

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,  
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭС**

УДК 623.454.8

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ НАУКОЕМКИХ ИЗДЕЛИЙ  
ПРИ ПОМОЩИ СОВРЕМЕННЫХ САД СИСТЕМ**

© 2014 г. Д.С. Горюшкин, Ю.С. Зувев

*Снежинский физико-технический институт –  
Филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»,  
Снежинск, Челябинская обл.*

Рассматриваются вопросы обоснования применимости методики проектирования наукоемких изделий при действии на них механических нагрузок. Исследуется возможность переноса результатов расчетов на масштабные модели с целью обоснования и корректировки критериальных параметров.

*Ключевые слова:* механические и тепловые нагрузки, масштабные модели, экспериментальное обоснование, критериальные параметры.

Поступила в редакцию 02.03.2014 г.

Обеспечение безопасности при обращении с опасными грузами (ОГ), которые могут содержать вредные и другие опасные вещества является актуальной задачей. Во время транспортировки опасных грузов в форме сферы в специальных контейнерах возможны аварийные ситуации (пожар, падение). В данных ситуациях возникает опасность внедрения опор (в частности полых цилиндрических опор, усеченных конусов) в транспортированный груз, что приводит к нарушению его геометрической целостности и снижению работоспособности всей конструкции при совместном действии температурных и инерционных воздействий.

Проведение исследований по представленной теме было направлено на решение следующих задач:

- Исследование критериев внедрения при температурных и инерционных воздействиях расчетными методами с использованием экспериментальных данных.
- Анализ результатов внедрения и определение критериальных параметров.
- Обоснование применимости современных систем 3-х мерного моделирования в проектировании наукоемких изделий.

Для решения поставленных задач необходимо:

- Провести комплекс исследований процессов внедрения с использованием различных случаев.
- Определить основные параметры внедрения по результатам проведенных экспериментов.
- Провести анализ экспериментов на основе современных численных методов.
- Провести верификацию результатов по разным методам решения с выражением критериальных параметров.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВНЕДРЕНИЯ  
В ОБРАЗЦЫ ИССЛЕДУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Схемы исследования образцов материалов представлены на рисунке 1. Материал исследуемых образцов – свинец, кадмий, медь. Физико-механические характеристики

исследуемых материалов представлены в таблице 1. Экспериментальные исследования проводились на прессе. Исследуемые образцы нагружали статически при комнатной температуре.

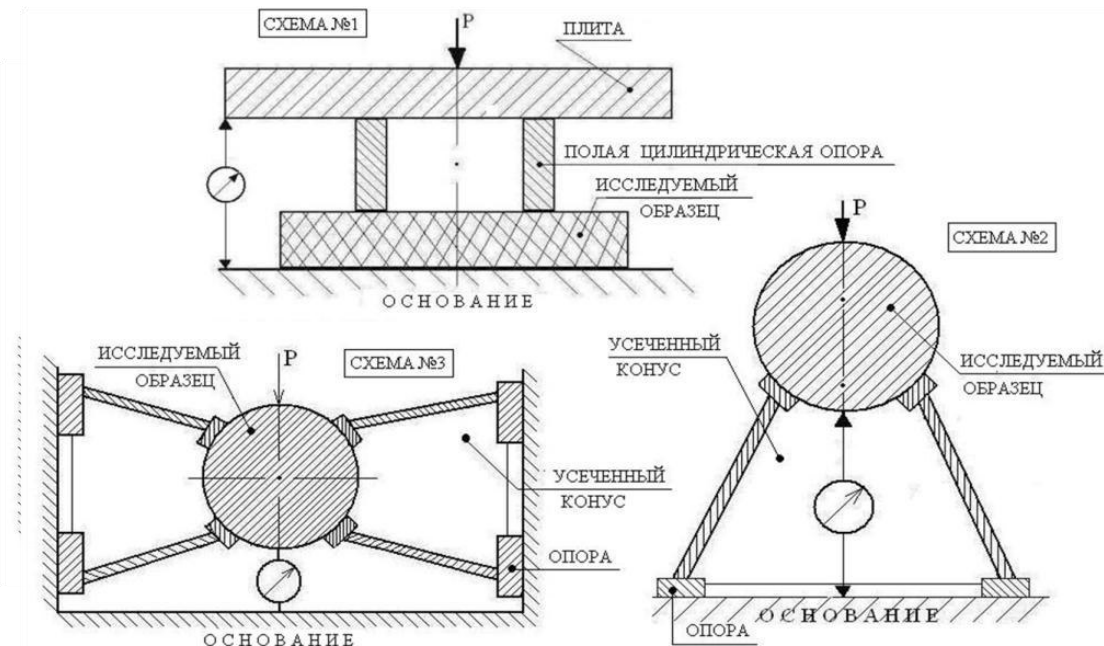


Рис. 1. Схемы испытания исследуемых образцов

Таблица 1. Физико-механические характеристики образцов

Материалы	Свинец С3	Кадмий Кд-0	Медь М3	Сталь 40Х	Литература
Модуль упругости, МПа	16600	50000	117720	217000	[1, 2]
Предел прочности, МПа	14 – 16	63	190,7	981	
Предел текучести на растяжение, МПа	4,5 – 7	24	60	784,8	
Предел текучести на сжатие, МПа	4,33	18,05	43,3	—	
Относительное удлинение, %	50	20	38	10	
Модуль упрочнения, МПа	15 – 17	160	294,57	1943	
Коэффициент Пуассона	0,44	0,3	0,35	0,28	

Испытания по схеме №1 были проведены:

- на образцах из свинца при действии нагрузки Р в интервале от 0 до 30 кН;
- на образцах из кадмия при действии нагрузки Р в интервале от 0 до 40 кН;
- на образцах из меди при действии нагрузки Р в интервале от 0 до 50 кН.

Испытания по схеме №2 были проведены:

- с образцом из свинца при действии нагрузки Р в интервале от 0 до 27,5 кН;
- с образцом из кадмия при действии нагрузки Р в интервале от 0 до 125,5 кН;
- с образцом из меди при нагрузке Р в интервале от 0 до 188,5 кН.

Испытания по схеме №3 были проведены:

- с образцом из свинца при действии нагрузки  $P$  в интервале от 0 до 14 кН;
- с образцом из кадмия при действии нагрузки  $P$  в интервале от 0 до 47,5 кН;
- с образцом из меди при нагрузке  $P$  в интервале от 0 до 50 кН.

При обработке экспериментальных и численных результатов расчета для разных схем нагружения для каждого исследуемого материала определялись параметры внедрения: контактные напряжения  $\sigma$ , перемещения  $U$ , безразмерная величина  $\xi$ , безразмерный параметр  $K$  [3].

Контактные напряжения  $\sigma$  для схемы №1 определялись следующим образом:

$$\sigma = \frac{P}{F} \quad (1)$$

где  $P$  – прикладываемая нагрузка, Н;  
 $F$  – площадь области контакта, равная площади поперечного сечения цилиндрической опоры, мм<sup>2</sup>.

Площадь поперечного сечения полой цилиндрической опоры вычисляется:

$$F = \pi (R^2 - r^2) \quad (2)$$

где  $R$  – внешний радиус опоры, мм;  
 $r$  – внутренний радиус опоры, мм.

Контактные напряжения  $\sigma$  для схемы №2 определялись следующим образом:

$$\sigma = \frac{P}{\pi r L \sin 2\theta_0} \quad (3)$$

где  $P$  – прикладываемая нагрузка, Н;  
 $r$  – радиус образца, мм;  
 $L$  – ширина верхней опоры усеченного конуса, мм;  
 $\theta_0$  – угол полураствора усеченного конуса, градус.

Контактные напряжения  $\sigma$  для схемы №3 определялись следующим образом:

$$\sigma = \frac{P}{\pi r L \sin^2 \theta_0} \quad (4)$$

где  $P$  – прикладываемая нагрузка, Н  
 $r$  – радиус образца, мм  
 $L$  – ширина верхней опоры усеченного конуса, мм  
 $\theta_0$  – угол полураствора усеченного конуса, градус.

Безразмерный параметр  $K$  характеризует отношение контактного напряжения, реализованного в опыте, к пределу текучести исследуемого материала:

$$K = \frac{\sigma}{\sigma_T} \quad (5)$$

Безразмерная величина  $\xi$ , определяется как произведение перемещения, реализованного в исследовании, на модуль упругости исследуемого материала к произведению предела текучести исследуемого материала на сжатие на высоту образца или радиуса образца в зависимости от схемы испытаний.

- для схемы 1 безразмерная величина

$$\xi = \frac{UE}{L\sigma_{сж}^T} \tag{6}$$

– для схемы 2, 3 безразмерная величина

$$\xi = \frac{UE}{R\sigma_{сж}^T} \tag{7}$$

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

На рисунке 2 представлены результаты перемещений, полученные в экспериментах по схеме №1.

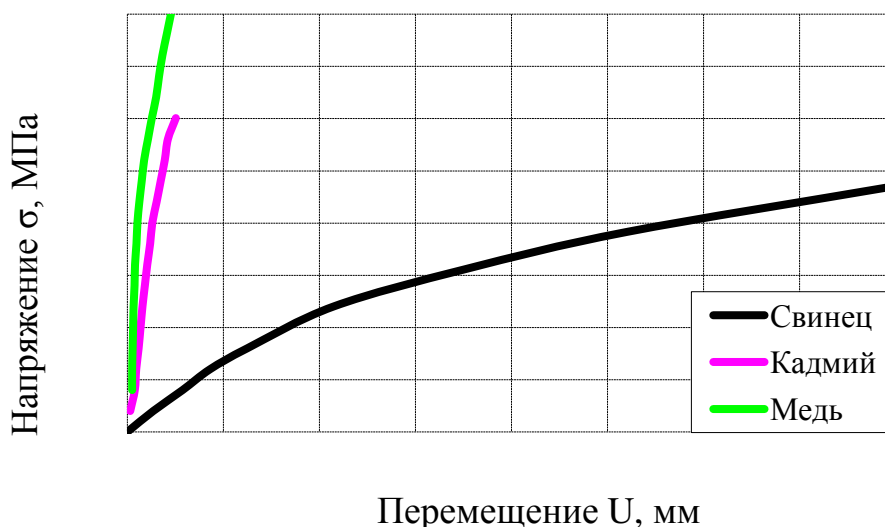


Рис. 2. Зависимость контактных напряжений σ от перемещений U

На рисунке 3 представлены результаты перемещений, полученные в экспериментах по схеме №2.

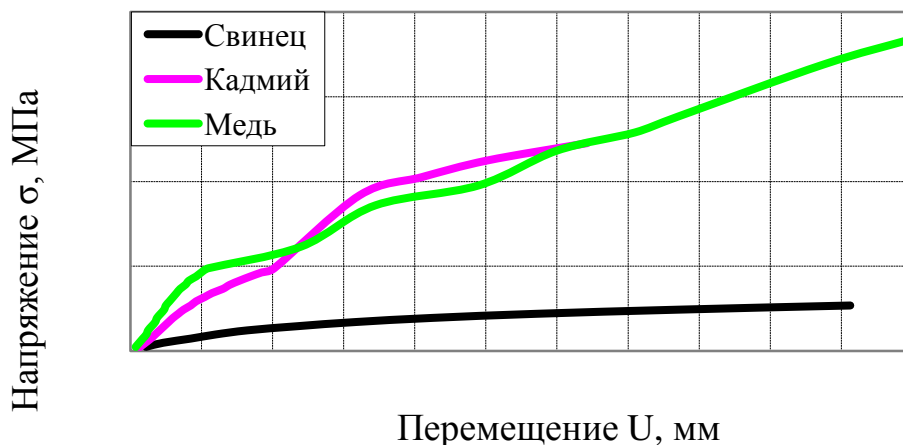


Рис. 3. Зависимость контактных напряжений σ от перемещений U

На рисунке 4 представлены результаты перемещений, полученные в экспериментах по схеме №3.

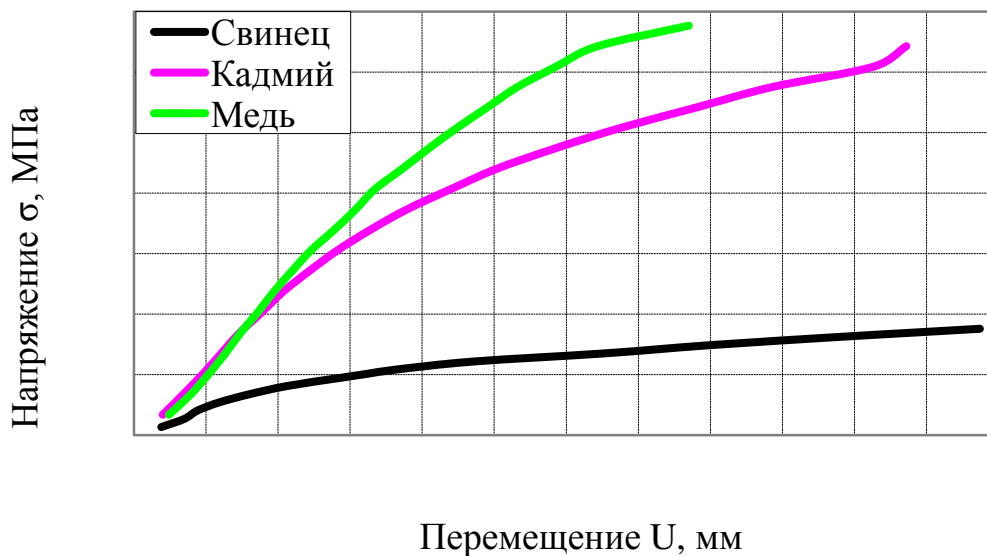


Рис. 4. Зависимость контактных напряжений  $\sigma$  от перемещений  $U$

#### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

По полученным экспериментальным результатам вычислим параметр  $K$ , безразмерную величину  $\xi$  для каждого образца пластического материала по формулам (5–7) соответственно. Построим графики зависимости параметра  $K$  от безразмерной величины  $\xi$ .

На рисунке 5 представлены графики зависимости параметра  $K$  от безразмерной величины  $\xi$  для каждого образца материала испытанного по схеме №1.

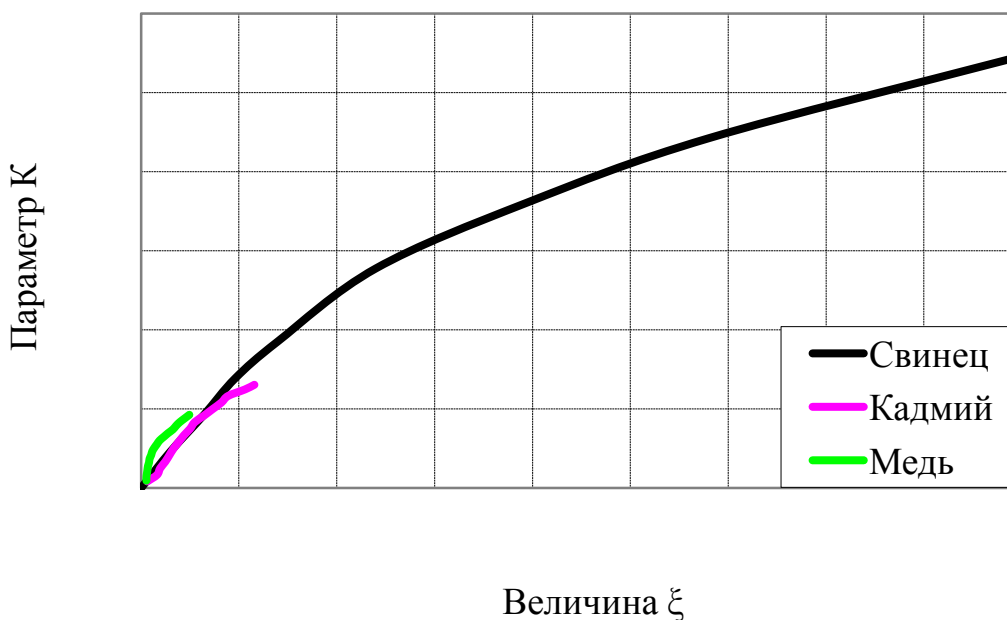


Рис. 5. Зависимость параметра  $K$  от величины  $\xi$

На рисунке 6 представлены графики зависимости параметра  $K$  от безразмерной величины  $\xi$  для каждого образца материала испытанного по схеме №2.

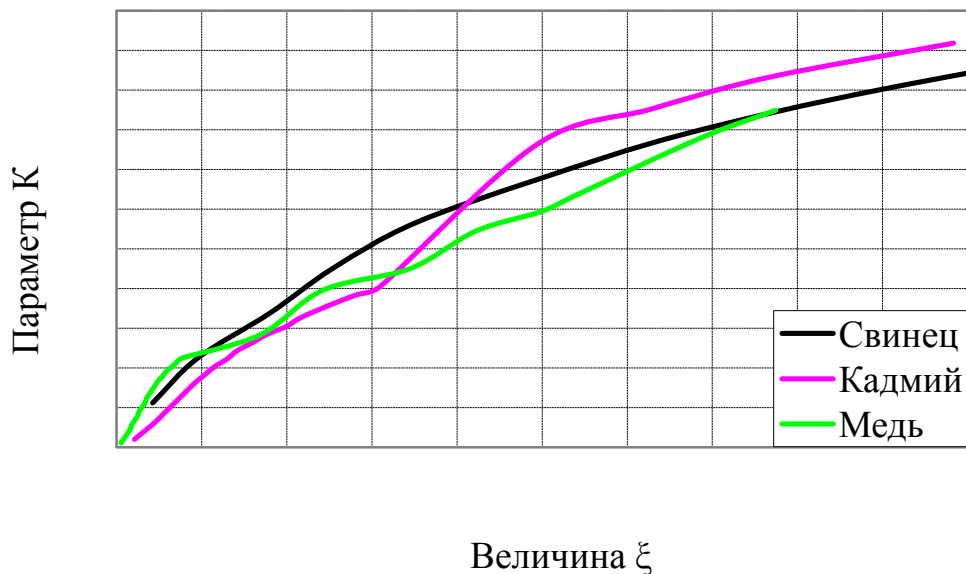


Рис. 6. Зависимость параметра К от величины  $\xi$

На рисунке 7 представлены графики зависимости параметра К от безразмерной величины  $\xi$  для каждого образца материала испытанного по схеме №3.

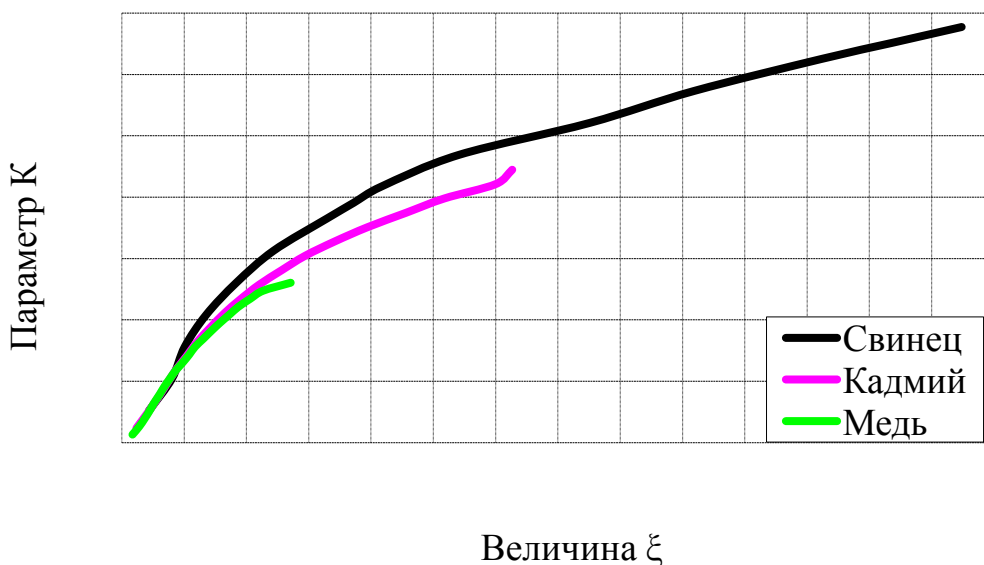


Рис. 7. Зависимость параметра К от величины  $\xi$

В качестве характеристики внедрения в материал может быть принят параметр  $K_{вн}$ . Как видно из экспериментальных диаграмм характер кривых для разных схем испытаний и для различных образцов пластических материалов аналогичен. Значение параметров внедрения для каждой схемы испытаний определяем графически. В качестве предельного значения перемещения принята величина  $U_{пр}$ , значение которой для всех образцов пластических материалов возьмем равное  $\approx 0,1\text{мм}$ . Параметры внедрения  $K_{вн}$  определяются точкой пересечения зависимости  $K(\xi)$  с секущей прямой, параллельной линейному (упругому) участку зависимости  $K(\xi)$  и проходящей через точку  $\xi_{пр}$ . Определим точку  $\xi_{пр}$  для каждого образца материала и схемы испытаний в отдельности.

- 1) Испытания пластического материала по схеме №1. Для данной схемы

испытаний точка  $\xi_{np}$  находится по формуле (6) для каждого образца материала:

- Образец из свинца

$$\xi_{pb} = \frac{U_{np} E}{L \sigma_{сж}^T} = \frac{0,1 \times 16600}{30 \times 4,33} = 12,2 ;$$

- Образец из кадмия

$$\xi_{cd} = \frac{U_{np} E}{L \sigma_{сж}^T} = \frac{0,1 \times 50000}{30 \times 18,05} = 9,3 ;$$

- Образец из меди

$$\xi_{cu} = \frac{U_{np} E}{L \sigma_{сж}^T} = \frac{0,1 \times 117720}{30 \times 43,3} = 9,1$$

2) Испытания пластического материала по схеме №2-3. Для данных схем испытаний точка  $\xi_{np}$  находится по формуле (7) для каждого образца материалов.

- Образец из свинца

$$\xi_{pb} = \frac{U_{np} E}{R \sigma_{сж}^T} = \frac{0,1 \times 16600}{36,2 \times 4,33} = 10,6 ;$$

- Образец из кадмия

$$\xi_{cd} = \frac{U_{np} E}{R \sigma_{сж}^T} = \frac{0,1 \times 50000}{36,2 \times 18,05} = 7,7 ;$$

- Образец из меди

$$\xi_{cu} = \frac{U_{np} E}{R \sigma_{сж}^T} = \frac{0,1 \times 117720}{36,2 \times 43,3} = 7,5$$

Полученные безразмерные величины  $\xi_{np}$  близки по значениям, примем, что безразмерная величина  $\xi_{np}$  в малой степени зависит от материала. Для вычисленных значений  $\xi_{np}$  найдем ее средние значения для каждой схемы испытания. Для этого воспользуемся формулой математического ожидания [4].

Испытания по схеме №1:

$$\xi_{np} = \frac{\xi_{pb} + \xi_{cd} + \xi_{cu}}{3} = \frac{12,2 + 9,3 + 9,1}{3} = 10,2$$

Испытания по схемам №2 и №3:

$$\xi_{np} = \frac{\xi_{pb} + \xi_{cd} + \xi_{cu}}{3} = \frac{10,6 + 7,7 + 7,5}{3} = 8,6$$

На рисунке 8 представлена средняя зависимость  $K(\xi)$  для испытаний по схеме №1 пластических материалов.

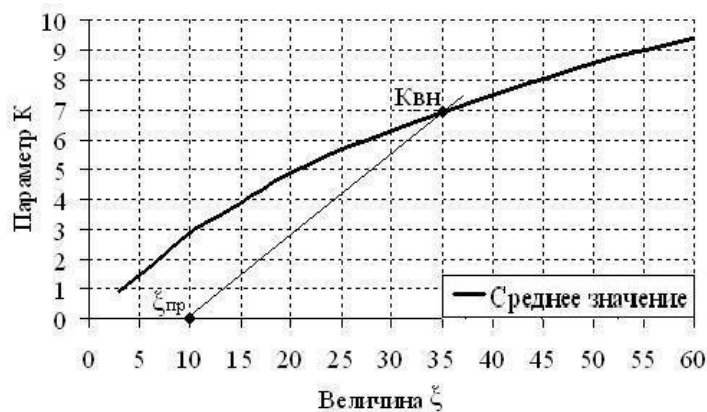


Рис. 8. Зависимость параметра К от величины  $\xi$

На рисунке 9 представлена средняя зависимость  $K(\xi)$  для испытаний по схеме №2 пластических материалов.

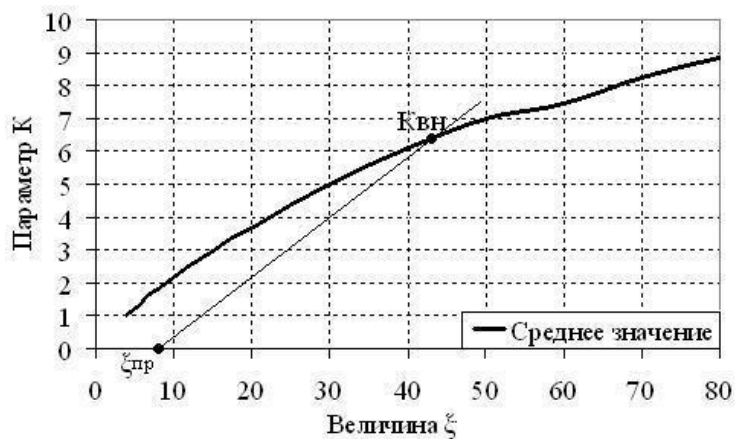


Рис. 9. Зависимость параметра К от величины  $\xi$

На рисунке 10 представлена средняя зависимость  $K(\xi)$  для испытаний по схеме №3 пластических материалов.

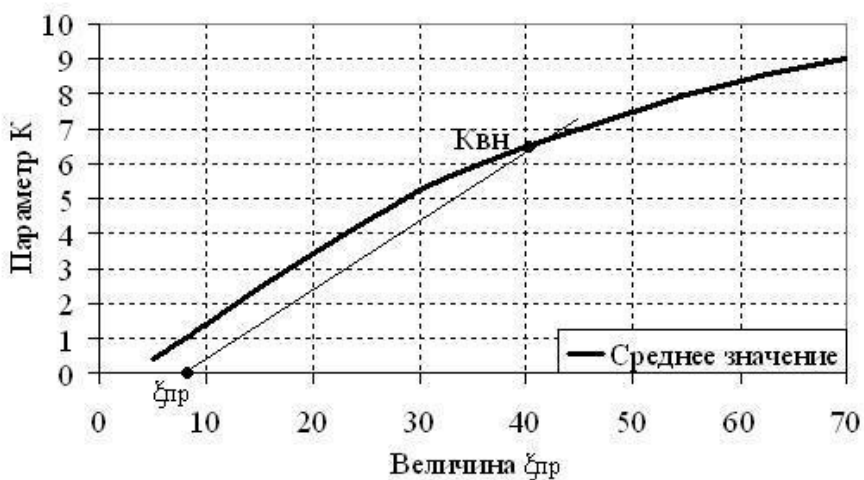


Рис. 10. Зависимость параметра К от величины  $\xi$

Графически определенные значения параметра  $K_{вн}$  для отдельных схем испытаний:



- Схема №1:  $K_{вн} \approx 7,0$
- Схема №2:  $K_{внХ} \approx 6,4$
- Схема №3:  $K_{внУ} \approx 6,2$

При близких значениях параметров  $K$  для различных образцов материалов можно говорить об идентичности процессов внедрения.

### ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВНЕДРЕНИЯ В ОБРАЗЦЫ ИССЛЕДУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Численное исследование процессов внедрения проводилось методом конечно-элементного (МКЭ) анализа. В дальнейшем для верификации полученных результатов будет проведен расчет в модуле «механика» пакета программ «CREO».

Расчеты проведены в нелинейной статической постановке с использованием двумерной осесимметричной конечно-элементной модели. В созданных моделях (рисунок 11), представляющих собой половину сборки (разделение сборки производилось по оси симметрии), на узлы, попадающие в плоскость симметрии, накладывались соответствующие ограничения по перемещениям по оси  $OX$ . Свойство осесимметричности использованное в расчетных моделях, позволило снизить количество конечных элементов и время счета упругопластических задач. Условия, ограничивающие перемещения по оси  $OY$  имитировали закрепление сборки при испытаниях. Расчеты были проведены по схемам 1 и 2, зазоры отсутствуют. Физико-механические свойства образцов материалов, применяемых в исследовании, представлены в таблице 1. В расчетах была применена мультилинейная модель материалов, позволяющая более точно описывать экспериментальные диаграммы, полученные в испытаниях на растяжение и сжатие. При генерации конечно-элементной сетки был выбран двумерный восьмиузловой элемент – PLANE 183. Контакт между деталями задан элементами типа “поверхность – поверхность” CONTA 172 и TARGE 169. Коэффициент трения для контактирующих деталей “пластичный образец – индентор” задавался равным 0,3 [5].

На рисунке 11 приведены расчетные двумерные осесимметричные модели, имитирующие нагружение по схемам №1 и №2.

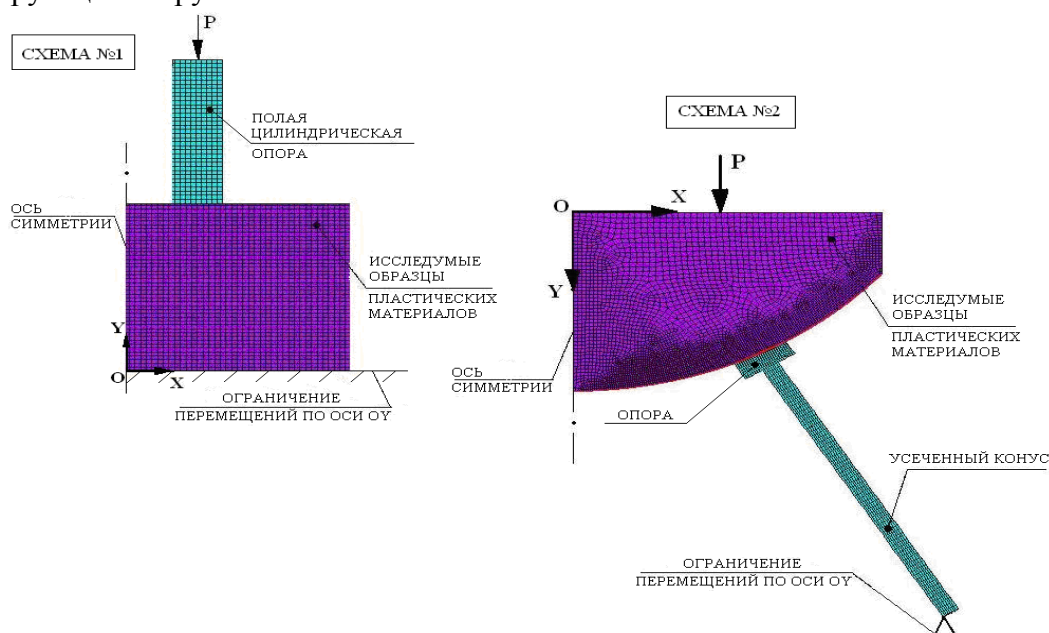


Рис. 11. Модели испытаний образцов пластических материалов

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

На рисунке 12 представлены результаты перемещений, полученные в численном расчете по схеме №1.

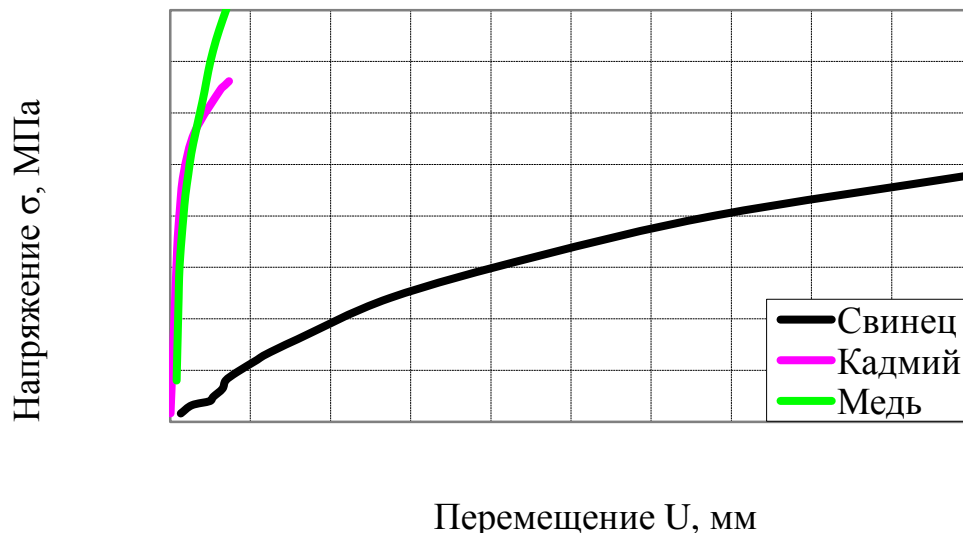


Рис. 12. Зависимость контактных напряжений  $\sigma$  от перемещений U

На рисунке 13 представлены результаты перемещений, полученные в численном расчете по схеме №2.

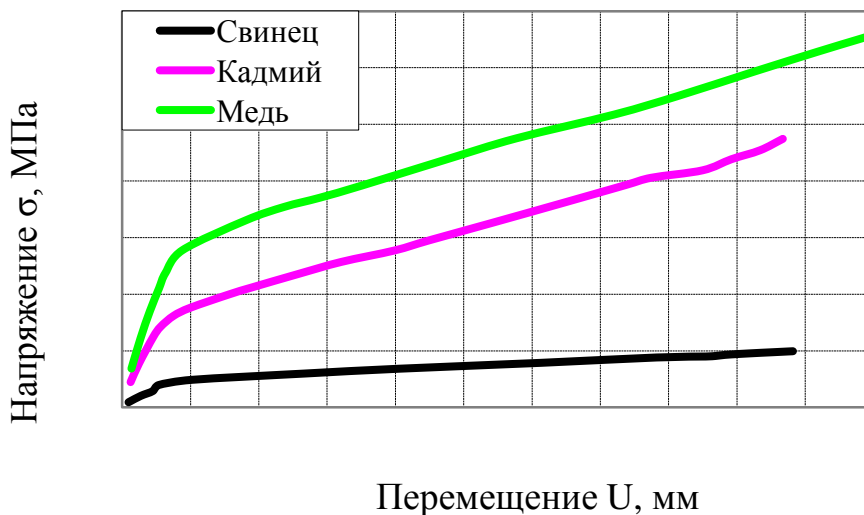


Рис. 13. Зависимость контактных напряжений  $\sigma$  от перемещений U

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

По полученным численным результатам вычислим параметр K, безразмерную величину  $\xi$  для каждого образца пластического материала по формулам (5-7) соответственно. Построим графики зависимости параметра K от безразмерной величины  $\xi$ .

На рисунке 14 представлены графики зависимости параметра K от безразмерной величины  $\xi$  для каждого образца материала испытанного по схеме №1.

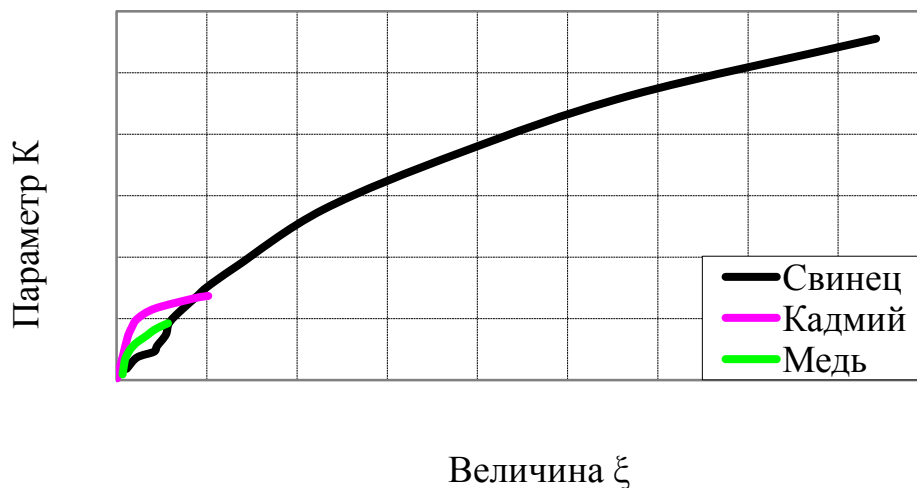


Рис. 14. Зависимость параметра  $K$  от величины  $\xi$

На рисунке 15 представлены графики зависимости параметра  $K$  от безразмерной величины  $\xi$  для каждого образца материала испытанного по схеме №2.

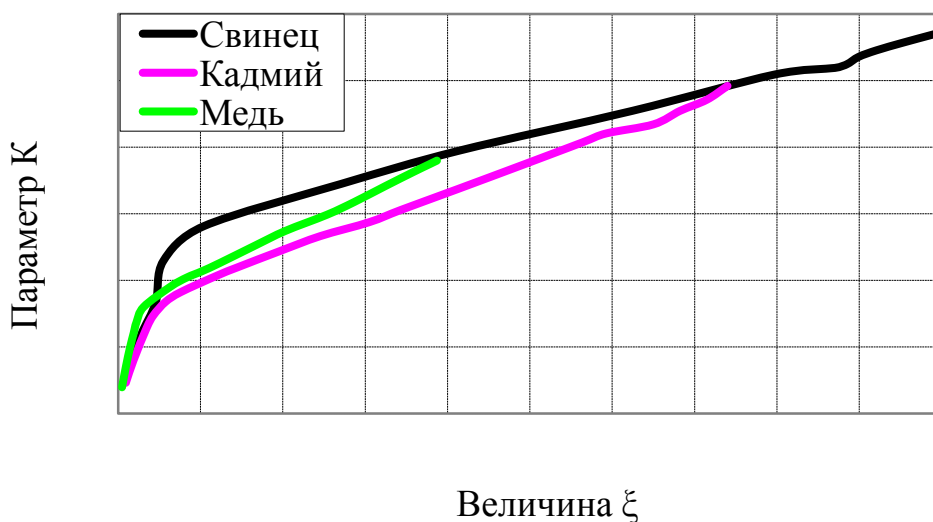


Рис. 15. Зависимость параметра  $K$  от величины  $\xi$

Обработка численных результатов проводилась аналогично обработке экспериментальных. Физико-механические свойства образцов пластических материалов, применяемых как в эксперименте, так и в расчетных моделях, идентичны, можно утверждать, что безразмерная величина  $\xi_{np}$  будет равна экспериментальным значениям:

- Схема №1:  $\xi_{np} = 10,2$
- Схема №2 и №3:  $\xi_{np} = 8,6$

При обработке результатов испытаний пластических материалов по схеме №1 не будем учитывать результаты перемещений, полученные для образцов из кадмия и меди, так как полученные для них значения перемещений не влияют на вид кривой. Параметры внедрения для образцов трех материалов будем находить по зависимости  $K(\xi)$ , полученной для образца из свинца.

На рисунке 16 средняя зависимость  $K(\xi)$  для испытаний по схеме №1

пластических материалов.

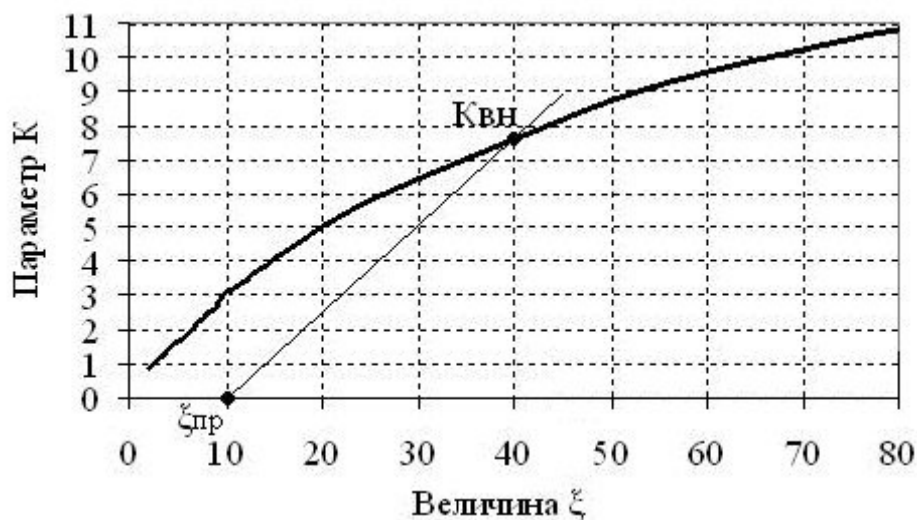


Рис. 16. Зависимость параметра К от величины  $\xi$

На рисунке 17 представлена средняя зависимость  $K(\xi)$  для испытаний по схеме №2 пластических материалов.

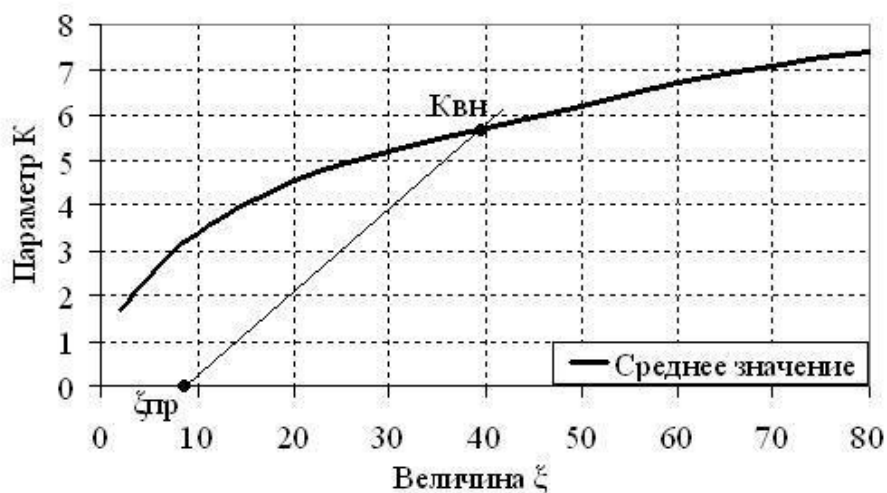


Рис. 17. Зависимость параметра К от величины  $\xi$

Графически определенные значения параметра  $K_{вн}$  для отдельных схем испытаний:

- Схема №1:  $K_{вн} \approx 7,4$
- Схема №2:  $K_{внХ} \approx 5,8$

### СРАВНЕНИЕ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

По результатам экспериментальных испытаний и по результатам численных исследований по программе конечно-элементного (МКЭ) анализа проведем сравнение. Для сравнения результатов построим графики средних зависимостей  $K(\xi)$  для каждой схемы в отдельности.

На рисунке 18 представлено сравнение зависимостей  $K(\xi)$ , полученных после обработки экспериментальных результатов и результатов расчета по МКЭ для схемы №1.

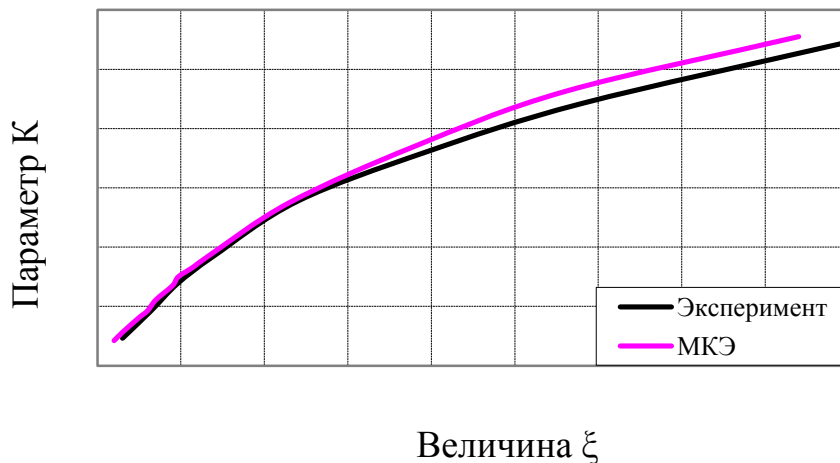


Рис. 18. Зависимость параметра  $K$  от величины  $\xi$

На рисунке 19 представлено сравнение зависимостей  $K(\xi)$ , полученных после обработки экспериментальных результатов и результатов расчета по МКЭ, для схемы №2.

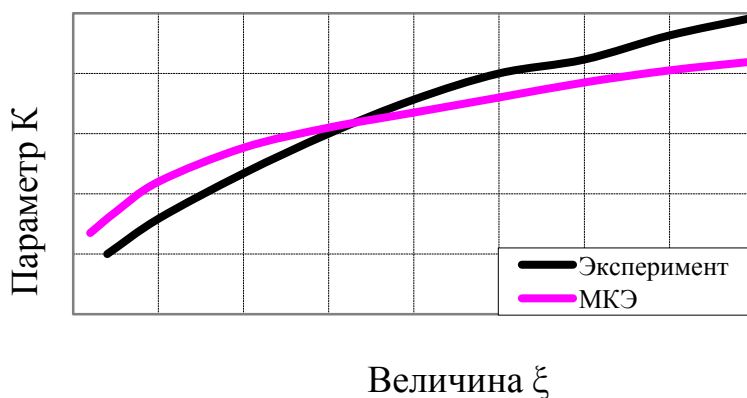


Рис. 19. Зависимость параметра  $K$  от величины  $\xi$

При обработке экспериментальных результатов и результатов, полученных численными исследованиями, были получены параметры внедрения при различных статических схемах нагружения.

Как видно из экспериментальных диаграмм и диаграмм, полученных численным методом, характер кривых для разных схем испытаний и для различных образцов пластических материалов идентичен.

В качестве характеристики внедрения в материал был принят параметр  $K_{вн}$ . Параметры  $K_{вн}$  найденные по экспериментальным результатам, так и по результатам программы МКЭ, сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Значение параметров  $K_{вн}$ .

Схема нагружения	Методы		Погрешность, %
	Эксперимент	МКЭ	
Схема №1	7,0	7,4	5,6
Схема №2	6,4	5,8	9,4
Схема №3	6,2	—	—

При сравнении результатов параметров  $K_{вн}$  полученных экспериментально и по программе конечно-элементного анализа были вычислены погрешности. Для обработки вычисленных погрешностей найдем общую погрешность результатов между методами:

- Схема №1  $\approx 5,6\%$ ;
- Схема №2  $\approx 9,4\%$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты экспериментальных исследований и результаты расчета по программе конечно-элементного анализа МКЭ удовлетворительно согласуются. Согласование двух методов решений говорит о корректных расчетных моделях, правильно подобранных физико-механических свойствах материалов, применяемых в программе МКЭ, что позволяет решать аналогичные задачи численным методом конечно-элементного анализа.

В результате проведенных исследований было теоретически и расчетно обосновано применение параметра внедрения  $K_{вн}$  для различных материалов, независимо от физико-механических свойств. При расчетах действия нагрузки в произвольном направлении предельной кривой внедрения можно принять эллипс с главными осями  $K_{внX}$ ,  $K_{внY}$ .

Данная методика может быть использована в расчетах стойкости конструкций при действии механических и тепловых нагрузок.

Полученные значения параметра  $K_{вн}$  позволят на стадии расчета, зная физико-механические свойства элементов конструкции, выявить ее критическое формоизменение, влияющее на работоспособность всей системы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рахштадт, А.Г. и др.* Справочник металлиста [Текст] / А.Г. Рахштадт, В.А. Брострем. – М.: Машиностроение, 1976.
2. *Бернштейн, М.Л.* Механические свойства металлов [Текст] / М.Л. Бернштейн. – М.: Metallurgy, 1979.
3. *Смирнов-Аляев, Г.А.* Сопротивление материалов пластическому деформированию [Текст] / Г.А. Смирнов-Аляев – М.: Машгиз, 1978.
4. *Вентцель, Е.С.* Теория вероятности [Текст] / Е.С. Вентцель – М.: Наука, Физматгиз, 1969.
5. *Басов, К.А.* ANSYS. Справочник пользователя [Текст] / К.А. Басов – М.: ДМК, 2005.

## Science-Intensive Products Designing by Means of Modern Computer-Aided Design Systems

**D.S. Goriushkin\*, Y.S. Zuyev\*\***

*Snezhinsk Physics-Technical Institute the Branch of National Nuclear Research University MEPhI  
8 Komsomolsk st., Snezhinsk city, Cheliabinsk reg. 456776*

*\* email: goruh@bk.ru, \*\* email: YSZuyev@mephi.ru*

**Abstract** – The article is devoted to substantiation applicability of the methodology for calculation of structures when subjected to mechanical and thermal loads. The authors consider the possibility of transferring results based on scale models for experimental study of criteria and adjusting parameters.

**Keywords:** mechanical and thermal loads, scale models, experimental substantiation, criterial parameters.

## REFERENCES

- [1] Rahshtadt A.G., Brostrem V.A. Spravochnik metallista [Reference book of the metalworker]. M. Pub. Mashinostroenie [Engineering], 1976 (in Russian)
- [2] Bernshtejn M.L. Mehanicheskie svojstva metallov [Mechanical properties of metals]. M. Pub. Metallurgija [Metal Industry], 1979. (in Russian)
- [3] Smirnov-Aljaev G.A. Soprotivlenie materialov plasticheskomu deformirovaniju [Resistance of materials to plastic deformation]. M. Pub. Mashgiz [State publishing house "Engineering"], 1978. (in Russian)
- [4] Ventcel E.S. Teorija verojatnosti [Probability theory]. M. Pub. Nauka, Fizmatgiz [Science. Publishing house of physical and mathematical and technical literature], 1969. (in Russian)
- [5] Basov K.A. ANSYS. Spravochnik polzovatelja [User manual]. M. Pub. DMK, 2005. (in Russian)