляются поверхностные силы, возникающие вследствие трения прессовки о пресс-форму и пуансоны. Вектор удельной поверхностной силы трения  $\vec{f}_\tau$  определяется нормальной  $\vec{\sigma}_n$  и тангенциальной  $\vec{\sigma}_\tau$  компонентами вектора напряжения, действующего на поверхности контактирующих тел, по примеру [13]:

$$\vec{f}_\tau = \begin{cases} -\chi \left| \frac{\vec{\sigma}_n \cdot \vec{\sigma}_\tau}{|\vec{\sigma}_\tau|} \right|, & \chi |\vec{\sigma}_n| \leq |\vec{\sigma}_\tau|, \\ \vec{\sigma}_\tau, & \chi |\vec{\sigma}_n| > |\vec{\sigma}_\tau|, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\chi$  – коэффициент трения.

Поскольку описываемая пресс-форма обладает осевой симметрией, целесообразно использовать для описания цилиндрическую систему координат (оси  $r, \varphi, z$ ). В такой системе координат все переменные и величины, характеризующие свойства прессовки, не зависят от координаты  $\varphi$ . Соответственно систему уравнений (1)–(6) можно рассматривать в двумерной постановке.

Для решения системы уравнений (1)–(6) используется метод конечных элементов. Для линеаризации уравнений применяется итерационный метод переменной жесткости [16, 17]. Получающаяся система линейных алгебраических уравнений решается методом бисопряженных градиентов (BiCGStab). Предобуславливатель матрицы строится в результате неполного LU-разложения с контролем заполнения (ILU(3)) [18].

Адекватность модели проверялась путём сравнения результатов численных расчетов с аналитическими решениями и экспериментальными данными по прессованию керамических порошков. Полученные результаты позволяют сделать вывод об адекватности модели и корректности используемых методов расчета.

#### Описание программного комплекса

Разработанный проблемно-ориентированный программный комплекс позволяет проводить моделирование процесса прессования осесимметричных изделий из порошковых материалов. Программный комплекс создан в интегрированной среде программирования Embarcadero C++Builder XE7 и предназначен для работы на персональном компьютере под управлением операционной системы MS Windows. Программный комплекс состоит из модулей: подго-

товки данных, расчета, визуализации и хранилища данных. Схема модулей программного комплекса и их связей представлена на рис. 2. Исходные данные

и результаты моделирования сохраняются в хранилище данных в виде структурированной системы файлов.

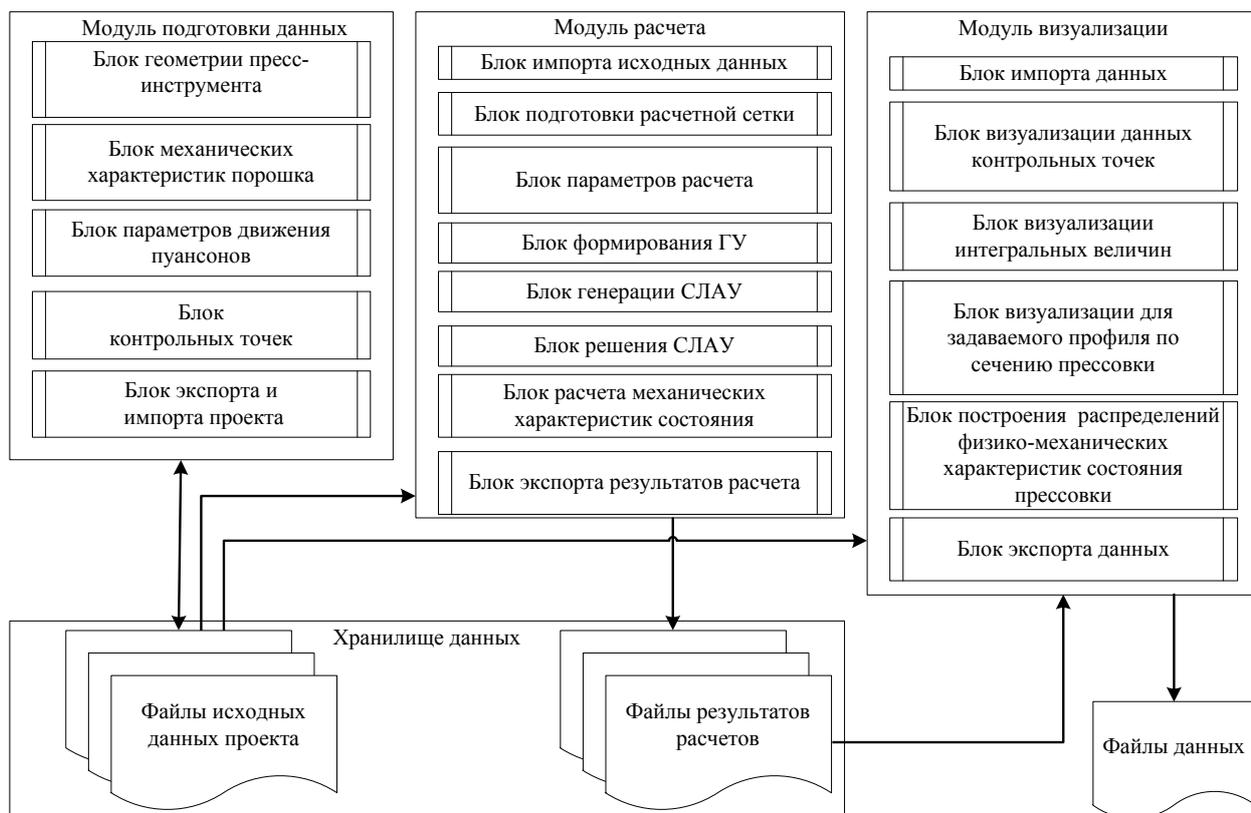


Рис. 2. Схема программного комплекса

Модуль подготовки исходных данных предоставляет пользователю возможности инициализации, редактирования и сохранения исходных данных для расчета. В модуле предусмотрены отдельные блоки для генерации исходных данных моделирования. В блоке геометрии пресс-инструмента задаются значения исходных геометрических размеров пресс-инструмента. Блок механических характеристик порошка позволяет задавать функции, описывающие зависимости физических свойств (модуль Юнга, коэффициент Пуассона, коэффициент трения) от плотности прессовки. Функции представляют собой кусочно-линейные зависимости, которые изображаются в виде таблицы узловых значений и графика. Пользователю предоставляется возможность редактирования функции.

Блок параметров движения пуансонов обладает интерактивными инструментами для задания местоположения пуансонов в различные моменты времени процесса прессования. Для исследования изменения физических характеристик состояния прессовки в каких-либо интересующих пользователя точках в модуле предусмотрен блок ввода контрольных точек. Пользователь имеет возможность задать местоположение точки в сечении прессовки и ее идентификатор. Для каждой из контрольных точек при расчете записываются все данные физических характеристик состояния прессовки. Положение

точки фиксируется для расчетной сетки. Блок экспорта и импорта проектов предназначен для записи исходных данных расчета и чтения данных проекта для редактирования.

Основным модулем представленного комплекса является модуль расчета. Модуль разработан на основе математической модели процесса деформирования порошковых материалов и предназначен для моделирования процесса прессования. Модуль состоит из блоков: импорта исходных данных, параметров расчета, формирования граничных условий, генерации системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), решения системы линейных алгебраических уравнений, экспорта результатов расчета.

Блок импорта исходных данных инициализирует данные для модели на основе информации, хранящейся в файле проекта. На основе этих данных блок подготовки расчетной сетки строит триангуляционную сетку с соответствующими сгущениями сетки в заданных областях. Блок параметров расчета предоставляет пользователю возможность задания следующих значений: продолжительность моделируемого процесса прессования, количество записываемых значений во временных сериях, временной шаг записи результатов расчетов. Блок формирования граничных условий пересчитывает граничные условия для текущего временного слоя. Блок генерации СЛАУ строит глобальную матрицу жесткости

для текущего временного слоя с пересчитанными свойствами и производит ее коррекцию в соответствии с текущими граничными условиями. Блок решения СЛАУ находит решение для построенной системы уравнений с заданными граничными условиями либо генерирует сообщение о невозможности решения. Блок экспорта результатов формирует файлы с результатами расчетов.

Модуль визуализации предназначен для графического представления результатов моделирования (рис. 3). Модуль состоит из блоков импорта и экспорта данных, а также блоков визуализации данных контрольных точек, интегральных величин по профилю, распределений физико-механических характеристик данных. Блок импорта данных предназначен для считывания необходимых данных из файлов хранилища данных.

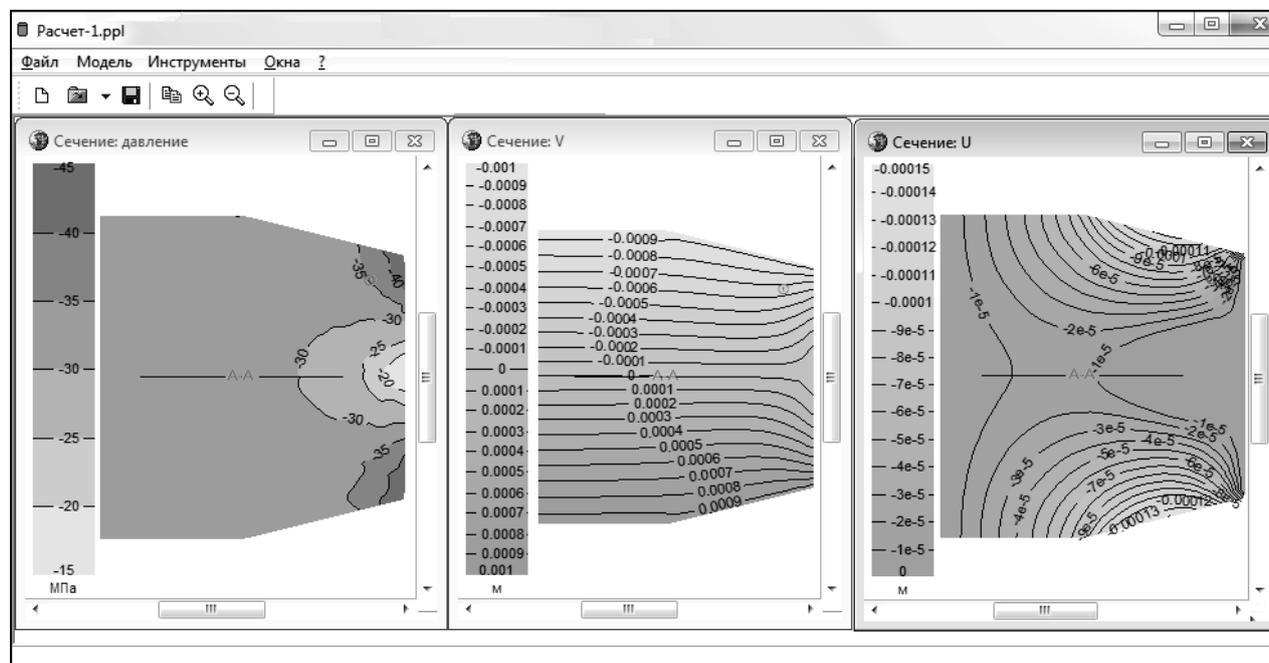


Рис. 3. Модуль визуализации расчетных данных

В качестве исходных данных для визуализации используются данные проекта и расчета для выбранного проекта. Блок визуализации контрольных точек предоставляет пользователю возможность построения временных зависимостей физико-механических характеристик для заданных в проекте контрольных точек. Блок визуализации интегральных величин позволяет пользователю построить временные зависимости для следующих интегральных величин, характеризующих процесс прессования: общая деформация прессовки, усилие на верхнем и нижнем пуансонах, давление на верхнем и нижнем пуансонах, средняя плотность прессовки по геометрии образца. Блок визуализации для задаваемого профиля по сечению прессовки предоставляет пользователю диалоги для построения профиля. Профиль представляет собой отрезок произвольной длины, расположенный в произвольном месте сечения и имеющий произвольную ориентацию. Для построенного профиля пользователь может построить пространственные зависимости физико-механических характеристик состояния прессовки. Следующий блок позволяет построить распределение по сечению физико-механических характеристик состояния прессовки в виде изолиний и заливки различных цветов для различных уровней значений величины. Блок экспорта данных, по требованию, имеет возможность сгенерировать файлы в тексто-

вом формате со значениями характеристики, которую определит пользователь. Блок также позволяет записать на диск битовый образ графического материала. В блоке предусмотрена возможность формирования отчета в виде документа MS Office Word с характерными значениями и графическим материалом результатов расчетов.

#### Методика моделирования процесса прессования

Решение задачи моделирования технологического процесса прессования с помощью представленного программного комплекса осуществляется путем циклического выполнения четырех этапов.

На первом этапе в модуле подготовки данных создается файл проекта. В проекте задаются геометрические размеры прессовки и исходные значения физических характеристик, отвечающих началу процесса прессования. Задаются функции физических характеристик и параметры движения пуансонов.

На втором этапе строится конечно-элементная модель прессовки на основе файла проекта, который извлекается из хранилища данных, и задаются начальные характеристики для элементов в соответствии с исходными данными. Определяются параметры расчета: длительность моделируемого процесса, количество сохраняемых точек для временных серий и т.д.

На третьем этапе расчета проводятся следующие процедуры. Исходя из текущего временного слоя генерируются граничные условия для сеточных функций. Формируется система линейных алгебраических уравнений в соответствии с физико-механическими характеристиками прессовки и конфигурации конечно-элементной модели прессовки для заданного временного слоя. На основе определенных граничных условий и особенностей геометрии пресс-инструмента производится корректировка СЛАУ. Как указано выше, блок решения СЛАУ использует итерационные методы решения для разреженных СЛАУ. В случае сходимости решения системы уравнений вычисляются текущие физические характеристики состояния прессовки для текущего временного слоя. При необходимости в соответствии с параметрами расчета, задаваемыми пользователем, полученные физические характеристики состояния прессовки записываются в файл результатов и помещаются в хранилище данных. На четвертом этапе с помощью модуля визуализации пользователь для проведения анализа результатов моделирования строит соответствующие графики и распределения механических величин.

#### **Методика решения задачи оптимизации технологического процесса**

Результаты многовариантных численных экспериментов по прессованию позволяют провести анализ напряженно-деформированного состояния прессовки к моменту окончания формования. Результаты моделирования позволяют оценить неоднородность распределения плотности по объему прессовки как на качественном, так и количественном уровнях. Данная характеристика во многом определяет качество компакта, его последующую механическую прочность и пригодность для последующих технологических операций обработки спрессованного изделия. Анализ распределения напряженного состояния прессовки позволяет оценить уровень остаточных напряжений, также влияющих на целостность компакта.

Методика решения задачи оптимизации сводится к анализу результатов многовариантных численных экспериментов. Исследователь имеет возможность подбора значений следующих характеристик: начальная насыпная плотность, коэффициенты трения, механические свойства порошка. Начальная насыпная плотность в натуральных экспериментах может варьироваться за счет предварительного подпрессовывания либо других процедур увеличения значения насыпной плотности. Уменьшение коэффициента трения инструмента может достигаться за счет уменьшения шероховатости поверхности. Изменение значений коэффициента трения порошка может быть достигнуто добавлением в порошок пластификаторов, например стеаратов [1]. На механические характеристики порошка влияют технологии его подготовки. Исследователь, корректируя исходные данные, может с помощью комплекса определить желательное состояние к моменту окончания прессования.

#### **Заключение**

Разработанный программный комплекс позволяет моделировать процесс прессования из порошковых материалов. С помощью численного моделирования могут быть получены распределения основных характеристик напряженно-деформированного состояния прессовки. Многовариантные численные эксперименты по моделированию процесса прессования позволят найти оптимальные режимы прессования за счет определения программы прессования и желательные физические параметры прессуемых порошков и материалов пресс-инструмента.

#### *Литература*

1. Бальшин М.Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. – М.: Металлургия, 1972. – 336 с.
2. Басов В.В. Исследование влияния агрегатов, присутствующих в пресс-порошке  $UO_2$ , на процессы прессования и спекания топливных таблеток / В.В. Басов, В.С. Панов, Л.В. Мякишева // Изв. высш. учеб. завед. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2011. – № 4. – С. 13–15.
3. Винокуров Г.Г. Статистическое моделирование корреляции локальной плотности макроструктуры при одностороннем прессовании порошковых материалов / Г.Г. Винокуров, О.Н. Попов // Изв. Самар. науч. центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13, № 1(3). – С. 553–556.
4. Болтачев Г.Ш. Моделирование процесса компактирования нанопорошков в рамках гранулярной динамики / Г.Ш. Болтачев, Н.Б. Волков // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81, вып. 7. – С. 18–29.
5. Khoei A.R. An endochronic plasticity model for finite strain deformation of powder forming processes / A.R. Khoei, A. Bakhshiani, M. Mofid // Finite Elements in Analysis and Design. – 2003. – Vol. 40. – P. 187–211.
6. Ortiz M. A variational Cam-Clay theory for plasticity / M. Ortiz, A. Pandolfi // Comput. Methods Appl. Mech. Eng. – 2004. – Vol. 193. – P. 2645–2666.
7. Математическое моделирование процесса прессования порошка диоксида урана при изготовлении таблеток ядерного топлива / О.А. Бахтеев, А.В. Лысыков, Е.Н. Михеев и др. // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». – 2014. – Т. 3, № 6. – С. 618–622.
8. ANSYS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ansys.com/>, свободный (дата обращения: 02.03.2016).
9. ABAQUS UNIFIED FEA, complete solutions for realistic simulation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>, свободный (дата обращения: 02.03.2016).
10. Drucker D.C. Relations of experiments to mathematical theories of plasticity // Journal of Applied Mechanics. – 1949. – Vol. 16. – P. 349–357.
11. An analysis of density distribution in  $UO_2$  green pellet by finite element method / K. Yanai, M. Hirai, T. Ishikawa, J. Ishizaki, H. Saitoh // Journal of Nuclear Materials. – 1998. – Vol. 257. – P. 318–330.
12. Lewis R.W. Numerical modelling of large deformation in metal powder forming / R.W. Lewis, A. Khoei // Comput. Methods Appl. Mech. Eng. – 1998. – No. 159. – P. 291–328.

13. Redanz P. Numerical modeling of the powder compaction of a cup // J. Mech. Solids. – 1999. – No. 18. – P. 399–413.

14. Sinka I.C. The effect of wall friction in the compaction of pharmaceutical tablets with curved faces: a validation study of the Drucker–Prager cap model / I.C. Sinka, J.C. Cunningham, A. Zavaliangos // Powder Technol. – 2003. – Vol. 133(1). – P. 33–43.

15. Keshavarz Sh. Contact friction simulation in powder compaction process based on the penalty approach / Sh. Keshavarz, A.R. Khoei, A.R. Khaloo // Materials and Design. – 2008. – Vol. 29(6). – P. 1199–1211.

16. Yamada Y. Plastic stress-strain matrix and its application for the solution of elastic-plastic problems by the finite element method / Y. Yamada, N. Yoshimura, T. Sakurai // Int. J. Mech. Sci. – 1968. – № 10. – P. 343–354.

17. Zienkiewicz O.C. Elasto-plastic solution of engineering problems ‘initial stress’, finite element approach / O.C. Zienkiewicz, S. Valliappan, I.P. Kings // Int. J. Num. Meth. In Eng. – 1969. – No. 1. – P. 75–100.

18. Saada Y. Iterative solution of linear systems in the 20th century / Y. Saada, H.A. van der Vorst // J. of Comp. and App. Math. – 2000. – Vol. 123. – P. 1–33.

---

**Матолыгин Андрей Анатольевич**

Ст. преподаватель каф. экономической математики, информатики и статистики ТУСУРа

Тел.: (382-2) 90-01-87

Эл. почта: matolygin.andrei@yandex.ru

**Истомин Андрей Дмитриевич**

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. физики Северского технологического института (СТИ) – филиала «Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»

Тел.: (382-3) 78-01-62

Эл. почта: istomin\_a.d@mail.ru

**Носков Михаил Дмитриевич**

Д-р физ.-мат. наук, зам. руководителя по научной работе и международной деятельности СТИ

Тел.: (382-3) 78-01-62

Эл. почта: md\_noskov@mail.ru

**Чеглоков Алексей Александрович**

Программист научного отдела СТИ НИЯУ МИФИ

Тел.: (382-3) 78-01-62

Эл. почта: cheglock@rambler.ru

Matolygin A.A., Istomin A.D., Noskov M.D., Cheglockov A.A.

**Software for press molding simulation for powder products**

The article proposes a software package for modeling the compaction of powder products. The software package consists of data preparation, calculation, and visualization modules as well as data storage. The software allows simulating the compacted powder stressedly-deformed state. The software application methods for powder products compacting are described.

**Keywords:** pressing, powders, methods of continuum mechanics, software simulation.