

3. Гольдфарб В. И. Основы теории автоматизированного геометрического анализа и синтеза червячных передач общего вида : дис. ... д-ра техн. наук. – Устинов, 1985. – 417 с.
4. Goldfarb, V. I., Trubachev, E. S., Glavatskikh, D. V. Spiroid gears with small gear ratios. Some problems of design and production // Proceedings of International Conference on Gears (October 2010, Düsseldorf, Germany). – Pp. 429-442.
5. Георгиев А. К., Гольдфарб В. И. Аспекты геометрической теории и результаты исследования спироидных передач с цилиндрическими червяками // Механика машин : сб. статей. – М. : Наука, 1971. – Вып. 31. – С. 70–80.
6. Трубочев Е. С., Орешин А. В. САПР спироидных передач // Информационная математика. – 2003. – № 1. – С. 159–165.
7. ОСТ-3-4290–79. Передачи спироидные цилиндрические. Метод расчета геометрических параметров / Разработчики: Георгиев А. К., Гольдфарб В. И., Езерская С. В.
8. Литвин Ф. Л. Теория зубчатых зацеплений. – М. : Наука, 1968. – 584 с.
9. Гольдфарб В. И. Некоторые результаты исследования кривизны взаимоогibaемых поверхностей в гипоидно-червячных (спироидных) передачах с цилиндрическими линейчатыми червяками // Механические передачи : сб. трудов. – Ижевск, 1971. – С. 135–140.
10. ГОСТ 22850–77. Передачи спироидные. Термины, определения и обозначения. – URL: <http://standartgost.ru/%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2%2022850-77> (дата обращения: 07.05.2014).
11. Гавриленко В. А. Зубчатые передачи в машиностроении (теория эвольвентных зубчатых передач). – М. : Mashgiz, 1962. – 532 с.
12. Гольдфарб В. И., Трубочев Е. С. Синтез спироидного станочного зацепления с цилиндрической червячной фрезой // Передачи и трансмиссии. – 2001. – № 1. – С. 35–43.

\*\*\*

M. O. Vereshchagin, PhD student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

#### Approach to designing cylindrical spiroid gears with small gear ratio

*Spiroid gears with small (less than 10) gear ratio design, influence of their parameters on geometrical-kinematic meshing factors research and rational selection of the noted parameters are studied in this article.*

**Keywords:** spiroid gear, gear design, geometrical restrictions

Получено: 23.04.14

УДК 621.833.3

В. И. Гольдфарб, доктор технических наук, профессор;  
 Е. С. Трубочев, доктор технических наук, профессор;  
 А. С. Кузнецов, кандидат технических наук, доцент;  
 А. А. Корнилов, инженер-конструктор

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НИЗКОСКОРОСТНЫХ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ СПИРОИДНЫХ РЕДУКТОРОВ

*Разработка и организация производства широкой гаммы низкоскоростных тяжело нагруженных спироидных редукторов трубопроводной арматуры предполагает обязательное проведение различного рода испытаний: приемо-сдаточных, которым подвергаются 100 % выпускаемых редукторов; периодических – для проверки и подтверждения соответствия выпускаемых редукторов предъявляемых к ним техническим требованиям; ресурсных; исследовательских – при создании новых образцов, модернизации, применении новых технологий, материалов, смазок. Приводятся некоторые результаты этих испытаний, наряду с описанием испытываемых редукторов, испытательного оборудования, программ испытаний.*

**Ключевые слова:** спироидный редуктор, исследования, испытания

#### Введение

Одним из широко распространенных видов технологического оборудования, применяемого во многих отраслях промышленности, в первую очередь в нефтяной, газовой, энергетической, химической и других, является трубопроводная арматура (ТПА), важнейшим элементом управления которой являются приводы, от надежности, безопасности работы, долговечности которых во многом зависят аналогичные важнейшие показатели как арматуры, так и трубопроводного транспорта в целом.

Появившиеся около 20 лет назад на рынке арматуростроения редукторы приводов ТПА со спироидными передачами [1–3 и др.] привлекли внимание

специалистов и заняли прочное место благодаря известным достоинствам последних [4, 5 и др.], среди которых важнейшими являются высокая нагрузочная способность, особенно в сравнительно короткие периоды действия повышенных вращающих моментов (в моменты страгивания и запираения запорного органа арматуры они могут кратковременно повышаться в 4–6 раз и более).

Эти достоинства обусловлены высоким коэффициентом перекрытия, благоприятными геометрическими и кинематическими характеристиками зацепления, возможностью надежно работать при изготовлении обоих звеньев передачи из стали. За указанный период в Институте механики ИжГТУ

имени М. Т. Калашникова разработана широкая гамма спироидных редукторов ТПА различного функционального назначения в диапазоне нагрузочных моментов от 300 Nm до 64 000 Nm и передаточных отношений от 6 до 118 в одноступенчатом исполнении и от 80 до 2 000 и более – в двухступенчатом. Серийное производство редукторов с использованием ряда технологических ноу-хау освоено на предприятии «Механик» (Ижевск).

Одним из обязательных этапов технологии изготовления редукторов являются их испытания, во многом являющиеся базой для совершенствования процесса их проектирования и поиска новых конструктивных решений. В статье приводятся некоторые результаты этих испытаний.

#### Объекты испытаний

Спироидные редукторы ТПА различных типоразмеров производятся в двух основных модификациях: четвертьоборотные, устанавливаемые на запорные узлы поворотного типа – шаровые краны или дисковые затворы, в которых рабочий запорный орган арматуры поворачивается на угол 90 градусов, и многооборотные, применяемые для управления запорными узлами поступательного типа – клиновыми и шибберными заслонками, в которых для полного открытия/закрытия необходимо совершить 20..100 оборотов ходовой гайки и, соответственно, выходного вала редуктора.

Разработаны типоразмерные ряды редукторов ТПА. Ряд четвертьоборотных редукторов включает 12 наименований, имеющих следующие значения максимальных нагрузочных моментов: 300 Nm, 1 000 Nm, 2 000 Nm, 2 700 Nm, 4 000 Nm, 6 000 Nm, 8 000 Nm, 11 200 Nm, 16 000 Nm, 20 000 Nm, 32 000 Nm, 64 000 Nm. Ряд многооборотных редукторов включает 4 типоразмера: 500 Nm, 1 000 Nm, 2 500 Nm, 10 000 Nm. Все указанные типоразмеры спироидных редукторов изготавливаются серийно.

Варианты конструктивных исполнений, реализуемых в каждом типоразмере четвертьоборотного

и многооборотного редукторов, приведены на рис. 1 и 2. Для реализации такого числа конструктивных исполнений оба типа редукторов выполнены по схожей конструктивной схеме и включают в себя (рис. 3) корпус 1, основание 2, входной фланец или крышку 3, переходник 4 (выходной вал для четвертьоборотных) или защитный колпак 5 (для многооборотных) и спироидную передачу, состоящую из узлов спироидных червяка 6 и колеса 7, а также другие детали вспомогательного назначения. Корпус является унифицированной базовой деталью, конструктивное исполнение которой не зависит от реализуемого передаточного отношения в спироидной передаче и исполнений на входном и выходном валах. Узел червяка (рис. 3, б и 4, б) включает в себя собственно сам спироидный червяк, размеры конца вала которого выполнены согласно исполнению на входном валу, и его подшипниковые опоры. Для четвертьоборотного редуктора применяется схема с двумя игольчатыми радиальными подшипниками 8 и 9, один из которых размещается в области зубчатого венца спироидного колеса, а второй – во входном фланце, и двумя (или одним) упорными шариковыми подшипниками качения 10. Для многооборотного редуктора применяется схема «враспор», в которой роль одного из упорных подшипников играет металлофторопластовое кольцо 11 толщиной не более 2,5 мм. Узел колеса (рис. 3, в и 4, в) содержит спироидное колесо и его опоры – одну радиальную 12 и одну (для многооборотных) или две (для четвертьоборотных) торцовых 13. Дополнительно четвертьоборотные редукторы могут снабжаться регулируемыми упорными болтами 14, ограничивающими угол поворота спироидного колеса, выполненного в этом случае в виде сектора, и связанного с ним выходного вала (переходника) в пределах от 80 до 120 градусов, а многооборотные редукторы – указателем 15 числа оборотов (до 120 оборотов) выходного вала.

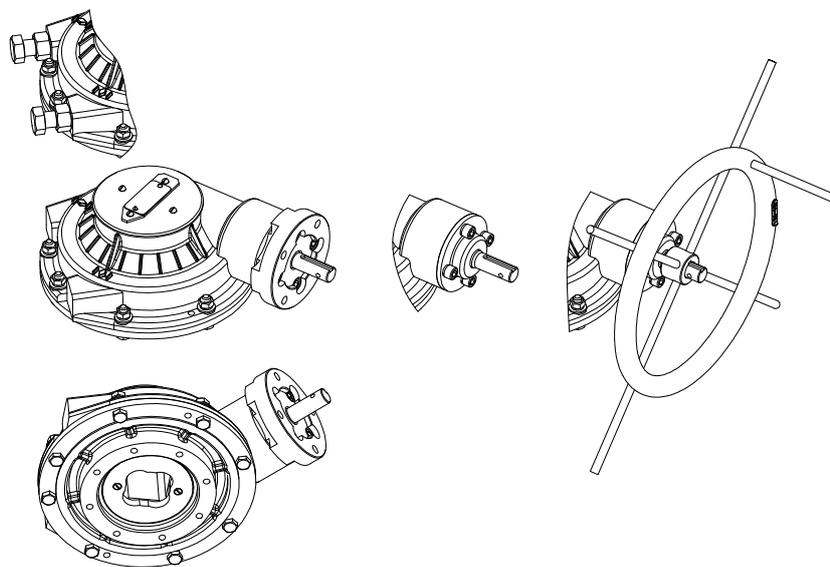


Рис. 1. Конструктивные исполнения четвертьоборотных редукторов

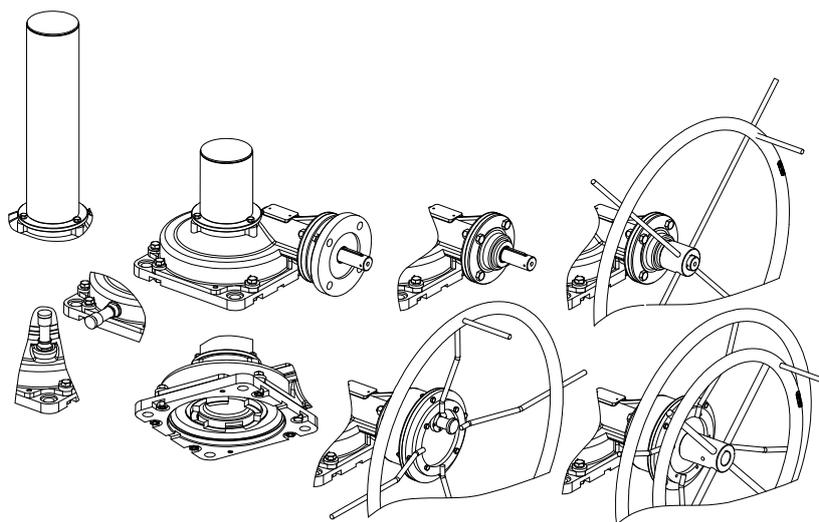
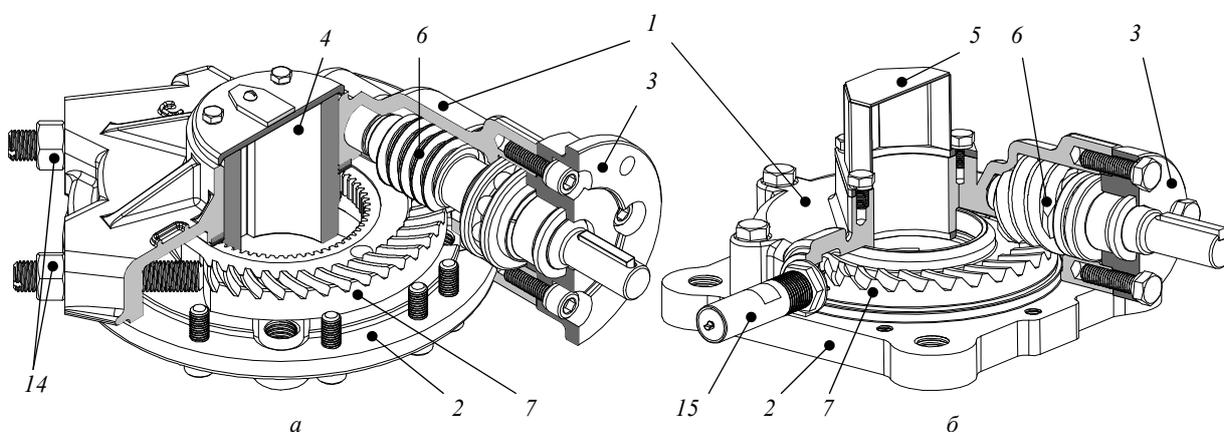
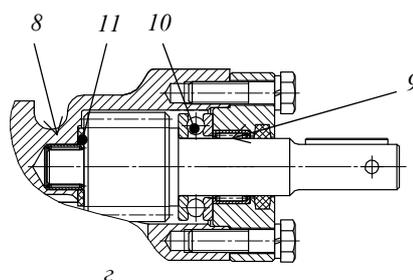
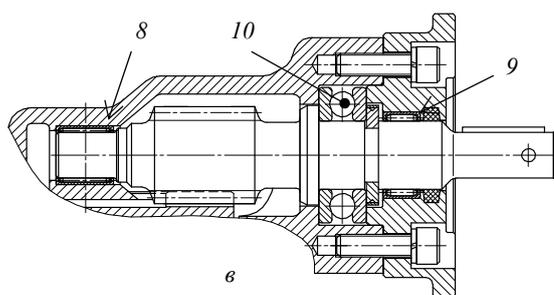


Рис. 2. Конструктивные исполнения многооборотных редукторов



Разрез по оси червяка



Разрез по оси колеса

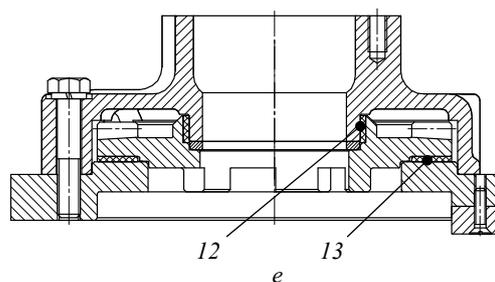
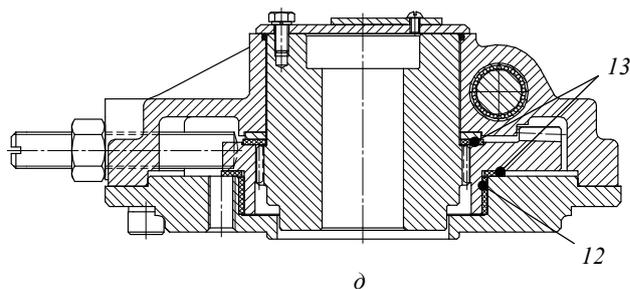


Рис. 3. Общий вид конструкции четвертьоборотных (а, в, д) и многооборотных (б, г, е) спиральных редукторов ТПА

Описанная конструкция спироидных редукторов обеспечивает высокую технологичность изготовления деталей, простоту их сборки и регулировки, а также их сравнительно малые массогабаритные показатели при условии обеспечения требуемых нагрузочных характеристик и реализации большого числа вариантов передаточных отношений и конструктивных исполнений, потребных для конечного потребителя.

#### Виды испытаний

Спироидные редукторы ТПА подвергаются различным испытаниям: приемочным, приемосдаточным, периодическим, типовым и исследовательским.

##### Приемочные испытания

Испытаниям этого вида подвергаются опытные образцы редукторов каждого нового типоразмера или модифицированные редукторы имеющихся типоразмеров перед внедрением их в серийное производство. Программа этих испытаний состоит из следующих стадий.

1. Ресурсные испытания – испытания под нагрузкой при нормальной температуре окружающей среды ( $20^{\circ} \pm 3^{\circ} \text{C}$ ). Частота вращения входного вала устанавливается равной 100 об/мин. При этом в соответствии с типовыми диаграммами нагружения многооборотной и четвертьоборотной арматуры в течение сравнительно короткого промежутка осуществляется нагружение редуктора максимальным вращающим моментом, а в течение оставшегося периода – нагружение вращающим моментом, пониженным на 20–30 % относительно максимального для четвертьоборотных и на 70–80 % – для многооборотных редукторов. Так, для многооборотных редукторов количество полных оборотов выходного вала в период нагружения максимальным вращающим моментом не превышает 5, а количество полных оборотов при пониженном моменте не менее 30. Для четвертьоборотных редукторов пропорции несколько иные: поворот выходного вала на  $20^{\circ}$  при максимальном вращающем моменте и на  $70^{\circ}$  – при номинальном. Один цикл нагружения состоит из включения редуктора в одном направлении вращения (открытие), паузы, продолжительность которой втрое превышает продолжительность включения (ПВ 25 %), включения в противоположном направлении вращения (закрытие), паузы, аналогичной предыдущей. Продолжительность испытаний для каждого типоразмера соответствует заявленному ресурсу редуктора: 12 000 циклов для четвертьоборотных и 8 000 циклов для многооборотных.

2. Испытаниям при пониженной и повышенной температурах окружающей среды ( $-60^{\circ} \pm 3^{\circ} \text{C}$  и  $+50^{\circ} \pm 3^{\circ} \text{C}$ ) подвергается один представитель типоразмерного ряда, прошедший 90 % от общего числа циклов нагружения при нормальной температуре окружающей среды (см. п. 1). На каждый из двух предельных температурных режимов приходится по 10 % циклов нагружения от общего расчетного ресурса редуктора (1 200 и 800 циклов для четвертьоборотных и многооборотных редукторов соответственно). В остальном режим нагружения практически

не отличается от первой стадии испытаний. Испытания проводятся в специальной камере, обеспечивающей необходимый температурный уровень.

3. Испытания статическим перегрузочным вращающим моментом проводятся для проверки прочности деталей редуктора в двух вариантах нагружения:

1) вращающий момент создается нагрузочным устройством испытательного стенда в положении выходного вала, соответствующем положению «Закрыто» для четвертьоборотных и в произвольных положениях выходного вала для многооборотных редукторов;

2) второй вариант реализуется лишь для четвертьоборотных редукторов (рис. 4) – вращающий момент замыкается на корпусе редуктора в результате взаимодействия сектора спироидного колеса с механическими упорами в положениях «Открыто» и «Закрыто».

В последнем случае, поскольку непосредственный контроль нагрузочного момента на выходном валу организовать затруднительно, предварительно устанавливают тарировочную зависимость между входным и выходным статическими моментами редуктора, а в процессе испытаний контролируют лишь первый из моментов.



Рис. 4. Сектор колеса в положениях «Закрыто» (слева) и «Открыто» (справа)

4. Испытания пыли- и влагозащиты (герметичности) редуктора осуществляются в соответствии с требованиями стандарта ИЕС-952 для класса защиты IP66.

##### Приемо-сдаточные испытания

Эти испытания являются элементом контроля готовой продукции, им подвергаются 100 % производимых изделий – это является необходимым условием исключения выпуска продукции, не обеспечивающей требуемых нагрузочных характеристик. Программа испытаний состоит в обкатке редуктора без нагрузки и под паспортной нагрузкой. Количество циклов нагружения обычно невелико – от 20 до 40. При этом контролируются вращающие моменты на входном и выходном валах; частота вращения выходного вала; наличие/отсутствие посторонних шумов при работе редуктора; наличие/отсутствие вибраций при передаче вращения и нагрузки; надежность соединения деталей (отсутствие их податливости).

##### Периодические испытания

Целью этих испытаний является регулярное подтверждение паспортных технических характеристик в течение всего периода его серийного производства. Для редукторов ТПА типовая программа таких испытаний, которые проводятся для каждого типораз-

мера редуктора не реже одного раза в три года, практически не отличается от программы периодических испытаний.

*Типовые испытания*

Эти испытания проводятся после внесения существенных изменений в конструкцию и (или) технологию изготовления редуктора. Объем и порядок испытаний выбираются в зависимости от внесенных изменений и, как правило, соответствуют программе приемочных или периодических испытаний.

*Исследовательские испытания*

В отличие от предыдущих, исследовательские испытания не являются необходимым звеном производственно-технологического процесса изготовления редукторов. Однако эти испытания являются основным источником для получения достоверной информации о технических возможностях редуктора, путях совершенствования его конструкции и технологии изготовления, выявления его слабых мест, выявления влияния новых материалов и смазок на его основные эксплуатационные показатели и получения других важных и интересных в научном и практическом отношении результатов. Именно ряд результатов этого вида испытаний описан далее.

**Испытательное оборудование**

В ходе всех испытаний необходимо поддерживать режимы нагружения, близкие к реальным режимам эксплуатации редукторов ТПА – низкие скорости вращения валов, высокие нагрузочные моменты, изменяющиеся за один цикл по известному

закону. При этом должна обеспечиваться оценка КПД редукторов и других контролируемых параметров. Эти требования определили конструкцию испытательных стендов и блоков управления ими.

Испытательные стенды выполнены по разомкнутой схеме нагружения и имеют в своем составе (рис. 5): мотор-редуктор (источник движения), имеющий частотное регулирование частоты вращения выходного вала в диапазоне 20...180 об/мин; испытываемый редуктор, устанавливаемый на кронштейн, имитирующий фланец запорного узла арматуры; нагружающий тормоз ленточного или дискового типов. В большинстве стендов вращающий момент выходного вала испытываемого редуктора на пути к тормозу снижается в 5...30 раз с помощью мультипликатора. Всего имеется четыре типоразмера стендов с диапазонами нагрузочных моментов: от 200 Нм до 1 000 Нм, 1 000–6 000 Нм, 6 000–20 000 Нм, 20 000–64 000 Нм. Измерения нагрузочных моментов на входном и выходном валах испытываемых редукторов выполняются с помощью электронных датчиков или механических динамометров. Управление стендами осуществляется с помощью специальных пультов, имеющих автоматический и ручной режим работы и возможность организации компьютерного централизованного управления. Последнее позволяет реализовать реальную схему нагружения редуктора, когда за один цикл нагрузка на выходном валу изменяется согласно характерному режиму работы запорной арматуры.

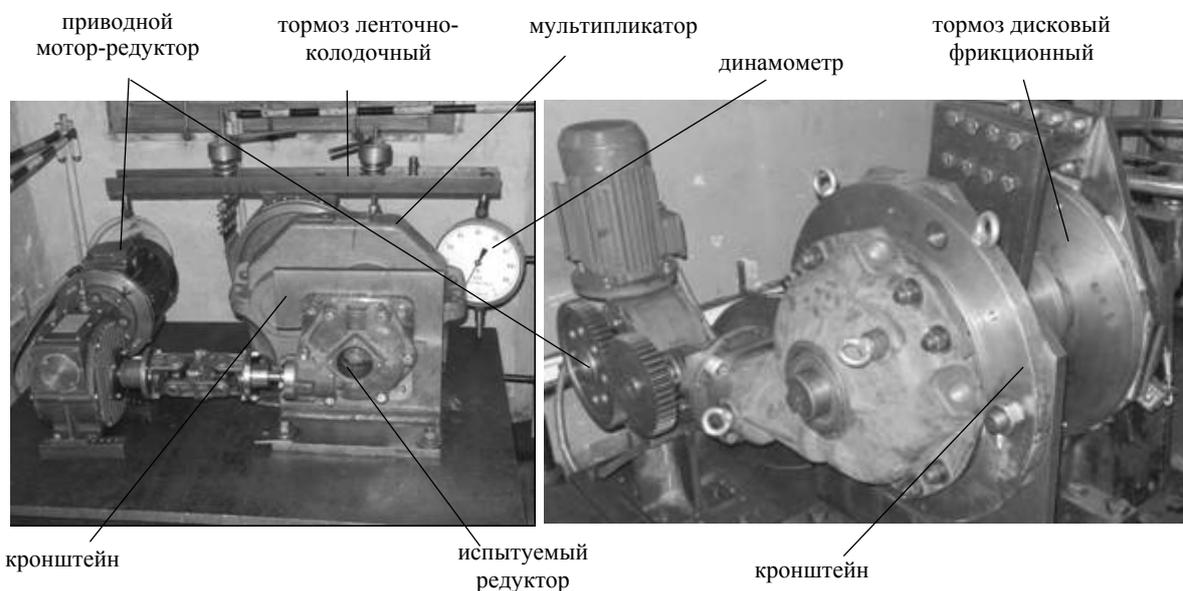


Рис. 5. Стенды для испытаний спиральных редукторов ТПА

**Некоторые результаты исследовательских испытаний**

Указанные испытания являются, как правило, самыми продолжительными и разнообразными. Целями этих испытаний является установление влияния различных конструкторско-технологических решений, материалов, смазок на эксплуатационные показатели редукторов и проверка адекватности приня-

тых математических моделей для расчета этих показателей.

Ниже приведены результаты испытаний, позволяющие оценить прочность и предельное состояние деталей редукторов, влияние изменения конструкции опор и некоторых видов смазки на работоспособность и КПД редукторов.

### Оценка прочности спироидных редукторов и их деталей

Данным испытаниям подвергается каждый типоразмер спироидных редукторов. В этом случае ставится задача экспериментального поиска предельных значений нагрузок, при которых происходит разрушение (усталостное или статическое) какой-либо детали или узла редуктора. Такая постановка задачи позволяет сформулировать основные направления совершенствования конструкций редукторов.

Практика испытаний показывает, что для установления слабых мест в конструкции достаточно выполнять:

- статическое нагружение редуктора для обоих вариантов испытаний, приведенных для третьей стадии приемочных испытаний, вращающим моментом, плавно увеличиваемым от максимального значения до значения, при котором происходит разрушение одной из деталей;

- испытания редуктора при вращении входного вала и различных режимах, отличающихся сочетаниями величин вращающего момента на выходном валу, частоты вращения входного вала и продолжительностью включения.

Так, например, статические испытания первых опытных образцов четвертьоборотных редукторов РЗА-С-2000 (РЗА – Редуктор Запорной Арматуры, С – спироидный одноступенчатый) и РЗА-С2-20000 (С2 – спироидный двухступенчатый), основные параметры которых отражены в табл. 1, выявили недостаточную прочность корпусных деталей в области установки упорных болтов положения «Открыто» для редуктора РЗА-С2-20000, а также недостаточную прочность упорных болтов редуктора РЗА-С-2000. Результаты отражены в табл. 1 и на рис. 6 и 7.



Рис. 7. Разрушения корпусной детали редуктора РЗА-С2-20000

Далее приведем некоторые результаты исследовательских испытаний на примере опытных образцов редукторов четвертьоборотных – РЗА-С-4000 и РЗА-С2-20000 и многооборотных – РЗАМ-С-2500 и РЗАМ-С-10000, основные технические характеристики которых приведены в табл. 2. Испытания проводились с целью отработки конструктивных решений (материалов деталей, методов их термического упрочнения, схем расположения и видов опор и др.) описанных выше типоразмерных рядов и, по сути, соответствовали этапу I приемочных испытаний. Часть результатов испытаний приведена на рис. 8, а число циклов, при котором наступило разрушение

Таблица 1. Основные технические характеристики и результаты испытаний опытных образцов редукторов РЗА-С-2000 и РЗА-С2-20000

Характеристики	Модель редуктора		
	РЗА-С-2000	РЗА-С2-20000	
$a_w$ (межосевое расстояние), мм	60	60/108	
$d_{i2}/d_{e2}$ (внутренний/наружный диаметры колеса), мм	138/175	255/350	
$i_{12}$ (передаточное отношение)	46	280	
$T_{2max}$ (максимальный вращающий момент на выходном валу редуктора), Нм	2 000	20 000	
$T_{2пред}$ (расчетное значение предельного статического вращающего момента на выходном валу), Нм	4 000	30 000	
$m$ (масса), кг	17	135	
Фактически полученный $T_{2пред}$ при испытаниях	в положении «Открыто», Нм	3 860	26 500
	в положении «Закрыто», Нм	4 100	31 500
Слабый элемент	Упорные болты	Корпус	
Минимальный запас прочности	0,90	0,88	

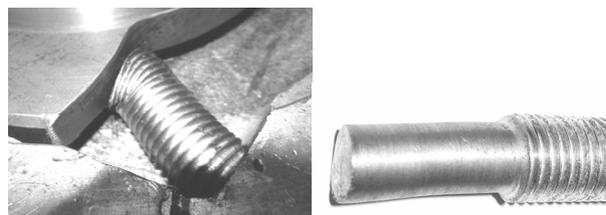


Рис. 6. Повреждение упорных болтов опытного образца редуктора РЗА-С-2000

элементов конструкции редукторов, – в табл. 2. В частности, в испытанных опытных образцах редукторов появились и катастрофически развились такие разрушения, как:

- разрушение горловой части корпуса редуктора РЗА-С2-20000 (рис. 8, а);

- разрушение тела спироидного червяка редуктора РЗАМ-С-10000 (рис. 8, в) в тех случаях, когда он имеет консольное закрепление в опорах;

- разрушение зубьев и витков спироидной передачи редуктора РЗА-С-4000, связанное с нерациональным подбором материалов и видов их химико-термической обработки (рис. 8, г и д);

Таблица 2. Технические характеристики опытных образцов редукторов

Редуктор	РЗА-С-4000	РЗА-С2-20000	РЗАМ-С-2500	РЗАМ-С-10000
$a_w$ , мм	70	60/108	70	93
$d_{f2}/d_{e2}$ , мм	165/213	255/350	165/216	230/310
$i_{12}$	65	280	19,5	40
$T_{2max}$ , Нм	4 000	20 000	2 500	10 000
$T_{2пред}$ , Нм	8 000	30 000	3 750	14 000
$m$ , кг	29	135	32	70
Слабый элемент	Витки червяка	Корпус	Витки червяка	Тело червяка
Число циклов до разрушения	480...780	1 100...1 560	4 500...6 000	280...470

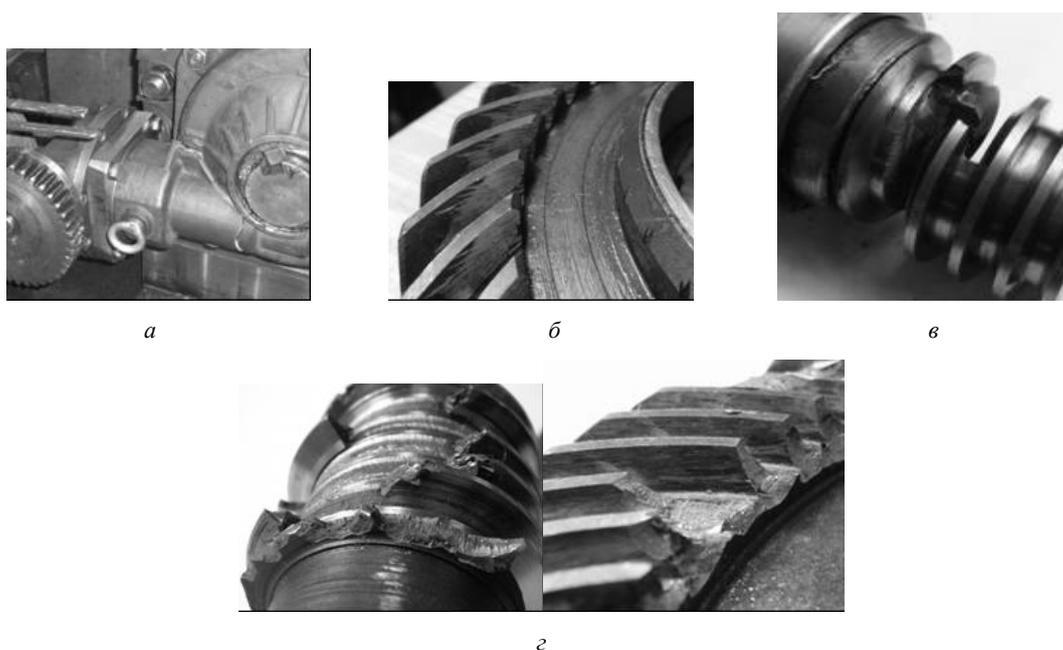


Рис. 8. Результаты испытаний на прочность: а – разрушение горловой части корпуса редуктора РЗА-С2-20000; б – смещение пятна контакта на носок зуба в передаче редуктора РЗАМ-С-2500; в – разрушение тела консольного червяка редуктора РЗАМ-С-2500; г – разрушение зубьев спиральной передачи редуктора РЗА-С-4000

– поверхностные разрушения (задиры, поверхностные сколы на кромках) на зубьях колес из-за чрезмерной концентрации нагрузки (уменьшения суммарного пятна контакта) в передаче редуктора РЗАМ-С-2500 (рис. 8, б) из-за совместного негативного влияния упругих деформаций колеса при его зубообработке и его объемных деформаций при химико-термической обработке.

Результаты испытаний на прочность стали основанием, например, для следующих доработок конструкций и технологий производства редукторов:

– утолщение стенок корпуса редукторов с  $T_{2max}$  свыше 8 000 Нм в областях горловины и упорных болтов на 20–30 % и усиление корпусов ребрами;

– увеличение диаметра резьбы упорных болтов редуктора РЗА-С-2000 с М12 до М16 с одновременным повышением класса прочности с 5.8 до 8.8;

– придание поверхности сектора колеса, взаимодействующей с упором, скругленной формы для исключения радиального нагружения упорного болта;

– применение объемной закалки (вакуумная закалка с последующим низким отпуском на твердость 45–50 HRC) для спиральных колес в сочетании с

нитроцементацией, закалкой и низким отпуском для червяков (поверхностная твердость 58–62 HRC, балл цементитной сетки не выше 4, балл мартенсита – не выше 4);

– исключение консольных схем размещения спиральных червяков;

– снижение деформаций закрепления спиральных колес при зубообработке;

– компенсация деформаций спиральных колес в результате ХТО и приложения сил при работе передачи соответствующей геометрической модификацией боковых поверхностей зубьев.

*Исследование вариантов конструкции опор*

Разумеется, в ходе проектирования редукторов стремятся к минимизации размеров узлов и их стоимости, как следствие – соответствующих характеристик редуктора в целом. Однако в случае компактных тяжело нагруженных спиральных редукторов ТПА имеются два обстоятельства, которые затрудняют окончательную оценку работоспособности сравниваемых решений традиционными инженерными методами на этапе проектирования: А) сравнительно большие силовые деформации элементов

конструкции и Б) применение нетиповых, но обладающих удачными компоновочными свойствами решений (см., например, схемы подшипниковых опор колеса на рис. 3, 9, 10). Это делает актуальным соответствующие экспериментальные исследования на реальных изделиях.

Одной из важных тем таких исследований стало сравнение подшипников качения и скольжения узла колеса. В последнем варианте исследованы два подварианта пар трения термически упрочненного колеса – непосредственно по корпусу и с применением втулок и колец, сделанных из металлофторопластовой полосы, состоящий из стальной основы (низкоуглеродистая сталь), слоя спеченной порошковой

бронзы (0,2–0,35 мм) инфильтрованной и покрытой слоем PTFE (политетрафторэтилен с дисульфидом молибдена – 0,01–0,04 мм).

Испытания показали, что применение металлофторопластовых опор скольжения дает положительный эффект и в отношении КПД (рис. 11), и в отношении массы редуктора (ок. 10 %). Сравнительно высокий уровень потерь в опорах качения может быть объяснен большой степенью нагруженности подшипников в сочетании, как было выше сказано, с большими деформациями элементов конструкции и, как следствие, перекосами колец подшипников качения.

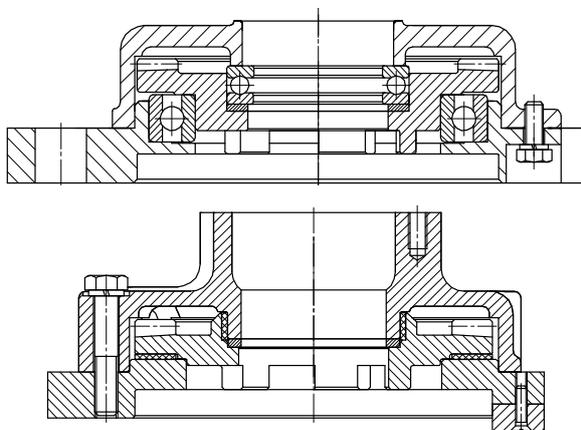


Рис. 9. Конструктивная схема многооборотного редуктора с опорами качения (вверху) и опорами скольжения (внизу)

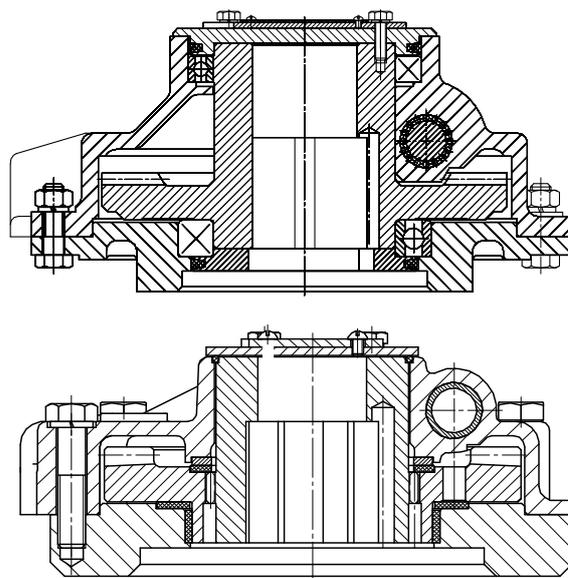


Рис. 10. Конструктивная схема четверть-оборотного редуктора с опорами качения (вверху) и опорами скольжения (внизу)

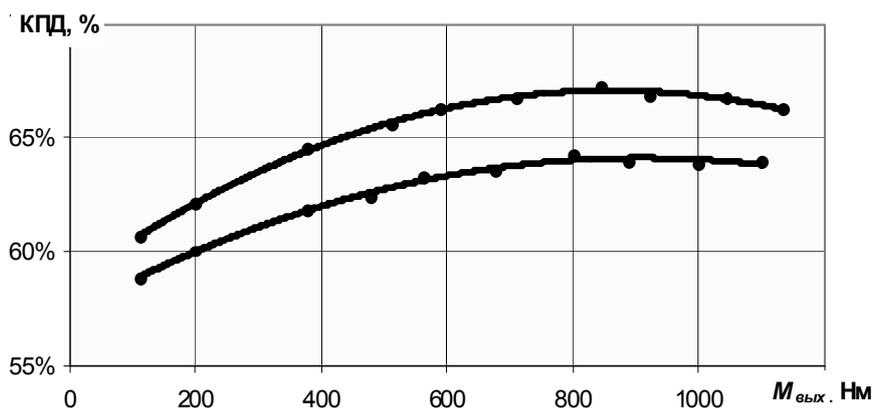


Рис. 11. Результат испытаний редуктора РЗАМ-С-1000 с опорами скольжения (металлофторопласт, верхний график) и качения (нижний график) на колесах

Также полученные результаты позволили сделать следующие выводы:

– на нагрузочную способность и ресурс металлофторопластовых радиальных опор (втулок) и величину потерь в них решающее влияние оказывают погрешности формы (седлообразность, овальность

и т. п.), которые следует ограничивать величиной 0,05 мм;

– в процессе эксплуатации опоры пластически деформируются (до 0,1 мм); это происходит в начальный период испытаний (20–50 циклов нагружения), далее процесс не прогрессирует; при этом не-

обходимо стремиться к минимальному зазору при сборке узла;

– в принятой нетиповой схеме (рис. 10) перекося колеса определяется зазором в торцевых опорах; поскольку этот зазор увеличивается в ходе работы редуктора, при сборке его также необходимо уменьшать до 0...0,05 мм;

– микронеровности стальных поверхностей, взаимодействующих с металлофторопластовыми опорами, выглаживаются (рис. 12), поэтому при окончательной механической обработке этих поверхностей следует считать достаточным параметр шероховатости  $R_a$  3,2.

На рис. 13 показаны результаты сравнительных испытаний редукторов РЗА-С-2000 (13, а) и РЗА-С-1000 (13, б), имеющих следующие варианты сочетаний скольжения в опорах стального объемно упрочненного колеса и смазки (цифры на рис. 13 соответствуют этим вариантам):

1) по металлофторопласту, смазка ЦИАТИМ-201 (с антизадирными присадками – специально об этом будет сказано ниже);

2) по шлифованной ( $R_a$  0,8) стали, смазка ЦИАТИМ-201;

3) по шлифованной ( $R_a$  0,8) стали, смазка ЦИАТИМ-201 с добавлением 20 % (по объему) гранулированного порошкового фторопласта (флуралит);

4) по чугуно ( $R_a$  1,6) смазка ЦИАТИМ-201 с добавлением 20 % (по объему) гранулированного порошкового фторопласта (флуралит).

Результаты показывают, что:

а) добавление флуралита дало некоторое повышение КПД редуктора;

б) применение металлофторопласта во всех случаях дало больший эффект.

*Исследование влияния состава смазки спироидного зацепления*

Оценка влияния марки и состава смазок на КПД редуктора осуществлялась на примере РЗА-С-1000. Рассматриваемые в испытаниях варианты составов консистентных смазок приведены в табл. 3 (номера вариантов соответствуют обозначениям на рис. 14).

В отношении противоизносных и противозадирных свойств все смазки показали удовлетворительные результаты на паспортных нагрузках редукторов. В отношении КПД и, соответственно, нагрева редуктора худшей оказалась смазка «Фиол Ультра Т» (рис. 14). В результате испытаний по совокупности характеристик лучшими были признаны смазки «Циатим 201» (№ 1) и «Томфлон М360» (№ ?). Из них более низкой ценой обладает смазка № 1 – «Циатим 201» с добавлением 5 % дисульфида молибдена и 10 % графита.



Рис. 12. Профилограмма поверхности торцевой опоры колеса после контакта с металлофторопластовой опорой скольжения

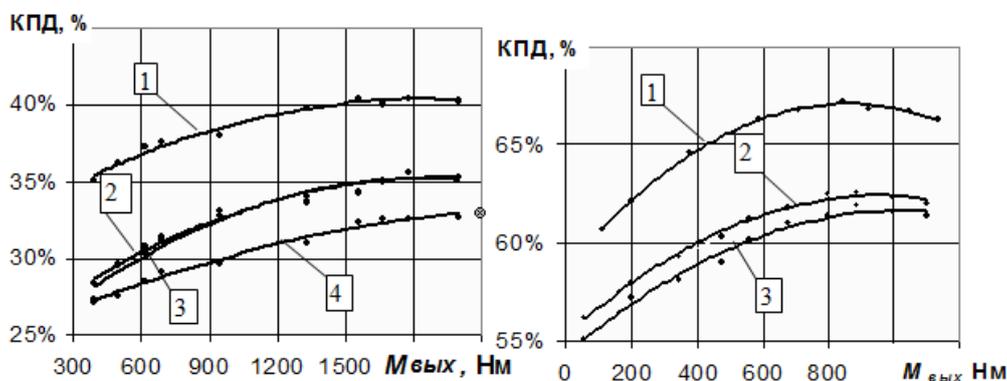


Рис. 13. Результаты испытаний редукторов с различными опорами скольжения на колесе и смазками

Таблица 3. Варианты составов консистентных смазок

№ п/п	Название	$t, ^\circ\text{C}$	Описание
1	«Фиол Ультра Т» ТУ 0254-003-15238210-04	( $-60^\circ\text{C} \dots +140^\circ\text{C}$ )	Полусинтетическая смазка с заявленными антизадирными и износостойкими свойствами
2	«ЛИТА» ТУ 0254-009-80388604-2008	( $-50^\circ\text{C} \dots +90^\circ\text{C}$ )	Литиевая нефтяная смазка с добавлением 5 % массовой доли дисульфида молибдена ( $\text{MoS}_2$ ) и 10 % мелкодисперсного графита
3	«Томфлон М360» ТУ 0254-017-1235252-04	( $-60^\circ\text{C} \dots +110^\circ\text{C}$ )	Полусинтетическая PTFE смазка с добавлением 15 % мелкодисперсного графита
4	«Циатим 201» ГОСТ 6267-74	( $-60^\circ\text{C} \dots +90^\circ\text{C}$ )	Литиевая нефтяная смазка с добавлением 5 % массовой доли дисульфида молибдена ( $\text{MoS}_2$ ) и 10 % мелкодисперсного графита
5	«Томфлон М360» ТУ 0254-017-1235252-04	( $-60^\circ\text{C} \dots +110^\circ\text{C}$ )	Полусинтетическая PTFE смазка с добавлением 5 % массовой доли дисульфида молибдена ( $\text{MoS}_2$ ) и 10 % мелкодисперсного графита

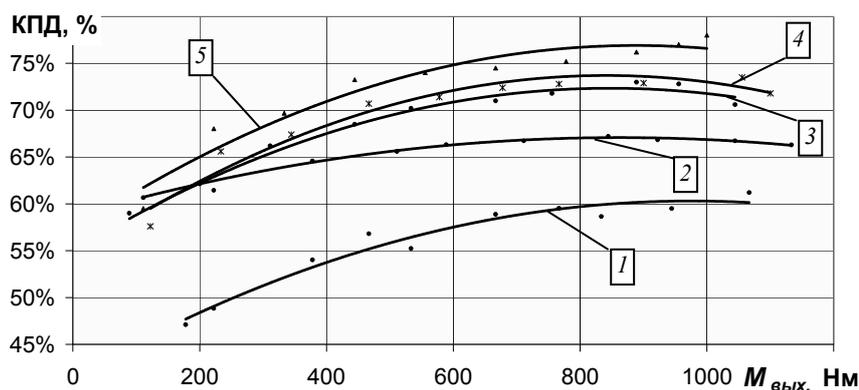


Рис. 14. Результаты испытаний редуктора РЗАМ-С-1000 с различными смазками

### Заключение

В настоящей статье описаны некоторые результаты испытаний низкоскоростных тяжело нагруженных спироидных редукторов, применяемых в приводах трубопроводной арматуры. Эти испытания непрерывно продолжаются, являются неперенной и очень важной составляющей процесса создания и совершенствования редукторов. Необычность условий эксплуатации редукторов (низкие скорости, высокие нагрузки, широкий диапазон температур, при которых они должны надежно работать) и практически полное первоначальное отсутствие информации о методологии их проектирования определили высокую ответственность указанных испытаний и необходимость их проведения в большом объеме.

За прошедшие более 15 лет разработки, производства, испытаний, успешной промышленной эксплуатации спироидных редукторов ТПА создан надежный и достоверный инструментарий их проектирования, получены важные данные по рациональному выбору вариантов конструкции, материалов, смазок, технологии изготовления и сборки, накоплен уникальный опыт их эксплуатации и, наконец, убедительно доказано, что применение спироидных пе-

редач для указанных условий эксплуатации не просто целесообразно, но и является одним из наилучших решений с технической и экономической точек зрения.

### Библиографические ссылки

1. Гольдфарб В. И., Макаров В. В., Маслов В. М. Перспективы развития приводной техники для трубопроводной арматуры // Арматуростроение. – 2005. – № 5. – С. 43–45.
2. Goldfarb, V. I., Glavatskikh, D. V., Trubachev, E. S., Kuznetsov, A. S. State of design and Production of Spiroid Gearboxes for Pipeline Valves // The 1st International Conference on Power Transmissions: ICPT'2011, Xi'an, China, Oct. 25th-29th, 2011 : Proc.
3. Спироидные редукторы трубопроводной арматуры : моногр. / В. И. Гольдфарб [и др.] ; ред. В. И. Гольдфарб. – М. : Вече, 2011. – 222 с.
4. Nelson, W. D. Spiroid Gearing // Machine Design. – 1961. No. 3. – Pp. 136-144; No. 4. – Pp. 93-100; No. 5. – Pp. 165-171.
5. Goldfarb, V. I. What we know about spiroid Gears // Proceedings of the International Conference on Mechanical Transmissions: Sept. 26-30, 2006, Chongqing University, Chongqing, P.R. China. – Science Press, 2006. – Vol. 1. – Pp. 19-26.

\*\*\*

V. I. Goldfarb, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University  
 E. S. Trubachev, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University  
 A. S. Kuznetsov, PhD in Engineering, Ass. Prof., Kalashnikov Izhevsk State Technical University  
 A. A. Kornilov, Engineer, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Experimental investigations of low-speed heavy-loaded spiroid gearboxes

*Development and industrial engineering of a wide range of low-speed heavy-loaded spiroid gearboxes for pipeline valves implies the obligatory execution of various types of their testing. This paper presents certain essential results of these investigations along with description of tested gearboxes, testing equipment and testing schedules.*

**Keywords:** spiroid gearbox, testing, investigations

Получено: 25.04.14

УДК 621.001.2

Э. Г. Зарифуллина, аспирант;  
О. В. Малина, доктор технических наук, профессор  
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## ПОДХОД К СОЗДАНИЮ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНФИГУРАТОРА

*Освещены структура и функционал конфигуратора класса машиностроительных объектов. Особое внимание уделяется описанию классификатора – информационной модели конфигуратора и подходам к его созданию.*

**Ключевые слова:** САПР, конфигурирование, классификатор, информационная модель конфигуратора

Задачи конфигурирования могут быть сформулированы в двух постановках и решаться на разных этапах жизненного цикла изделия. Во-первых, конфигурирование как разработка новой конструкции изделия путем изменения прототипа. Во-вторых, конфигурирование, как оценка возможности замены компоновочных элементов конструкции аналогами. Конфигурирование первого типа в практике автоматизированного конструирования называют конструированием «сверху – вниз». Задача конфигуратора в этом случае состоит в том, чтобы определить, как измененные исходные данные на проектирование сочетаются со свойствами существующего прототипа, выявить, какая возможна модификация, после чего выполнить все возможные модификации и предоставить проектировщику множество возможных конструкторских решений.

Конфигурирование второго типа выполняется, когда изменяются не технические требования к изделию, а возникает необходимость замены детали или узла аналогом с фиксированным набором характеристик, отличающихся от характеристик исходного элемента. В этом случае следует оценить возможность замены и условия, при которых замена возможна (например, замена еще одной детали или узла).

Автоматизированный конфигуратор – система, позволяющая дать оценку существующей конструкции, присвоить ей уникальный код и предложить новую конфигурацию объекта, то есть его работоспособную структуру в терминах предметной области.

Базовыми модулями конфигуратора являются, во-первых, классификатор группы объектов, например, спиридных редукторов, во-вторых, база правил, фиксирующая правила конфигурирования, и, в-третьих, функциональный модуль, позволяющий на основании классификатора и правил конфигурирования решать задачу конфигурирования конструкции изделия машиностроения.

В качестве информационной базы конфигуратора выступает классификатор. Классификатором в дан-

ном случае мы называем систему упорядоченного хранения данных о предметной области, которая позволяет систематизировать как конструктивные элементы, встречающиеся в проектных решениях, так и их возможные характеристики.

Созданию классификатора предшествует разработка обобщенной модели класса объектов, этапами которой являются:

- описание отдельных проектных решений в терминах предметной области;
- обобщение полученных данных;
- дополнение модели, то есть расширение классификатора.

Выполнение каждого из указанных этапов сталкивается со специфическими трудностями:

- на этапе описания отдельных вариантов необходимо обеспечить структурную идентичность описания, что решается путем описания последующих конструкций путем модификации ранее описанных;
- на этапе обобщения данных и расширения классификатора необходим учет необязательности элементов и характеристик, поскольку классификатор в системе конфигуратора – это исходное множество признаков для переборного алгоритма, являющегося аппаратом синтеза в процессе конструирования.

Необязательность, то есть возможное отсутствие функциональных элементов и признаков, регулируется добавлением значения отсутствия к характеристикам самой необязательной вершины и всех ее потомков – Null. При таком подходе итоговое описание каждой конструкции включает в себя по одному значению каждого признака классификатора, вследствие чего имеет одинаковую длину для всех вариантов. Неполное описание признака классификатора, в частности потеря значения «отсутствие признака», приведет к системной ошибке, в результате которой из итогового множества вариантов исчезнут возможные сочетания. Рассмотрим простейший пример. Классификатор содержит два признака со следую-