



Терентьев О. М.

доктор технических наук, профессор кафедры электромеханического оборудования геотехнических производств Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»



Ключев А. И.

магистрант кафедры электромеханического оборудования геотехнических производств Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»

МОДЕЛЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЯДРА УПЛОТНЕНИЯ В СИСТЕМЕ «ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИСТОЧНИК – СРЕДА»

В статье описаны результаты анализа процесса возникновения ядра уплотнения при разрушении среды и определение зависимостей геометрии (высоты) ядра уплотнения от состояния и физико-механических свойств атомарных структур среды.

Ключевые слова: ядро уплотнения, атомарная структура среды, частота собственных колебаний, энергетический источник.

1. Введение

При обработке забоя разрушающим инструментом в зоне его контакта со средой, образуется ядро уплотнения. Это ядро при длительной нагрузке на него, поглощает значительную часть энергии привода на уплотнение и увеличение своего объема. Изменение геометрии разрушающего инструмента приводит к росту трения и нагрузки на лезвие разрушающего инструмента. Вследствие этого забой разрушает не лезвие инструмента, а ядро уплотнения. Из-за этого увеличивается энергоемкость а значит снижается энергоэффективность процесса разрушения забоя.

Согласно Директиве Европейского Парламента и Совета «об эффективности конечного использования энергии и энергетических услугах, а также об отмене Директивы Совета 93/76/ЕЭС» от 5 апреля 2006 года 2006/32/ЕС [1], увеличение энергоэффективности процесса разрушения породных массивов является актуальной задачей.

2. Постановка проблемы

Целью работы является анализ процесса формирования ядра уплотнения при разрушении забоев и установление зависимостей геометрии (высоты) ядра уплотнения от физико-механических характеристик и атомарных структур среды. Это требует разработки новых математических моделей, связывающих высоту ядра уплотнения с атомарной структурой среды, которая разрушается. Новым является переход от классической теории механики разрушения к модели разрушения на уровне атомарных структур среды с соблюдением основных законов квантовой механики.

3. Основная часть

Для анализа разрушения, забой рассмотрен на атомарном уровне. Каждая элементарная частица (атом) обладает потенциальной энергией. Наличие постоянных возбуждающих факторов (гравитация, упругость межатомных связей, упруго-деформированное состояние среды, которая разрушается) вызывают наличие внутренней частоты колебаний атомов структуры.

Частота собственных колебаний частицы (атома) ω , 1/с, определяется через модель Эйнштейна [2, с.10]

$$\omega = \frac{\varepsilon}{\hbar} \quad (\text{формула 1})$$

где ε – энергия элементарной частицы (атома), Дж;

$\hbar = 1,054571726 \cdot 10^{-34}$ – постоянная Дирака, Дж·с.

Согласно с техническими характеристиками [8], станки СВШ - 250 МН предназначены для бурения пород с коэффициентом крепости $f = 12 - 18$ по шкале Протодеяконова. Для моделирования выбраны породы с $f = 12, 16, 18$ (кварц, диабаз, порфир). По их химическому составу выделены основные атомарные структуры, связи которых подлежат разрушению. Значение энергии составляющих структуры атомов сведены в таблицу 1.

Таблица 1 - Показатели собственной энергии атомов

Атом	Собственная энергия, ϵ , eВ	Источник
Кремний (Si)	1,119	5
Железо (Fe)	2,2	4
Кальций (Ca)	5	3

Для кремния (Si), частота собственных колебаний атомарной решетки, 1/с:

$$\omega = 1.119 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} / 1.054571726 \cdot 10^{-34} = 1.697750808085 \cdot 10^{15}$$

Результаты расчетов по (ф. 1) для кремния и других атомов сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Частота собственных колебаний атомов

Атом	Частота собственных колебаний атомов, ω_0 , 1/с
Кремний (Si)	1697750808085000
Железо (Fe)	3337847880060000
Кальций (Ca)	7586017909227000

Для определения высоты ядра уплотнения при разрушении забоя, за исходную формулу, описывающую систему «Внешний источник - среда», принято [6, с.181]:

$$h_a = \frac{\sqrt{N_{II}^2 + N_P^2} \cdot \eta_{II} \cdot \ln((0.00013 \cdot E)^{1.67} \cdot \pi \cdot (1 - \nu^2) / (0.152 \cdot E))}{28.2 \cdot a_k \cdot 0.0083 \cdot E \cdot \eta_P \cdot N_i \cdot \sqrt{V_{II}^2 + V_P^2}} \quad (\text{формула 2})$$

де N_{II} – среднее значение мощности привода подачи, Вт;

N_P – среднее значение мощности привода резания, Вт;

η_{II} – коэффициент полезного действия приводов подачи и резания,

в. о.;

E – модуль Юнга, Па;

ν – коэффициент Пуассона, в. о.,

a_k – ширина контакта инструмента с забоем, м;

η_P – коэффициент полезного действия редуктора, в. о.;

N_i – количество режущих инструментов, шт;

V_{II} – средняя скорость подачи, м/с;

V_P – средняя скорость резания, м/с.

Недостатком приведенной модели является отсутствие воздействия внутренней энергии атомов и их собственной частоты колебаний на высоту возникающего ядра уплотнения. Переход на атомарный уровень осуществляется в соответствии с законами квантовой механики. Особенностью использования законов квантовой механики является наличие постоянной Планка. При переходе к основному показателю квантовой механики - постоянной Планка, была использована постоянная Дирака [7].

$$h = \hbar \cdot 2\pi$$

(формула 3)

де $h = 6,62606957 \cdot 10^{-34}$ - постоянная Планка, Дж·с;

Тогда, (ф. 2) описывает систему «Энергетическое источник - среда» (ЭИС) и принимает вид:

$$(формула 4) h_{\alpha} = \frac{\sqrt{N_{\Pi}^2 + N_{P}^2} \cdot \eta_{\Pi} \cdot \ln((0.00013 \cdot E)^{1.67} \cdot (h/2\hbar) \cdot (1 - v^2)/(0.152 \cdot E))}{28.2 \cdot a_k \cdot 0.0083 \cdot E \cdot \eta_P \cdot N_i \cdot \sqrt{V_{\Pi}^2 + V_P^2}}$$

С учетом модели Эйнштейна (ф. 1), высота ядра уплотнения на атомарном уровне:

(формула 5)

$$h_{\alpha} = \frac{\sqrt{N_{\Pi}^2 + N_{P}^2} \cdot \eta_{\Pi} \cdot \ln((0.00013 \cdot E)^{1.67} \cdot (h\omega/2\varepsilon) \cdot (1 - v^2)/(0.152 \cdot E))}{28.2 \cdot a_k \cdot 0.0083 \cdot E \cdot \eta_P \cdot N_i \cdot \sqrt{V_{\Pi}^2 + V_P^2}}$$

Для проведения анализа математической модели, использованы характеристики буровых станков СБШ-250МН-32, СБШ-250МН-32Д, СБШ-250МН-32КП-18, СБШ-160/200-40, СБШ-160/200-40Д из каталогов ОАО «Рудгормаш» [8], и сведены в табл. 3.

Таблица 3 – Характеристики буровых станків СБШ

Модель бурового станка	СБШ-250МНА-32	СБШ-250МНА-32Д	СБШ-250МНА-32КП-18	СБШ-160/200-40	СБШ-160/200-40Д
Коэффициент крепости пород по шкале Протодяконова, f	f=6-20	f=6-20	f=6-20	f=6-18	f=6-18
Диаметр скважины, a_k , мм	160, 170, 190, 215, 250, 270	170...311	250, 270, 300	160, 171, 215	160, 171, 215
Верхняя граница усилия подачи, F_{II} , кН	294	340	350	235	235

Верхний предел частоты вращения бурового снаряда, $\omega_p, \text{хв}^{-1}$	120	150	120	120	140
Максимальный крутящий момент, $M, \text{Нм}$	17400	13000	21000	7000	7000
Скорость спуска/подъема бурового снаряда, $V_p, \text{м/хв}$	15/15	20/20	25/25	15/15	15/15

Линейная скорость резания, [9, с.45]:

$$V_p = \omega_p \cdot \left(\frac{a_k}{2}\right) \quad (\text{формула 6})$$

Мощность [10, с.88] привода подачи:

$$N_{II} = F_{II} \cdot V_{II} \quad (\text{формула 7})$$

Мощность привода резания [11, с.49]:

$$N_p = M \cdot \omega_p \quad (\text{формула 8})$$

Подставив (ф. 6) - (ф. 8) в (ф. 5), высота ядра уплотнения:

$$h_x = \frac{\sqrt{(F_{II} \cdot V_{II})^2 + (M \cdot \omega)^2 \cdot \eta_{II} \cdot \ln((0.00013 \cdot E)^{1.67} \cdot (h\omega / 2\varepsilon) \cdot (1 - \nu^2) / (0.152 \cdot E))}}{28.2 \cdot a_x \cdot 0.0083 \cdot E \cdot \eta_p \cdot N_i \cdot \sqrt{V_{II}^2 + (\omega_p \cdot \frac{a_k}{2})^2}} \quad (\text{формула 9})$$

Впервые предложена математическая модель, которая отличается от существующих тем, что учитывает физико-механические свойства пород с учетом атомарной структуры среды, и определяет их зависимость от изменения характеристик различных моделей существующих буровых станков по паспортным данным.

Для анализа предложенной модели, необходимые данные сведены в таблицы 4 и 5.

Таблица 4 – Физические свойства атомов

Атом	Коэффициент Пуассона	Источник	Модуль Юнга, ГПа	Источник
Кремний (Si)	0.266	[12]	109	[15]
Железо (Fe)	0.28 - 0.29	[13]	190-210	[16]
Кальций (Ca)	-0.27	[14]	26	[17]

Таблица 5 – Технические характеристики приводов буровых станков СВШ

Коэффициент полезного действия привода резания, в. о.	Источник	Коэффициент полезного действия привода подачи, в. о.	Источник	Коэффициент полезного действия редуктора, в. о.	Источник
0,65	[19]	0,7	[19]	0,95	[20, 21]

Высота ядра уплотнения при работе СВШ-250МН-32 с забоем с атомарной структурой кремния (Si), м:

$$h_{ал} = \frac{\sqrt{(294000 \cdot 15 / 60)^2 + (17400 \cdot 120 / 60)^2} \cdot (0,65 \cdot 0,7) \cdot \ln((0,00013 \cdot 109 \cdot 10^9)^{1,67})}{28,2 \cdot 0,160 \cdot 0,0083 \cdot 109 \cdot 10^9} \cdot \frac{(6,62606957 \cdot 10^{-34} \cdot 1697750808085000 / 21,054571726 \cdot 10^{-34} \cdot 1,119 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}) \cdot 0,95 \cdot 1 \cdot \frac{(1 - 0,266^2) / (0,152 \cdot 109 \cdot 10^9)}{\sqrt{(15 / 60)^2 + ((120 / 60) \cdot (0,160 / 2))^2}}}{1,62 \cdot 10^{-4}}$$

Высота ядра приведенной выше модели бурового станка и других с забоями с различными атомарными структурами определяется аналогично. Сравнение значений высоты ядра уплотнения при работе СВШ-250МН с породами различных атомарных структур с изменением диаметра скважины приведено на рисунке 1

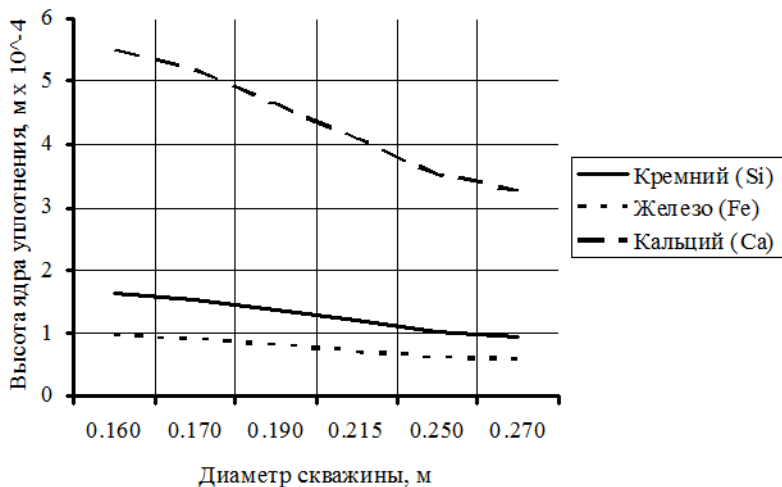
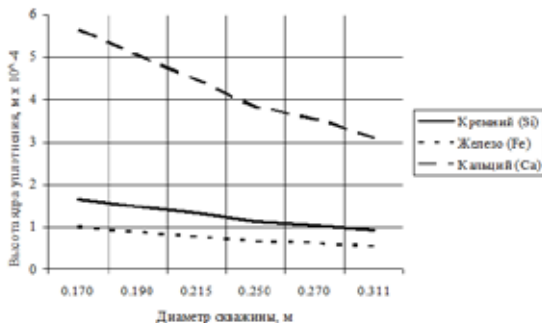


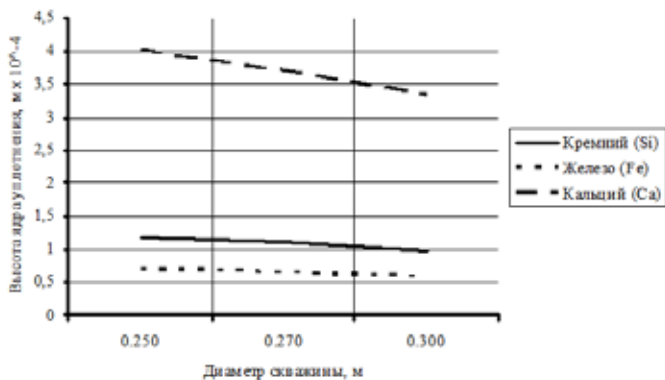
Рисунок 1 – График зависимости высоты ядра уплотнения от изменения диаметра скважины СБШ-250МН-32.

Высота ядра уплотнения кремния (Si) уменьшается на 10 мкм при увеличении диаметра скважины на 10 мм. Это связано с тем, что ядро уплотнения формируется по параболическому закону. С увеличением диаметра скважины, рога параболы уплотнения удаляются друг от друга. Однако фокус ядра не меняется, так как мощность разрушающего инструмента была неизменна. При разрушении атомарной структуры кальция (Ca), образуется ядро уплотнения с большей высотой, 0,54 мм, по сравнению с разрушением атомарных структур кремния (Si), 0,16 мм, и железа (Fe), 0,095 мм, так как кальций относится к ауксетикам (имеет отрицательный коэффициент Пуассона) [14]. То есть имеет свойство растягиваться при сжатии. Поэтому, высота ядра уплотнения пород с преимущественным содержанием кальция (Ca), будет больше.

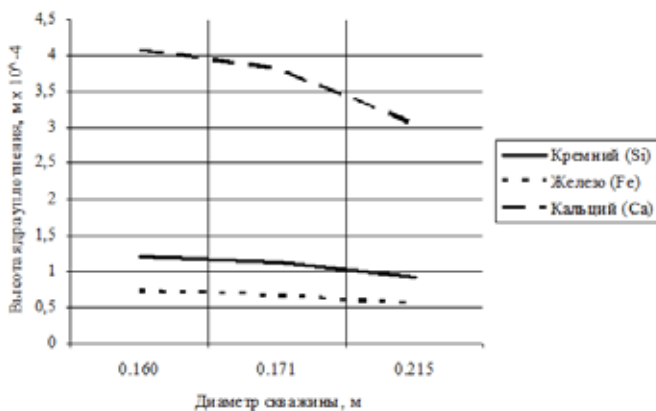
Сравнение значений высоты ядра уплотнения при работе СБШ-250МН-32Д, СБШ-250МН-32КП-18, СБШ-160/200-40 и СБШ-160/200-40Д с породами различных атомарных структур с изменением радиуса скважины, приведены на рисунке 2 а-г, соответственно.

а)

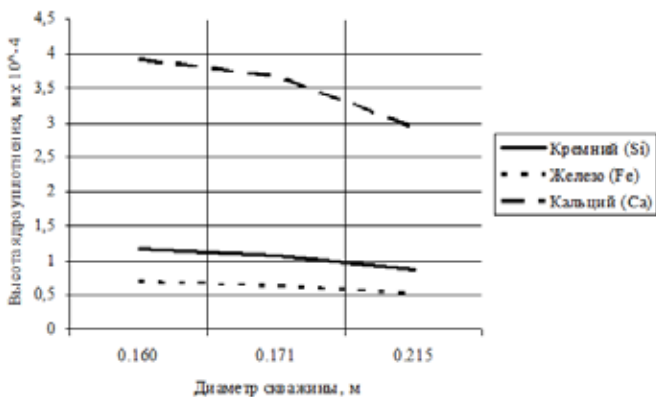




б)



в)



г)

Рисунок 2 – Графики зависимостей высоты ядра уплотнения от изменения диаметра скважины с породами с различными атомарными структурами: а) СБШ-250МН-32Д б) СБШ-250МН-32КП-18 в) СБШ-160/200-40 г) СБШ-160/200 -40Д.

Наименьшее ядро уплотнения 0,050 - 0,067 мм образуется при работе СБШ-160/200-40Д с забоями с преимущественным содержанием железа (Fe) в атомарной структуре среды. Это объясняется тем, что у железа упругие свойства, а именно модуль Юнга, 190-210 ГПа, вызывает большую хрупкость материала, чем у кремния (Si) и кальция (Ca). Также на высоту ядра уплотнения влияет то, что в СБШ-160/200-40Д используются диаметры режущих инструментов до 215 мм и меньшее усилие подачи - 235 кН, в отличие от 294 - 340 кН в СБШ - 250 МН. Это указывает на пропорциональную зависимость высоты ядра уплотнения от усилия подачи.

Выводы

1. Впервые предложена математическая модель, которая адаптирована к анализу формирования ядра уплотнения и отличается от существующих тем, что учитывает физико-механические свойства забоев и их атомарную структуру и определяет их зависимости от изменения характеристик различных моделей существующего разрушающего оборудования.
2. Выяснено, что высота ядра уплотнения кремния (Si) уменьшается на 10 мкм при увеличении диаметра скважины на 10 мм. Это связано с тем, что ядро уплотнения формируется по параболическому закону. С увеличением диаметра скважины, рога параболы уплотнения удаляются друг от друга. Однако фокус ядра не меняется, так как мощность разрушающего инструмента была неизменна. При разрушении атомарной структуры кальция (Ca), образуется ядро уплотнения с большей высотой, 0,54 мм, по сравнению с разрушением атомарных структур кремния (Si), 0,16 мм, и железа (Fe), 0,095 мм, так как кальций относится к ауксетикам (имеет отрицательный коэффициент Пуассона). То есть имеет свойство растягиваться при сжатии. Поэтому, высота ядра уплотнения пород с преимущественным содержанием кальция (Ca), будет больше.
4. Установлено наименьшее ядро уплотнения 0,050 - 0,067 мм при работе СБШ-160/200-40Д с забоями с преимущественным содержанием железа (Fe), что объясняется упругими свойствами, а именно модуль Юнга, 190-210 ГПа, вызывает большую хрупкость материала, чем у кремния (Si) и кальция (Ca).
5. Выяснено, что на высоту ядра уплотнения влияет то, что у СБШ-160/200-40Д используются диаметры режущих инструментов до 215 мм и меньшее усилие подачи - 235 кН, в отличие от 294 - 340 кН в СБШ - 250 МН, что указывает на пропорциональную зависимости высоты ядра уплотнения от усилия подачи.

Библиографические источники

1. Директива европейского парламента и совета «об эффективности использования энергии и энергетических услугах, а также об отмене Директивы Совета 93/76/ЕЭС» от 5 апреля 2006 года 2006/32/ЕС [Текст]. - Введ. 2006-04-27. - 17 с.
2. Иродов, И. Е. Квантовая физика. Основные законы. [Текст] / И. Е. Иродов. - М. : Высш. шк., 1985. - 271 с.
3. Сульфид - щелочноземельный металл. [Электронный ресурс] /Большая энциклопедия нефти и газа. - Режим доступа : <http://www.ngpedia.ru/id492444p1.html>- 13.06.2011 г. - Загл. с экрана.

4. Классический вид таблицы Менделеева. Свойства химических элементов. [Электронный ресурс] / © ChemPort.Ru, ММII-ММХI. – Режим доступа : <http://www.chemport.ru/pertable/>- 13.06.2011 г. - Загл. с экрана.
5. Харламова М. В. Оптические свойства наночастиц γ -оксида железа в матрице мезопористого оксида кремния [Текст] / М. В. Харламова, Н. А. Саполетова, А. А. Елисеев, А. В. Лукашин // Журн. Письма в ЖТХ. - 2008. - Т. 34, №7. - С. 36-43.
6. Терентьев О. М. Синтез функционирования систем «Наружный источник – среда» [Текст] : дис. докт. техн. наук / О. М. Терентьев. - К., 2000. - 323 с.
7. Постоянная Дирака. [Электронный ресурс] / Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа : http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%8F%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%94%D0%B8%D1%80%D0%B0%D0%BA%D0%B0/- 13.06.2011 г. - Загл. с экрана.
8. СБШ 250 / Характеристики. [Электронный ресурс] / Станок буровый шарошечный. – Режим доступа : http://sbsh-250.ru/sbsh250/performance_attributes/- 2010 г. - Загл. с экрана.
9. Савельев, И. В. Курс общей физики, том I. Механика, колебания и волны, молекулярная физика [Текст] / И. В. Савельев. - М. : Наука, 1970. – 511 с.
10. Иродов, И. Е. Основные законы механики [Текст] / И. Е. Иродов. - М. : Высш. шк., 1985. – 250 с.
11. Китаев, В. В. Электрические машины. Часть 2. Машины переменного тока. [Текст] : учеб. пособие / В. В. Китаева, Ю. М. Корхова, В. К. Свирина ; под общ. ред. В. Е. Китаева ; М. : Высш. шк., 1978.- 184 с.
12. Материалы и покрытия. Материалы для пропускающей оптики. Кремний. [Электронный ресурс] / ЗАО "Тидекс" – Режим доступа : http://www.tydexoptics.com/ru/materials/for_transmission_optics/silicon/- 01.07.2012 г. - Загл. с экрана.
13. Лещева, О. А. Электронная структура и физико-механические свойства наноразмерных кластеров [Текст] / О. А. Лещева, И. В. Бажин // Журн. Фазовые переходы, упорядоченные состояния и новые материалы. – 02.03.2009. - С. 1-4.
14. Коэффициент Пуассона. [Электронный ресурс] / Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа : http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B8%D1%86%D0%B8%D0%B5%D0%BD%D1%82_%D0%9F%D1%83%D0%B0%D1%81%D1%81%D0%BE%D0%BD%D0%B0/- 20.07.2012 г. - Загл. с экрана.
15. Кремний. [Электронный ресурс] / © ChemPort.Ru, ММII-ММХI. – Режим доступа : <http://www.chemport.ru/pertable/elinfo.php?el=14/>- 13.06.2011 г. - Загл. с экрана.
16. Железо. [Электронный ресурс] / © ChemPort.Ru, ММII-ММХI. – Режим доступа : <http://www.chemport.ru/pertable/elinfo.php?el=26/>- 13.06.2011 г. - Загл. с экрана.
17. Кальций. [Электронный ресурс] / © ChemPort.Ru, ММII-ММХI. – Режим доступа : <http://www.chemport.ru/pertable/elinfo.php?el=20/>- 13.06.2011 г. -

- Загл. с экрана.
18. Алексеев, В. В. Автоматизированный привод станков шарошечного бурения [Текст] : учеб. / В. В. Алексеев, А. С. Соловьев ; Санкт-Петербургский горный институт. - СПб, 1997. - 49 с., ISBN 5-230-19609-2
 19. Демченко, И. И. Методические указания по выполнению курсовых проектов на тему «Выбор, обоснование и расчет буровых и выемочно-погрузочных машин» [Текст] : канд. техн. наук / И. И. Демченко. - Красноярск., 2003. - 34 с.
 20. Краткое описание электронного каталога деталей и сборочных единиц бурового станка СБШ-250 МНА-32. [Электронный ресурс] / Электронные и печатные каталоги деталей для СПЕЦТЕХНИКИ. – Режим доступа : http://katalogekg.narod.ru/e_sbsh250.html/- 14.05.2009 г. - Загл. с экрана.
- Планетарные редукторы. [Электронный ресурс] / © Copyright Детали Машин. – Режим доступа : http://detali-mashin-na-5.narod.ru/Planetarny_ye_reduktory.html/- 2010 г. - Загл. с экрана.