

## РАЗРАБОТКА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С УПРУГИМИ РЕГУЛИРУЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

© 2023

**Э. Г. Берестовицкий** доктор технических наук, ведущий научный сотрудник;  
АО «Концерн «НПО «Аврора», г. Санкт-Петербург;  
[berest40@mail.ru](mailto:berest40@mail.ru)

**Ю. А. Гладилин** кандидат технических наук, доцент, начальник лаборатории,  
главный акустик;  
АО «Концерн «НПО «Аврора», г. Санкт-Петербург;  
[gladil\\_01@mail.ru](mailto:gladil_01@mail.ru)

**Н. В. Пялов** кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник;  
АО «Концерн «НПО «Аврора», г. Санкт-Петербург;  
[afx7cu@mail.ru](mailto:afx7cu@mail.ru)

В настоящее время при создании исполнительных механизмов глубоководных аппаратов и иных технических средств имеется тенденция размещать элементы гидравлического привода вне прочного корпуса. Подобные системы гидравлики подвержены риску разгерметизации, что ведёт к попаданию рабочей жидкости (минеральных масел или синтетических рабочих жидкостей) в морскую воду и обводнению морской забортной водой рабочей жидкости системы гидравлики. Попадание рабочей жидкости в морскую воду ведёт к нарушению экологической безопасности и демаскирует подводный объект. Попадание морской воды во внутренние полости системы гидравлики может привести к их повреждению и потребовать в дальнейшем длительного и дорогостоящего ремонта. Одним из возможных способов устранения перечисленных последствий разгерметизации забортных гидравлических систем является создание гидравлического оборудования с использованием морской воды в качестве рабочей жидкости. Самая дешёвая конструкция такого нормативного тела – это использование отключенных клапанов с упругими элементами управления трубчатыми. Были проведены исследования, подтверждающие возможность создания малошумных гидравлических регуляторов с эластичными регулируемыми элементами. Эти регуляторы имеют лучшие виброакустические характеристики, чем дроссели золотникового типа с аналогичными рабочими характеристиками. Было подтверждено сохранение рабочих характеристик регуляторов с упругими регулируемыми элементами при работе с рабочими жидкостями различной вязкости (жидкость ПГВ, минеральное масло, водопроводная вода). Было подтверждено сохранение работоспособности гидравлического регулятора с эластичными регулируемыми элементами при проведении длительных испытаний. В результате проведённых работ получен научно-технический задел, позволяющий создать прибор с эластичными регулируемыми элементами, имеющий расходно-перепадную характеристику, отвечающую современным требованиям, виброакустическую характеристику, отвечающую перспективным требованиям, и имеющий достаточную надёжность при работе на чистых рабочих жидкостях.

*Вибрация; дроссельная заслонка; регулятор давления; характеристика потока; эластичный регулирующий элемент*

---

**Цитирование:** Берестовицкий Э.Г., Гладилин Ю.А., Пялов Н.В. Разработка гидравлических устройств с упругими регулируемыми элементами // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 2. С. 33-41. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-2-33-41

### Введение

В 2015-2018 годах АО «Концерн НПО «Аврора» совместно с Институтом акустики машин при Самарском аэрокосмическом университете выполняли научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию регулирующей аппаратуры с эластичными элементами дросселирования.

Необходимость выполнения указанной работы обусловлена следующими причинами:

1) поиск конструкции дроссельного элемента, обеспечивающего работу с засорённой рабочей средой, включая использование в качестве морской среды морской забортной воды;

2) поиск конструкции дроссельного элемента, обеспечивающего снижение уровней вибрации и воздушного шума.

Рассмотрение созданных в настоящее время устройств с упругими регулируемыми элементами показало, что их использование может значительно снизить требования к чистоте рабочей жидкости и её составу, включая использование в качестве рабочей жидкости морской водой. Учитывая, что дроссельная зона образуется упругими элементами со значительной податливостью, также можно ожидать снижения уровней вибрации и шума [1].

### **Элементы дроссельного регулятора с упругими частями. Выбор дроссельных элементов с эластичными узлами**

Многолетний опыт создания и эксплуатации органов регулирования золотникового типа позволяет утверждать, что надёжное функционирование приборов возможно только с использованием рабочей среды с высокой степенью очистки. Однако имеющийся опыт эксплуатации гидравлической аппаратуры свидетельствует о недостаточной степени очистки рабочей среды систем гидравлики объектов различного назначения. Особенно это актуально для устройств, находящихся в непрерывной работе. В настоящее время в подобных устройствах применяются рабочие жидкости типа ПГВ или минеральные масла. Для механизмов, используемых периодически, характерно зарастание зазоров в золотниках, облитерация рабочих жидкостей, а при наличии морской воды в рабочей жидкости – коррозия рабочих поверхностей золотниковых пар.

В настоящее время предприняты попытки создания дроссельных элементов, работающих на морской воде, связанные с применением новых материалов для изготовления золотниковых пар. Например, в МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2013-2014 гг. [1] был получен опыт применения в качестве материалов керамики (стабилизированный оксид циркония) и искусственного сапфира (оксид алюминия). Опытная эксплуатация макетов проводилась с использованием специально очищенной морской воды без добавления загрязнений, влияющих на износ.

Поиск более простой в изготовлении конструкции органа регулирования привёл к идее использовать клапаны с эластичными регулирующими элементами трубчатой формы. В настоящее время такие устройства применяются для регулирования расхода различных рабочих сред, в том числе водопесчаных смесей и сыпучих грузов. Имеющийся опыт создания малозумной гидравлической аппаратуры свидетельствует о сложности дальнейшего снижения уровней вибрации и шума с использованием в составе гидроаппаратуры дроссельных элементов типа золотник. Выполненные ранее работы [2] показали, что использование в составе гидроаппаратуры эластичных узлов обеспечивает большую податливость дроссельных элементов, что должно обеспечивать снижение уровня вибрации и шума.

### **Исследование гидравлических регуляторов с упругими трубчатыми элементами**

С 2015 года проводились исследования для создания гидравлических регуляторов для морской воды с использованием эластичных регулирующих элементов.

Эти работы предусматривали:

- анализ существующих конструкций приборов систем управления с целью выявления узлов трения, работающих в различных средах и в широком диапазоне рабочих температур, влияющих на технический ресурс и эксплуатационные характеристики;
- поиск конструкции эластичных регулирующих элементов гидравлических приборов, позволяющих эффективно регулировать параметры рабочей среды с малыми уровнями вибрации и шума;
- поиск материалов и покрытий, обеспечивающих необходимые антифрикционные, антиадгезионные и антикоррозионные свойства поверхностей деталей;
- разработку математических моделей узлов приборов, приборов в целом и процессов их функционирования;
- разработку макетов узлов гидравлических приборов;
- изготовление макетов узлов приборов и их испытания, в том числе с проверкой уровней вибрации и шума, а также сохранения работоспособности в ходе ресурсных испытаний.

В ходе выполнения работ был выполнен поиск и выбор материалов для эластичных регулирующих элементов, проработаны возможные конструкции подобных узлов, в том числе с внутренним и наружным пережимом, а также с их комбинацией (рис. 1).

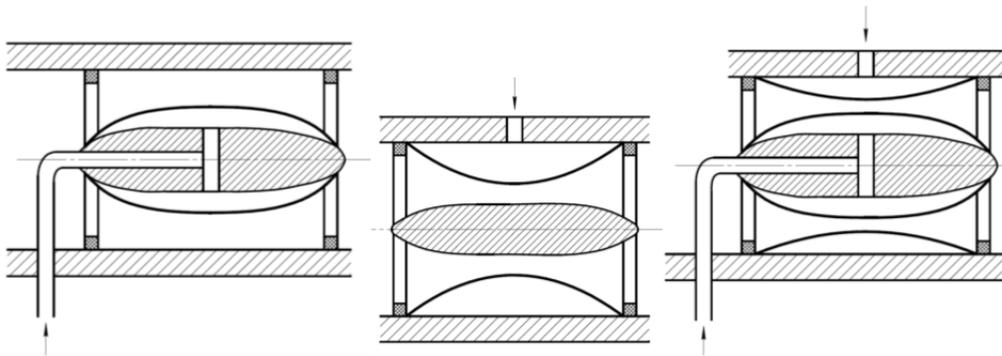


Рис. 1. Структурные схемы эластичных узлов регулирования

На рис. 1 представлены схемы эластичных узлов регулирования посредством внутреннего пережима (слева), внешнего пережима (по центру) и комбинированная схема. В отличие от существующих конструкций подобных узлов перемещение упругого элемента осуществлялось рабочей жидкостью или газом. Для проверки принятых решений были выполнены расчёты численным методом, а также изготовлены макеты узлов (рис. 2) и проведены их испытания с целью уточнения характеристик.



Рис. 2. Макет сборки внутренней оболочки с трубкой 20,0×3,0 ГОСТ 5496-78

В ходе выполнения работ осуществлено:

- проработка конструкции эластичного трубчатого элемента (ЭТЭ) для гидравлических дросселей Ду 0, Ду 32;
- 3D-моделирование ЭТЭ;
- проработка структурной схемы электрогидравлического прибора с использованием регулирующего устройства ЭТЭ;
- изготовление макета регулятора давления и его испытание с определением расходно-перепадной и виброакустической характеристик.

Изготовленный макет регулятора давления Ду10 имеет конструкцию, представленную на рис. 3.

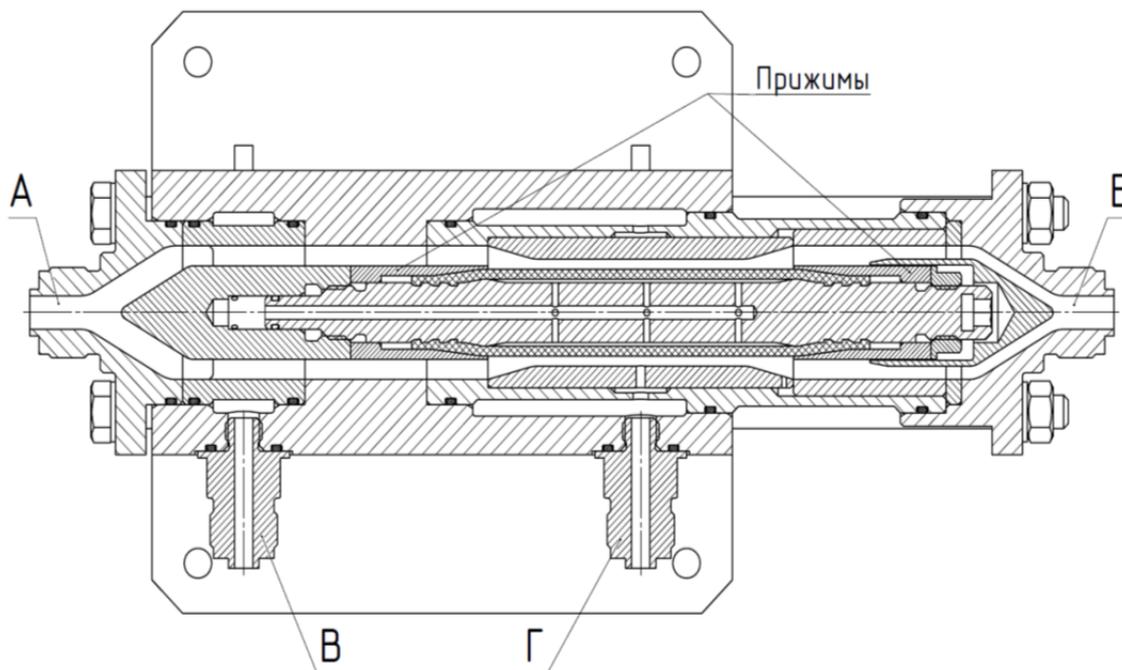


Рис. 3. Макет регулятора давления Ду10

Штуцеры *А* и *Б* предназначены для регулируемой рабочей жидкости, штуцеры *В* и *Г* – для подачи рабочей жидкости (газа) для управления. Проверки характеристик макета выполнялись с использованием рабочей жидкости ПГВ и водопроводной воды. В полость управления также подавалась жидкость ПГВ или водопроводная вода.

В результате проведённых испытаний были построены расходно-перепадные характеристики, которые носили линейный характер, что говорит о ламинарном режиме течения рабочей жидкости в рабочем зазоре дросселя.

Проверка акустических характеристик показала, что до частоты 1000 Гц прослеживался рост уровня вибрации. При более высоких частотах, в отличие от «металлических» дроссельных элементов, отмечено снижение уровня вибрации. Снижение составило 3 дБ на октаву, начиная с частоты 1600 Гц.

Вместе с тем моделирование деформации дроссельного узла, выполненное численными методами в пакете Ansys, показало, что деформация эластичного элемента является несимметричной и имеет смещение в сторону направления тока рабочей жидкости (рис. 4), что усложняет определение гидравлических характеристик узла.

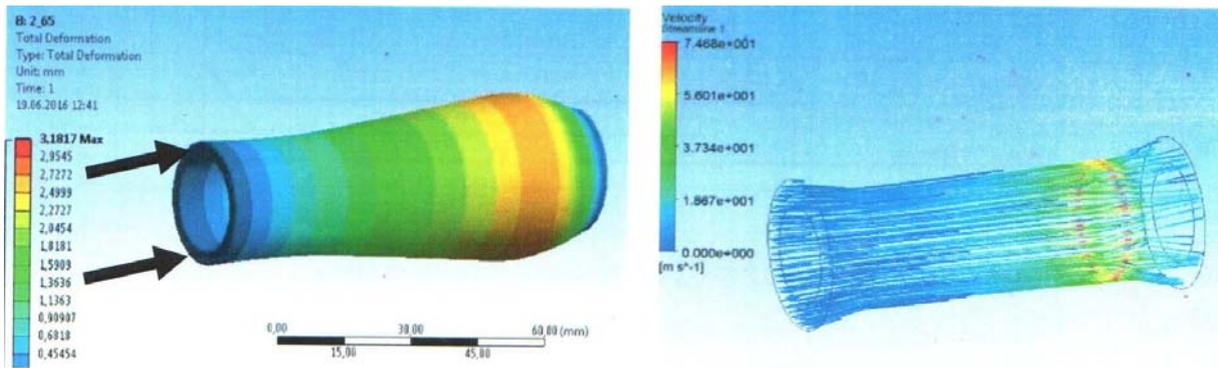


Рис. 4. Моделирование деформации эластичного элемента и потока при работе дросселя

Результаты испытаний макета регулятора давления показали, что принятые технические решения позволили создать узел регулирования, имеющий уникальные виброакустические характеристики, особенно в области высоких частот.

### Разработка макета двухкаскадного регулятора с эластичным элементом управления

В ходе испытаний установлено, что акустический КПД зависит от скорости потока при нулевом давлении управления и вида среды (вязкости) и не зависит от перепада давления, давления на выходе и расхода.

Подтверждено снижение ВШХ в области частот свыше 1600 Гц. Уточнённый расчёт гидравлических характеристик показал, что максимальная скорость потока рабочей жидкости в районе минимального зазора в клапане кратковременно повышается до 24 м/с.

Ухудшение акустических характеристик в части шума потока рабочей среды является следствием наличия пульсаций давления. Причиной выявленных пульсаций на режимах с большими расходами предположительно является потеря устойчивости оболочки эластичного регулирующего элемента и её автоколебания по типу флаттера, т.е. с положительной обратной связью.

Таким образом, выявилась необходимость повышения жёсткости эластичного узла регулирования или обеспечения многокаскадности дросселирования для обеспечения соответствия регулятора требованиям малошумности.

В результате оценки возможных конструкций эластичного дроссельного узла было принято решение реализовать многокаскадную конструкцию, поскольку повышение жесткости эластичного элемента (например, использование эластичного элемента с кордом) приводило к необходимости повышения управляющего давления.

Был разработан макет двухкаскадного регулятора с одним эластичным регулирующим элементом (рис. 5).

В качестве первого каскада служит клапан с эластичным регулирующим элементом, в качестве второго – перфорированная гильза. Конструкция заделки и материал эластичного регулирующего элемента приняты аналогичными с однокаскадными регуляторами. Для повышения податливости системы «эластичный регулирующий элемент + полость управления» в качестве управляющей среды применялся сжатый воздух.

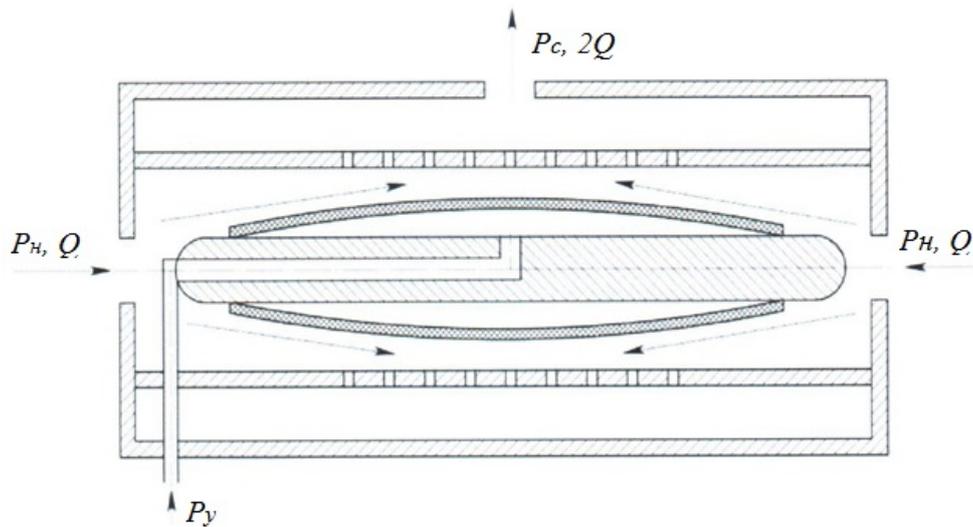


Рис. 5. Схема двухкаскадного регулятора давления

Показанная конструкция позволяет применять её как при движении рабочей жидкости в направлении, показанном на рис. 5, так и при движении рабочей жидкости в обратном направлении.

Двухкаскадный регулятор по сравнению с однокаскадным имеет преимущество, т.к. двухсторонний подвод жидкости уменьшил воздействие выходного давления на деформацию эластичного регулирующего элемента.

Реализована возможность ступенчатого дросселирования потока при наличии следующих гидравлических сопротивлений:

- регулируемого кольцевого зазора между эластичным регулирующим элементом и перфорированной втулкой;
- поворота потока из кольцевого зазора в радиальные отверстия перфорированной втулки;
- наличия радиальные отверстия перфорированной втулки.

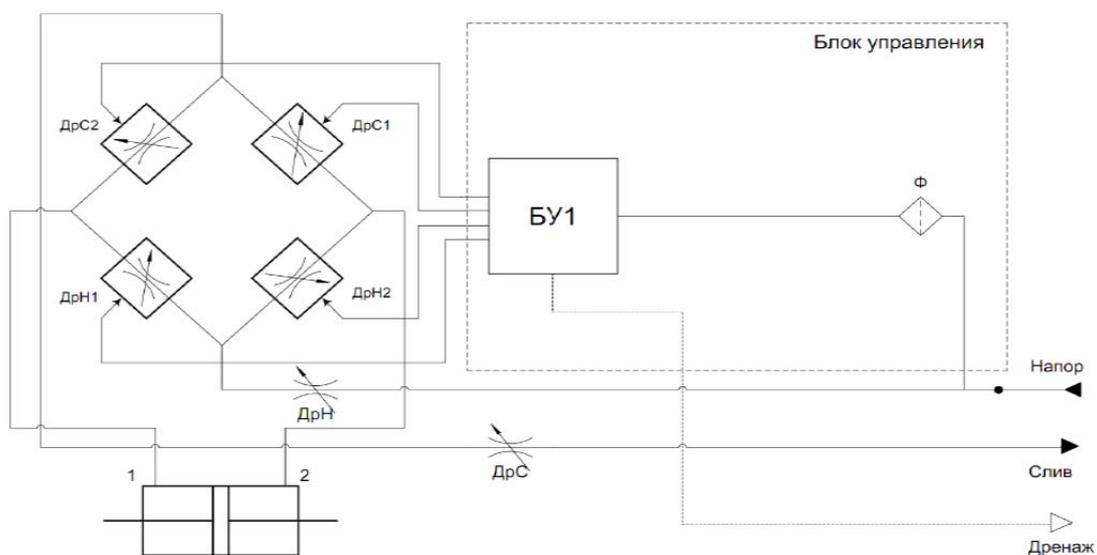


Рис. 6. Принципиальная схема электрогидравлического блока с эластичными регулирующими элементами

## Разработка макета электрогидравлического прибора с эластичными регулирующими элементами

Для проверки принятых конструктивных решений был разработан и изготовлен макет электрогидравлического прибора. Схема макета представлена на рис. 6.

Конструктивно макет состоит из двух блоков:

- блока управления, предназначенного для коммутации сигналов управления (для коммутации служат шариковый клапан с электромагнитом);
- блока регуляторов давления, предназначенного для распределения рабочей жидкости внутри макета.

Четыре регулятора с эластичными регулирующими элементами, аналогичными приведённому на схеме рис. 6, соединены по мостиковой схеме. Кроме этого, в корпусе предусмотрены места для установки двух дополнительных путевых силовых дросселей.

Была проведена проверка сохранения характеристик макета после наработки заданного числа циклов срабатывания. Проверки выполнялись на рабочей жидкости – вода от передвижной насосной станции. Для управления использовался сжатый азот из баллона высокого давления. Температура рабочей жидкости поддерживалась в пределах от 20 до 30 °С. Отработка проводилась путём подачи циклического сигнала «включено – выключено» с частотой 5 циклов в минуту. В ходе испытаний проверялись параметры:

- утечка из штуцеров напора и слива при отсутствии электрического сигнала на клапанах;
- герметичность полостей управления силовых дросселей;
- расходная характеристика;
- вибрация и шум (определялись до и после испытаний).

В ходе испытаний были проведены четыре проверки перечисленных характеристик прибора (наработка 0, 24, 48, 70 тыс. циклов). Проведённые проверки показали:

- 1) макет прибора в целом сохранил рабочие характеристики;
- 2) состояние эластичных регулирующих элементов после испытаний свидетельствует об имеющемся запасе прочности для подтверждения более длительного ресурса.

Было обнаружено, что акустическая эффективность зависит от скорости потока при нулевом контрольном давлении и типе рабочей жидкости (вязкости) и не зависит от падения давления.

Таким образом, была подтверждена возможность создания малошумной гидроаппаратуры с эластичными регулирующими элементами. Макет подобного прибора показал лучшие виброакустические характеристики, чем приборы с дросселями золотникового типа с аналогичным Ду. Подтверждено сохранение рабочих характеристик регуляторов с эластичными регулирующими элементами при работе с рабочими жидкостями разной вязкости (жидкость ПГВ, минеральное масло, вода водопроводная). Подтверждено сохранение работоспособности регулятора с эластичными регулирующими элементами при проведении длительных испытаний. Расчётами подтверждена возможность дальнейшего улучшения виброакустических характеристик регуляторов с эластичными регулирующими элементами.

### Заключение

В результате проведённых работ получен научно-технический задел, позволяющий создать прибор с эластичными регулирующими элементами, имеющий расходно-перепадную характеристику, отвечающую установленным требованиям, и виброакустическую характеристику, отвечающую перспективным требованиям и имеющую достаточную надёжность узла регулирования при работе на чистых рабочих жидкостях.

Анализ существующих конструкций клапанов с эластичными трубными элементами показал, что приборы с подобными элементами могут использоваться для регулирования давления и расхода загрязнённых рабочих жидкостей (вплоть до водно-песчаной пульпы), однако стабильность рабочих характеристик клапана при этом нуждается в подтверждении.

### Библиографический список

1. Вельтищев В.В. Перспективы развития подводной гидравлики на морской воде // Подводные исследования и робототехника. 2014. № 2 (18). С. 19-28.
2. Берестовицкий Э.Г., Гладиллин Ю.А., Пялов Н.В. Создание гидравлического оборудования с упругими регулирующими элементами // Судостроение. 2021. № 6 (859). С. 44-48.

## DEVELOPMENT OF HYDRAULIC DEVICES WITH ELASTIC REGULATING ELEMENTS

© 2023

**E. G. Berestovitsky** Doctor of Science (Engineering), Leading Researcher; Aurora JSC, Saint-Petersburg, Russian Federation; [berest40@mail.ru](mailto:berest40@mail.ru)

**Y. A. Gladilin** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Head of Laboratory, Chief Acoustician; Aurora JSC, Saint-Petersburg, Russian Federation; [gladil\\_01@mail.ru](mailto:gladil_01@mail.ru)

**N. V. Pyalov** Candidate of Science (Engineering), Leading Researcher; Aurora JSC, Saint-Petersburg, Russian Federation; [afx7cu@mail.ru](mailto:afx7cu@mail.ru)

Currently, when creating the actuators of deep-sea vehicles and other technical facilities, there is a tendency to accommodate the elements of the hydraulic drive outside the durable housing. Such hydraulic systems are subject to the risk of depressurization, which leads to the ingress of working fluid (mineral oils or synthetic working fluids) into seawater and flooding of the hydraulic system's working fluid with seawater. The ingress of the working fluid into seawater leads to the violation of environmental safety, and if seawater enters the internal cavities of the hydraulic system, they may be damaged, which will require long and expensive repair in the future. One of the possible ways to eliminate the listed consequences of depressurization of outboard hydraulic systems is the creation of hydraulic equipment using seawater as a working fluid. The cheapest design of such a regulatory body is the use of shut-off valves with elastic tubular control elements. The research carried out confirmed the possibility of creating low-noise regulators with elastic control elements. These regulators have better vibroacoustic characteristics than spool-type throttles with similar functional characteristics. Preservation of the operating characteristics of regulators with elastic regulating elements when working with working fluids of different viscosities (PGV liquid, mineral oil, tap water) was confirmed. Survivability of a regulator with elastic control elements during long-term tests was confirmed. As a result of the work carried out, research and technological groundwork was obtained that allows creating a device with elastic regulating elements, having a flow differential characteristic that meets modern requirements, a vibroacoustic characteristic that meets advanced requirements and sufficient reliability when working on clean working fluids.

*Vibration; throttle; pressure regulator; flow characteristic; elastic regulating element*

---

*Citation:* Berestovitsky E.G., Gladilin Y.A., Pyalov N.V. Development of hydraulic devices with elastic regulating elements. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2023. V. 22, no. 2. P. 33-41. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-2-33-41

### **References**

1. Veltishchev V.V. Prospects for development of underwater hydraulic seawater. *Underwater Investigations and Robotics*. 2014. No. 2 (18). P. 19-28. (In Russ.)
2. Berestovitsky E.G., Gladilin Yu.A., Pyalov N.V. Fabrication of hydraulic equipment with elastic adjusting elements. *Sudostroenie*. 2021. No. 6 (859). P. 44-48. (In Russ.)