

УДК 621.646.42+532.5.013.12
EDN: MQZHBL

М.В. Куклин
АО «ПО «Севмаш», Северодвинск, Россия

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ И ВИБРОАКУСТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МАКЕТА РЕГУЛИРУЕМОГО ДРОССЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ НЕПРОНИЦАЕМОЙ ЭЛАСТИЧНОЙ МЕМБРАНЫ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является макет регулируемого дроссельного устройства (РДУ) на основе непроницаемой эластичной мембраны. Цель работы – экспериментальные исследования гидравлических и виброакустических характеристик макета РДУ.

Материалы и методы. В качестве средства точной настройки гидравлического сопротивления, снижения гидродинамического шума и вибрации в трубопроводных системах вместо дроссельных устройств с металлическими регулируемыми элементами применено РДУ с дросселирующим элементом на основе непроницаемой резиновой мембраны. Испытания проводились в лабораторных условиях с помощью виброакустической аппаратуры фирмы Brüel & Kjær. Моделирование картины вихреобразования обтекания проточных частей РДУ и дроссельной шайбы выполнено с помощью компьютера.

Основные результаты. Экспериментально показана возможность снижения вибрации трубопровода путем установки макета РДУ на основе непроницаемой эластичной мембраны вместо дроссельных шайб, а также возможность регулирования расхода рабочей среды в широком диапазоне без слива рабочей среды из трубопровода.

Заключение. Показано, что предлагаемое РДУ является перспективным малозумным дроссельным устройством, которое целесообразно применять разработчикам виброактивных трубопроводных систем при проектировании судов и кораблей, а также заводам-строителям для обеспечения необходимых требований по уровням вибрации и шума трубопроводных систем и оборудования.

Ключевые слова: регулируемое дроссельное устройство, дроссельная шайба, гидравлическое сопротивление, вибрация, шум.

Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 621.646.42+532.5.013.12
EDN: MQZHBL

M.V. Kuklin
JSC PO Sevmash, Severodvinsk, Russia

HYDRAULIC AND VIBROACOUSTIC MODEL TESTS OF ADJUSTABLE THROTTLE BASED ON IMPERMEABLE ELASTIC MEMBRANE

Object and purpose of research. The object of the study is a model of adjustable throttle based on impermeable elastic membrane. The purpose of the paper is experimental study of hydraulic and vibroacoustic performance of adjustable throttle model.

Materials and methods. To fine-tune hydraulic resistance and reduce flow noise and vibration in pipelines, adjustable throttles with impermeable rubber membranes are better than throttles with metal control elements. The tests were carried out

Для цитирования: Куклин М.В. Гидравлические и виброакустические испытания макета регулируемого дроссельного устройства на основе непроницаемой эластичной мембраны. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 3(409): 102–108.

For citations: Kuklin M.V. Hydraulic and vibroacoustic model tests of adjustable throttle based on impermeable elastic membrane. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 3(409): 102–108 (in Russian).

in laboratory conditions with Bruel & Kjaer vibroacoustic equipment. Vortex formation pattern in the flow around adjustable throttle components as well as in the throttle orifice was obtained through computer-based simulation.

Main results. It has been experimentally demonstrated that adjustable throttles with impermeable flexible membrane, as compared to throttle orifices, can mitigate piping vibrations and offer wide-range variation of the flow rate without the necessity to drain the working medium from the piping system.

Conclusion. It is shown that the adjustable throttle suggested by the author is a promising solution for silent throttling, suitable for vibroactive pipeline systems aboard naval and commercial ships. Therefore, ship designers and shipyards could both resort to this solution to comply with noise and vibration requirements for marine piping and equipment.

Keywords: adjustable throttle, throttle orifice, hydraulic resistance, vibration, noise.

The author declares no conflicts of interest.

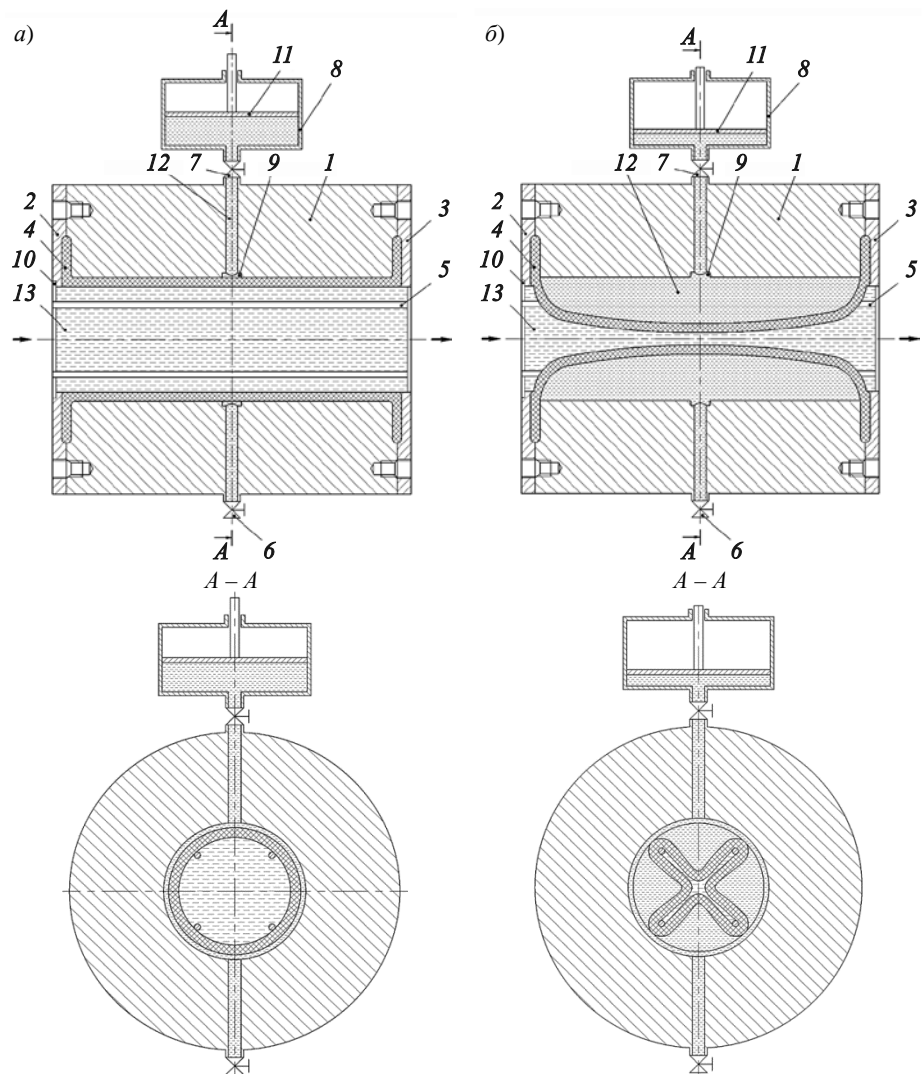
Для настройки расхода рабочей среды в судовых трубопроводных системах применяются дроссельные шайбы и различные дроссельные устройства, в т.ч. малозумные.

При движении потока рабочей среды через проходной канал дроссельного элемента возникают

повышенные уровни вибрации и шума трубопроводов, которые необходимо снижать по причине предъявления повышенных требований по виброакустическим характеристикам к судовым трубопроводным системам и энергетическим установкам в целом. В связи с этим актуальным становится

Рис. 1. Регулируемые дроссельные устройства с минимальным (а) и максимальным (б) коэффициентом гидравлического сопротивления: 1 – корпус; 2, 3 – входной и выходной зажимные фланцы; 4 – непроницаемая эластичная мембрана; 5 – направляющая решетка; 6 – клапан вентиляции; 7 – отключающий клапан; 8 – гидравлический пресс; 9 – кольцевая канавка; 10 – кольцевой паз; 11 – поршень; 12 – жидкость, управляющая расходом; 13 – жидкость, расход которой регулируется

Fig. 1. Adjustable throttles with minimum (a) and maximum (b) hydraulic resistance coefficient: 1 – casing; 2, 3 – inlet and outlet clamping flanges; 4 – impermeable flexible membrane; 5 – guide grid; 6 – ventilation valve; 7 – shut-off valve; 8 – hydraulic press; 9 – ring groove; 10 – circular slot; 11 – piston; 12 – flow rate control fluid; 13 – pipeline medium subject to flow rate control



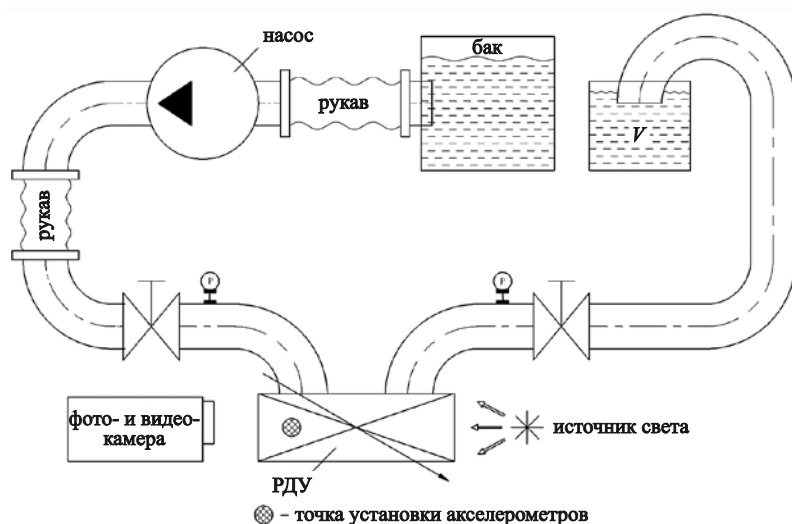


Рис. 2. Экспериментальный гидродинамический стенд
Fig. 2. Hydrodynamic test facility

вопрос о разработке новых конструкций дроссельных устройств с улучшенными виброакустическими характеристиками. Одним из направлений в решении этой задачи является применение регулируемых дроссельных устройств (РДУ) на основе непроницаемой эластичной мембраны [1, 2].

Перспективная конструкция РДУ на основе непроницаемой эластичной мембраны [3] представлена на рис. 1. Расход жидкости через проходное сечение устройства регулируется жидкостью, которая за счет изменения объема между корпусом и непроницаемой эластичной мембраной плавно изменяет положение дросселирующего элемента, заполняемого жидкостью, управляющей расходом при помощи гидравлического пресса. Внутри РДУ

расположена направляющая решетка, которая позволяет при регулировке управляющей жидкости обеспечить равномерное изменение формы непроницаемой эластичной мембраны. После настройки расхода жидкости отключающий клапан закрывается и гидравлический пресс демонтируется.

С целью исследования гидравлических и виброакустических характеристик на экспериментальном гидродинамическом стенде (рис. 2) проведены испытания макета РДУ с непроницаемой эластичной мембраной толщиной порядка 1 мм и проходным сечением 18 мм (рис. 3).

Регулирование (уменьшение или увеличение) площади проходного сечения макета устройства (рис. 3) достигается изменением формы цилиндриче-



Рис. 3. Общий вид макета регулируемого дроссельного устройства в сборе и с разобранной внутренней частью
Fig. 3. General view of adjustable throttle model fully assembled and without the inner part

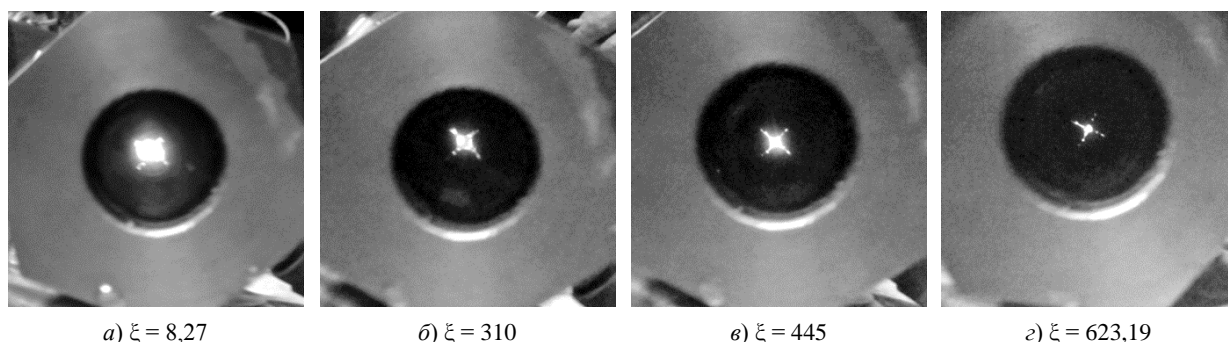


Рис. 4. Регулируемое дроссельное устройство с коэффициентом гидравлического сопротивления, изменяющимся в пределах от 8,27 до 623,19

Fig. 4. Adjustable throttle with hydraulic resistance coefficient between 8.27 and 623.19

ской резиновой мембраны, вставленной в проточную часть устройства. После настройки расхода рабочей среды в трубопроводной системе количество управляющей воды между корпусом и мембраной постоянно, а мембрана находится под воздействием одинаковых давлений, действующих с обеих сторон. Динамически на мембрану воздействует только поток движущейся рабочей среды. Торцевые стенки макета устройства выполнены из органического стекла для визуализации процесса изменения круглого проходного сечения мембраны в крестообразную форму.

На рис. 4 представлены фотографии проходного канала РДУ с различными коэффициентами гидравлического сопротивления.

На стенде опытным путем определялся коэффициент гидравлического сопротивления макета РДУ по формуле [4]:

$$\xi = \frac{2\Delta P}{\rho w^2},$$

где $\Delta P = P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}$ – перепад давления, Па; ρ – плотность воды, кг/м^3 ; $w = \frac{V}{S \cdot t}$ – скорость потока, м/с; V – известный объем емкости, заполняемый жидкостью за время t , м^3 ; $S = \frac{\pi d^2}{4}$ – площадь проходного сечения трубопровода, м^2 ; t – время заполнения жидкостью объема V , с.

В таблице представлены экспериментальные данные для расчета коэффициента гидравлического сопротивления РДУ. Видно, что коэффициент гидравлического сопротивления меняется в пределах от 8,27 до 623,19. При коэффициенте 623,19 минимальная площадь проходного сечения РДУ составила $\sim 6 \text{ мм}^2$ (рис. 4).

По результатам гидравлических испытаний макета РДУ построена экспериментальная гидравлическая характеристика $\Delta P = f(Q)$ (рис. 5), которая

Таблица. Экспериментальные данные для расчета коэффициента гидравлического сопротивления регулируемого дроссельного устройства

Table. Experimental data for calculation of hydraulic resistance coefficient for adjustable throttle

Внутренний диаметр d , м	Площадь проходного сечения S , м^2	Давление на входе $P_{\text{вх}}$, МПа	Давление на выходе $P_{\text{вых}}$, МПа	Перепад давления ΔP , МПа	Время t заполнения бака $V = 0,06 \text{ м}^3$, с	Скорость потока w , м/с	Коэффициент гидравлического сопротивления ξ
0,018	0,000254	0,105	0,035	0,070	58	4,07	8,27
		0,165	0,018	0,147	76	3,11	30,43
		0,195	0,030	0,165	89	2,65	45,91
		0,235	0,020	0,215	130	1,81	127,63
		0,285	0,010	0,275	254	0,93	623,19

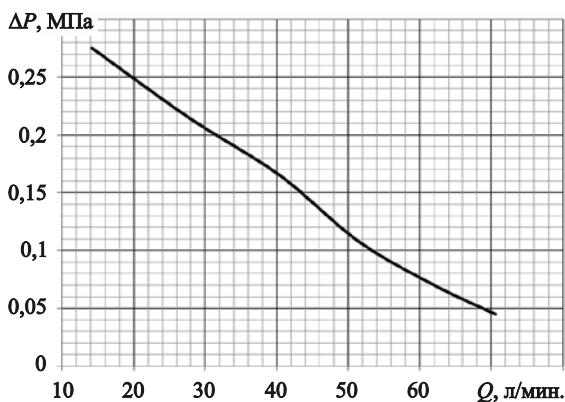


Рис. 5. Гидравлическая $\Delta P(Q)$ характеристика регулируемого дросельного устройства

Fig. 5. Hydraulic $\Delta P(Q)$ characteristic of adjustable throttle device

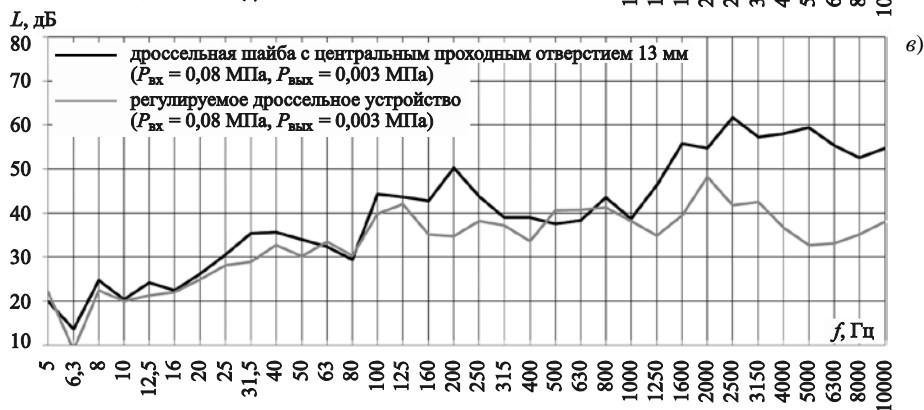
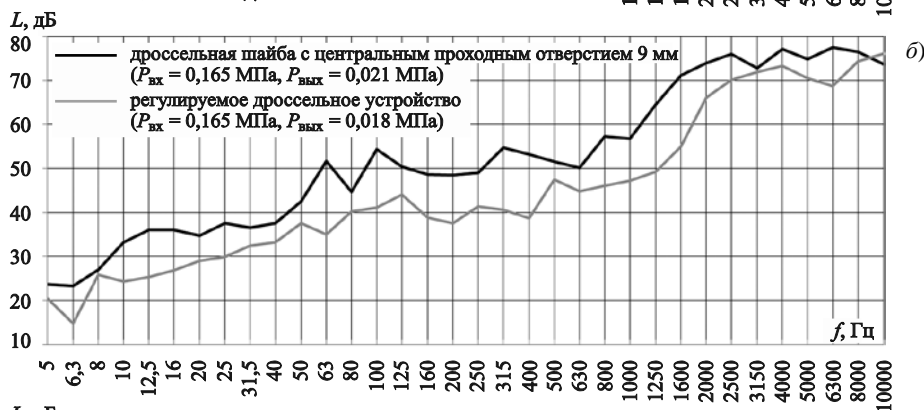
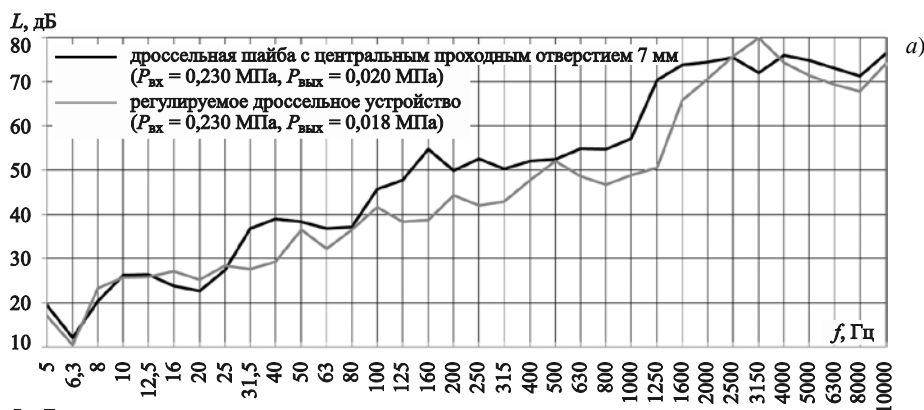
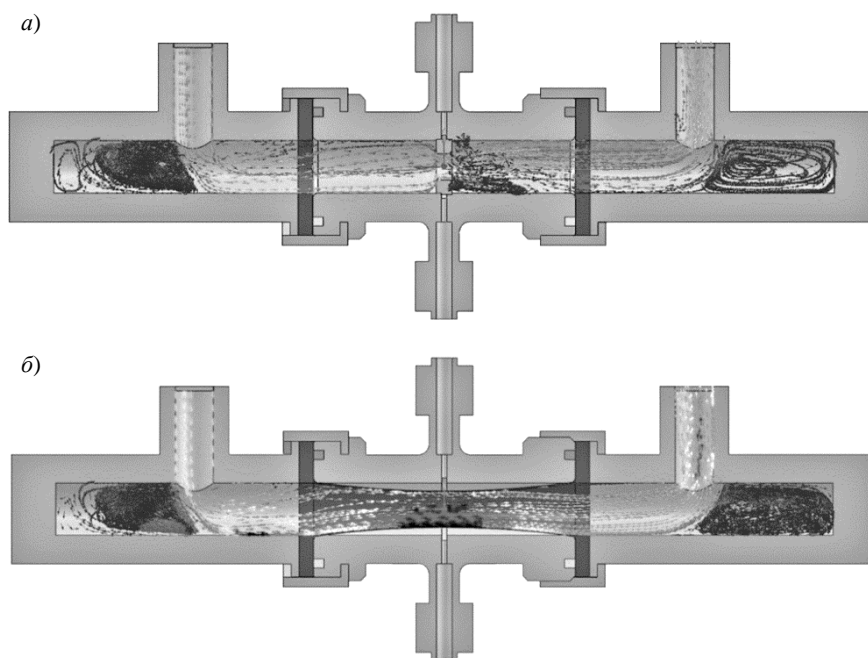


Рис. 6. 1/3-октавные спектры уровней вибрации на корпусах РДУ (серая кривая) и дросельной шайбе (черная кривая): а) $\xi = 93$; б) $\xi = 30$; в) $\xi = 4,1$

Fig. 6. 1/3-octave spectra of vibration levels on adjustable throttle casings (gray curve) and on throttle orifice (black curve)

Рис. 7. Картины вихреобразования при обтекании потоком проточных частей дроссельной шайбы с центральным проходным отверстием (а) и регулируемого дроссельного устройства на основе непроницаемой эластичной мембраны (б)

Fig. 7. Vortex formation patterns of flow around the throttle plate with central orifice (a) and adjustable throttle based on impermeable flexible membrane (b)



имеет линейную зависимость, что говорит о стабилизации потока рабочей среды с достижением ламинарного режима течения. Аналогичный линейный характер расходно-перепадной характеристики получен и при испытаниях дросселя с эластичным трубчатый элементом [5]. Результаты испытаний свидетельствуют о целесообразности применения эластичной непроницаемой мембраны в качестве регулирующего органа для снижения пульсаций давления в пограничном слое при течении рабочей среды через проточную часть устройства.

На экспериментальном стенде также выполнялись исследования виброакустических характеристик макета РДУ и металлических дроссельных шайб традиционного исполнения с помощью аппаратуры фирмы Bruel & Kjaer и программного обеспечения Pulse LabShop.

На рис. 6 представлены усредненные 1/3-октавные спектры уровней вибрации в трех ортогональных направлениях (вертикальном, траверзном и продольном) в контрольных точках, установленных на корпусах РДУ и корпусах одиночных дроссельных шайб с центральным проходным отверстием 7, 9, 13 мм. Сравнительный анализ спектров уровней вибрации на корпусах РДУ и дроссельных шайб выполнялся при одинаковых режимах работы стендового насоса, давлениях на входе и выходе РДУ и шайб, значениях коэффициента гидравлического сопротивления.

Из представленных спектров видно, что уровни вибрации на корпусе РДУ ниже в широком частотном диапазоне, чем на дроссельных шайбах. Соответственно, можно рекомендовать применение РДУ вместо дроссельных шайб и устройств с металлическими (твердотельными) регулирующими элементами для улучшения виброакустических характеристик трубопроводных систем.

На рис. 7 представлены картины вихреобразования при моделировании обтекания потоком жидкости проточных частей дроссельной шайбы (а) и РДУ (б). Наглядно видно, что плавное изменение площади проходного сечения канала и применение эластичной резиновой мембраны позволят получить ламинарный режим течения рабочей среды, а также приведут к снижению гидродинамического шума и вибрации трубопроводов.

Заклучение

Conclusion

РДУ на основе эластичной непроницаемой мембраны является перспективным малозумным дроссельным устройством, которое обладает следующими преимуществами:

- уровень вибрации на средних и высоких частотах существенно более низкий по сравнению с дроссельными шайбами и дроссельными устройствами с твердотельными регулирующими элементами;

- простая и точная настройка расхода рабочей среды, не требующая слива рабочей среды из трубопроводов;
 - высокая стабильность заданных настроек за счет отсутствия неподвижных соединений, вибрация в которых приводит к их ослаблению и образованию зазоров.
- РДУ рекомендуется устанавливать в системы трубопроводов со следующими техническими характеристиками:
- рабочая среда – пресная и морская вода, масло;
 - давление до 6 МПа;
 - внутренний диаметр от 15 до 150 мм;
 - скорость движения рабочей среды до 10 м/с.

Список использованной литературы

1. *Куклин М.В.* Регулируемое дроссельное устройство на основе непроницаемой эластичной мембраны // Судостроение. 2022. № 2. С. 31–32.
2. *Куклин М.В.* Исследование виброакустических характеристик макета регулируемого дроссельного устройства на основе непроницаемой эластичной мембраны // Морской вестник. 2022. № 4(84). С. 79–80.
3. Регулируемое дроссельное устройство : пат. 2667177 Рос. Федерация / *Куклин М.В.* № 2017105948; заявл. 21.02.2017; опубл. 17.09.2018. Бюл. № 26. 10 с.
4. *Идельчик И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям. 3-е изд., перераб. и доп. Москва : Машиностроение, 1992. 672 с.
5. *Берестовицкий Э.Г., Гладиллин Ю.А., Пялов Н.В.* Создание гидроаппаратуры с эластичными регулирующими элементами // Судостроение. 2021. № 6. С. 44–48.

References

1. *Kuklin M.V.* Adjustable throttling device based on an impermeable flexible membrane // Sudostroeniye. 2022. No. 2. P. 31–32 (in Russian).
2. *Kuklin M.V.* Investigation of vibroacoustic characteristics of adjustable throttling device model based on impermeable flexible membrane // Morskoy Vestnik. 2022. No. 4(84). P. 79–80 (in Russian).
3. Adjustable throttling device : Pat. 2667177 Russian Federation / *M.V. Kuklin.* No. 2017105948; Appl. 02.21.2012; publ. 09.17.2018. Bull. No. 26.10 p. (in Russian).
4. *Idelchik I.E.* Handbook of hydraulic resistance. 3rd edition, reprinted and updated. Moscow : Mashinostroyeniye, 1992. 672 p. (in Russian).
5. *Berestovitsky E.G., Gladilin Yu.A., Pyalov N.V.* Development of hydraulic equipment with elastic regulating elements // Sudostroeniye. 2021. No. 6. P. 44–48 (in Russian).

Сведения об авторе

Куклин Михаил Васильевич, к.т.н., заместитель начальника управления защиты кораблей и судов по физическим полям – начальник отдела подготовки производства и перспективных разработок АО «ПО «Севмаш». Адрес: 164500, Россия, Северодвинск, Архангельское шоссе, д. 58. Тел.: +7 (8184) 50-50-32. E-mail: kuklinmikhail@rambler.ru.

About the author

Mikhail V. Kuklin, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of Ship Signature Management Department, Head of Pre-Production and Innovative Projects Department, JSC PO SevMash. Address: 58, Arkhangelskoye sh., Severodvinsk, Russia, post code 164500. Tel.: +7 (8184) 50-50-32. E-mail: kuklinmikhail@rambler.ru.

Поступила / Received: 25.03.24
Принята в печать / Accepted: 23.08.24
© Куклин М.В., 2024