

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАЛОШУМНОГО ДРОССЕЛИРУЮЩЕГО УЧАСТКА ДЛЯ ЗАПОРНО- РЕГУЛИРУЮЩЕЙ АРМАТУРЫ

Крючков А.Н.,
Ермилов М.А.,
Баляба М.В.,
Ермилова Е.Н.,
Видяскина А.Н.

Самарский национальный
исследовательский университет
имени академика С. П. Королёва
(Самарский университет)

Московское шоссе, 34, г. Самара,
443086, Российская Федерация

emasamara@gmail.ru

В статье описаны основной источник гидродинамического шума в запорно-регулирующей арматуре и механизм возникновения акустической энергии. Рассмотрены основные геометрические параметры дроссельного участка цилиндрической формы: форма каналов дросселирующего участка, диаметр отверстий каналов и расстояние между каналами. Описаны этапы выбора этих геометрических параметров. Изменение этих параметров существенно влияет на гидродинамический шум в запорно-регулирующей арматуре. В статье представлены экспериментально полученные зависимости изменения уровня ГДШ от относительного изменения диаметра каналов дроссельного участка и от изменения относительного расстояния между каналами.

Ключевые слова: гидродинамический шум; запорно-регулирующая арматура; дроссельный участок

1 Введение

При работе запорно-регулирующей арматуры (ЗРА) возникают интенсивные пульсации давления рабочей среды, распространяющиеся по гидравлической системе в виде упругих акустических волн или гидродинамического шума (ГДШ) и возбуждающие механические вибрации трубопроводов и другой арматуры, а также присоединённых механических конструкций.

Интенсивность акустической энергии зависит от акустического КПД ЗРА [1]. Акустический КПД – это отношение звуковой мощности ЗРА к мощности потока при бескавитационном режиме. Он в основном определяется конструкцией и пропускной способностью клапана. Колебательная энергия распространяется в виде пульсаций давления потока, а также в виде вибрации стенок трубопровода [2] и воздушного шума.

Данные динамические нагрузки отрицательно влияют как на обслуживающий персонал, так и на агрегаты, ускоряя приближение к критическому значению по его усталостной прочности и увеличивая погрешность контрольно-измерительных

приборов [3]. Снижение интенсивности колебаний рабочей среды не только обеспечивает надёжность работы ответственных узлов, но в ряде случаев является необходимым условием их функционирования [4,5,6].

Установлено, что основными источниками ГДШ в гидравлических системах являются насосные агрегаты и многочисленная ЗРА. За последнее десятилетие в результате проведения большого объёма работ по внедрению и доводке различных мероприятий удалось обеспечить выполнение требуемых норм по ГДШ насосов, что выдвигает актуальность проблемы сверхнормативного ГДШ ЗРА на первый план.

При дросселировании в местном сужении сечения потока происходит локальное ускорение потока, возникает высокоскоростная струя (рисунок 1). Из-за неравномерности скоростей в данной струе возникает слой смешения 3, представляющий собой область вихрей разного размера.

Согласно закону Бернулли изменение скорости вызывает изменение давления по квадратичной зависимости. Таким образом, вихрь с изменяющейся скоростью

является источником пульсаций давления. Следовательно, высокоскоростная струя с областью смешения является основным источником колебательной энергии.

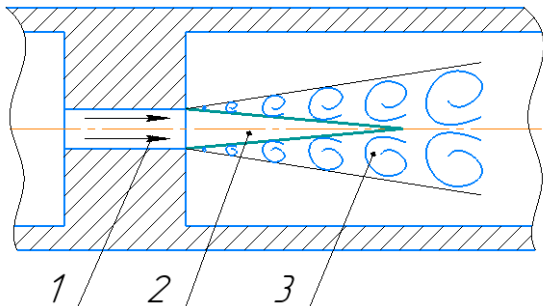


Рисунок 1. Структура турбулентной струи за местным сопротивлением
1 – входной поток; 2 – конус равной скорости; 3 – слой смешения

Акустическая мощность струи, взаимодействующей с твёрдой границей, пропорциональна скорости в шестой степени [7]:

$$W_A \sim \frac{\rho \cdot V^6 \cdot D^2}{c_0^3},$$

где ρ – плотность среды, кг/м³; V – скорость рабочей среды, м/с; D – диаметр канала, м; c_0 – скорость звука в среде, м/с.

Следовательно, геометрические и режимные параметры напрямую влияют на уровень ГДШ.

Очевидно, что непосредственное воздействие на механизм возникновения колебаний в самих источниках (при формировании струи) – наиболее эффективный путь снижения интенсивности пульсаций рабочей среды в трубопроводах.

Работа в сложных эксплуатационных условиях, а именно при высоких перепадах и скоростях течения регулируемой среды, требует применения специальных конструкций регулирующих органов (рисунок 2), позволяющих снизить вредное воздействие потока на элементы конструкции [8]. Зарубежными фирмами и отечественными предприятиями разработаны конструкции, в которых

взамен традиционных регулирующих органов используются перфорированные или многоступенчатые плунжеры [9].

Методики проектирования подобных конструкций являются "ноухау" отдельных специализированных фирм и отсутствуют в открытой печати. В настоящей статье детально рассмотрен выбор геометрических параметров малозумного дроссельного участка.



Рисунок 2. Клапан фирмы «Intro» со специальным устройством HF

2 Геометрические параметры дроссельного участка

Рассмотрим геометрические параметры дроссельного участка (ДрУ) с цилиндрической втулкой. ДрУ является основным элементом ЗРА, формирующим вид и гидродинамические характеристики струи. Его основные параметры изображены на рисунке 3. К ним относятся: общая площадь развёртки дроссельного участка $S_{Общ} = \pi \cdot D_{ВН} \cdot L$, площадь его проходного сечения $S_{ДрУ}$; индекс перфорации: $П_{общ} = S_{ДрУ} / S_{Общ}$; форма (цилиндрический канал, щель) и размеры (диаметр, угол раскрытия диффузора и т.д.) единого канала, длина канала, количество каналов, расположение каналов друг относительно друга, расход рабочей среды и перепад давления.

Так как источником акустической энергии являются пульсирующие вихри,

генерирующиеся в зоне смешения струи, то основными параметрами ДрУ были выбраны следующие:

- форма дросселирующего участка;
- диаметр отверстий каналов ДрУ;
- расстояние между каналами.

Варьируя данными параметрами необходимо увеличить объём зон смешения. При этом максимальная скорость падает, а интенсивность всего источника уменьшается. Рассмотрим этапы выбора параметров ДрУ.

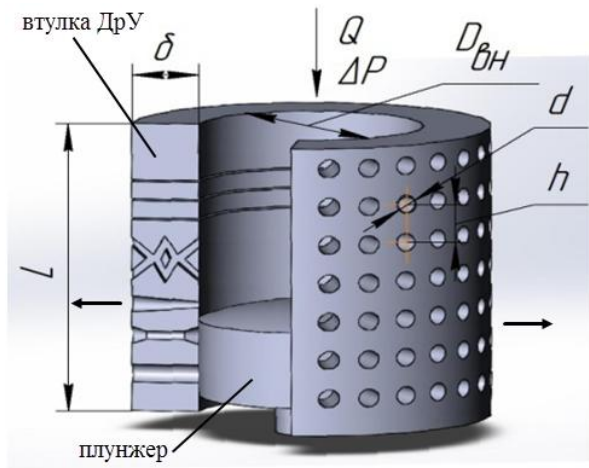


Рисунок 3 – Геометрические параметры ДрУ

δ – длина дросселирующего канала; L – длина ДрУ (ход запорного элемента); Q – расход рабочего тела; ΔP – перепад давления на ЗРА; $D_{вн}$ – внутренний диаметр цилиндрического дросселирующего элемента; d – диаметр канала ДрУ; h – межосевое расстояние между каналами ДрУ

3 Выбор геометрических параметров ДрУ

1 этап – форма сечения проходных каналов ДрУ

В настоящее время в ЗРА в качестве ДрУ наибольшее распространение нашли группы отверстий двух типов: щелевые и цилиндрические (рисунок 4).

Проведённые на полноразмерном стенде (Ду 200мм.) исследования по влиянию форм дросселирующих отверстий



Рисунок 4. Типы дроссельных участков ЗРА
а) – группа щелей; б) – группа отверстий

показали (рисунок 5), что уровни ГДШ для щелевых каналов в диапазоне частот более 50 Гц существенно (на 5...10 дБ) выше, чем для цилиндрических. Испытания проводились для диаметров цилиндрических отверстий $d=1...3$ мм, ширины щелей $\delta=0,5...1$ мм и перепадов давления 0,3...1 МПа.

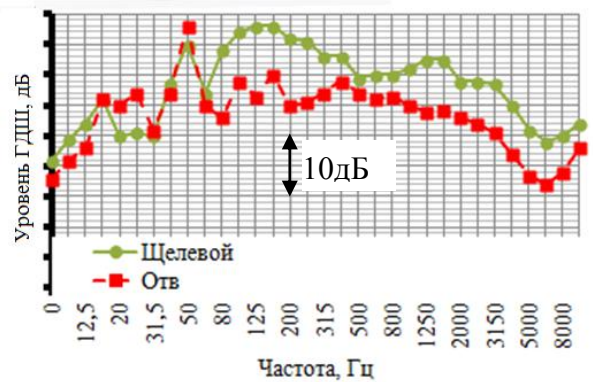


Рисунок 5. Спектр ГДШ при различных формах каналов дроссельных участков ЗРА при перепаде давления 0,45 МПа

Таким образом, экспериментально установлено, что для данных диапазонов конструктивных и режимных параметров наименьшим ГДШ обладают ДрУ с цилиндрическими отверстиями.

Исследования продольной формы цилиндрического канала проводились на малоразмерном стенде (Ду 12мм). Экспериментальные и численные исследования в программном пакете Ansys Fluent показали, что наилучшей формой обладает цилиндрический канал без конфузорного и диффузорного участков (рисунок 6).

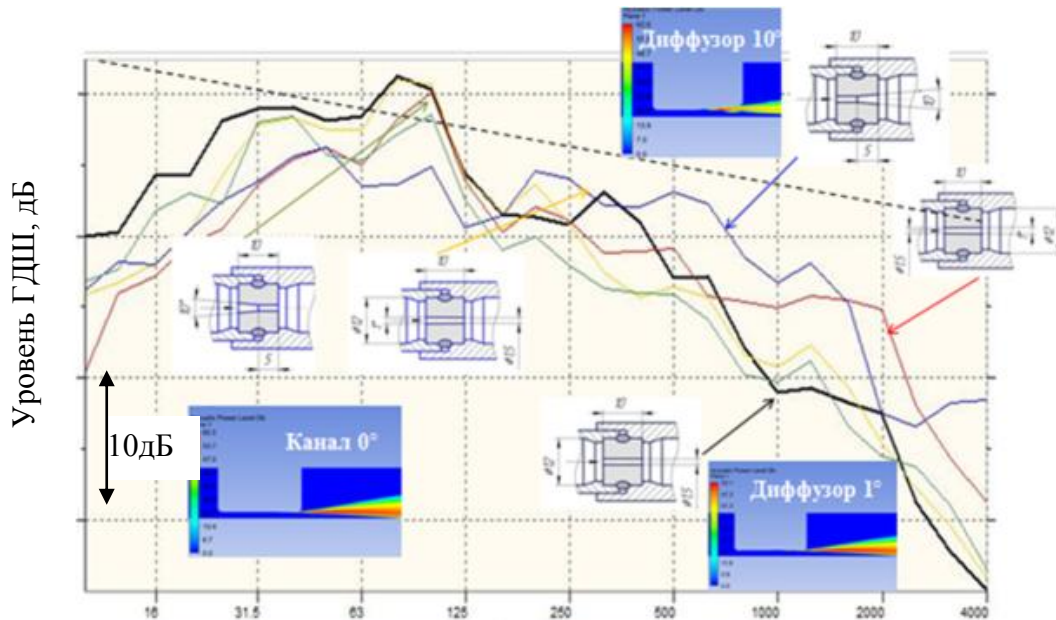


Рисунок 6. Зависимость ГДШ канала от его профиля

Этот вывод был подтверждён экспериментальными исследованиями на полноразмерном стенде, результаты которых представлены на рисунке 7.

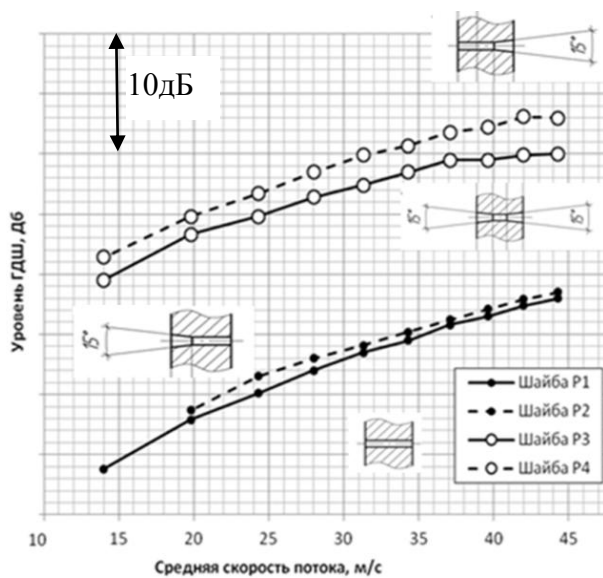


Рисунок 7. Уровни ГДШ шайб с каналами разной формы

Из рисунка видно, что, несмотря на снижение гидравлического сопротивления, при использовании диффузорного и конфузорного участков наименьший уровень ГДШ реализуется при строго цилиндрической отверстии.

2 этап – выбор диаметра отверстий канала

С помощью анализа многочисленных экспериментов было определено, что в целях снижения уровней ГДШ необходимо уменьшать диаметр отверстий d (рисунок 8). Предельное наименьшее значение диаметра каналов определяется из условия турбулентного течения рабочей жидкости:

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} \geq 10^4,$$

где Re – число Рейнольдса; V – скорость течения в каналах ДрУ, зависящая от перепада давления на нём, м/с; ν – кинематическая вязкость, м²/с. Использование каналов менее 1 мм не целесообразно по технологическим параметрам и из-за опасности возникновения облитерации. Таким образом, рекомендуется при скоростях рабочей жидкости в каналах ДрУ более 10 м/с принимать диаметр отверстия равным 1 мм.

3 этап – выбор расстояния между отверстиями ДрУ

Для определения расстояния между каналами необходимо воспользоваться минимальной пропускной площадью ДрУ,

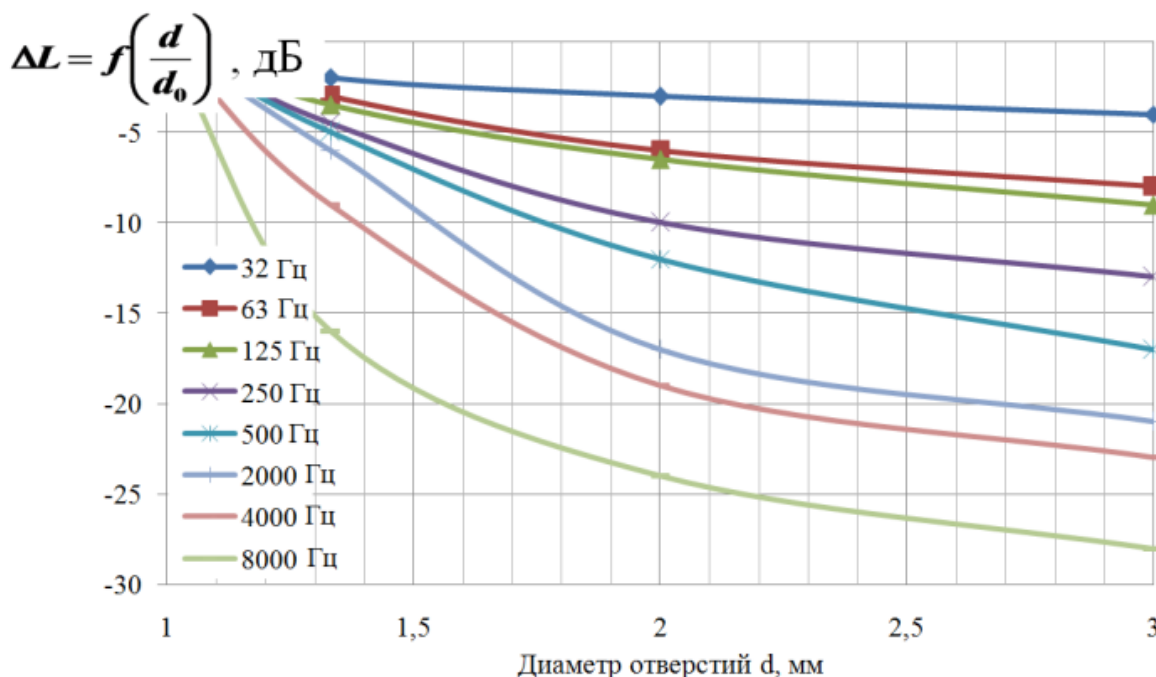


Рисунок 8. Зависимость изменения уровня ГДШ от относительного изменении диаметра каналов ($d_0=1$ мм) в 1/3 октавных полосах частот

заданной в исходных данных. При этом необходимы также сведения по габаритным ограничениям на максимальную площадь всего ДрУ. Поэтому сначала находится минимальный допустимый индекс перфорации:

$$P_{общ} = \frac{S_{мин}^{ИСХ.}}{S_{Габ}}$$

где $S_{мин}^{ИСХ.}$ – минимальная необходимая площадь открытого сечения ДрУ; $S_{Габ}$ – площадь ДрУ, ограниченная его максимальными габаритами, например $S_{Габ} = \pi D_{ДрУ} \cdot L_{ДрУ}$ при цилиндрическом ДрУ диаметром $D_{ДрУ}$ и высотой $L_{ДрУ}$.

Далее определимся с относительной закономерностью расположения отверстий. Для наиболее равномерного расположения выберем участок с отверстиями, расположенными в узлах гексагональной сетки, которую можно разбить на элементарные сегменты (равносторонние треугольники), как показано на рисунке 9.

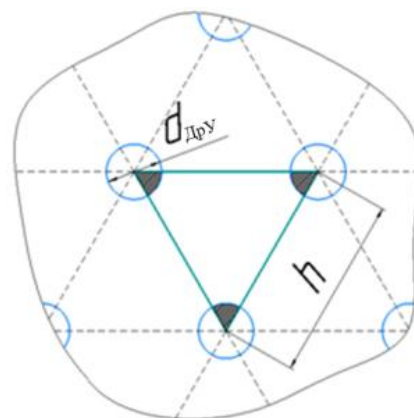


Рисунок 9. Элементарный сегмент ДрУ

Определим индекс перфорации данного элементарного треугольного сегмента в зависимости от относительного расстояния между каналами:

$$P_{\Delta} = \frac{0,5 \cdot S_{омс}}{S_{\Delta}} = \frac{\pi}{2\sqrt{3} \cdot \bar{h}^2}$$

где $S_{омс}$ – площадь одного отверстия ДрУ диаметром $d_{ДрУ}$; S_{Δ} – площадь равностороннего треугольника со стороной $h = h_{ДрУ}$; $\bar{h} = \frac{h_{ДрУ}}{d_{ДрУ}}$ – относительное

расстояние между каналами в дроссельном участке.

Приравнявая величины $\Pi_{общ} = \Pi_{\Delta}$, определяем \bar{h} :

$$\bar{h} = \sqrt{\frac{\pi \cdot S_{Габ}}{S_{min}^{ИСК} \cdot 2\sqrt{3}}}$$

Зная \bar{h} и диаметр отверстий, определяем расстояние между каналами и полностью определяем размеры плоского ДрУ

$$h_{ДрУ} = \bar{h} \cdot d_{ДрУ}$$

Влияние относительного расстояния между отверстиями на уровни ГДШ ЗРУ представлено на рисунке 10, из которого следует, что с увеличением этого расстояния уровни ГДШ снижаются.

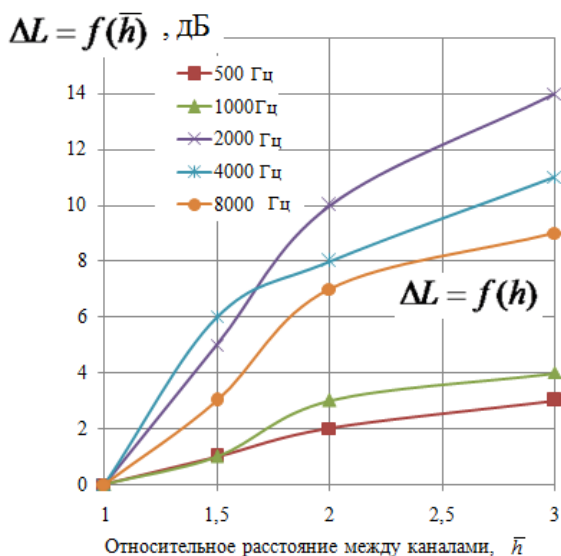


Рисунок 10 – Зависимость изменения уровня ГДШ от изменения относительного расстояния между каналами

Так как обычно, за исключением плоских золотников, используется цилиндрический участок ДрУ, поэтому для него необходимо

знать угловой шаг $\alpha_{ДрУ} = \frac{360 \cdot h_{ДрУ}}{\pi \cdot D_{ДрУ}}$ и шаг по

высоте $K_{ДрУ} = \frac{\sqrt{3} \cdot h_{ДрУ}}{2}$ (рисунок 11).

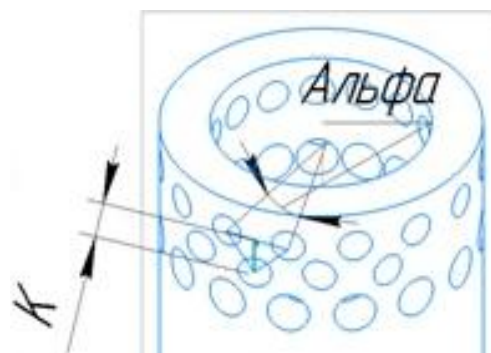


Рисунок 11. Цилиндрический ДрУ

После этого определены основные геометрические параметры дроссельного участка.

4 Заключение

Проведённое исследование влияния угла диффузора и длины диффузорной части проточного элемента показало, что наилучшей формой канала рабочего участка является цилиндрическая, а наличие диффузорного участка лишь дестабилизирует поток.

Проведённые теоретические и экспериментальные исследования показали, что за счёт изменения геометрических параметров дроссельного участка арматуры можно уменьшить её ГДШ на 10-20 дБ в широком диапазоне частот.

Список использованных источников

- [1] IEC 60534-8_4 Industrial Process Control Valves – Noise Considerations 2015.
- [2] Ионов, А.В. Средства снижения вибрации и шума на судах [Текст] / А.В. Ионов. – СПб.: ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2000. – 348 с.
- [3] ГОСТ Р 50.2.038. – 2004 Оценивание погрешностей и неопределенности результата измерений [Текст] – Введ. 2004-10-27. – М.: Издательство стандартов, 2004. – 7 с.
- [4] Санчугов, В.И. Методы обработки агрегатов и систем авиационной техники [Текст]: дис. ... докт. техн. наук: 05.07.07, 05.07.04 / Санчугов Валерий Иванович. – Самара, 1998. – 298 с.
- [5] Снижение колебаний и шума в гидромеханических системах [Текст] / А.А. Иголкин, А.Н. Крючков, Г.М. Макарьянц [и др.]. – Самара: Изд-во СГАУ, 2005. – 314 с.

[6] Шорин, В.П. Устранение колебаний в авиационных трубопроводах [Текст] / В.П. Шорин. – М.: Машиностроение, 1980. – 156 с.

[7] Зиневич, В.Д. Поршневые и шестеренные пневмодвигатели горношахтного оборудования / В.Д. Зиневич, Л.А. Гешлин. – М.: Недра, 1982. – 199 с.

[8] Арзуманов, Э.С. Снижение шума и вибрации в регулирующих органах клапанов для высоких перепадов давлений [Текст] / Э.С. Арзуманов, В.Г. Скрипченко, Л.Н. Нисман. – М.: ЦИНТИ химнефтемаш, 1976. – серия ХМ-10. – 48 с.

[9] Globe/angle cage-guided control valves [Text] / Kentintrol brochure. – 2019. – 18 p.

DESIGN OF A LOW-NOISE THROTTLE SECTION FOR SHUT-OFF CONTROL VALVES

**A.N. Kryuchkov,
M.A. Ermilov,
M.V. Balyaba,
E.N. Ermilova,
A.N. Vidyaskina**

Samara National Research University
(Samara University)

34, Moskovskoye shosse, Samara,
443086, Russian Federation

emasamara@gmail.ru

The article describes the main source of hydrodynamic noise (HDN) in shut-off and control valves and the mechanism of the occurrence of acoustic energy. The main geometric parameters of the throttle section with a cylindrical shape are considered: the shape of the channels of the throttle section, the diameter of the orifices of the channels and the distance between the channels. The stages of choosing these geometric parameters are described. Changes in these parameters significantly affects the HDN in control valves. The article presents the experimentally obtained dependences of the change in the HDN level on the relative change in the diameter of the channels of the throttle section and on the change in the relative distance between the channels in 1/3 octave frequency bands.

Keywords: hydrodynamic noise; shut-off and control valves; throttle section

References

- [1] IEC 60534-8_4 Industrial Process Control Valves – Noise Considerations 2015.
- [2] A.V. Ionov. Means to reduce vibration and noise on ships [Text] / A.V. Ionov. - St. Petersburg: Krylov State Research Centre, 2000. - 348 p.
- [3] GOST R 50.2.038. - 2004 Ocenivanie po-greshnostej i neopredelennosti rezul'tata izme-renij [Estimation of errors and uncertainty of the result of measurements] [Text] - Introduced. 2004-10-27. - Moscow: Izdatel'stvo standartov, 2004. - 7 p.
- [4] V.I. Sanchugov. Metody otrabotki agregatov i sistem aviacionnoj tekhniki [Methods for testing units and systems of aviation equipment] [Text]: doctoral dissertation: 05.07.07, 05.07.04 / V. I. Sanchugov - Samara, 1998. - 298 p.
- [5] A.A. Igolkin. Snizhenie kolebanij i shuma v gidromekhanicheskikh sistemah [Reduction of oscillations and noise in hydromechanical systems] [Text] / A.A. Igolkin, A.N. Kryuchkov, G.M. Makaryants and others. - Samara: Izd-vo SGAU, 2005. - 314 p.
- [6] V.P. Shorin. Ustranenie kolebanij v aviacionnyh truboprovodah [Elimination of oscillations in aviation pipelines] [Text] / V.P. Shorin. – Moscow: Mashinostroenie, 1980. – 156 p.
- [7] V.D. Zinevich. Porshnevye i shesterennye pnevmodvigateli gornoshahtnogo oborudovaniya [Piston and gear pneumatic motors of mining equipment] / V.D. Zinevich, L.A. Geshlin. – Moscow: Nedra, 1982. – 199 p.
- [8] E.S. Arzumanov. Snizhenie shuma i vibracii v reguliruyushchih organah klapanov dlya vysokih perepadov davlenij [Noise and vibration reduction in valve control elements for high pressure drops] [Text] / E.S. Arzumanov, V.G. Skripchenko, L.N. Nisman. - Moscow: CINTI him-neftemash, 1976. – 48 p.
- [9] Globe/angle cage-guided control valves [Text] / Kentintrol brochure. – 2019. – 18