

На правах рукописи



Ермилов Михаил Анатольевич

**РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ СНИЖЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ШУМА
ЗАПОРНО-РЕГУЛИРУЮЩЕЙ АРМАТУРЫ ГИДРОСИСТЕМ**

1.3.7. Акустика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Самара – 2021

Работа выполнена в **федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»** на кафедре автоматических систем энергетических установок.

Научный руководитель:

Крючков Александр Николаевич доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

Официальные оппоненты:

Майзель Александр Борисович, доктор технических наук, профессор, начальник отдела АО «ЦКБ МТ «Рубин», г. Санкт-Петербург;

Попов Юрий Николаевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ФГУП «Крыловского государственного научного центра», г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный морской технический университет"** (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «9» декабря 2021 в 16-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.387.02 (Д 212.238.06), созданного при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» по адресу: 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «СПбГЭТУ «ЛЭТИ»» и на сайте университета www.etu.ru в разделе «Подготовка кадров высшей квалификации» - «Объявление о защитах докторских и кандидатских диссертаций».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5.

Автореферат разослан «8» октября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.387.02 (Д 212.238.06)
кандидат технических наук



Л.Н. Подгорная

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. При работе запорно-регулирующей арматуры (ЗРА) (ГОСТ 24856-2014) 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. Вибрация трубопроводов и арматуры многократно возрастает на резонансных режимах, что приводит к повышению погрешности контрольно-измерительных приборов, неустойчивой работе контуров регулирования, а также к повышенному шуму, излучаемому элементами гидравлических систем в окружающую воздушную среду. Шум отрицательно влияет на работоспособность человека в производственных условиях и может представлять угрозу для его здоровья. При оценке интенсивности шума учитывают санитарные требования, в части допустимых уровней громкости. Поэтому к приборам, клапанам и арматуре предъявляются повышенные требования по ГДШ. Ввиду указанного, борьба с шумом является важной производственной и социальной задачей, которая должна решаться при создании и эксплуатации гидромашин и гидроарматуры.

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.

Так, например, в АО «Концерн «НПО «Аврора» (г. Санкт-Петербург) в процессе проектирования и отработки дроссельного и питательного клапанов системы охлаждения судовой энергоустановки, выяснилась необходимость в снижении ГДШ на 3-18 дБ в диапазоне частот от 400 до 1000 Гц. Аналогичные проблемы возникают в судовых гидросистемах, арматура для которых разрабатывается в КБ «Армас» АО «ЦТСС», а также в ряде других предприятий машиностроения. Таким образом, необходимость в разработке методов и средств снижения ГДШ является актуальной задачей.

Анализ методов снижения повышенных уровней ГДШ показал, что существуют два основных способа снижения ГДШ: уменьшение интенсивности источника ГДШ и его подавление на путях распространения. Первый связан с изменением конструкции клапана в целом или отдельных его частей, второй – с установкой в трубопроводную систему глушителей гидродинамического шума (ГГДШ).

Любой глушитель обладает определенным гидравлическим сопротивлением и может существенно повлиять на работоспособность системы в целом. Поэтому вопрос разработки мероприятий по снижению ГДШ, обеспечивающих не только снижение динамических и виброакустических нагрузок в системах с ЗРА, но также наименьший вносимый перепад давления и работоспособность системы, является также актуальным.

Степень разработанности темы. Проблеме снижения ГДШ при работе гидросистем посвящены работы Шорина В. П., Ионайтиса Р. Р., Шахматова Е. В., Вакка А., Макарьянца Г. М., Берестовицкого Э. Г., Крючкова А. Н., Куличковой Е. А., Брайнина Б. П., Кузнецова Ю. И., Голованова В. И. и других отечественных и зарубежных исследователей, в которых рассмотрены различные методы снижения пульсаций давления и ГДШ гидросистем и отмечено, что трубопроводная арматура является потенциальным источником динамических и виброакустических нагрузок высокого уровня. Обзор выполненных исследований выявил недостаточную проработанность вопросов проектирования проточной части ЗРА и глушителей гидродинамического шума (ГГДШ) в условиях постоянно ужесточающихся требований. В связи с этим были сформулированы цель и задачи исследования.

Цель работы. Снижение гидродинамического шума запорно-регулирующей арматуры гидросистем за счёт разработки комплекса средств подавления акустических колебаний.

Задачами работы являются:

1 Анализ существующих средств снижения ГДШ ЗРА и методов подавления акустических колебаний.

2 Обоснование эффективности комплексного применения средств снижения уровня ГДШ: доработка дроссельного участка (ДрУ) запорно-регулирующей арматуры, создание перфорированных экранов и диссипативных ГГДШ, устанавливаемых на входе и выходе арматуры.

3 Разработка методики проектирования средств снижения уровня ГДШ ЗРА.

4 Разработка средств снижения ГДШ на основе:

4.1 Определения экспериментально-аналитических зависимостей уровней ГДШ от конструктивных параметров ДрУ ЗРА;

4.2 Выбора параметров перфорированных экранов высокоскоростной струи на выходе ДрУ;

4.3 Определения области применимости реактивных ГГДШ;

4.4 Выбора параметров ГГДШ диссипативного типа, обеспечивающих снижение ГДШ на входе и выходе ЗРА.

5 Экспериментальные исследования эффективности средств снижения ГДШ ЗРА судовых энергоустановок и их стендовая доводка.

Объектом исследования является запорно-регулирующая арматура.

Предметом исследования являются процессы возбуждения ГДШ и методы их снижения.

Методы исследования. В работе использовались теоретические и экспериментальные методы исследования, а также метод натурного моделирования на стендовой установке.

Гидравлический расчёт течения жидкости через ЗРА выполнялся с применением программного комплекса ANSYS/Fluent на основе дискретизации уравнений гидродинамики с использованием метода контрольных объёмов.

Научная новизна работы

1 Разработана методика расчёта и выбора параметров ДрУ ЗРА, перфорированных экранов и диссипативных ГГДШ, учитывающая их совместную работу как комплекса эффективных средств снижения ГДШ.

2 Впервые определены зависимости, учитывающие влияние конструктивных параметров ДрУ, перфорированных экранов и диссипативных ГГДШ на интенсивность генерации и поглощения ГДШ ЗРА, позволяющие выбирать наиболее рациональный состав, характеристики комплекса средств снижения ГДШ и прогнозировать его эффективность.

3 Теоретически и экспериментально обоснована и подтверждена целесообразность комплексного применения средств снижения уровня ГДШ ЗРА и совместного проектирования ДрУ, перфорированных экранов и диссипативных ГГДШ, позволяющих достигать эффективность в требуемом диапазоне частот.

Теоретическая значимость работы. Выявленные зависимости влияния на ГДШ геометрических параметров ДрУ, экранов и диссипативных ГГДШ позволили разработать методику выбора параметров и расчёта комплекса средств снижения ГДШ ЗРА гидросистем, обеспечивающего требуемое снижение ГДШ.

Разработанная на основе полученных зависимостей методика направлена на решение важной научно-технической задачи – снижение ГДШ в гидросистемах энергоустановок.

Практическая значимость работы. На основании полученных результатов были спроектированы и изготовлены в АО «Концерн «НПО «Аврора» опытные образцы ЗРА и ГГДШ. Предложенный комплекс средств позволил снизить ГДШ рабочей среды опытных изделий до требуемого уровня.

Разработанная в диссертации методика используется при проектировании серийных гидравлических агрегатов в АО «Концерн «НПО «Аврора» и в КБ «Армас» АО «ЦТСС».

Научные положения, выносимые на защиту:

1 Комплекс средств снижения ГДШ ЗРА, включающий коррекцию проточной части дроссельного участка, установку перфорированных экранов на выходе дроссельного участка, а также диссипативных ГГДШ на входе и выходе арматуры (акустическая мощность, излучаемая ЗРА во входную и выходную магистраль, одинакова) обеспечивает выполнение необходимых

норм ГДШ при расходах рабочей среды $Q=4\ldots 50 \text{ м}^3/\text{ч}$, перепаде давления на ЗРА $\Delta P=0,1\ldots 1 \text{ МПа}$, температуре $20\text{--}40 \text{ С}^0$ и $Dy=50\ldots 200 \text{ мм}$.

2 Дроссельный участок ЗРА, представляющий собой совокупность параллельно соединенных цилиндрических каналов с минимальными диаметрами, при которых реализуется турбулентный режим течения, излучает меньшую акустическую энергию, чем конфузорные, диффузорные и щелевые каналы.

3 Перфорированные экраны снижают уровень ГДШ ЗРА в низкочастотном диапазоне (до 1500 Гц) и увеличивают в высокочастотном (от 1500 Гц), причём для снижения генерации дополнительной высокочастотной энергии каналы дроссельного участка и экранов должны располагаться соосно.

4 При разработке ГГДШ необходим учёт их собственного шума, наименьшего у диссипативных глушителей на основе звукопоглощающего материала МР, эффективных на частотах выше 1000 Гц .

Достоверность результатов математических исследований обеспечивается обоснованностью принятых допущений при получении гидродинамических уравнений для расчёта параметров ГГДШ. Снижение ГДШ и виброакустических нагрузок в гидросистеме с модернизированной клапанной сборкой и автономными ГГДШ подтверждено проведёнными экспериментами на стендовых установках: большерасходной (до $100 \text{ м}^3/\text{ч}$) и малорасходной (до $2 \text{ м}^3/\text{ч}$), разработанной автором. Экспериментальные исследования проведены на поверенном оборудовании с использованием современных методик сбора и обработки информации.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на Международной научно-технической конференции с участием молодых учёных «Динамика и виброакустика машин» (2012, Самара), на 21 Международном конгрессе Звука и Вибрации в Пекине (2014, Китай) (ICSV21), на XXVII сессии Российского акустического общества, (2014, Санкт-Петербург), на Второй Международной научно-технической конференции «Динамика и виброакустика машин» (2014, Самара), на 22 Международном конгрессе Звука и Вибрации во Флоренции (2015, Италия) (ICSV22), на Международной молодежной научной конференции «XIII КОРОЛЁВСКИЕ ЧТЕНИЯ» (2015, Самара), на 23 Международном конгрессе Звука и Вибрации в Афинах (2016, Греция) (ICSV22), на Третьей и Пятой Международной научно-технической конференции «ДИНАМИКА И ВИБРОАКУСТИКА МАШИН» (2016, 2020, Самара).

Публикации. По теме исследования опубликовано 16 работ, из них 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 статьи в изданиях, индексируемых в базе данных «Scopus», 7 статей в изданиях, индексируемых в базе данных РИНЦ; получены 2 патента.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка литературы из 76 наименований. Общий объём диссертации составляет 170 страниц, включая 110 рисунков, 3 таблицы и 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, посвящённого снижению уровней ГДШ ЗРА; сформулированы цель и задачи исследования; приведены основные положения и результаты, выносимые на защиту, апробация, структура и краткое содержание работы.

В первом разделе выполнен анализ существующих средств снижения ГДШ ЗРА и методов подавления акустических колебаний в гидравлических системах. Описаны особенности работы ЗРА, влияющие на возбуждение ГДШ. Рассмотрена генерация ГДШ отдельной струёй.

Проведённый анализ показал, что для снижения уровня ГДШ существуют два основных способа: изменение режимных и геометрических параметров источника, обеспечивающие его малощумную работу и подавление колебаний на путях распространения с помощью ГГДШ разных типов.

В настоящее время имеется несколько направлений в решении проблемы предупреждения и устранения колебаний давления в рабочей среде в системах с ЗРА:

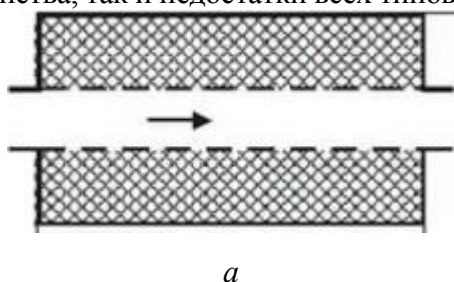
– снижение генерируемой колебательной энергии в источнике ГДШ (разбивка высокоскоростной струи в дроссельном сечении ЗРА за счёт установки специальных устройств – тримов (рисунок 1), многоступенчатое дросселирование и пр.);

– подавление колебаний на пути их распространения за счёт установки ГГДШ, которые делятся на следующие типы:

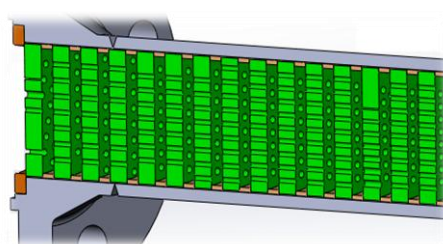
- диссипативные с параллельной фрикцией (рисунок 2,а) – эффективность которых зависит от звукопоглощающих свойств материала и увеличивается с ростом частоты;
- диссипативные с последовательной фрикцией (рисунок 2,б) – имеют широкий диапазон эффективности, однако обладают высоким гидравлическим сопротивлением;
- реактивные (в т.ч. резонансные – рисунок 3) – имеют высокую эффективность, но узкий частотный диапазон;
- комбинированные (многокамерные с активными сопротивлениями, рисунок 4) имеют как достоинства, так и недостатки всех типов.



Рисунок 1 – Установка перфорированных втулок на ДрУ



а



б

Рисунок 2 – ГГДШ диссипативные: а – параллельная фрикция, б – последовательная фрикция

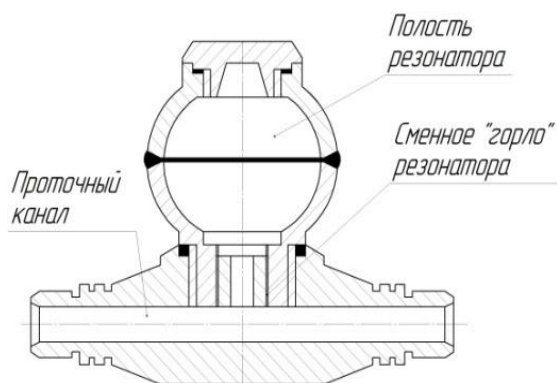


Рисунок 3 – ГГДШ резонансного типа

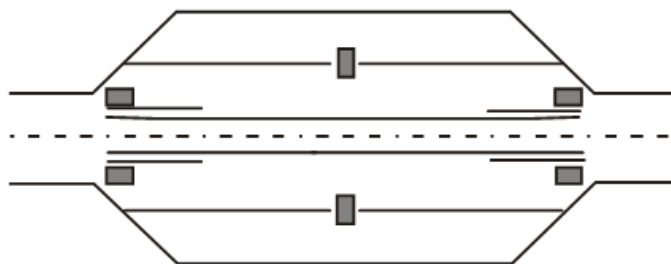


Рисунок 4 – Комбинированный ГГДШ (многокамерный)

С точки зрения нормирования уровней ГДШ важно не только значение акустической мощности его источника, но и спектральное распределение $L_{\text{норм}}(f)$.

Во втором разделе диссертации проведён анализ спектров превышений норм ГДШ $\Delta L(f)$ существующих типов ЗРА для рабочей среды «вода» и диапазона условных проходных диаметров $D_y=50...200$ мм при следующих параметрах рабочей среды: температура $20-40$ $^{\circ}\text{C}$, расход $Q=4...50$ $\text{м}^3/\text{ч}$, перепад давления на ЗРА $\Delta P=0,1...1$ МПа. Исследование превышений норм шума значительного количества элементов ЗРА гидросистем различного назначения позволило построить семейство третьоктавных спектров величин $\Delta L(f)$ для ЗРА (рисунок 5). Анализ $\Delta L(f)$ показал, что большая номенклатура современной ЗРА по причине ввода новых ужесточённых требований по ГДШ имеет превышение над максимально допустимыми значениями. Весь частотный диапазон превышения можно разделить на три участка:

- гарантированное выполнение норм (низкочастотный участок – до 63 Гц), $\Delta L(f) \leq 0$;
- переходный участок с неопределённостью знака $\Delta L(f)$ (средние частоты – 63-500 Гц);
- гарантированное превышение норм $\Delta L(f)$ (высокочастотный диапазон – 0,5 кГц-10 кГц).

В большинстве случаев характер изменения кривых превышения схож – наблюдается постепенное увеличение превышения нормы с увеличением частоты.

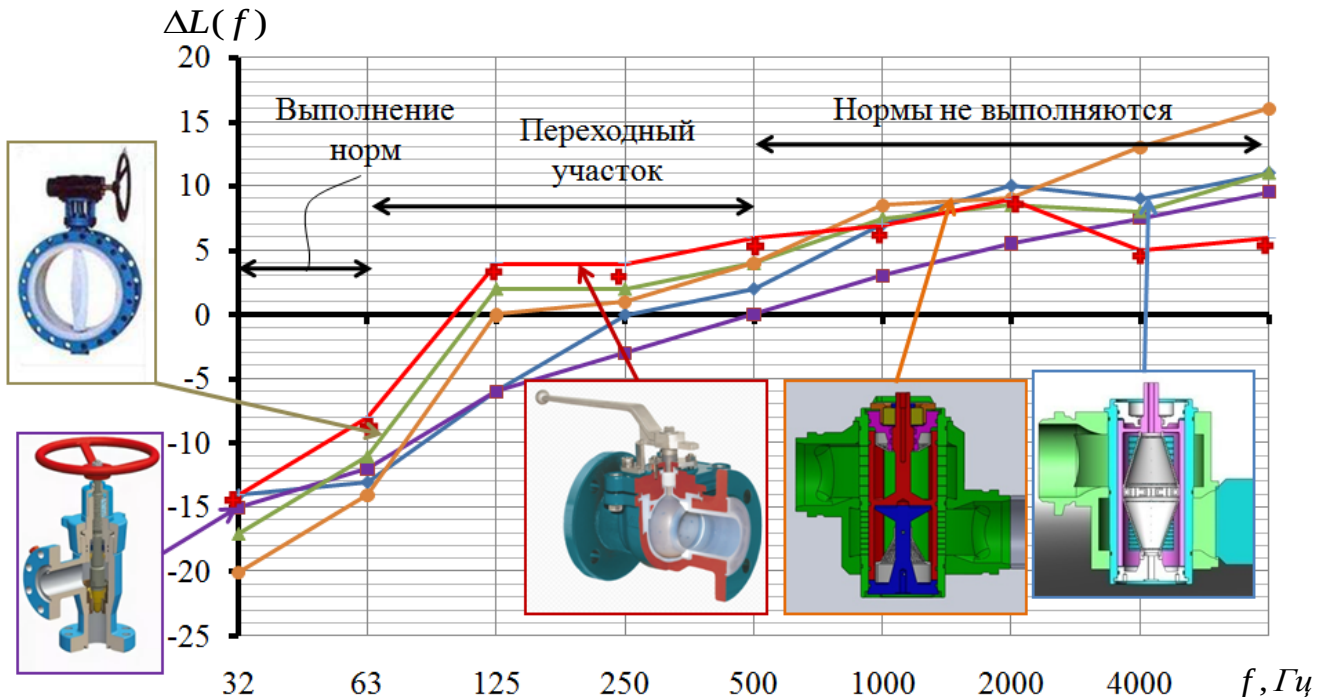


Рисунок 5 – Значение превышений норм разных типов ЗРА

На основе экспериментальных исследований выполнен выбор и обоснование комплексного применения средств по снижению ГДШ ЗРА, включающих мероприятия по снижению и трансформации генерируемого ГДШ в источнике (доработка ДрУ и создание перфорированных экранов) и средства для снижения колебательной энергии на путях её распространения (создания ГГДШ) (рисунок 6).

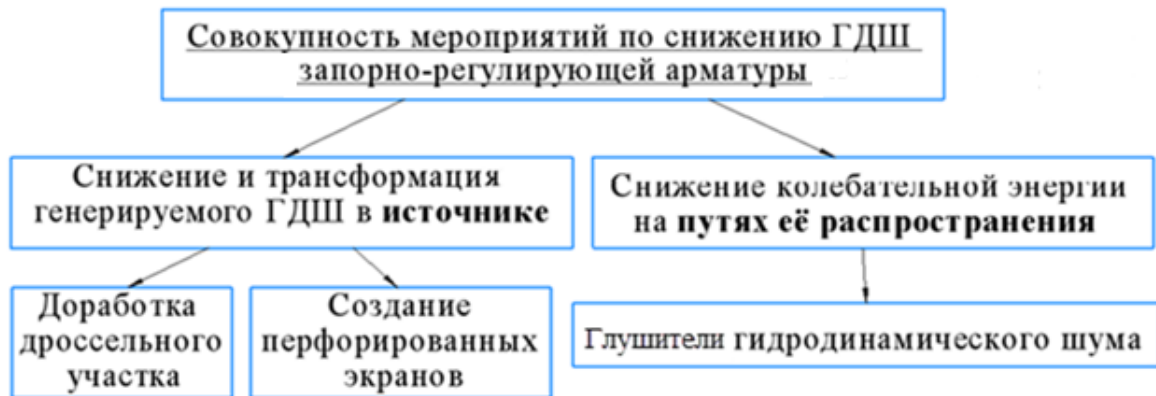


Рисунок 6 – Структурная схема комплексного применения средств по снижению ГДШ ЗРА

Основным источником ГДШ ЗРА является высокоскоростная струя, выходящая из ДрУ и взаимодействующая с элементами выходного тракта ЗРА и присоединённой трубопроводной арматурой. Акустическая мощность струи зависит от ряда параметров, основным из которых является скорость струи. Акустическая мощность определяется степенной функцией от скорости с показателем степени 6-8.

$$W_A \sim \frac{\rho \cdot V^k \cdot D^2}{c_0^n},$$

где ρ – плотность среды, кг/м³; V – скорость истечения струи, м/с; D – диаметр струи, м; c_0 – скорость звука в среде, м/с; для свободной струи $k=8$, $n=5$; для струи, взаимодействующей со стенкой $k=6$, $n=3$.

Известно, что за счёт изменения геометрии ДрУ имеется возможность снижения генерируемой акустической мощности, поэтому *важным этапом работы* является **определение геометрии малошумного ДрУ**. В качестве таких параметров предлагаются: изменение формы и размеров проточных каналов ДрУ.

Вторым мероприятием по снижению ГДШ является установка **перфорированных экранов**. На основании экспериментальных исследований установлено, что экраны трансформируют спектр шума с перераспределением энергии из низкочастотной области в высокочастотную, поэтому для трансформации спектра ГДШ струи предложено введение в проточную часть ЗРА перфорированных экранов, располагающихся на начальном участке и трансформирующих спектр струи.

Установлено, что возбуждение экранами высокочастотного шума обусловлено обтеканием струи ДрУ корпуса экрана и кромок его отверстий. Предложено для снижения генерации данного шума соосное расположение отверстий ДрУ и экрана, что требует выбор параметров ДрУ и экранов как единого комплекса по снижению ГДШ.

Третьим мероприятием является **установка ГГДШ**. ГГДШ реактивного типа широко используются в авиационной технике для снижения высокоинтенсивных колебаний. Конструкция реактивного (камерного) ГГДШ, предполагает наличие центрального канала, пропускающего основной расход среды. Однако с ростом скорости возникает увеличение собственного ГДШ. Поэтому условием применимости ГГДШ реактивного типа является низкий уровень собственного шума, возникающего в центральном канале. Для снижения последнего необходимо уменьшить скорость течения в центральном канале за счёт увеличения его диаметра. Однако, это приводит, руководствуясь теорией подобия, к увеличению габаритных размеров устройства. Потому применимость реактивных ГГДШ зависит от разности требуемой его эффективности и собственного шума ($\Delta L_{\text{ГГДШ}} - \Delta L_{\text{собст}}$), а также от габаритных ограничений на ГГДШ, в частности, для стендового ГГДШ, разработанного с участием автора (рисунок 8), эффективность составила 21-25 дБ для диапазона частот от 20 до 800 Гц. Однако при увеличении расхода от 25 м³/ч до 100 м³/ч она уменьшилась до 2-5 дБ на данных частотах и становилась отрицательной на низких (меньше 20 Гц) и высоких (более 300 Гц).

Таким образом, определены условия применимости реактивных ГГДШ как средства снижения ГДШ:

1. Максимальная скорость потока не должна превышать предельное значение (в случае вышеуказанного стендового ГГДШ это 3 м/с), $V_{\text{ГГДШ}}^{\text{max}} < V_{\text{тр}}$.

2. Эффективность ГГДШ должна быть больше требуемой на величину уровня собственного ГДШ, $\Delta L_{\text{ГГДШ}} > \Delta L_{\text{тр}}$.

3. Относительный диаметр и длина ГГДШ не должны превышать требуемые

$$\bar{L} = \frac{L_{\text{max}}}{D_y} \leq \bar{L}_{\text{max}}, \bar{D} = \frac{D_{\text{max}}}{D_y} \geq \bar{D}_{\text{max}}.$$

Стендовый ГГДШ (рисунок 7) удовлетворяет данным требованиям, поэтому успешно эксплуатируется более 10 лет. Однако к бортовым судовым агрегатам предъявляются более жёсткие габаритные ограничения. Так, с учётом установленной зависимости возбуждения собственного

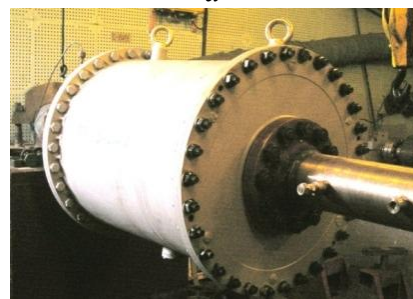
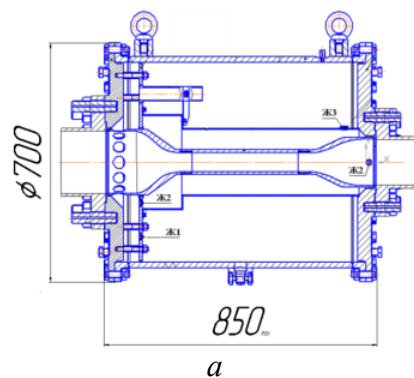


Рисунок 7 – Стендовый ГГДШ: его конструктивная схема (а) и внешний вид (б)

ГДШ от максимальной скорости (рисунок 8) и требуемой акустической эффективности был разработан многокамерный ГГДШ для клапанной сборки системы охлаждения судовой энергоустановки.

Для требуемой эффективности его габариты составили:

- $\bar{D}=3,75$, при $\bar{D}_{MAX}=2,5$;
- $\bar{L}=12$, при $\bar{L}_{MAX}=5$.

Приведённое сравнение (рисунок 9) рассчитанных габаритных размеров с предельно допустимыми показало неприемлемость применения ГГДШ реактивного типа. В целях снижения габаритов автор предлагает использование ГГДШ диссипативного типа с звукопоглощающим материалом МР (металлорезина), разработанным в Самарском университете. Такие ГГДШ наиболее эффективны в области высоких частот, реализующихся при применении перфорированных экранов ЗРА.

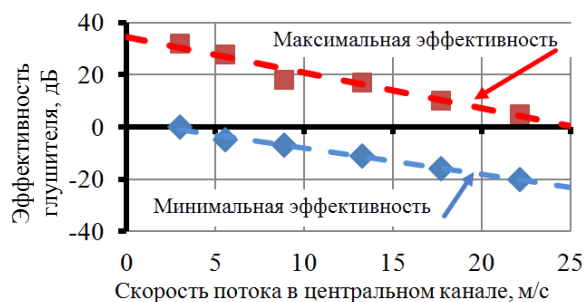


Рисунок 8 – Зависимость эффективности ГГДШ от максимальной скорости

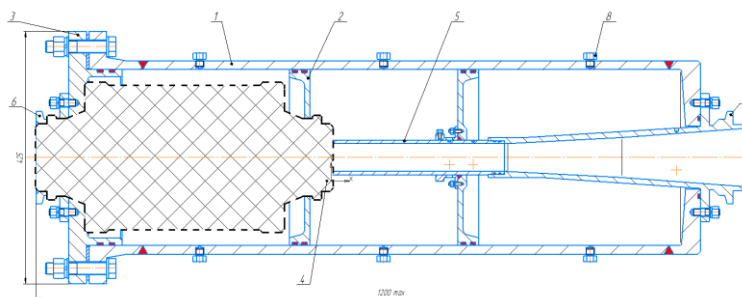


Рисунок 9 – Сравнение размеров камерного ГГДШ с требуемыми габаритными ограничениями (заштрихованный контур)

В работе приведено сравнение уровней ГДШ на входе и выходе (рисунок 10) разных типов ЗРА, из которого следует, что интенсивность колебательной энергии, распространяющейся по потоку и против него, соизмерима. Разница между уровнями ГДШ на входе и выходе ЗРА не превышает 2 дБ. Следовательно, необходима установка ГГДШ как на входе, так и на выходе ЗРА. Вследствие особенностей частотных характеристик диссипативных ГГДШ (эффективных в высокочастотной области) и экранов (эффективных в низкочастотной области), данные мероприятия следует рассматривать как комплекс «экраны–ГГДШ».

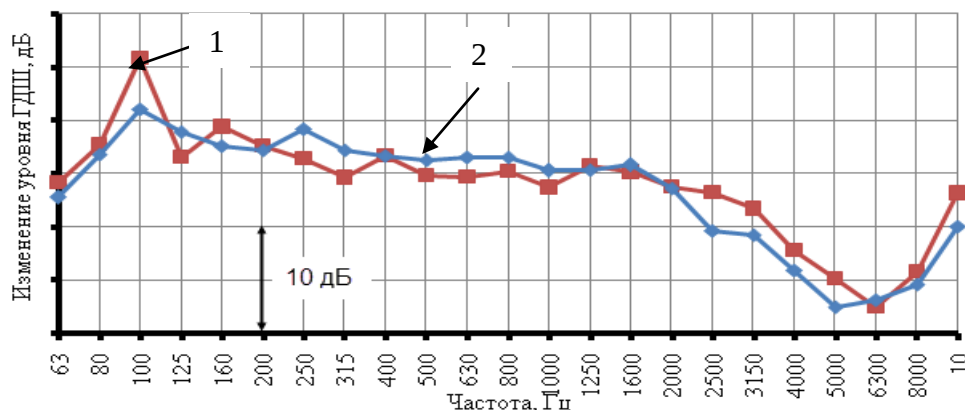


Рисунок 10 – Спектры ГДШ на входе (1) и выходе (2) ЗРА

В целом предложенные автором средства необходимо рассматривать как комплекс взаимосвязанных мероприятий «коррекция ДрУ–экраны–входной и выходной ГГДШ», причём установка глушителей необходима непосредственно на входе и выходе ЗРА (рисунок 11).

Таким образом, автором обоснована структура совокупности мероприятий (рисунок 11), комплексное применение которых обеспечивает эффективное снижение ГДШ ЗРА.

В третьем разделе представлена разработанная методика выбора параметров ДрУ, перфорированных экранов и диссипативных ГГДШ как совокупности мероприятий снижения ГДШ ЗРА гидросистем, позволяющая обеспечивать требуемое снижение уровней ГДШ.

Методика включает в себя алгоритм проектирования совокупности мероприятий и расчётно-экспериментальные зависимости эффективности снижения ГДШ отдельными его составляющими.

Исходными данными для проектирования являются:

- режимы работы (расход рабочей жидкости Q и перепад давления на ЗРА ΔP);
- образец ЗРА с экспериментально или численно полученной необходимой эффективностью;
- габаритные ограничения;
- необходимая эффективность снижения ГДШ $\Delta L_{Tr}(f_{L1}, f_{L2})$.

Алгоритм методики (рисунок 12) включает в себя следующие этапы:

1. На первом этапе производится коррекция ДрУ, при этом основными изменяемыми параметрами являются: форма канала, диаметр отверстий и расстояние между ними.
2. Проверяется, удовлетворяется ли следующее условие: расчётно-экспериментальная эффективность должна быть больше требуемой.

$$\Delta L_{ДрУ} > \Delta L_{Tr},$$

где $\Delta L_{ДрУ}$ – изменение уровня ГДШ при изменении конструкции ДрУ.

Если условие выполняется, то переходим к оформлению конструкторской документации (КД) ЗРА.

3. Если условие не выполняется, то проверяется частотное условие необходимости применения экранов

$$f_1^* > f_1^{ГГДШ},$$

где f_1^* – наименьшая граница частотного диапазона требуемой эффективности после доработки ДрУ; $f_1^{ГГДШ}$ – нижняя граница диапазона эффективной работы ГГДШ.

4. Если условие выполняется, то переходим к проектированию ГГДШ, если нет – переходим к оформлению КД ЗРА.

5. При разработке экранов (внутреннего и внешнего) определяются следующие параметры: расстояние между экранами, расстояние между первым экраном и ДрУ, диаметр отверстия каналов экранов.

6. После чего осуществляется проверка эффективности разработанных мероприятий

$$(\Delta L_{ДрУ} + \Delta L_{Эк}) > \Delta L_{Tr},$$

где $\Delta L_{Эк}$ – изменение уровня ГДШ при установке экранов.

Если условие выполняется, то переходят к оформлению КД ЗРА.

7. Если условие не выполняется, то проверяется частотное условие работоспособности ГГДШ

$$f_1^{**} < f_1^{ГГДШ},$$

где f_1^{**} – наименьшая граница частотного диапазона требуемой эффективности после доработки ДрУ и установки экранов.

Если условие не выполняется, то необходимо совместное изменение параметров экранов или ГГДШ. Если условие выполнилось – переходим к выбору параметров ГГДШ.

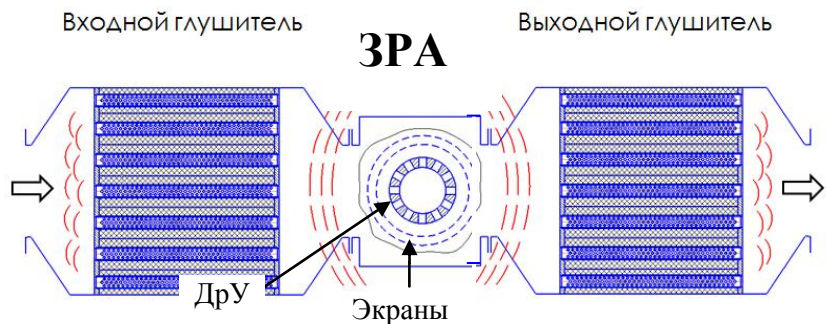


Рисунок 11 – Структура мероприятий по снижению ГДШ ЗРА

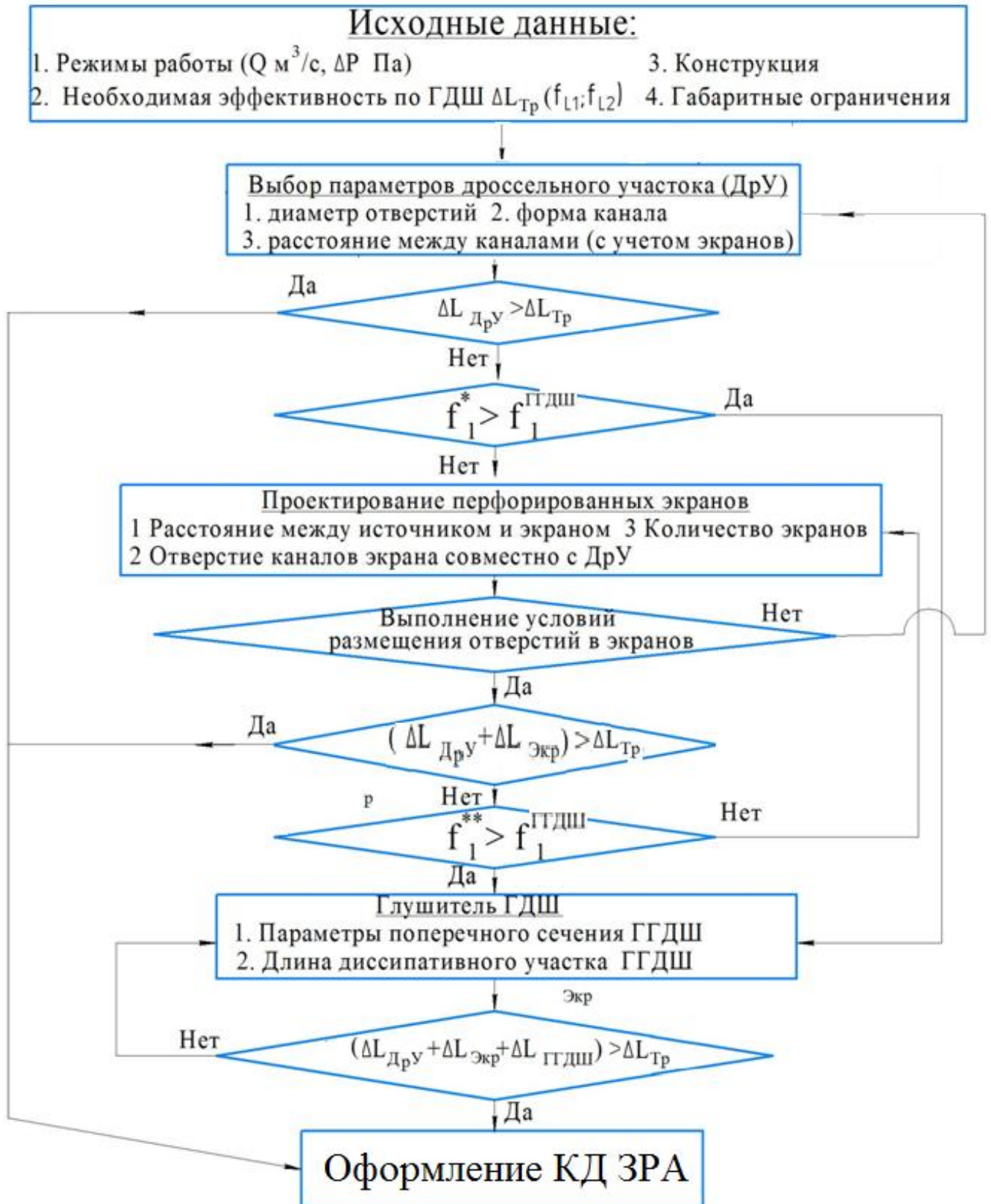


Рисунок 12 – Алгоритм методики выбора параметров совокупности средств снижения ГДШ ЗРА

8. На данном этапе методики происходит выбор основных параметров диссипативных ГГДШ: геометрических параметров продольного сечения и длины диссипативного участка.

После чего производится итоговая оценка эффективности всей совокупности мероприятий

$$(\Delta L_{\text{ДрУ}} + \Delta L_{\text{Эк}} + \Delta L_{\text{ГГДШ}}) > \Delta L_{\text{Тр}},$$

где $\Delta L_{\text{ГГДШ}}$ – изменение уровня ГДШ при установке ГГДШ.

Если условие не выполняется, то возвращаемся к выбору параметров ГГДШ; если выполняется, то переходим к оформлению конструкторской документации ЗРА.

Первым мероприятием является коррекция геометрических характеристик ДрУ.

Основные параметры показаны на рисунке 13: форма дросселирующего участка, диаметр отверстий каналов ДрУ и расстояние между каналами.

Рекомендации по выбору параметров направлены на уменьшение интенсивности зон смешивания и увеличения площади зоны смешения (уменьшения максимальной скорости и увеличение распределения области струй). С этой целью предлагаются этапы проектирования ДрУ.

1 этап – форма сечения проходных каналов ДрУ.

Экспериментальные и численные исследования показали, что наиболее оптимальной формой проходных каналов ДрУ является группа цилиндрических отверстий, а наилучшей формой является цилиндр без конфузورного и диффузорного участков.

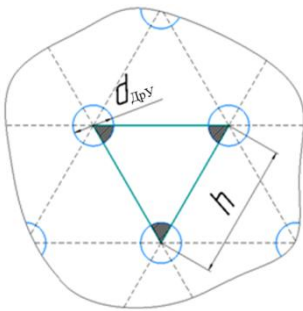
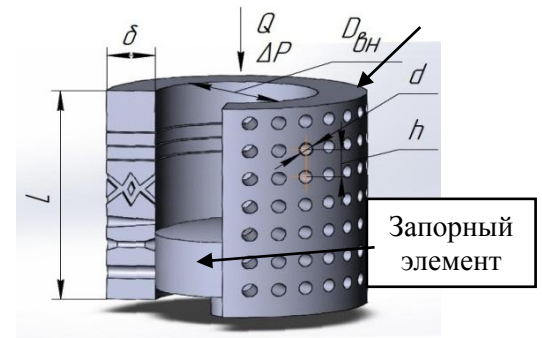


Рисунок 14 – Фрагмент развёртки участка ДрУ



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

Рисунок 13 – Геометрические параметры ДрУ

Для наиболее равномерного расположения, выберем участок с отверстиями, расположенными в узлах гексагональной сетки, которую можно разбить на элементарный сегмент – равносторонний треугольник (рисунок 14).

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 15). Предельное наименьшее значение диаметра каналов определяется из условия турбулентного течения рабочей жидкости:

течения рабочей жидкости:

$$\text{Re} = \frac{V \cdot d}{\nu} \geq 10^4, \text{ где } V - \text{ скорость течения, м/с; } \nu - \text{ кинематическая вязкость, м}^2/\text{с.}$$

Использование каналов менее 1 мм не целесообразно по технологическим параметрам и опасностью облитерации. Таким образом, **рекомендуется при скоростях рабочей жидкости в каналах ДрУ не менее 10 м/с принимать диаметр отверстия, равный 1 мм.**

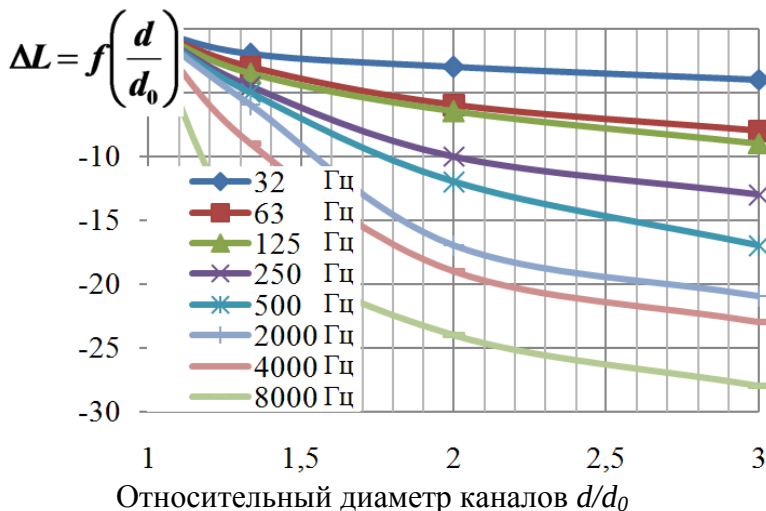


Рисунок 15 – Зависимость изменения уровня ГДШ от относительного изменения диаметра каналов ($d_0=1$ мм) в 1/3 октавных полосах частот

3 этап – выбор расстояния между отверстиями ДрУ.

Зная общую площадь $S_{\text{общ}}$ ДрУ ЗРА (определяется габаритными ограничениями) и площадь его проходного сечения $S_{\text{дрУ}}$ (с учётом коэффициента расхода), определяем минимально допустимый индекс перфорации: $\Pi_{\text{общ}} = S_{\text{дрУ}} / S_{\text{общ}}$. Определим индекс перфорации треугольного элемента Π_{Δ} в зависимости от относительного расстояния между осями каналов $\bar{h} = h / d_{\text{дрУ}}$. Приравнявая величины $\Pi_{\text{общ}}$ и Π_{Δ} , определяем $\bar{h}$.

4 этап – выбор расстояния между отверстиями ДрУ.

Зная $\bar{h}$ и диаметр отверстий, определяем расстояние между каналами и полностью определяем размеры плоского ДрУ $h_{\text{дрУ}} = \bar{h} \cdot d_{\text{дрУ}}$. Влияние относительного расстояния между отверстиями на уровни ГДШ ЗРА представлено на рисунке 16, из которого следует, что с увеличением этого расстояния уровни ГДШ возрастают.

Если после второго мероприятия (ЭКРАНЫ) потребуется увеличение расстояния между каналами, то будет необходима коррекция величины $h_{\text{дрУ}}'$:

$h_{\text{дрУ}}' = h_{\text{дрУ}} \cdot K_{\text{ЭКР}}$, где $K_{\text{ЭКР}}$ – поправка на установку экранов.

5 этап – определение углового шага и шага по высоте цилиндрической втулки.

Так как обычно, за исключением плоских золотников и пр., используется цилиндрический участок ДрУ, поэтому для него необходимо знать угловой шаг $\alpha_{\text{дрУ}} = 360 \cdot h_{\text{дрУ}} / (\pi \cdot D_{\text{дрУ}})$ и шаг по высоте $K_{\text{дрУ}} = \sqrt{3} \cdot h_{\text{дрУ}} / 2$ (рисунок 17).

6 этап – определение теоретической эффективности изменения уровней от изменения ДрУ ЗРА.

После определения геометрических параметров d и h необходимо получить теоретическую эффективность от каждого изменения: $\Delta L_{\text{дрУ}} = \Delta L_d + \Delta L_h$

Вторым мероприятием предлагаемого комплекса является **установка перфорированных экранов** на выходе проточной части ЗРА, физическая картина действия которых заключается в разбивке струи, что подтверждено результатами численного моделирования течения жидкости (рисунок 18). Так как размер основных вихрей уменьшается, то это сопровождается перераспределением колебательной энергии из низкочастотной области спектра в высокочастотную, о чём говорит число Струхала: $Sh = f \cdot L / V$, где f – частота образования вихрей, Гц; L – характерный линейный размер течения, м; V – характерная скорость потока, м/с.

При проектировании экранов важно, чтобы такая трансформация струи протекала с минимальным дополнительным звукоизлучением, обусловленным обтеканием тела экранов. Поэтому рациональным количеством экранов является $n=2$ по причине различных выполняемых ими целей.

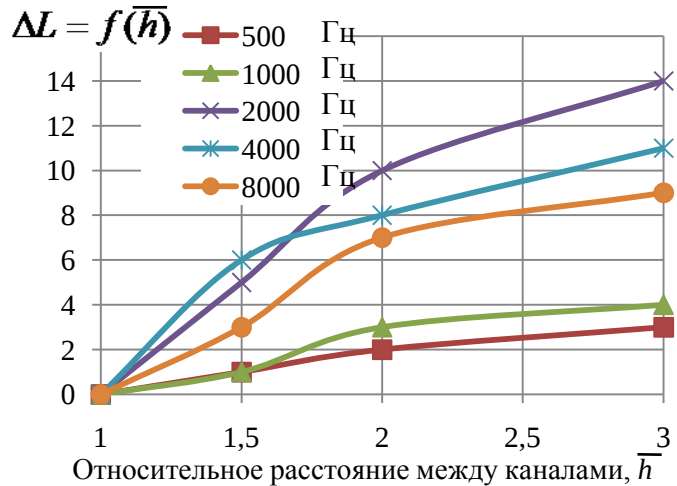


Рисунок 16 – Зависимость изменения уровня ГДШ от изменения относительного расстояния между каналами

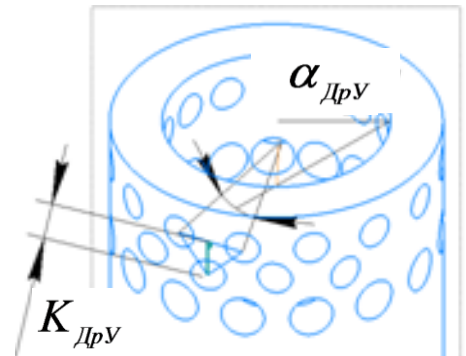


Рисунок 17 – Цилиндрический ДрУ

Анализ течения показал, что максимальная генерация шума происходит при обтекании тел экранов (преимущественно первого), поэтому наиболее выгодное расположение отверстий первого экрана является соосным с отверстиями ДрУ. Также анализ позволил установить функции 1 и 2-го экранов по обеспечению минимального ГДШ:

1. Экран внутренний:

– плавное торможение высокоскоростной струи с целью снижения генерации ГДШ;

– ослабление максимальной скорости струи, при наименьшем излучении ГДШ.

2. Экран внешний:

– формирование внешней равномерной струи, что обеспечивается при определённом перепаде давления на 2-ом экране.

На основе физической картины действия экранов, теории затопленной турбулентной струи и экспериментальных данных разработаны рекомендации по выбору основных соотношений между геометрическими параметрами экранов (рисунок 19):

1. Диаметр отверстий первого экрана $d_{\varepsilon 1}$ выбирается из условия минимального собственного ГДШ экранов:

$$d_{\varepsilon 1} = 2 \cdot d_{\text{ДрУ}}.$$

2. Диаметр отверстий второго экрана $d_{\varepsilon 2}$ выбирается из условий:

$$\mu_{\varepsilon 1} \cdot S_{\Pi}^{\varepsilon 1} \cong 2 \mu_{\varepsilon 2} \cdot S_{\Pi}^{\varepsilon 2}, \quad \text{где } S_{\Pi}^{\varepsilon 1}, S_{\Pi}^{\varepsilon 2} - \text{площади проходных сечений экранов};$$

$\mu_{\varepsilon 1}, \mu_{\varepsilon 2}$ – коэффициенты расхода отверстий экранов.

$$\Delta P_{\varepsilon 2} \leq 0,05 \cdot \Delta P_{\text{ДрУ}}, \quad \text{где } \Delta P_{\varepsilon 2}, \Delta P_{\text{ДрУ}} - \text{перепады давления на экране №2 и ДрУ.}$$

3. Радиальное расстояние от ДрУ до экрана №1 $h_{\varepsilon 1}$ выбирается из условия плавного торможения струи первым экраном:

$$d_c \approx 2d_{\varepsilon 1} \Rightarrow h_{\varepsilon 1} = 5d_{\text{ДрУ}}, \quad \text{где } d_c - \text{диаметр струи, натекающей на первый экран.}$$

4. Радиальное расстояние между экранами $h_{\varepsilon 2}$ выбирается из условия реализации возможности расположения несоосных отверстий наружных экранов.

При проектировании экранов важно, чтобы трансформация струи протекала с минимальным дополнительным звукоизлучением, обусловленным обтеканием тела экранов. Это обеспечивается за счёт соосного расположения отверстий ДрУ, экрана №1 и частью отверстий экрана №2.

Изменение спектра ГДШ, характеризующее эффективность экранов и зоны снижения и увеличения ГДШ после выполнения данных мероприятий, показано на рисунке 20.

Разработка ГГДШ – третье мероприятие комплекса. Применение ГГДШ на входе и выходе ЗРА целесообразно в случае недостаточной эффективности доработки ДрУ и установки перфорированных экранов. Если после реализации двух указанных мероприятий требуемый

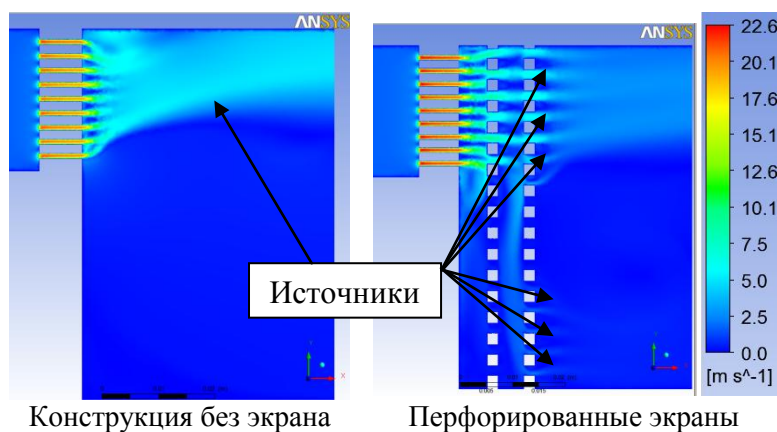


Рисунок 18 – Картина распределения скорости

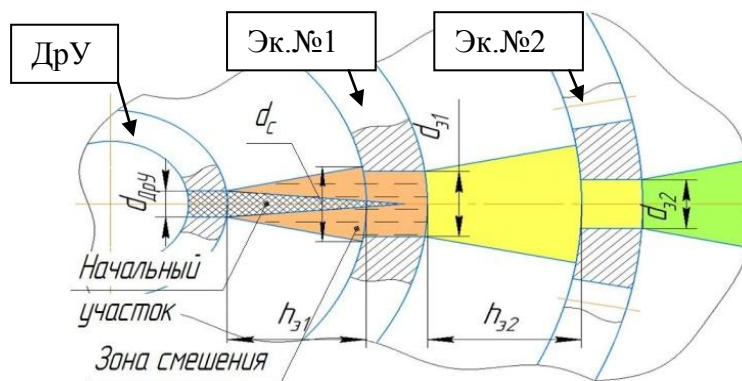


Рисунок 19 – Схема течения струи в проточной части ЗРА

уровень ГДШ ЗРА не достигнут, то предлагается установка го и выходного ГГДШ дистивного типа, эффективность которых возрастает с ростом частоты. В качестве звукопоглощающего материала известно эффективное применение «металлорезины» (МР) в гасителях пульсаций давления непроточного типа для измерительных гидравлических и газовых цепей.

Поскольку для эффективного поглощения шума необходимо значительно увеличивать гидравлическое сопротивление данного пористого материала, то предложена в структуре материала МР реализация параллельных узких каналов, пропускающих значительный расход рабочей жидкости.

Из схемы ГГДШ (рисунок 21) видно, что его действие аналогично воздушному сотовому глушителю, представляющему совокупность облицованных звукопоглощающим материалом параллельных каналов. Работоспособность предложенной схемы диссипативного ГГДШ с малым гидравлическим сопротивлением будет обеспечена при условии реализации поперечных мод колебаний в глушителе, при этом достигается интенсивное взаимодействие волнового поля с пористым материалом.

В связи с этим при проектировании ГГДШ необходимо выполнить следующие условия:

1. Условие эффективного поглощения ГДШ – сопротивление звукопоглощающего элемента должно удовлетворять неравенству [Юдин Е.Я.]:

$2 \cdot Z_B \leq R_{MP} \leq 4 \cdot Z_B$, где R_{MP} – удельное сопротивление потоку; Z_B – волновое сопротивление пористой среды с рабочей жидкостью.

Удельное сопротивление потоку в поперечном направлении (аналогичное сопротивлению продуванию для воздушных глушителей) равно [Изжеуров Е.А.]:

$$R_{MP} = \frac{\lambda \cdot \mu \cdot h \cdot (1 - \Pi)^2}{d_{ПК}^2 \cdot \Pi^3},$$

где λ – коэффициент, зависящий от структуры материала; $h = K_{кон} \cdot D$ – осреднённая по сечению толщина слоя МР в радиальном направлении, м; $K_{кон} = 0,1 \dots 0,5$ – коэффициент радиальной наполненности среды материалом МР; μ – коэффициент динамической вязкости, Па*с; Π – пористость материала МР; $d_{ПК}$ – диаметр проволоки, из которой изготовлен МР, м.

Волновое сопротивление пористой среды с рабочей жидкостью определяется следующим образом: $Z_B = \rho_{CP} \cdot c_{CP}$, где $\rho_{CP} = \rho_{Ж} \cdot \Pi_{CP} + \rho_{ПР} \cdot (1 - \Pi_{CP}) \cdot K_M$ – эквивалентная плотность пористой среды с учётом осевых каналов; $\rho_{Ж}$, $\rho_{ПР}$ – плотность рабочей жидкости и материала проволоки; Π_{CP} – пористость среды с учётом осевых каналов; $K_M = 0 \dots 1$ – коэффициент присоединённой соколеблющейся массы материала МР, определяемый экспериментально;

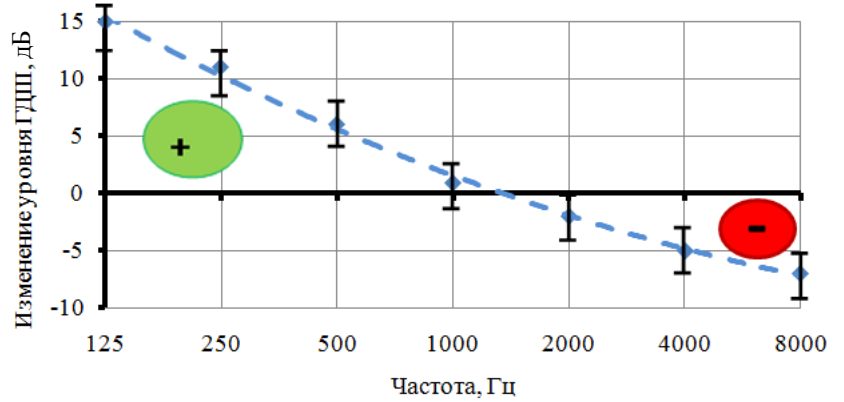


Рисунок 20 – Спектр эффективности экранов

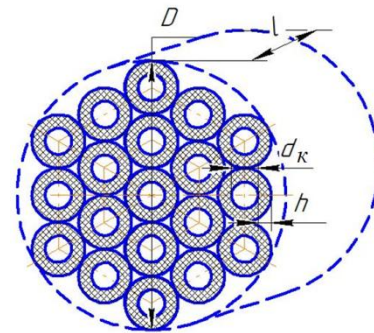
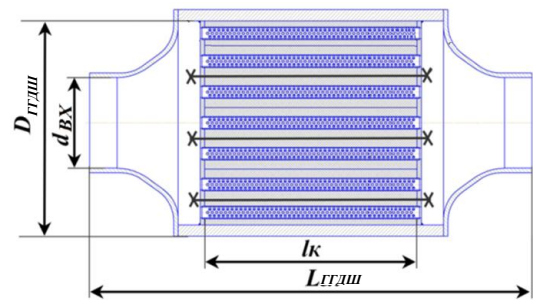


Рисунок 21 – Схема диссипативного ГГДШ с характерными размерами

$c_{CP} = c_{Ж} / \sqrt{\left(1 + \frac{D}{\delta} \cdot \frac{K_{Ж}}{E'}\right) \cdot \left(\frac{\rho_{CP}}{\rho_{Ж}}\right)}$ – скорость звука в пористой среде с рабочей жидкостью, м/с;

$c_{Ж}$ – скорость звука в жидкости, м/с; $K_{Ж} = \rho_{Ж} \cdot c_{Ж}^2$ – модуль объёмной упругости рабочей жидкости, Па; $E' = \frac{E}{\sqrt{1-\nu^2}}$ – модуль упругости стенки трубы, Па; E – модуль упругости материала

стенки трубы, Па; δ – толщина стенки, м; ν – коэффициент Пуассона.

2. Технологические ограничения на материал МР: $П=0,5\dots0,9$, $d_{ПК}=0,06\dots0,25$ мм.

3. Условие гидравлического сопротивления.

В целях уменьшения гидравлического сопротивления ГГДШ необходимо, чтобы суммарная площадь поперечного сечения каналов была в « K » раз больше, чем площадь входного трубопровода:

$$S_{BX} = K \cdot N \frac{\pi \cdot d_K^2}{4},$$

где $K=1\dots1,5$ – коэффициент запаса по площади; $N = 1 + \sum_{i=1}^{n_{РЯД}} i \cdot 6$ – количество каналов при коли-

честве рядов $n_{РЯД}$; d_K^2 – диаметр каналов, м.

4. Условие неплоскостности волны (условие интенсивного взаимодействия поперечных волновых мод с пористой диссипативной средой) $D \geq 0,586 \cdot c_{CP} / f_{\min}$.

Геометрические параметры ГГДШ ($D_{ГГДШ}$, $L_{ГГДШ}$, d_k , h , l_k , D , $K_{кон}$, N), характеристики пористого материала ($П$, $d_{нк}$, K_m , $\rho_{пр}$), а также параметры $П_{ср}$, $\rho_{ср}$, $c_{ср}$, Z_B зависят от множества исходных параметров: гидравлического сопротивления, требуемого частотного диапазона, габаритных ограничений и пр. Так как в задачи работы не входило определение оптимальных параметров глушителя ГДШ, то была экспериментально определена зависимость эффективности глушителя с рассчитанной геометрией поперечного сечения (в соответствии с выше указанными условиями) от длины диссипативного участка (рисунок 22). По данной зависимости определяется необходимая длина диссипативного участка l_k , обеспечивающая необходимую эффективность глушителя.

В четвёртом разделе описана модернизация клапанной сборки системы охлаждения судовой энергоустановки с помощью разработанной автором в разделе 3 методики. Подробно рассмотрена процедура расчёта и выбора параметров ДрУ, экранов и ГГДШ. Исходными данными для этого являются следующие:

- параметры режима работы ЗРА: расход рабочей жидкости $Q=32$ м³/ч и перепад давления на ЗРА $\Delta P=1,3$ МПа;
- параметры конструкции исходного образца ЗРА, состоящего из двух клапанов с цилиндрическим дроссельным участком с группой отверстий диаметром 3 мм;
- габаритные ограничения на ГГДШ. Длина не более 0,6 м, включая входную и выходную часть, диаметр 0,45 м;
- Необходимая эффективность по снижению ГДШ $\Delta L(f_{L1}, f_{L2})$.

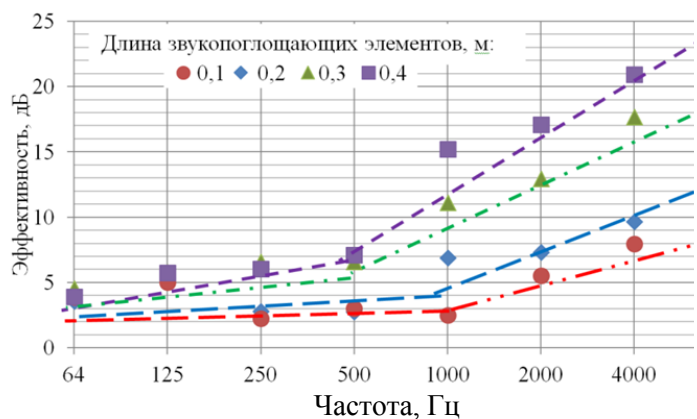


Рисунок 22 – Зависимость эффективности ГГДШ от длины диссипативных элементов

Доработка ДрУ заключалась в уменьшении диаметра отверстий каналов с 3 до 1 мм и расстояния между каналами с 7 до 3 мм. На выходе проточной части установлены двухступенчатые перфорированные экраны с диаметрами отверстий: экран №1 – 2,1 мм, экран №2 – 1,5 мм. Отверстия экранов и ДрУ располагаются соосно. Установлена требуемая нижняя граница диапазона эффективной работы ГГДШ $f_1^F = 1000 \text{ Гц}$. Исходя из чего, выбраны следующие параметры ГГДШ: внутренний диаметр глушителя 420 мм, толщина стенок 15 мм, 127 каналов (6 рядов) диссипативных элементов (ДЭ), диаметр канала 12 мм, толщина слоя 10 мм, диаметр проволоки 0,1 мм, пористость 0,5. Длина ДЭ выбрана согласно рисунку 22 и составила 0,2 м.

На рисунке 23 изображена поэтапная коррекция спектра превышения ГДШ после реализации данных мероприятий.

По разработанной конструкции были изготовлены и испытаны опытные образцы ЗРА (в виде клапанной сборки), входного и выходного ГГДШ (рисунок 24). Экспериментальные исследования, выполненные на полномасштабном стенде в АО «Концерн «НПО «Аврора», подтвердили требуемую эффективность разработанных средств снижения ГДШ до требуемых норм.

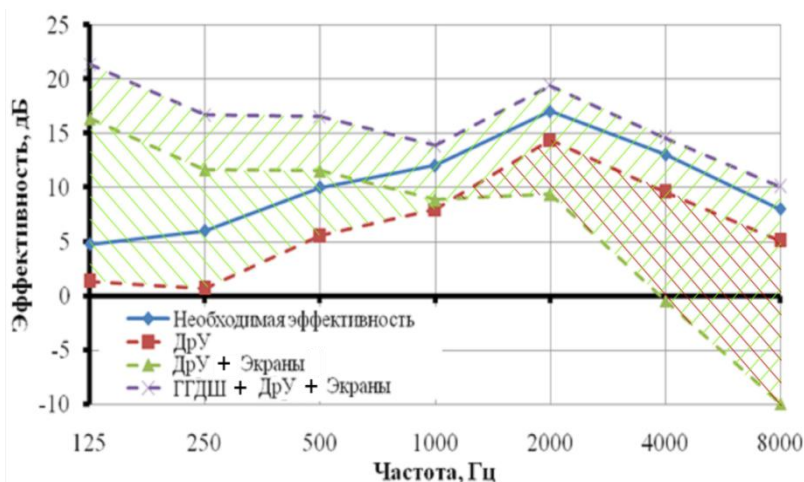


Рисунок 23 – Поэтапная коррекция спектра превышения ГДШ

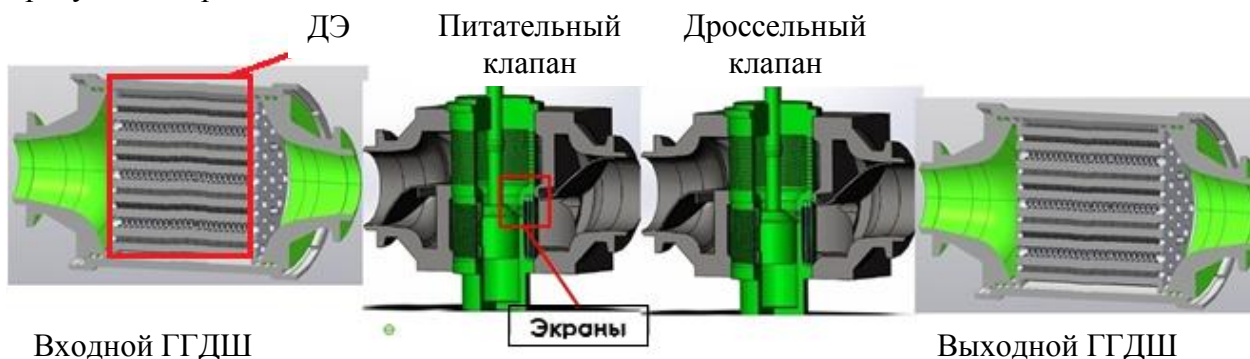


Рисунок 24 – Разработанная клапанная сборка

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В соответствии с целью исследований в диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача по созданию малозумной запорно-регулирующей арматуры гидросистем за счёт разработки эффективных средств подавления ГДШ, имеющая существенное значение для промышленных предприятий, разрабатывающих и использующих трубопроводную арматуру.

Основные результаты и выводы выполненной работы заключаются в следующем:

1 На основе анализа превышений норм по шуму существующих типов ЗРА для рабочей среды «вода» и диаметров труб $D_y=50 \dots 200$ мм были выделены частотные диапазоны выполнения норм (до 63 Гц), превышения норм (свыше 600...800 Гц) и переходный (60...800 Гц), на котором для одних типов ЗРА нормы выполняются, для других – нет.

2 Обоснована и подтверждена эффективность комплексного применения средств снижения ГДШ клапанной арматуры, включая коррекцию проточной части ЗРА с установкой на её выходе перфорированных экранов, перераспределяющих колебательную энергию из низкочастотной (5...250 Гц) в высокочастотную (свыше 1000 Гц) область спектра, а также использование диссипативных глушителей ГДШ, наиболее эффективных в области высоких частот.

3 Разработана методика совместного выбора параметров ДрУ, перфорированных экранов и диссипативных глушителей, позволяющая выбирать наиболее рациональные параметры устройств, обеспечивающих требуемое снижение уровней ГДШ.

4 Определены экспериментально-аналитические зависимости уровней ГДШ от конструктивных параметров дросселирующего участка ЗРА, позволившие определить наиболее рациональную цилиндрическую форму дросселирующего канала клапана с точки зрения минимального возбуждения ГДШ, причём диаметр канала должен быть минимально допустимым с учётом его закупоривания и облитерации.

5 Описана и подтверждена экспериментальными и численными методами физическая картина функционирования перфорированных экранов-рассекателей, на основе которой разработаны рекомендации по их проектированию.

6 Обоснована область применимости реактивных глушителей для снижения ГДШ, определяемая ограничениями по габаритам и генерации собственного ГДШ при повышенных скоростях потока (свыше 3-5 м/с) в их проточных элементах.

7 Предложена конструкция и методика выбора параметров диссипативного глушителя шума с элементами из пористого материала МР, обеспечивающего эффективное подавление акустических колебаний в жидкой рабочей среде.

8 Предложенная методика, а также средства снижения ГДШ в проточных частях гидравлических приборов, разработанные на её основе, внедрены на АО «Концерн «НПО «Аврора» для разработки электрогидравлических приборов, что позволило обеспечить требуемые нормы по ГДШ. Разработанная методика выбора параметров малошумного дроссельного участка использована при создании технологии гидродинамического и аэродинамического проектирования проточной части регулирующей арматуры осевого типа в КБ «Армас» АО «ЦТСС».

Таким образом, цель диссертации достигнута в части научного решения поставленной задачи и её практической реализации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Устранение газодинамических резонансных режимов виброн нагружения трубопроводной арматуры газораспределительных станций [Текст] / **М.А. Ермилов**, М.В. Баляба, А.Н. Крючков [и др.] // Вестник СГАУ. – 2014. – № 4 (35). – С. 184-192.

2. **Ермилов, М. А.** Разработка эффективных устройств снижения виброакустических нагрузок в линиях редуцирования газораспределительных станций [Текст] / М.А. Ермилов, А.Н. Крючков, К.Ю. Шабанов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – №6 (16). – С. 300-304.

3. Устранение газодинамических автоколебаний в выходном тракте регулятора давления газа [Текст] / **М.А. Ермилов**, М.В. Баляба, А.Н. Крючков [и др.] // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2016. – № 3 (15). – С. 35-45.

4. Схемно-конструктивные решения по созданию аппаратуры систем управления расходом питательной воды [Текст] / Э.Г. Берестовицкий, Ю.А. Гладилин, **М.А. Ермилов** [и др.] // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2016. – № 4 (15). – С. 184-194.

5. Исследование гидравлических и виброакустических характеристик перспективного клапана-дросселя с рабочим органом в виде эластичного трубчатого элемента [Текст] / Н.Н. Ромашов, А.Н. Крючков, **М.А. Ермилов** [и др.] // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2017. – № 4 (16). – С. 82-90.

В изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus

6. Hydrodynamic noise dampener with metal rubber [Text] / **М.А. Ermilov**, A.I. Safin, A.A. Igolkin [et al.] // 21st International Congress on Sound and Vibration, ICSV21. – 2014. – P. 1-7.

7. Research of an Influence of Throttle Element Perforation on Hydrodynamic Noise in Control Valves of Hydraulic Systems [Text] / **М.А. Ермилов**, E.G. Berestovitskiy, A.N. Kryuchkov [et al.] // Procedia Engineering. – 2015. – V. 106. – P. 284-295.

Патенты РФ

8. Пат. 2622679 Российская Федерация, МПК 7F 16 L 55/04. Устройство для гашения пульсаций давления в линиях редуцирования газа [Текст] / К.Ю. Шабанов, В.А. Грабовец, А.Н. Крючков, **М.А. Ермилов**, М.В. Баляба; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Газпром трансгаз Самара» (RU). – № 2015155946; заявл. 24.12.15; опубл. 19.06.17, Бюл. № 17. – 8 с.: ил.

9. Пат. 190998 Российская Федерация, МПК 7G 05 D 16/10. Прямоточный регулятор давления газа со встроенным гасителем пульсаций [Текст] / М.В. Баляба, Д.М. Стадник, А.Н. Крючков, **М.А. Ермилов**; заявитель и патентообладатель Самарский университет (RU). – № 2019109465; заявл. 01.04.19; опубл. 18.07.19, Бюл. № 20. – 6 с.: ил.

В других изданиях и материалы конференций

10. Исследование гидродинамического шума проточных элементов клапанной арматуры судовых систем управления [Текст] / **М.А. Ермилов**, Э.Г. Берестовицкий, А.Н. Крючков [и др.] // Морской вестник. – 2016. – №2 (58). – С. 52-54.

11. Разработка гасителя пульсаций давления для гидросистем энергоустановок [Текст] / **М.А. Ермилов**, А.Н. Крючков, Е.Н. Ермилова [и др.] // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2019. – т. 18, № 2. – С. 146-155.

12. Разработка и апробация методики расчёта гидродинамического шума и виброакустических характеристик дроссельно-регулирующей арматуры гидросистем [Текст] / Н.Н. Ромашов, **М.А. Ермилов**, Е.Н. Ермилова [и др.] // Динамика и виброакустика. – 2019. – № 3 (5). – С. 14-19.

13. Экспериментальное и компьютерное моделирование гидродинамического шума потока рабочей среды в проточных частях регулирующих органов гидравлических систем [Текст] / **М.А. Ермилов**, Э.Г. Берестовицкий, А.Н. Крючков [и др.] // XXVII сессия Российского акустического общества, посвященная памяти учёных-акустиков ФГУП "Крыловский государственный научный центр" А.В. Смолякова и В.И. Попкова, Санкт-Петербург, 16-18 апреля 2014.

14. Экспериментальное и численное моделирование гидродинамического шума проточных частей гидроагрегатов [Текст] / Э.Г. Берестовицкий, **М.А. Ермилов**, А.Н. Крючков [и др.] // The Second International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines, September 15-17, Samara, 2014.

15. **Ермилов, М.А.** Защита измерительного участка гидравлического стенда от виброакустических помех [Текст] / М.А. Ермилов, А.Н. Видяскина, А.Н. Крючков // Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика. XXIV Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. Сборник материалов и докладов. – 2020. – С. 66-73.

16. Разработка гасителя пульсаций давления для пневматического испытательного стенда [Текст] / **М.А. Ермилов**, М.В. Баляба, А.Н. Крючков [и др.] // Гидропневмоавтоматика и гидропривод: материалы Всероссийской научно-технической и научно-методической конференции, посвященной 45-летию кафедры гидропневмо-автоматики и гидропривода. – 2020. – С. 24-35.