

УДК 681.8

DOI: 10.18287/2409-4579-2022-8-1-18-24

Е.Н. Ермилова  
А.Н. Видяскина  
М.А. Ермилов

Самарский национальный  
исследовательский университет  
имени академика С.П. Королёва

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

makaroff.zhenia2011@yandex.ru

## РАЗРАБОТКА СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ШУМА ДРОССЕЛЬНЫХ ШАЙБ. РАСЧЁТ БЕСКАВИТАЦИОННОГО РЕЖИМА ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ ДРОССЕЛЬНОЙ ШАЙБЫ

*В статье представлена разработка стенда для исследования уровня гидродинамического шума дроссельных шайб. Проводятся исследования собранного стенда на наличие собственных стендовых помех. По результатам исследований проведены мероприятия по снижению собственных стендовых помех. Также представлен расчёт для определения режима испытаний дроссельных шайб, исключающий возникновение кавитационных процессов при экспериментах.*

**Ключевые слова:** *стенд; испытание; стендовые помехи; кавитация*

### 1 Введение

В настоящее время трубопроводные системы широко применяются на многих промышленных объектах (энергетические и химические производственные предприятия, морские суда и другие).

Для регулирования расхода и давления жидкостей, транспортируемых по трубопроводам, в гидравлических системах применяют запорно-регулирующую арматуру (ЗРА). В этих устройствах изменяется площадь проходного сечения, при этом также изменяется и сопротивление потоку. Основной функцией ЗРА является управление расходом или давлением рабочей среды в заданном диапазоне рабочих режимов. Запорно-регулирующая арматура, зачастую, является источником шума и вибраций гидравлических систем. А именно высокоскоростная струя на выходе из дросселирующего участка, создающая пульсации давления [1].

Поскольку на данный момент существенно ужесточились нормы уровней шума на различных предприятиях, то требуется уделять большее внимание акустическим характеристикам различных видов ЗРА при её проектировании.

Как правило, недостаточно только расчётных данных при проектировании ЗРА. После её изготовления требуются испытания

и доводка акустических параметров арматуры. Это выполняется на специальных стендах, имитирующих реальные условия работы агрегатов [2]. Особенно остро стоит вопрос о снижении уровня гидродинамического шума (ГДШ) в системе стенда при исследовании виброакустических характеристик (ВАХ) агрегата, т.к. при этом затрудняется корректное определение ВАХ и ГДШ агрегата, из-за значительных помех, вносимых стендовым оборудованием.

### 2 Конструкция стенда

На базе Самарского университета был разработан и создан стенд для исследования акустических характеристик дроссельного участка ЗРА. Принципиальная схема этого стенда представлена на рисунке 1.

Преимущество данного стенда состоит в том, что его испытательный участок открытого типа. Это даёт возможность визуально оценивать характер поведения потока.

В данной компоновке схемы, источником давления рабочей среды может являться как напор, создаваемый в системе (магистральный трубопровод), так и избыточное давление воздуха, накачиваемого в гидробак (вытеснительная подача). Внешний вид гидробака представлен на рисунке 2. Объём гидробака составляет 70 л.

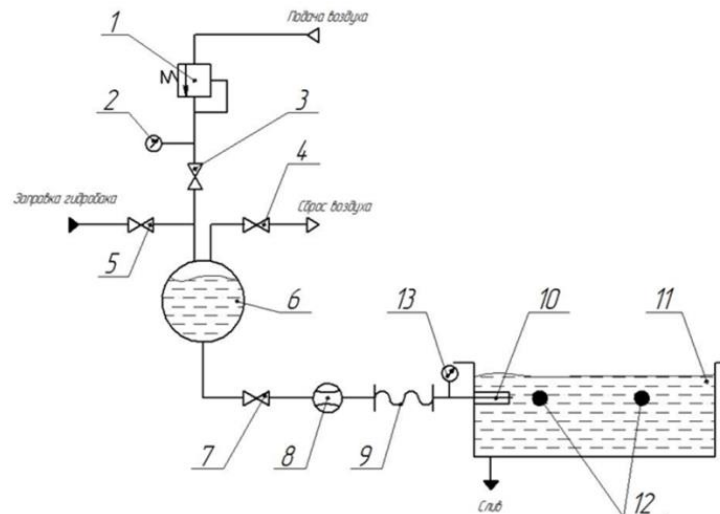


Рисунок 1. Принципиальная схема стенда

1 – регулятор давления воздуха, 2 – манометр, 3 – вентиль подачи воздуха, 4 – вентиль сброса воздуха, 5 – вентиль подачи воздуха, 6 – гидробак, 7 – вентиль подачи жидкости в ёмкость, 8 – расходомер, 9 – гибкий трубопровод, 10 – место установки испытуемых образцов дросселирующих элементов ЗРА, 11 – ёмкость, 12 – гидрофоны, 13 – манометр.



Рисунок 2. Внешний вид гидробака

В качестве расходомера 8 (рисунок 2) применялся ультразвуковой расходомер «СИГМА-С», показанный на рисунке 3.



Рисунок 3. Расходомер

Использование в конструкции стенда гибкого трубопровода 9 (рисунок 2) обусловлено необходимостью снижения ГДШ, генерируемого стендовой арматурой и распространяющегося по трубопроводам. Внешний вид гибкого трубопровода представлен на рисунке 4.



Рисунок 4. Внешний вид гибкого трубопровода

В качестве датчиков, измеряющих уровень ГДШ при испытании дросселирующих элементов, были выбраны гидрофоны ZETLAB BC311, врезного исполнения, их внешний вид представлен на рисунке 5. На рисунке 6 показаны их характеристики.



Рисунок 5. Применяемый гидрофон

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	
Обозначение	BC 311
Тип исполнения	погружной
Номинальная чувствительность по напряжению	65 мкВ/Па
Номинальная чувствительность по заряду	от 0,35 до 0,65 нКл/Па
Уровень чувствительности (относительно 1 В/мкПа)	-204 дБ
Частотный диапазон	3...100 000 Гц
Максимальное значение амплитуды измеряемого звукового давления	100 кПа
Максимальное значение амплитуды измеряемого звукового давления с аттенуатором	до 10 МПа
Предельное статическое давление	60 МПа
Электрическая емкость (со встроенным кабелем)	не менее 6 нФ
Взрывозащищенное исполнение	— по заказу
Материал корпуса	нержавеющая сталь
Размеры (длина × диаметр корпуса)	173 × ø23 мм
Присоединительная резьба	M20×1,5
Масса (без кабеля)	—
Длина кабеля стандартная	10 м
Предельная длина кабеля	250 м
Внешний диаметр кабеля	10,2 мм
Вид кабеля	коаксиальный с оболочкой ПВХ, имеет центральный проводник и экран устойчив к среде, содержащей серную кислоту
Разъем кабеля	BNC
Рабочая среда измерений	вода, воздух, нефть и нефтепродукты, природный газ
Температура рабочей среды	0...+60 °С
Температура окружающего воздуха	-60...+80 °С

Рисунок 6. Характеристики применяемых гидрофонов

Схема подключения гидрофонов показана на рисунке 7.



Рисунок 7. Схема подключения гидрофонов

Место установки испытуемых образцов (например, шайб с группой отверстий) было спроектировано таким образом, чтобы обеспечивалась герметичность между сопрягаемыми деталями. Расход рабочей жидкости должен проходить через каналы испытуемых образцов.

Дополнительно обеспечена возможность установки перфорированных экранов на выходе дросселирующего участка испытуемого образца. Необходима возможность устанавливать перфорированные экраны на расстоянии 1, 2, 4, 6, 10 и 12 мм от испытуемых шайб. На рисунке 8 отображена разработанная конструкция.

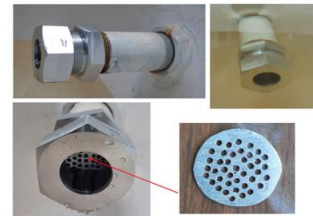
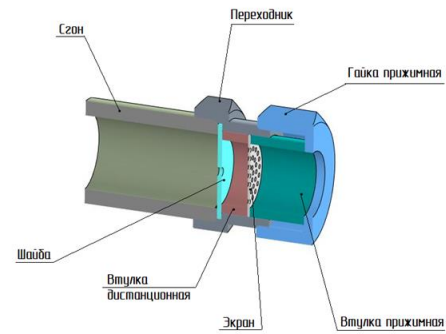


Рисунок 8. Место установки испытуемых образцов

### 3 Исследование стендовых помех

Для корректного определения ГДШ дросселирующих элементов необходимо снизить помехи от внешнего воздействия и источников самого стенда.

Испытательный участок находится в ёмкости, наполненной водой. Результаты измерений собственного акустического фона испытательного стенда показаны на рисунке 9.

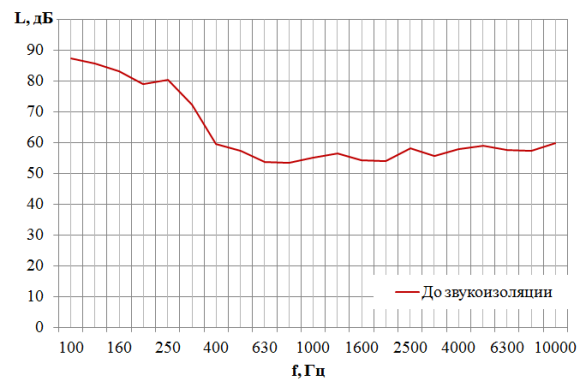


Рисунок 9. Акустический фон на испытательном участке стенда

Требуемый уровень акустического фона на испытательном стенде должен быть не более 60 дБ во всём диапазоне частот. На графике наблюдается превышение нормы до частоты 400 Гц.

Это объясняется тем, что на ёмкость воздействуют внешний шум, от которого стенки ёмкости начинают резонировать и вибрировать. Эти колебания порождают распространение в рабочей жидкости ГДШ. Это вносит существенные помехи на результаты измерений. Поэтому необходимо провести мероприятия по звукоизоляции ёмкости.

#### 4 Звукоизоляция испытательного участка

Первый этап, направленный на снижение акустической помехи, вносимой стендовым оборудованием – звукоизоляция измерительного участка. Для этого предлагается повышение звукоизоляции стенок ёмкости. Внешняя сторона ёмкости покрывается вспененным полимером, который, полимеризуясь на воздухе, образует плотную пористую структуру толщиной до 40 мм. Эта структура представляет собой монолитную обечайку, способствующую поглощению колебаний внешнего акустического воздействия. На рисунке 10 представлен внешний вид ёмкости после нанесения звукоизолирующего материала на внешнюю поверхность.



Рисунок 10. Внешний вид ёмкости после нанесения звукоизолирующего материала

Открытая поверхность ёмкости сверху дополнительно изолировалась листом минеральной ваты толщиной 100 мм.

Внешний вид ёмкости после применения мер по звукоизоляции представлен на рисунке 11.



Рисунок 11. Внешний вид ёмкости после звукоизоляции

Результаты измерений акустического фона до и после звукоизоляции ёмкости представлены на рисунке 12.

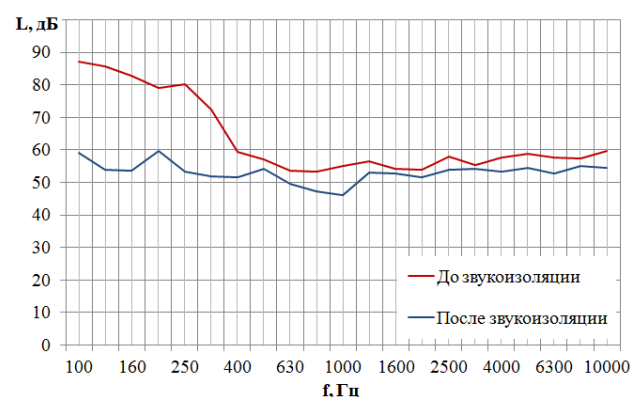


Рисунок 12. Акустический фон на испытательном участке стенда до и после звукоизоляции ёмкости

Как видно из рисунка 13, акустический фон на измерительном участке стенда после применения мер по звукоизоляции ёмкости снизился, и не превышает 60 дБ, что удовлетворяет требованиям.

## 5 Теоретическое и экспериментальное определение кавитационного режима

При проектировании испытательных стендов для исследования ГДШ дросселирующих элементов ЗРА, помимо снижения стендовых помех, важно правильно рассчитать режим испытаний. Негативным фактором, который создаёт существенные помехи при проведении измерений, является кавитационный процесс [3].

На рисунке 13 показан пример кавитационного явления в ЗРА.

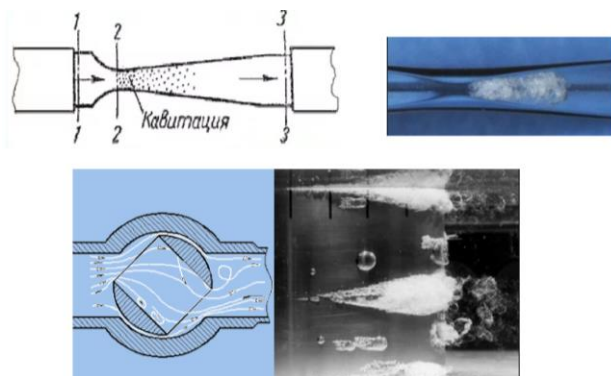


Рисунок 13. Кавитация в ЗРА

Условие возникновения кавитации в одноступенчатых клапанах:

$$p_1 - p_2 \geq 0,6 \cdot (p_1 - p_s),$$

где  $p_1$  – входное давление в Па;

$p_2$  – давление за клапаном в Па;

$p_s$  – давление насыщенных паров среды в Па.

Необходимо найти величину входного давления  $p_1$ , при котором начинает зарождаться кавитация

$p_s = 2,3388 \text{ КПа} = 2338,8 \text{ Па}$  – давление насыщенных паров воды при температуре 20 °С.

$$p_2 = (p_0 + \rho gh),$$

где:  $p_0 = 101325 \text{ Па}$  – атмосферное давление;

$$\rho = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$g = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Величина  $h = 17 \text{ см} = 0,17 \text{ м}$  – глубина расположения измерительного участка относительно максимального уровня воды в ёмкости. (рисунок 14).

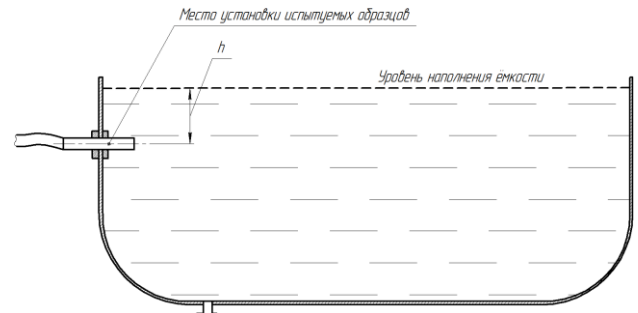


Рисунок 14. Глубина установки испытываемых образцов

Найдём величину  $p_2$ :

$$p_2 = (p_0 + \rho gh) = (101325 + 1000 \cdot 9,8 \cdot 0,17) = 102991 \text{ Па};$$

$$p_1 \geq \frac{p_2 - 0,6p_s}{0,4} \geq \frac{102991 - 0,6 \cdot 2338,8}{0,4} \geq 253969,3 \text{ Па}$$

Получаем, что при  $p_1 \geq 253969,3 \text{ Па}$  (2,5 атм.) будут возникать кавитационные процессы, которые создают значительные помехи при испытаниях дроссельных шайб.

Проведем акустическое исследование затопленной струи на двух режимах работы стенда со следующими параметрами:  $P_{1вх} = 3,5 \text{ атм.}$ ,  $G_1 = 0,8 \text{ м}^3/\text{час}$  и  $P_{2вх} = 1 \text{ атм.}$ ,  $G_2 = 0,45 \text{ м}^3/\text{час}$ .

Результаты измерений уровня шума на данных режимах представлены на рисунке 15.

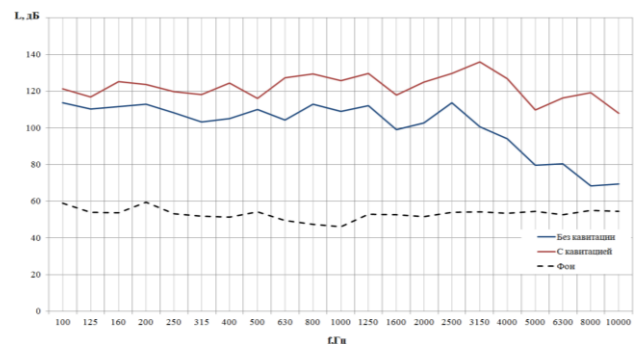
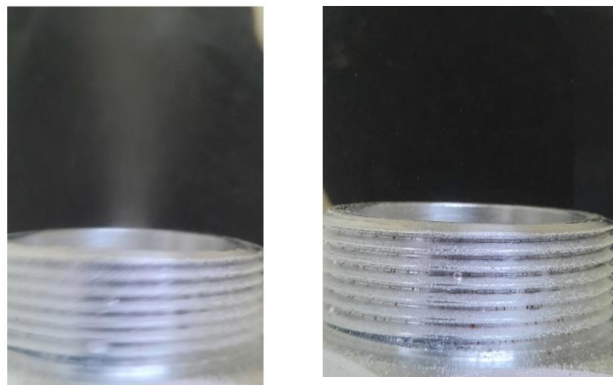


Рисунок 15. Уровень шума дроссельной шайбы при  $P_{вх} = 1 \text{ атм.}$ ,  $G = 0,45 \text{ м}^3/\text{час}$

Анализируя полученные спектры, можно увидеть, что на режиме работы с  $P_{1вх} = 3,5 \text{ атм}$  за счет увеличения расхода рабочей жидкости увеличится скорость истечения струи и соответственно повышается уровень шума. Однако, в высокочастотном диапазоне (более 4000 Гц) наблюдается

дополнительный прирост уровня шума. Это объясняется наличием кавитационных процессов.

Благодаря конструкции стенда с открытым испытательным участком возможна визуальная оценка поведения потока жидкости (рисунок 16).



а

б

Рисунок 16. Поведение потока жидкости при  $P_{1вх}=3,5$  атм и  $P_{2вх}=1$  атм

Наличие кавитации на режиме работы с  $P_{1вх}=3,5$  атм подтверждается поведением потока с образованием кавитационного облака в месте местного сопротивления.

Для определения максимального давления при проведении испытаний примем кавитационный запас, равный 0,5 атм.

Тогда входное давление  $p_1$  будет равно:  $p_1 = 253969,3 - 50000 = 203969,3 \text{ Па} \approx 2 \text{ атм}$ .

## 6 Заключение

В ходе работы был разработан стенд для исследования гидродинамического шума дросселирующих элементов запорно-регулирующей арматуры (ЗРА). Были проведены исследования на наличие стендовых помех и мероприятия по их снижению. Так же был рассчитан режим для экспериментальных образцов, исключающий возникновение кавитационных процессов при экспериментах.

## Список использованных источников

- [1] Жамов, Е.А. Основные источники шумообразования в трубопроводной арматуре [Текст] / Е.А. Жамов, С.Ф. Королёв // Сб. науч. трудов ЦКБА. – 1977. – С. 37–44.
- [2] 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.
- [3] Дейч, М.Е. Техническая газодинамика [Текст]/М.Е. Дейч– М.: Энергия, 1974. – 592 с.

**DEVELOPMENT OF A TEST RIG FOR STUDYING THE HYDRODYNAMIC NOISE LEVEL OF THROTTLE PLATES. CALCULATION OF THE CAVITATION-FREE TEST MODE FOR THE THROTTLE PLATE**

**E.N.Ermilova  
A.N.Vidyaskina  
M. A. Ermilov**

Samara University

Moskovskoe shosse, 34  
Samara, Russian Federation  
443086

makaroff.zhenia2011@yandex.ru

*The article presents the development of a test rig for studying the hydrodynamic noise level of throttle plates. The assembled test rig is being investigated for the presence of its self-generated noise. According to the results of the research, measures were taken to reduce self-generated noise of the test rig. To exclude the occurrence of cavitation processes during the experiments, a calculation was carried out to determine the test conditions for the study of throttle plates.*

**Keywords:** test rig; test; self-generated noise; cavitation

## References

- [1] Shamov, E. A. Osnovnye istochniki shumoobrazovaniya v truboprovodnoj armature [The main sources of noise formation in pipeline fittings] [Text] / E. A. Shamov, S. F. Korolev // Collection of scientific works of the Central Design Bureau of armature engineering. – 1977. – p. 37-44.
- [2] Arzumanov, E. S. Snizhenie shuma i vibracii v reguliruyushchih organah klapanov dlya vysokih perepadov davlenij [Reducing noise and vibration in the regulating bodies of valves for high differential] [Text]/E. S. Arzumanov, V. G. Skripchenko, L. N. Nisman. - Moscow: TSINTI himneftemash [Central Institute of Scientific and Technical Information and Feasibility Studies for Chemical and Petroleum Engineering], 1976, series HM-10. 48 p.
- [3] Deich, M. E. Tekhnicheskaya gazodinamika [Technical gas dynamics] [Text] / M. E. Deich-Moscow: Energia Publ, 1974. - 592 p.