

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ УСТРОЙСТВ СНИЖЕНИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В ЛИНИЯХ РЕДУЦИРОВАНИЯ ГАЗОРасПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЙ

© 2014 М.А. Ермилов¹, А.Н. Крючков², К.Ю. Шабанов³

¹ Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева
(национальный исследовательский университет)

² Институт акустики машин при СГАУ, г. Самара

³ ООО “Газпром трансгаз Самара”

Поступила в редакцию 22.12.2014

Предложен метод проектирования гасителей пульсаций давления газового потока на выходе регуляторов давления. Сформулированы принципы работы такого гасителя, включающего дроссельные шайбы и вихрегаситель потока на выходе. Разработан стенд для исследования виброакустических параметров гасителей. Стенд включает пневматическую систему, заглушенную акустическую камеру и измерительно-обрабатывающую систему. Предложена методика стендовой доводки гасителя пульсаций давления (ГПД) за газовым регулятором на основе отработки его физической модели (ФМ ГПД). Представлен гаситель пульсаций, разработанный по предложенной методике.

Ключевые слова: пневматические и газовые системы; регуляторы давления газа; газораспределительные станции; аэродинамический шум, акустическая мощность, шум, гаситель пульсаций давления, пневматический стенд, информационно вычислительный комплекс, газодинамическое сопротивление.

1. ВВЕДЕНИЕ

Важной проблемой, связанной с эксплуатацией газораспределительных станций и узлов, являются повышенные уровни шума и вибрации, вызванные высокоскоростной струей газа, вытекающей из регуляторов давления. Наличие такой интенсивной струи обусловлено высокими перепадами давления (свыше 3...5 МПа), срабатывающими на регуляторах давления газа.

Регуляторы давления (РД) газа предназначены для снижения и поддержания давления газа на заданном уровне [1]. Дросселирование потока происходит в самом узком сечении РД. В большинстве случаев (при критическом перепаде) скорость в этом сечении оказывается сверхзвуковой. Источником шума всей системы является струя газа, на выходе из РД (рис. 1).

Наиболее эффективным средством снижения шума работы РД является установка на его выходе гасителей пульсаций давления [2]. Гаситель должен эффективно снижать шум регулятора при этом не должна изменяться пропускная способность РД.

Ермилов Михаил Анатольевич, аспирант кафедры автоматических систем энергетических установок.

E-mail: emasamara@gmail.com.

Крючков Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок СГАУ, исполнительный директор. E-mail: kan@ssau.ru

Шабанов Константин Юрьевич, начальник технического отдела ОАО «Газпром Трансгаз Самара».

E-mail: K.Shabanov@samaratransgaz.gazprom.ru

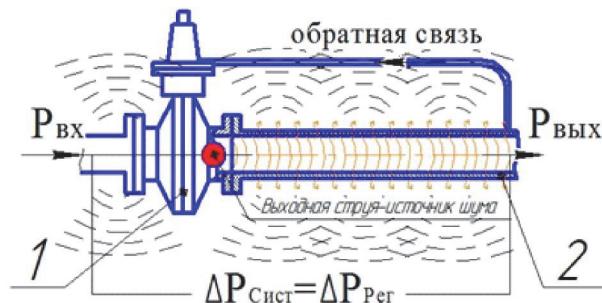


Рис. 1. Шумообразование в трубопроводной системе с регулятором давления газа:
1 – регулятор, 2 – выходной трубопровод

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ ГПД КАК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОТОКА ГАЗА

Шумы газодинамического происхождения носят случайный характер и обычно наблюдаются в широком спектре частот. Интенсивность газодинамического шума повышается с увеличением скорости потока и достигает максимальных значений при звуковых и сверхзвуковых скоростях движения среды.

Акустическая мощность $W_{ак}$, излучаемая струей, пропорциональна скорости струи в 6-8 степени (в зависимости от числа Маха), квадрату плотности газа в струе и квадрату диаметра струи [3]:

$$W_{ак} = k_0 \frac{\rho_c^2 V^8 D^2}{\rho_o V_{36}^3}, \quad (1)$$

где k_0 – коэффициент пропорциональности; ρ_c – плотность потока, кг/м³; V – скорость потока, м/с; D – диаметр струи, м; $V_{\text{зв}}$ – скорость звука, м/с.

Следовательно, добиться снижения шумности высокоскоростных турбулентных струй возможно за счет:

- снижения скорости струй;
- уменьшения плотности газа в струях;
- уменьшения их диаметров;
- ступенчатого понижения давления.

3. МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ ГПД

Как уже отмечалось выше, наиболее эффективным решением проблемы шума и вибрации трубопроводной арматуры является установка гасителя пульсаций давления на выходе регулятора, выполняющего следующие функции (рис. 2):

1. уменьшение перепада давления на регуляторе и, тем самым, снижение максимальной скорости потока в регуляторе;
2. ступенчатое дросселирование общего перепада давления в целях снижения скорости газа в элементах гасителя;
3. разбивку и дробление потока в целях смещения частоты максимума звукоизлучения струй в высокочастотную область.

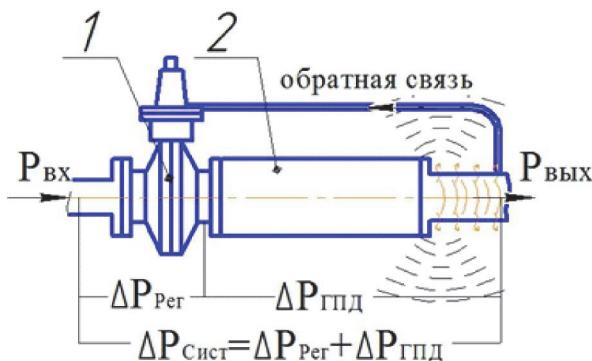


Рис. 2. Фрагмент трубопроводной системы с регулятором (1) и гасителем пульсаций (2)

В зависимости от выходного давления РД рассчитаем по методике, изложенной в [4] генерируемый регулятором уровень звукового давления на определенном расстоянии от выходной трубы (рисунок 3). Данная методика учитывает также различные режимы возбуждения шума в клапане в зависимости от структуры течения газа (аэродинамические режимы), границы которых также показаны на рисунке 3. На графике видно, что имеется такое выходное давление $P_{\text{вых}}^{\text{крит.}}$ (при постоянном $P_{\text{вх}}$), при котором наблюдается максимальный уровень звукового давления. Поэтому перепад на ГПД должен выполнять несколько условий:

- перепад должен быть таким, чтобы давление на выходе из регулятора

$$P_{\text{вых}}^{P_{\text{пер}}} > P_{\text{вых}}^{\text{крит.}}; \quad (2)$$

- перепад на гасителе не должен ограничивать пропускную способность всей системы в целом (РД+ГПД).

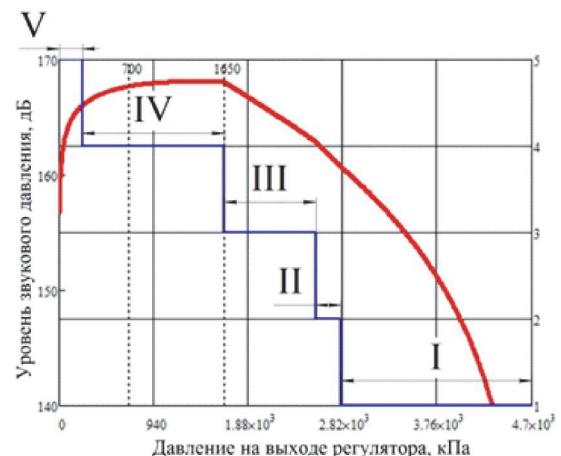


Рис. 3. График изменения уровня акустического давления РД (римскими цифрами указаны аэроакустические режимы работы РД)

После выбора перепада давления на ГПД назначают количество его ступеней дросселирования (дроссельных шайб), с учётом того, что для выполнения вышеуказанных функций гаситель должен состоять из 3-х частей: разгрузочной (для создания подпора регулятора), рассекающей поток и выходной вихреваяющей.

Распределив перепады давления по ступеням, определяют диаметр и количество отверстий на каждой дроссельной шайбе, используя формулу Сен-Венана-Венцеля [5], для определения массового расхода потока:

$$G = F \cdot \mu \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k - 1} \cdot P_1 \cdot \rho_1 \cdot \left[\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (3)$$

где F – суммарная площадь отверстий в шайбе; μ – коэффициент расхода; k – показатель адиабаты; P_1 – входное давление; ρ_1 – плотность газа на входе; β – коэффициент отношения давления после шайбы к давлению после.

Найденное количество отверстий считается приблизительным и уточняется в ходе виртуального моделирования каждой шайбы в отдельности в программном пакете ANSYS Fluent. После такие же расчеты проводятся с целой моделью (рис. 4).

Предложенный авторами алгоритм разработки ГПД показан на рис. 5.

Принятые обозначения:

$P_{\text{вх}}$ – давление на входе в гаситель, Па; $P_{\text{вых}}$ –

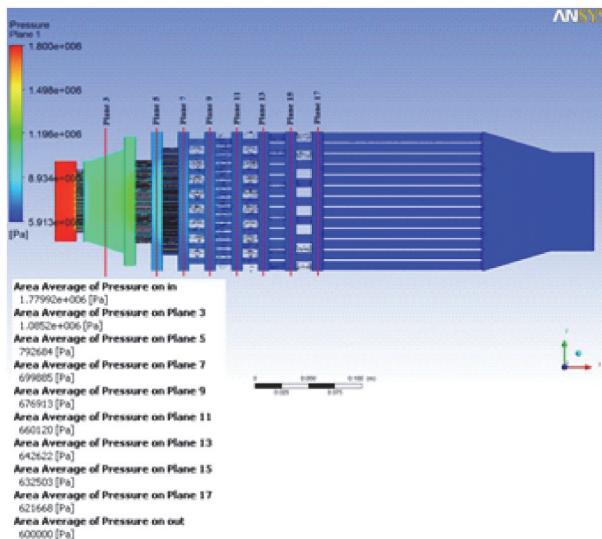


Рис. 4. Перепад давления на гасителе при массовом расходе 2,5 кг/с

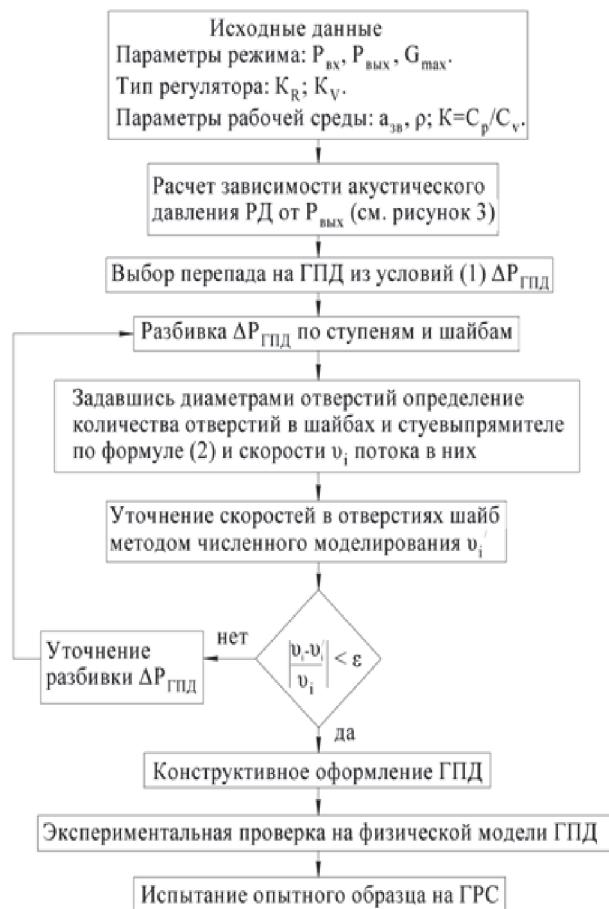


Рис. 5. Алгоритм разработки ГПД

давление на выходе из гасителя, Па; G_{\max} – максимальный массовый расход, кг/с; K_V – коэффициент расхода; K_R – коэффициент восстановления давления; $a_{\text{зв}}$ – скорость звука в среде, м/с; ρ – плотность среды, кг/м³; К – коэффициент адиабаты; v_i – скорость потока, м/с; v_i – уточненная скорость потока, м/с; ε – допустимая погрешность.

4. СТЕНДОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОТРАБОТКИ ГАСИТЕЛЕЙ ПУЛЬСАЦИЙ

Так как в настоящее время не существует адекватных аэроакустических моделей для расчета эффективности ГПД, то необходимы его тщательные экспериментальные исследования и отработка. В этих целях Для виброакустических испытаний разных видов регуляторов давления газа с проходным диаметром до 80 мм и ГПД разработан и изготовлен стенд на базе компрессорной станции СГАУ. Испытательное оборудование позволяет кратковременно создавать условия по расходу воздуха до 1кг/с и давлению, приближенные к реальным, существующим на ГРС: давление на входе в регулятор давления до 10МПа и на выходе - до 1,6МПа. Стенд включает в свой состав регулятор давления газа с испытуемой физической моделью гасителя, расположенные в его входной части (рис. 6).



Рис. 6. Входная часть испытательного стенда, включающая входной вентиль, регулятор давления и физическую модель ГПД (газ движется справа налево)

В условиях высокого уровня шумового фона от данных пневмоагрегатов особое внимание при проектировании стенда было удалено созданию заглушенной камеры (рисунок 7). Звукоизоляция камеры составляет для от 15 дБ (для низких частот) до 35 дБ для высоких частот. Это позволяет замерять шум тонкостенной трубы без влияния внешних источников шума [6].

На стенде определяется значительное количество статических (давление и расход) и динамических параметров. К последним относятся пульсации давления на входе и выходе ГПД, вибрации выходной трубы, а также шум, излучаемый данной трубой в заглушенной камере. Пульсации давления измеряются двумя датчиками РСВ, ввернутыми в корпус физической модели гасителя (см. рис. 2) на входе и выходе газового потока.

Измерение вибрации тонкостенной выходной трубы регулятора осуществляется одновременно контактными датчиками вибрации и бесконтактным лазерным виброметром Polytec (рис. 8.).



Рис. 7. Вид заглушенной камеры со снятой передней панелью и размещенными вдоль выходной трубы регулятора микрофонами



Рис. 8. Измерение вибрации тонкостенной трубы контактными датчиками и лазерным виброметром Pdv100

Причем по парной установкой датчиков на трубу (один напротив друга в одной плоскости) исследуются как стержневые (балочные), так и оболочечные формы колебаний стенок трубы.

Разработанная экспериментальная установка позволяет проводить комплексные вибрационные исследования пневматической трубопроводной регулирующей арматуры (в т.ч. регуляторов давления газа) с одновременной регистрацией статических параметров и динамических величин (пульсаций давления за регулятором, виброускорения стенок выходной трубы регулятора, а также звукового давления, излучаемого данной трубой). Наличие такого специализированного испытательного стенда позволяет проводить исследования статических и динамических (в том числе вибрационных) характеристик регуляторов давления газа и определять вибрационную эффективность гасителей пульсаций в широком диапазоне частот.

5. ОТРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ГАСИТЕЛЯ ПУЛЬСАЦИЙ НА ЕГО ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

Важным этапом создания эффективного образца ГПД является его экспериментальная отработка, что связано с отсутствием адекватных математических моделей аэроакустических процессов, лежащих в основе функционирования ГПД. Авторами предложено отрабатывать конструкцию ГПД на его малоразмерных физических моделях (ФМ ГПД). Конструкция модели позволяет за счет ее оперативной переборки в достаточно короткие сроки испытать десятки вариантов возможных схем ФМ ГПД, которые могут отличаться порядком следования дроссельных шайб (с различным количеством профилированных отверстий), вариацией расположения дросселя и струевыпрямителя.

За время испытаний проведено исследование десятков вариантов ФМ ГПД, примеры которых показаны на рис. 9 и 10.

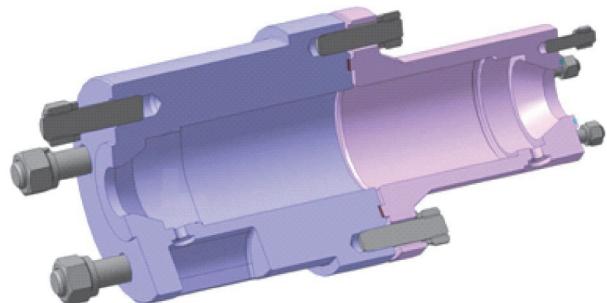


Рис. 9. Первый «базовый» («пустой») вариант конструкции ФМ ГПД без внутренних элементов

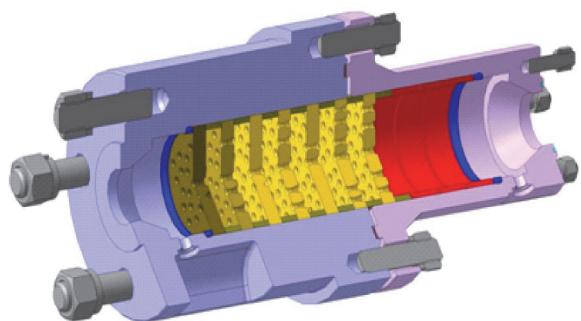


Рис. 10. Второй вариант конструкции ФМ ГПД с 7 дроссельными шайбами

В результате многочисленных экспериментальных исследований разработан гаситель пульсаций спроектированный по данному алгоритму для $P_{вх}=4,7$ МПа, $P_{вых}=0,7$ МПа, $G=2,5$ кг/с, ра-

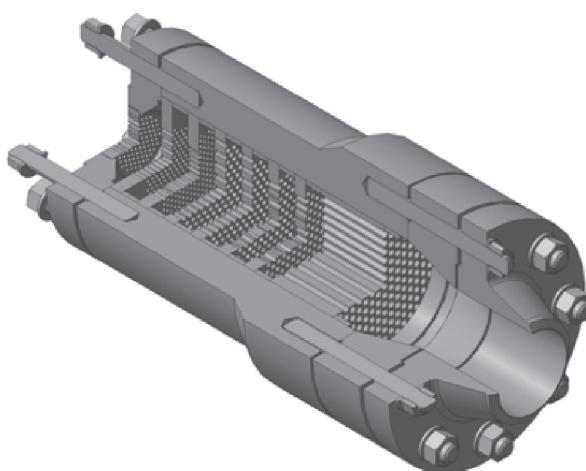


Рис. 11. Вид в разрезе ГПД для ГРС средней производительности (дроссельные шайбы и струевыпрямитель)

бочее тело-метан. Испытание физической модели устройства показали эффективность ГПД, составляющую 34дБА.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод разработки гасителей пульсаций за регуляторами давления, в основе которого лежит принцип ступенчатого дросселирования совместно с выравниванием и успокоением выходного потока. Метод апробирован на гасителе для регулятора давления газа газораспределительной станции средней производительности.

Экспериментальные исследования показали, что наиболее эффективной конструкцией ГПД является вариант с 6...8 дроссельными шайбами и выходным струевыпрямителем, причем количество отверстий в шайбах должно постоянно увеличиваться таким образом, чтобы перепад на гасителе составлял 20 % от общего перепада на системе “регулятор - ГПД”, а перепад давления на последних 4..5 шайбах был незначительным в целях выравнивания потока газа, который на выходе проходил бы еще через струевыпрямитель для ещё более эффективного сглаживания пульсаций потока.

Таким образом, экспериментально подтверждена методика проектирования ГПД.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арзуманов Э.С. Гидравлические регулирующие органы систем автоматического управления. Машиностроение. 1985. 256 с.
2. Юдин Е.Я. Борьба с шумом на производстве. Машиностроение. 1985. 400 с.
3. Иоффе В.К. Справочник по акустике. Связь. 1979 312.
4. ANSI/ISA- 75.17- Control Valve Aerodynamic Noise Prediction, ISBN 1-55617-207-9. 1989. 32 pp.
5. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. Госэнергоиздат. 1961. 671 с.
6. Шорин В.П. Разработка методов физического моделирования глушителей шума сверхзвуковых пульсирующих струй. СГАУ, 2008. 72 с.

DEVELOPMENT OF EFFECTIVE DEVICES FOR REDUCING VIBRO-ACOUSTIC LOADS IN THE LINES OF REDUCING GAS DISTRIBUTION STATIONS

© 2014 M.A. Ermilov¹, A.N. Kryuchkov², K.U. Shabanov³

¹ Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov

(National Research University)

² The Machine Acoustic Institute, SSAU, Samara

³ “Gazprom transgas Samara”

The conception of projecting of the gas flow pulsation dampers at the outlet of the pressure regulator is offered. It is formulated the operational principle of this damper, which contains the orifice and the stabilizer of an outflow. The stand for researching of the vibroacoustic parameters of dampers. The stand contains the pneumatic system, the damped acoustic chamber, and the measuring and computing system. The method of the bench development of the pressure pulsation damper (PPD) behind the gas regulator based on the development of its physical model (PM PDD) is offered. It is presented the pulsation damper, which was developed by the offered method.

Key words: Pneumatic and gas systems, gas pressure regulator, gas-distribution station, aerodynamic noise, gas throttling, sound power, noise, pressure pulsations damper, pneumatic stand, measuring and computing complex, gas-dynamic resistance.

Mikhail Ermilov, Graduate Student at the Automatic Systems of Power Plants Department. E-mail: emasamara@gmail.com
Alexander Kryuchkov, Doctor of Technics, Professor at the Automatic Systems of Power Plants Department (SSAU), Executive Director. E-mail: kan@ssau.ru

Konstantin Shabanov, Head of the Technical Department of Gazprom Transgas Samara LLC.
E-mail: K.Shabanov@samaratransgaz.gazprom.ru