

УДК 621.22-546

DOI: 10.22213/2413-1172-2022-1-38-43

## Совершенствование конструкции распределителя газомеханического волнообразователя

**М. Н. Каракулов**, доктор технических наук, профессор, Воткинский филиал ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

**Д. В. Старшев**, кандидат технических наук, доцент, Воткинский филиал ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

**Е. С. Коробейникова**, студент, Воткинский филиал ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*В современной промышленности актуален вопрос повышения надежности работы того или иного механизма, особенно когда работа проходит в агрессивной среде. Нефтяные и газодобывающие компании как никто другой заинтересованы в решении этих проблемы. В статье приведен пример решения одной из проблем современной промышленности – совершенствование конструкции распределителя газомеханического волнообразователя. Такие устройства применяются для генерации волны деформации гибких элементов газогидравлических двигателей и управления работой этих устройств. Применение газогидравлических двигателей с газомеханическими волнообразователями обусловлено возможностью их работы с использованием потенциальной энергии, транспортируемой по газопроводу среды, что позволяет использовать их в удаленных регионах с низким уровнем развития инфраструктуры, например, в районах Крайнего Севера.*

*Малоизученным остается вопрос определения момента срабатывания распределительного механизма и упрощение его конструкции. Рассмотрены варианты конструкции распределителя газомеханического волнообразователя опытного образца плунжерного газогидравлического двигателя. Охарактеризованы положительные и отрицательные стороны использования в приводе распределителя дополнительных реверсирующих механизмов. В качестве путей совершенствования предложены варианты модификации геометрии золотника распределителя, выраженной добавлением пазов, благодаря чему происходит срабатывание устройства с использованием давления транспортируемой среды. Расчеты показали, каким образом необходимо расположить пазы, как определить угол их смещения для обеспечения срабатывания. Получена зависимость, позволяющая определить величину вращающего момента, возникающего на валу золотника распределителя. Установлено, что на величину вращающего момента значительное влияние оказывает угол смещения пазов золотника.*

**Ключевые слова:** газомеханический волнообразователь, механизм, золотник, конструкция, распределитель.

### Введение

Конструкция золотниковых распределительных узлов газомеханического волнообразователя плунжерной передачи может иметь несколько модификаций [1, 2]. В плунжерном газогидравлическом двигателе (ПГД) (рис. 1) применяется золотник 1 с диаметрально противоположным симметричным расположением полостей как высокого, так и низкого давления. Такая конструкция для работы привода должна оснащаться дополнительным исполнительным механизмом, придающим ему вращательное движение (патент 2330196 РФ). Однако применение такого механизма уменьшает надежность срабатывания всего привода. Необходимо признать, что такая конструкция обладает также рядом преимуществ, например, упрощается реверсирование работы привода, которое обеспечивается только изменением направления вращения золотника. Поэтому в слу-

чае применения ПГД в качестве исполнительного механизма в часто срабатывающих приводах, не требующих высокой надежности, можно рекомендовать именно такую конструкцию распределительного устройства.

В том случае, когда механизм срабатывает редко, например, в приводах отсечной арматуры, для увеличения надежности срабатывания можно использовать конструкцию золотника 2 с пазами высокого давления 3, смещенными в противоположных окружных направлениях (рис. 1).

Для реверсирования такого привода применяются дополнительные механические устройства, например, зубчатые передачи с паразитными колесами. Увеличение надежности в этом случае достигается за счет удаления из конструкции дополнительного привода распределителя, а сам распределитель приводится в движение за счет потенциальной энергии транспортируе-

мой среды (патент 2340813 РФ). Одним из путей решения задачи повышения надежности срабатывания распределителя является моди-

фикация геометрии зубчатого зацепления ПГД [3–10], но в некоторых случаях это является невозможным.

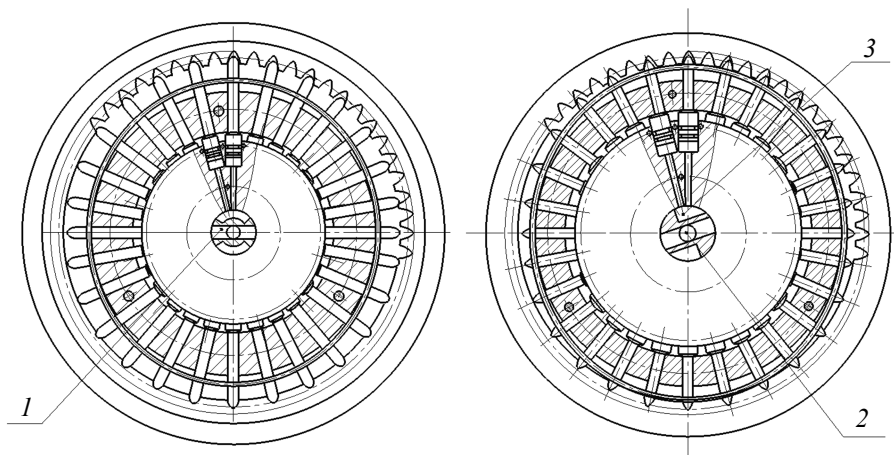


Рис. 1. Варианты конструкции золотника ПГД: 1 – золотник с диаметрально противоположным симметричным расположением полостей высокого и низкого давления; 2 – с пазами высокого давления 3, смещенными в противоположных окружных направлениях

Fig. 1. PGD spool: 1 - spool with a diametrically opposite symmetrical arrangement of high and low pressure cavities; 2 - with high pressure slots 3 offset in opposite circumferential directions

**Цель исследования** – разработка конструкции распределителя, позволяющей повысить надежность срабатывания узла волнообразования без использования дополнительных механизмов.

**Используемые подходы**

Для достижения целей исследования можно использовать проверенный математический аппарат силового анализа тела, находящегося под действием внешних силовых факторов. Путем дальнейшего математического моделирования рассматриваемой системы можно сделать выводы о возможности достижения поставленных целей.

**Материалы и методы**

Для увеличения крутящего момента на валу золотника изготавливаются пазы под определенным углом со смещением относительно оси симметрии (рис. 2).

Технологически данная операция легко осуществима. Для этого при изготовлении пазов заготовку золотника (или инструмент) располагают под углом  $\gamma$  к оси симметрии пазов низкого давления (выхлопа) [11, 12].

**Анализ силового взаимодействия между золотником и рабочим телом**

Крутящий момент на валу в этом случае создается за счет получения давления силы  $S = phl$  с плечом относительно центра золотника [13–16] (рис. 2):

$$h_s = 0,5d_3 - 0,5h/\cos \gamma, \quad (1)$$

где  $d_3$  – диаметр золотника;  $h$  – высота паза;  $p$  – давление в магистрали;  $l$  – длина паза золотника.

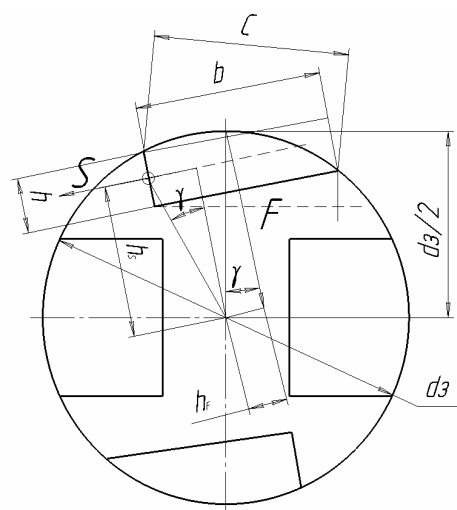


Рис. 2. Расчетная схема к определению крутящего момента на валу распределителя

Fig. 2. Calculation scheme for determining the torque on the distributor shaft

При отсутствии смещения пазов силу  $S$  пытаются уравновесить сила

$$F = pbl,$$

где  $b$  – ширина паза,  $с$  плечом

$$h_F = 0,5d_3 \sin \gamma. \quad (2)$$

Тогда с учетом (1) и (2) результирующий момент, создаваемый на валу золотника, определяется из выражения [17, 18]

$$M_3 = 0,5pl(d_3(h - b \sin \gamma) - h^2/\cos \gamma). \quad (3)$$

Одним из важных конструктивных размеров золотника является размер  $c$  (см. рис. 2), который определяет размер активной зоны зацепления плунжерной передачи ПГД, поэтому его рекомендуется назначать исходя из рассчитанной величины этой зоны [19, 20].

При рассчитанном  $\varphi_t$  и конструктивно назначенном диаметре золотника величина  $c$  может быть определена из зависимости

$$c = d_3 \sin(0,5\varphi_t).$$

При этом ширина и высота паза высокого давления могут быть выражены через заданное расстояние  $c$  и угол  $\gamma$  (см. рис. 2) как

$$b = c \cos \gamma, h = c \sin \gamma.$$

Следовательно, выражение (3) можно представить как функцию, зависящую от аргумента  $\gamma$ .

Тогда задача определения требуемых геометрических параметров паза из условия создания необходимого момента сводится к решению неравенства относительно  $\gamma$ :

$$M_3(\gamma) \geq [M_3], \quad (4)$$

где  $[M_3]$  – требуемый момент на валу золотника, необходимый для приведения его во вращение.

Следовательно, с учетом (3) и (4) для решения задачи необходимо решить уравнение

$$[M_3] = 0,5pl \left( d_3 c (\sin \gamma - \cos \gamma \sin \gamma) - \frac{c^2 \sin^2 \gamma}{\cos \gamma} \right). \quad (5)$$

### Анализ результатов

По данным Кареева В. Н. и Крахина О. И. (1975), момент, приложенный к валу золотника распределителя, должен составлять не менее 10 Нм для преодоления момента трения в уплотнительных узлах. Расчеты по зависимости (5) показывают, что для ПГД при  $p = 4,0$  МПа,  $d_3 = 30$  мм,  $\varphi_t = 40^\circ$  и  $l = 40$  мм момент на валу золотника принимает величину, не достаточную для надежного срабатывания распределителя (рис. 3).

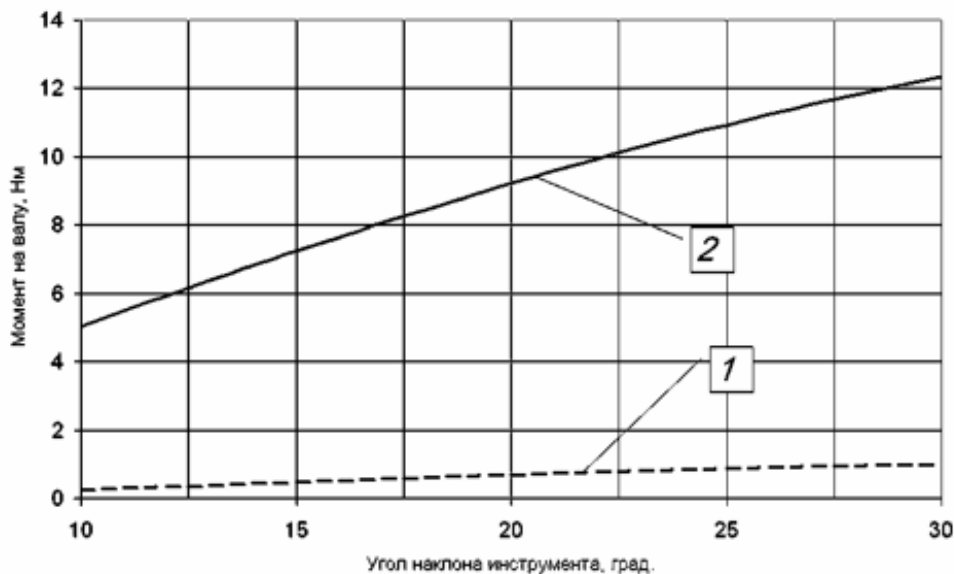


Рис. 3. Зависимость  $M_3(\gamma)$ : 1 – без смещения паза; 2 – с применением смещения

Fig. 3. Dependence  $M_3(\gamma)$ : 1 - without the shift of the groove; 2 - with the application of the shift

Для увеличения надежности рекомендуется компенсировать момент силы  $F$ . Для этого пазы высокого давления необходимо сместить в противоположных направлениях относительно оси симметрии пазов низкого давления в сторону действия силы  $S$  на расстояние  $h_F$  относительно

первоначального положения. В этом случае плечо силы  $F$  теоретически примет значение, равное нулю (рис. 4).

Применив данное изменение конструкции, как показывают расчеты с помощью уравнения (5), к валу золотника, при прочих равных

условиях прикладывается крутящий момент, достаточный для его надежного срабатывания (см. рис. 4).

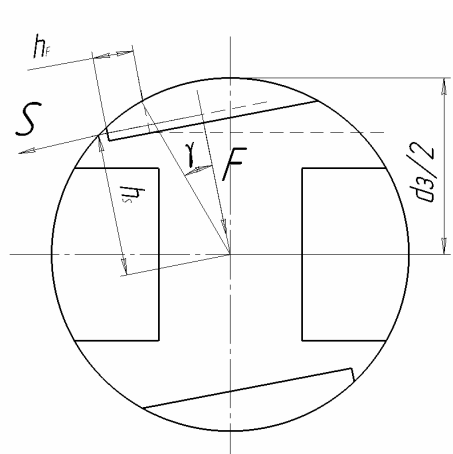


Рис. 4. Золотник со смещенным пазом высокого давления

Fig. 4. The spool with shift of the groove

### Выводы

Повышение надежности работы распределителя ПГД путем увеличения величины вращающего момента, приложенного к валу золотника, возможно с использованием изменения геометрии его пазов высокого давления. Так, предложенные конструктивные изменения золотника опытного образца ПГД позволили увеличить вращающий момент на его валу в 10...12 раз, что говорит о перспективности использования полученных решений в устройствах аналогичного назначения.

### Библиографические ссылки

1. Кареев В. Н. Пневмомеханический генератор волновой передачи. Волновые передачи. М.: СТАНКИН, 1970. 240 с.
2. Кареев В. Н., Крахин О. И. Плунжерный пневмомеханический генератор волновых передач. Волновые передачи. М.: СТАНКИН, 1975. 256 с.
3. Gravagno F., Mucino V. and Pennestri E. The Mechanical Efficiency of Harmonic Drives: A Simplified Model. *J. of Mechanical Design*, 2020, pp. 1-17. DOI: 10.1115/1.4048412.
4. Hu Q., Liu Z., Cai L., Yang C., Zhang T. and Wang G. Research on Prediction Method of Transmission Accuracy of Harmonic Drive. *International Power Transmission and Gearing Conference*, 2019, vol. 10, pp. 54-58. DOI: 10.1115/DETC2019-97214.
5. Koptavy S., Yudell, A. and Van de Ven J. Design of a Crank-Slider Spool Valve for Switch-Mode Circuits With Experimental Validation. *J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 2017, no. 140, pp. 141-146. DOI: 10.1115/1.4038537.
6. Maiti R. and Roy A. A Wave Generator of New Concept for Flex Gear of Harmonic Drive With Pure Involute Tooth Gear Pairs. *8<sup>th</sup> International Power Transmission and Gearing Conference*, 2017, vol. 6, pp. 70-78. DOI: 0.1115/DETC2000/PTG-14458.
7. Schmidt L., Liedhegener M., Bech M. and Andersen T. Dynamic Analysis and Characterization of Conventional Hydraulic Power Supply Units. *BATH/ASME 2016 Symposium on Fluid Power and Motion Control*, 2016, pp. 75-79. DOI: 10.1115/FPMC2016-1756.
8. Xie F., Zhang J., Han Y., Wu C., Zhao Z. and Zhan M. Three-Dimensional Spatial Meshing Quality Pre-Control of Harmonic Drive Based on Double-Circular-Arc Tooth Profile. *International Power Transmission and Gearing Conference*, 2019, vol. 10, pp. 194-198. DOI: 10.1115/DETC2019-97228.
9. Yu S., Zhifei G., Gaotong L. and Qiang L. Design of measurement and control system for the efficiency test of spacecraft harmonic drive mechanism. *8<sup>th</sup> International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE)*, 2017, pp. 110-115. DOI: 10.1109/ICMAE.2017.8038735.
10. Pennestri E. and Valentini P. Kinematics and Enumeration of Combined Harmonic Drive Gearing. *J. of Mechanical Design*, 2016, no. 137, pp. 111-116. DOI: 10.1115/1.4031590.
11. Boyce-Erickson G., Fulbright N., Voth J., Chase T., Li P. and Van de Ven J. Mechanical and Hydraulic Actuation Strategies for Mainstage Spool Valves in Hydraulic Motors. *ASME/BATH 2019 Symposium on Fluid Power and Motion Control*, 2019, pp. 106-110. DOI: 10.1117/09596518JSCE1037.
12. Васин С. А., Плахотникова Е. В. Методика расчета величины крутящего момента настройки электропривода в системе электроприводной запорной арматуры с прямолинейным перемещением запорного органа // Записки Горного института. 2018. № 232. С. 407.
13. Силовой анализ двухпоточных гидромеханических передач / В. М. Шарипов, Ю. С. Щетинин, С. В. Гаев, О. В. Трошкин // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 2. С. 35-41.
14. Гудков В. В., Дементьев М. Р. Сравнительные характеристики волновых зубчатых и фрикционных передач // Евразийское научное объединение. 2017. Т. 1, № 10 (32). С. 36-39.
15. Ан И. К., Беляев Д. В. Силовые характеристики в волновой передаче с промежуточными телами // Главный механик. 2017. № 12. С. 40-42.
16. Кинематика и особенности расчета волновой зубчатой передачи / Г. А. Тимофеев, О. В. Егорова, М. В. Самойлова, И. И. Григорьев // Современное машиностроение. Наука и образование. 2016. № 5. С. 250-263. DOI: 10.1872/MMF-2016-25.
17. Капитонов А. В., Сасковец К. В., Касьянов А. И. Планетарная радиально-плунжерная передача с улучшенными эксплуатационными характеристиками // Вестник Белорусско-Российского университета. 2017. № 3 (56). С. 27-34. DOI: 10.53078/20778481-2017-3-27.

18. Капитонов А. В., Сасковец К. В., Касьянов А. И. Компьютерное 3d-моделирование конструкций и кинематических параметров планетарных малогабаритных передач // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2016. № 11. С. 34–40.

19. Сасковец К. В., Капитонов А. В., Лебедев М. В. Новые конструкции и методы оценки точности планетарных радиально-плунжерных передач // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. 2019. № 1 (76). С. 3–9.

20. Башта Т. М. Гидропривод и гидропневмоавтоматика. М.: Машиностроение, 1972. 320 с.

### References

1. Karev V.N. *Pnevmomechanicheskij generator volnovoj peredachi. Volnovye peredachi* [Pneumatic-mechanical wavetransmission generator. Wave transmissions]. Moscow, STANKIN Publ., 1970, 240 p. (in Russ.).

2. Kareev V.N., Krakhin O.I. *Plunzhernyj pnevmomechanicheskij generator volnovyh peredach. Volnovye peredachi* [Plungerpneumo-mechanical generator of wave transmissions. Wave transmissions]. Moscow, STANKIN Publ., 1975, 256 p. (in Russ.).

3. Gravagno F., Mucino V. and Pennestri E. The Mechanical Efficiency of Harmonic Drives: A Simplified Model. *J. of Mechanical Design*, 2020, pp.1-17. DOI: 10.1115/1.4048412.

4. Hu Q., Liu Z., Cai L., Yang C., Zhang T. and Wang G. Research on Prediction Method of Transmission Accuracy of Harmonic Drive. International Power Transmission and Gearing Conference, 2019, vol. 10, pp. 54-58. DOI: 10.1115/DETC2019-97214.

5. Koktavy S., Yudell, A. and Van de Ven J. Design of a Crank-Slider Spool Valve for Switch-Mode Circuits With Experimental Validation. *J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 2017, no. 140, pp. 141-146. DOI: 10.1115/1.4038537.

6. Maiti R. and Roy A. A Wave Generator of New Concept for Flex Gear of Harmonic Drive With Pure Involute Tooth Gear Pairs. 8<sup>th</sup> International Power Transmission and Gearing Conference, 2017, vol. 6, pp. 70-78. DOI: 0.1115/DETC2000/PTG-14458.

7. Schmidt L., Liedhegener M., Bech M. and Andersen T. Dynamic Analysis and Characterization of Conventional Hydraulic Power Supply Units. BATH/ASME 2016 Symposium on Fluid Power and Motion Control, 2016, pp. 75-79. DOI: 10.1115/FPMC2016-1756.

8. Xie F., Zhang J., Han Y., Wu C., Zhao Z. and Zhan M. Three-Dimensional Spatial Meshing Quality Pre-Control of Harmonic Drive Based on Double-Circular-Arc Tooth Profile. International Power Transmission and Gearing Conference, 2019, vol. 10, pp. 194-198. DOI: 10.1115/DETC2019-97228.

9. Yu S., Zhifei G., Gaotong L. and QiangL. Design of measurement and control system for the efficiency test of spacecraft harmonic drive mechanism. 8<sup>th</sup> International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE), 2017, pp. 110-115. DOI: 10.1109/ICMAE.2017.8038735.

10. Pennestri E. and Valentini P. Kinematics and Enumeration of Combined Harmonic Drive Gearing. *J. of Mechanical Design*, 2016, no. 137, pp. 111-116. DOI: 10.1115/1.4031590.

11. Boyce-Erickson G., Fulbright N., Voth J., Chase T., Li P. and Van de Ven J. Mechanical and Hydraulic Actuation Strategies for Mainstage Spool Valves in Hydraulic Motors. ASME/BATH 2019 Symposium on Fluid Power and Motion Control, 2019, pp. 106-110. DOI:10.1177/09596518JSCE1037.

12. Vasin S.A., Plakhotnikova E.V. [Electric drive setting torque calculation method in electric drive shut-off valve system with rectilinea displacement of the valve closure]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2018, no. 232, pp. 407-409 (in Russ.).

13. Sharipov V.M., Shhetinin Ju.S., Gaev S.V., Troshkin O.V. [Force analysis of two-line hydromechanical transmissions]. *Traktoryisel'hozmashiny*, 2017, no. 2, pp. 35-41 (in Russ.).

14. Gudkov V.V., Dement'ev M.R. [Comparative characteristics of wave gear and friction gears]. *Evrazijskoe Nauchnoe O b#edinenie*, 2017, vol. 1, no. 10, pp. 36-39 (in Russ.).

15. An I.K., Beljaev D.V. [Force characteristics in wave transmission with intermediate bodies]. *Glavnyj mehanik*, 2017, no. 12, pp. 40-42 (in Russ.).

16. Timofeev G.A., Egorova O.V., Samojlova M.V., Grigor'ev I.I. [Kinematics and features of the calculation of the wave gear transmission]. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie*, 2016, no. 5, pp. 250-263 (in Russ.). DOI: 10.1872/MMF-2016-25.

17. Kapitonov A.V., Saskovec K.V., Kas'janov A.I. [Advanced Planetary Radial Plunger Gear]. *Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta*, 2017, no. 3, pp. 27-34 (in Russ.). DOI: 10.53078/20778481-2017-3-27.

18. Kapitonov A.V., Saskovec K.V., Kas'janov A.I. [Computer 3D modeling of structures and kinematic parameters of small planetary gears]. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Serija V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki*, 2016, no. 11, pp. 34-40 (in Russ.).

19. Saskovec K.V., Kapitonov A.V., Lebedev M.V. [New designs and methods for assessing the accuracy of planetary radial-plunger gears]. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. P.O. Suhogo*, 2019, no. 1, pp. 3-9 (in Russ.).

20. Bashta T.M. *Gidroprivod i gidropnevmomatika* [Hydraulic drive and hydro pneumatic automation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972, 320 p. (in Russ.).

## Improving the Design of the Gas-Mechanical Wave Generator Distributor

*M.N. Karakulov*, DSc in Engineering, Professor, Votkinsk branch of Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*D.V. Starshev*, PhD in Engineering, Associate Professor, Votkinsk branch of Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*E.S. Korobeynikova*, Student, Votkinsk branch of Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*In modern industry, the issue of improving the reliability of a particular mechanism is relevant, especially when the work takes place in an aggressive environment. Oil and gas companies are interested than anyone else in solving these problems. This article will give an example of solving one of the problems of modern industry, this is the improvement of the design of the distributor of the gas mechanical waveguide. Such devices are used to generate a deformation wave of flexible elements of gas-hydraulic engines and control the operation of these devices. The use of gas-hydraulic engines with gas-mechanical wave generators is due to their ability to work using the potential energy of the substance transported through the gas pipeline, which allows them to be used in remote regions with a low level of infrastructure development, for example, in the Far North.*

*A little-studied issue is the determination of the moment of distribution mechanism straining and simplification of its design. Variants of the design of the distributor of the gas-mechanical wave generator of the prototype plunger gas-hydraulic engine are considered. The positive and negative aspects of using additional reversing mechanisms in the distributor drive are given. A considered improvements of distributor spool geometry modification are realized by addition of grooves, so that the device is triggered using the pressure of the transported medium. The calculations showed the ways of grooves positioning and determination of their angle displacement to ensure operation. A relation has been obtained that makes it possible to determine the magnitude of the torque that occurs on the shaft of the distributor spool. It has been established that the displacement angle of the spool slots has a significant effect on the magnitude of the torque.*

**Keywords:** gas-mechanical, wave generator, mechanism, spool, design, distributor.

Получено 10.01.2022

### Образец цитирования

*Каракулов М. Н., Старшев Д. В., Коробейникова Е. С.* Совершенствование конструкции распределителя газомеханического волнообразователя // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 1. С. 38–43. DOI: 10.22213/2413-1172-2022-1-38-43.

### For Citation

*Karakulov M.N., Starshev D.V., Korobeynikova E.S.* [Improving the Design of the Gas-Mechanical Wave Generator Distributor]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2022, vol. 25, no. 1, pp. 38-43 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2022-1-38-43.