

УДК 534.134

## УСТРАНЕНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ РЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМОВ ВИБРОНАГРУЖЕНИЯ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЙ

© 2014 К. Ю. Шабанов<sup>1</sup>, А. Н. Крючков<sup>2</sup>, М. А. Ермилов<sup>2</sup>, М. В. Баляба<sup>3</sup><sup>1</sup>ОАО «Газпром Трансгаз Самара»<sup>2</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)<sup>3</sup>Институт акустики машин при СГАУ, г. Самара

В статье приведено исследование режимов резонансного взаимодействия высокоскоростного потока газа, выходящего из дозирующих сечений регуляторов давления, с его элементами. Показано, что такое взаимодействие приводит к существенному увеличению шума клапана за счёт возникновения тональной составляющей спектра колебательной энергии, проявляющейся на частотных характеристиках пульсаций давления в трубопроводе, вибрации выходного фланца регулятора, а также внешнего шума клапана. Приведены результаты исследования условий возникновения резонансного взаимодействия потока газа с элементами конструкции регулятора, в том числе со стойками – пилонами центрального обтекателя. Показано, что с увеличением выходной скорости потока выше определённого значения (около 40 м/с) возникают дискретные составляющие спектра пульсаций давления. Представлены результаты экспериментального анализа элементов регулятора давления, показывающие практическое совпадение частот дискретных составляющих спектра пульсаций потока и собственных колебаний элементов конструкции. Модальный анализ собственных колебаний элементов регулятора проводится методом простукивания. Предложены мероприятия по устранению резонансного взаимодействия выходного потока со стойками – пилонами, заключающиеся в установке специальных рассекающих поток конструкций в виде перфорированных цилиндрических втулок.

*Газотранспортные системы, резонансное взаимодействие, регулятор давления, пульсации потока, шум, клапан, собственные частоты и формы колебаний, вихревые струи, флаттер.*

В газотранспортной системе установлено значительное количество клапанов, работающих при высоких перепадах давления [1]. В частности, на газораспределительных станциях (ГРС) используются регуляторы давления газа, понижающие его давление с 5...7 МПа (реализуемое в магистральном трубопроводе) до 0,5...1 МПа в трубопроводных сетях конкретных потребителей. Авторским коллективом установлено, что помимо широкополосного шума газодинамического происхождения, интенсивность которого может достигать 100 дБА и выше, реализуются также тональные шумы для класса широко применяемых регуляторов типа РДУ 50 и РДУ 80. Причиной этого является интенсивное взаимодействие высокоскоростной струи газа, выходящей из дозирующего кольцевого сечения, с элементами его выходного тракта. Особенностью вышеуказанных агрегатов РДУ является

наличие в данном тракте центрального обтекаемого тела, на котором закрепляется дозирующий и запорный элемент агрегата (рис. 1, поз. 10). При такой конструкции регулятора интенсивная струя газа, выходящая из кольцевого дозирующего сечения, взаимодействует с поддерживаемыми центральное тело стойками-пилонами (рис. 1, поз. 12), возбуждая вибрации последних. При этом возникает виброакустическое взаимодействие вихревых структур струи и вибрирующих стоек-пилонов, известное в авиации как флаттер. Резонансные явления таких виброакустических процессов наблюдаются при совпадении характерной (струхалевой) частоты срыва вихрей струи с собственными частотами колебаний пилонов. Для агрегатов РДУ 50 и РДУ 80 такие частоты находятся в диапазоне 3100...6300 Гц.

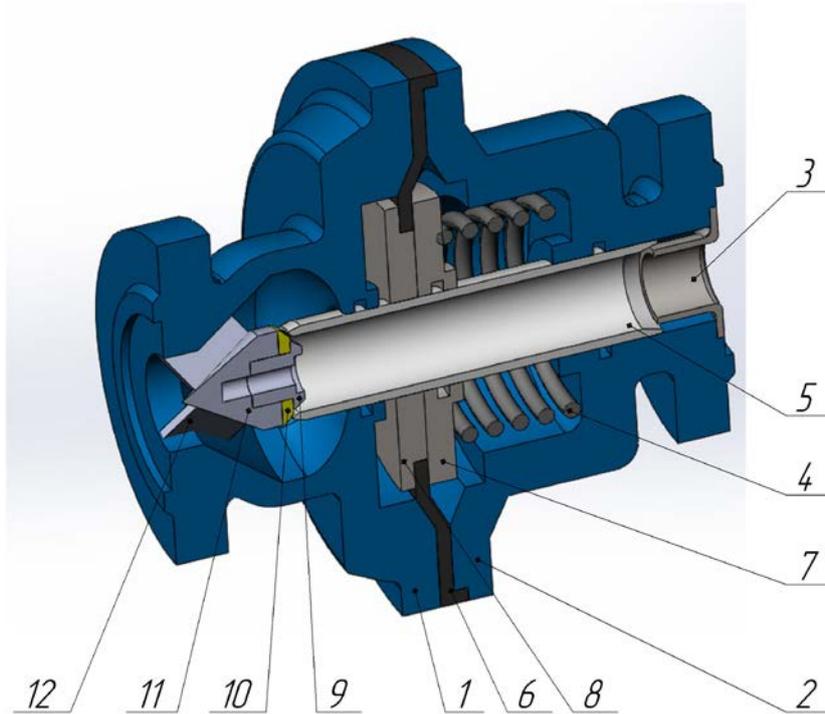


Рис. 1. Схема регулятора давления газа РДУ-80:  
 1 – выходной фланец; 2 – входной фланец; 3 – кожух; 4 – пружина; 5 – затвор;  
 6 – мембрана; 7, 8 – держатель мембраны; 9 – прижим седла; 10 – седло;  
 11 – выходной направляющий конус; 12 – пилон

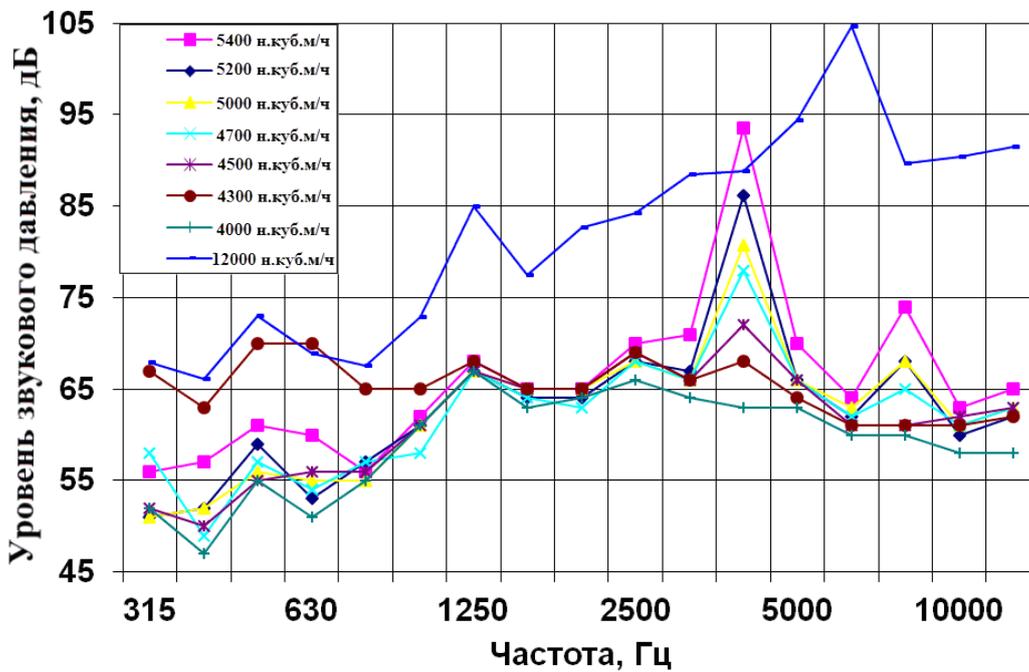


Рис. 2. Спектры уровня звукового давления в редуцирующей камере ГРС-64 при плавном снижении расхода (графики 4000-5400 - расход плавно снижается от 5400 до 4000 н.куб.м/ч)

В качестве примера на рис. 2 показаны спектры звукового давления в редуцирующем зале ГРС-64 ОАО «Газпром Трансгаз Самара» [2,3]. Можно заметить, что в третьоктавной полосе 4000 Гц наблюдается указанный резонансный режим, реализующийся при расходах газа свыше 4000 н.куб.м/ч. Это объясняется, по-видимому, возбуждением автоколебаний пилонов (в том, что данное явление носит автоколебательный характер, нет никакого сомнения, т.к. в трубопроводной системе нет ни одного источника, возбуждающего подобные колебания). Из рис. 2 также видно, что при понижении расхода газа с 5400 до 4000 н.куб.м/ч данные автоколебательные процессы полностью прекращаются. Можно также заметить, что резонансные режимы возбуждаются и на высших формах колебаний элементов конструкции.

Наличие рассматриваемых резонансных режимов клапанов приводит к значительному увеличению вибронагруженности как самих клапанов, так и трубопроводной арматуры. На рис. 3 показан участок газопровода ГРС-64, обследованного как контактными вибродатчиками, так и бесконтактным лазерным вибромет-

ром. Результаты исследований показали, что наличие резонансных режимов повышает виброскорость стенки трубы в 15 раз, что значительно увеличивает вибрационные нагрузки на трубопроводную арматуру (рис. 4).

Отличительной особенностью резонансных режимов клапанов РДУ является то, что при развитых автоколебательных процессах гасители пульсаций давления (ГПД), разработанные без их учёта, оказывают незначительное влияние на дискретные составляющие шума. Это хорошо видно на рис. 2. Из него следует, что установленный ГПД не обеспечивает устранение дискретной звуковой составляющей в полосе 4 кГц, причём наличие такой составляющей увеличивает шум в зале редуцирования на 20...30 дБА, что является недопустимым. С другой стороны, из рис. 5 следует значительная эффективность гасителя пульсаций в окрестности резонансной частоты. Поэтому необходимо при проектировании ГПД производить его газодинамический расчёт таким образом, чтобы направление и вихревая частота дросселируемого потока не совпадали с собственными частотами элементов конструкции регулятора.

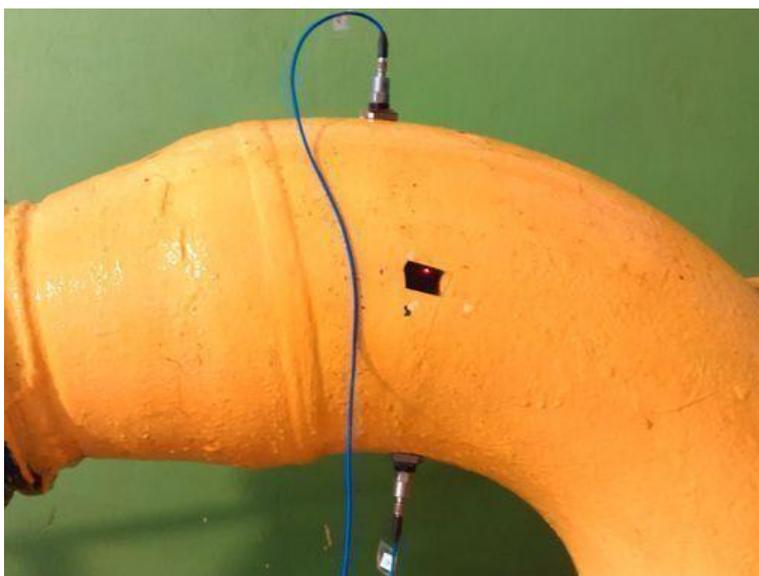


Рис. 3. Измерение виброускорения стенки трубопровода после РДУ-80 на ГРС-64

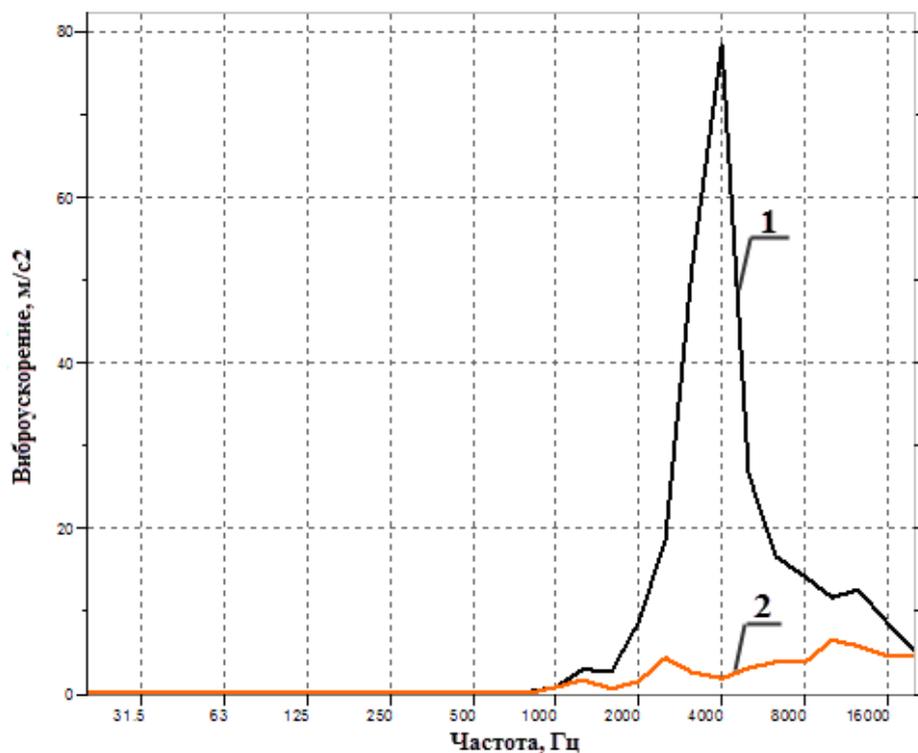


Рис. 4. Спектр виброускорения стенки трубопровода после РДУ-80 на ГРС-64 (1 – без ГПД; 2 – на выходе РДУ-80 установлен ГПД)

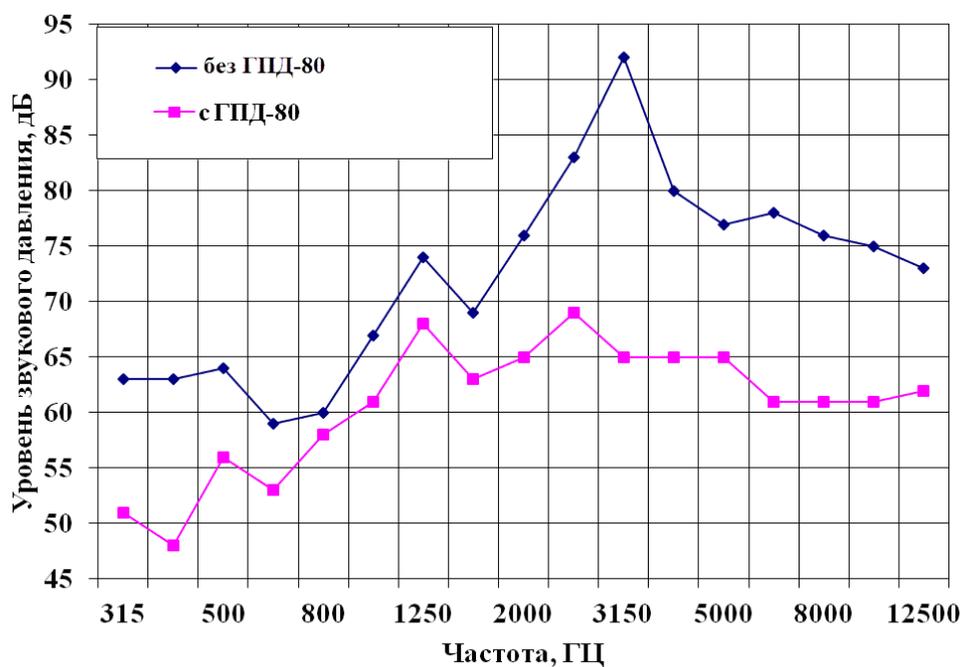


Рис. 5. Уровни звукового давления в третьоктавных полосах без ГПД-80 и с установкой ГПД-80 при расходе 4000 н.куб.м/ч

На рис. 5 показаны уровни звукового давления без ГПД-80 и с ГПД-80 при расходе 4000 н.куб.м/ч. Можно заметить, что ГПД эффективно (на 27 дБ) подавил дискретную составляющую спектра 3150 Гц, что связано, по-видимому, с низкой её энергетикой, обусловленной относительно малой скоростью потока газа [4].

Так как при отсутствии резонансных режимов разработанные специалистами

СГАУ гасители пульсаций давления обеспечивают выполнение санитарных норм (рис. 6) по шуму (чего нельзя сказать при наличии резонансных режимов), то важнейшей задачей акустической доводки гасителя является устранение автоколебательных процессов в системе «Регулятор-Гаситель-Трубопровод».

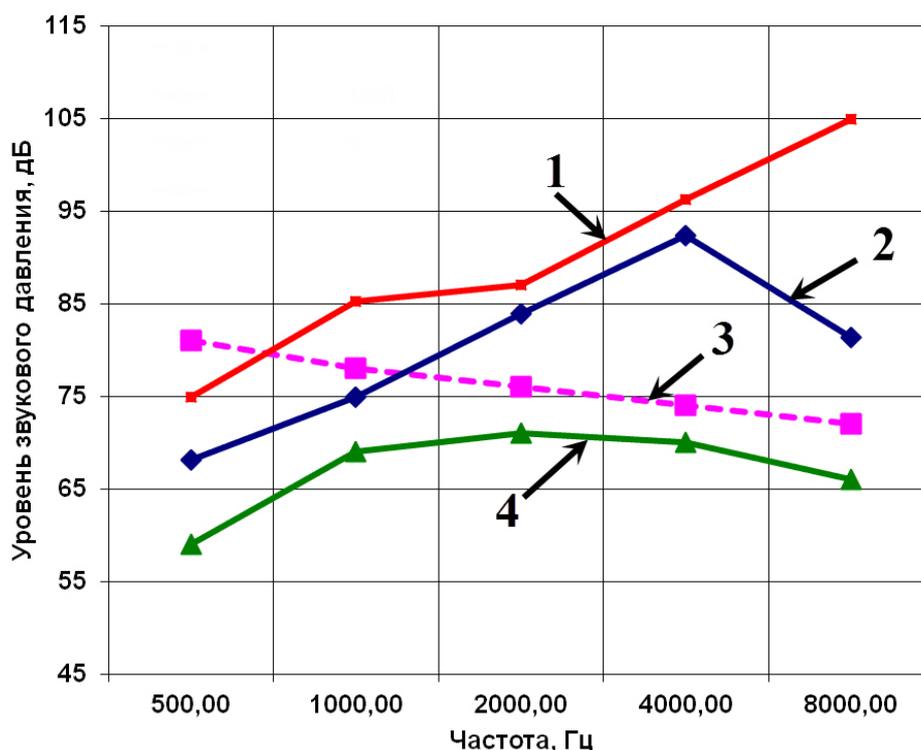


Рис. 6. Уровни звукового давления в октавных полосах частот:

1 – без ГПД-80 расход равен 10000 н.куб.м/ч; 2 – без ГПД-80 расход равен 4000 н.куб.м/ч; 3 – установленная норма шума в октавных полосах; 4 – с ГПД-80 расход равен 4000 н.куб.м/ч

Исследование резонансных режимов работы РДУ-50 производилось на стендовой установке СГАУ с имитацией реальных рабочих режимов работы агрегатов. Целью исследований являлось определение границ диапазонов резонансных режимов агрегата. Режим работы регулятора определяется тремя основными параметрами: входным и выходным давлением газа и массовым расходом. Указанные параметры определяют фактическую скорость и направление потока газа, набегающего на пилоны регулятора. В процессе

стендовых исследований было воспроизведено более 30 режимов работы РДУ 50. По результатам исследований построены области реализации резонансных режимов (рис. 7).

Из рис. 7 видно, что при средней скорости потока газа на выходном срезе регулятора до 41 м/с не возникает тональной составляющей виброакустических параметров газа: пульсаций газа, вибраций и шума.

При увеличении скорости свыше 41 м/с возникают резонансные режимы агре-

гата, сопровождающиеся возникновением значительных тональных составляющих параметров.

Отдельной кривой показана зависимость критерия Струхала от скорости потока, которая вычисляется по формуле

$St = \frac{f \cdot \delta}{v}$  (за характерный размер  $\delta$  берём толщину пилона РДУ). Она показывает, что при числах Струхала менее 0,4 возникают резонансные режимы [5].

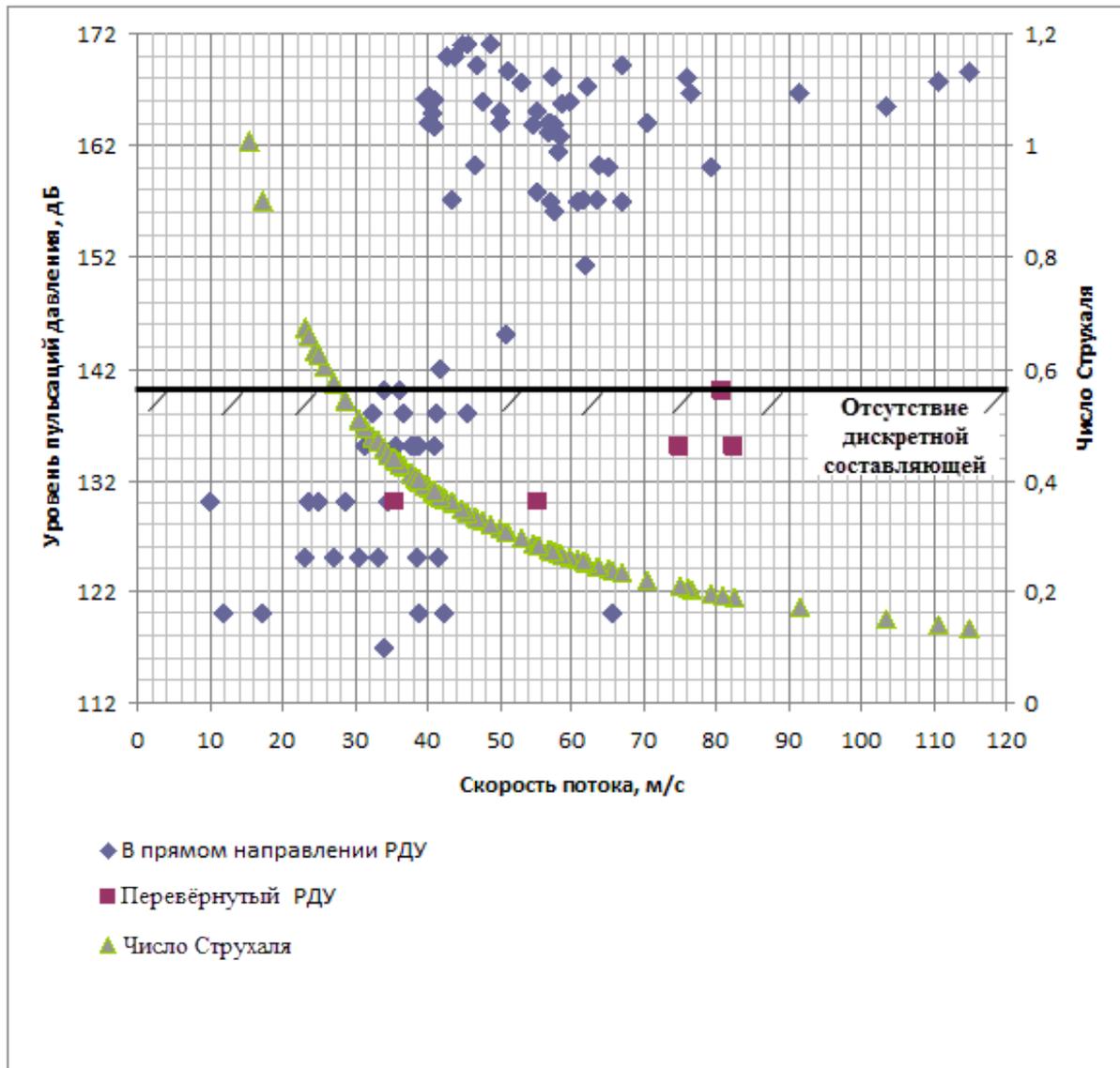


Рис. 7. Зависимость уровня пульсаций давления от скорости на выходе регулятора

Для подтверждения предположения о возбуждении пилонов были проведены мероприятия по обратному и прямому включению регулятора. Они показали отсутствие резонансов агрегата при его обратном включении (рис. 8).

Для изменения направления струи, обтекающей пилоны, установлены пористые элементы, преобразующие структуру

струи и устраняющие резонансы. Результаты показаны на рис. 9.

В целях более детального исследования выходного потока агрегата проведено его численное моделирование в программе ANSYS FLUENT 3D. На рис. 10 показано распределение осевой скорости потока газа по каналу регулятора давления газа.

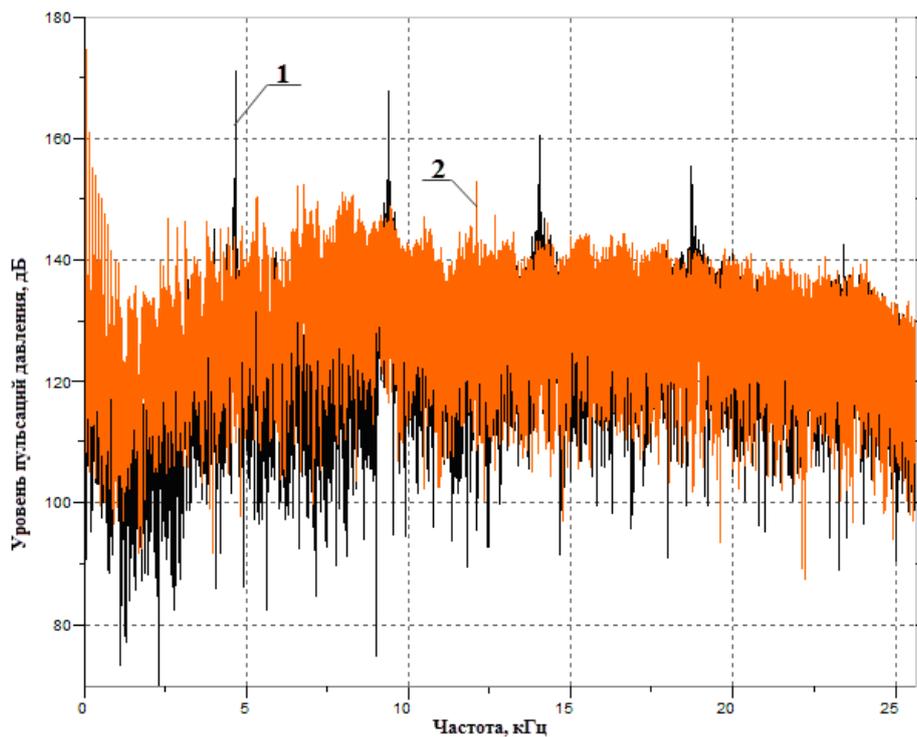


Рис. 8. Пульсации давления на выходе РДУ-50, полученные при стендовых испытаниях в СГАУ (1 – рабочее положение РДУ; 2 – РДУ развёрнут входом на выход),  
 $P_{вх}=40$  атм.,  $P_{вых}=4$  атм.,  $Q=970$  н.куб.м/ч

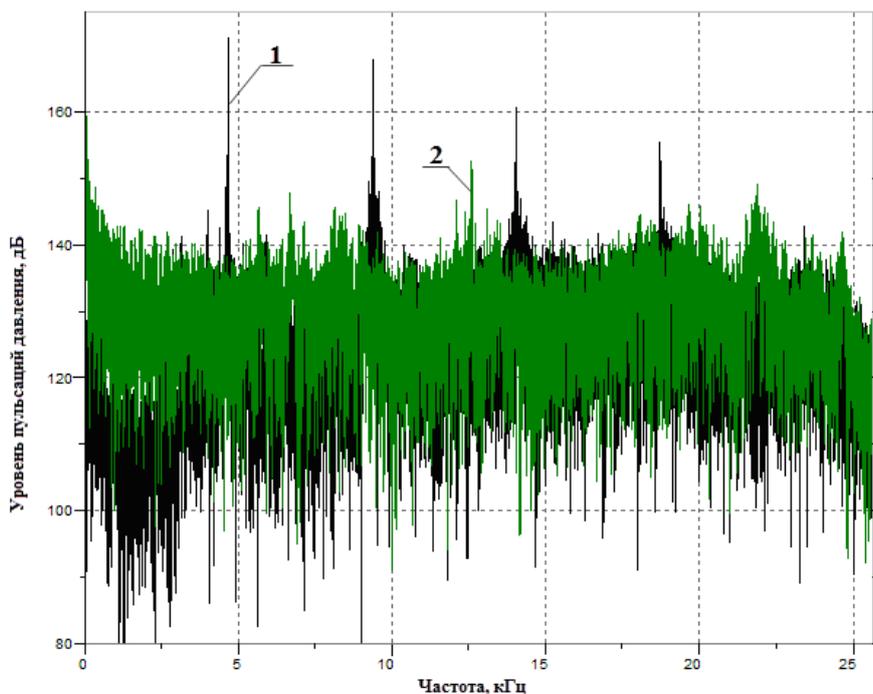


Рис. 9. Пульсации давления на выходе РДУ-50, полученные при стендовых испытаниях в СГАУ (1 – пилоны открыты; 2 – пилоны покрыты пористым материалом),  
 $P_{вх}=40$  атм.,  $P_{вых}=4$  атм.,  $Q=970$  н.куб.м/ч

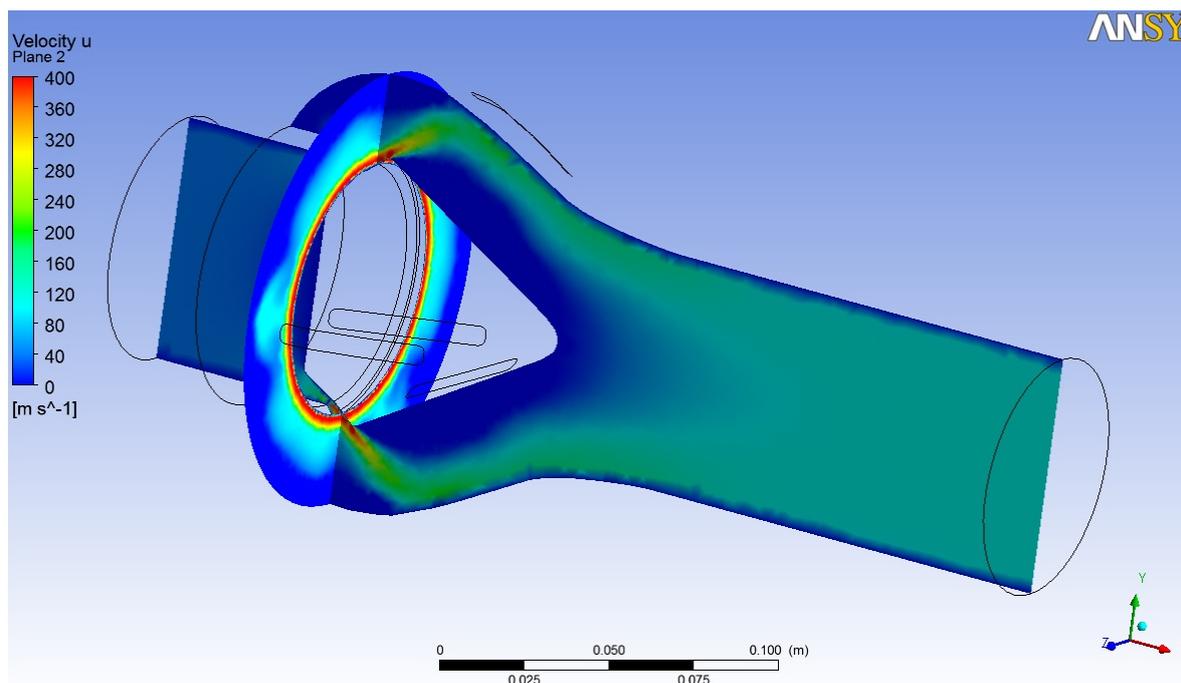


Рис. 10. Скорости потока газа на выходе клапана регулятора давления

Проведён модальный анализ отдельных частей регулятора методом простукивания (рис. 11-14), и определены собственные частоты его элементов.

1. Прижимная пружина РДУ-50. Частота 2342 Гц.

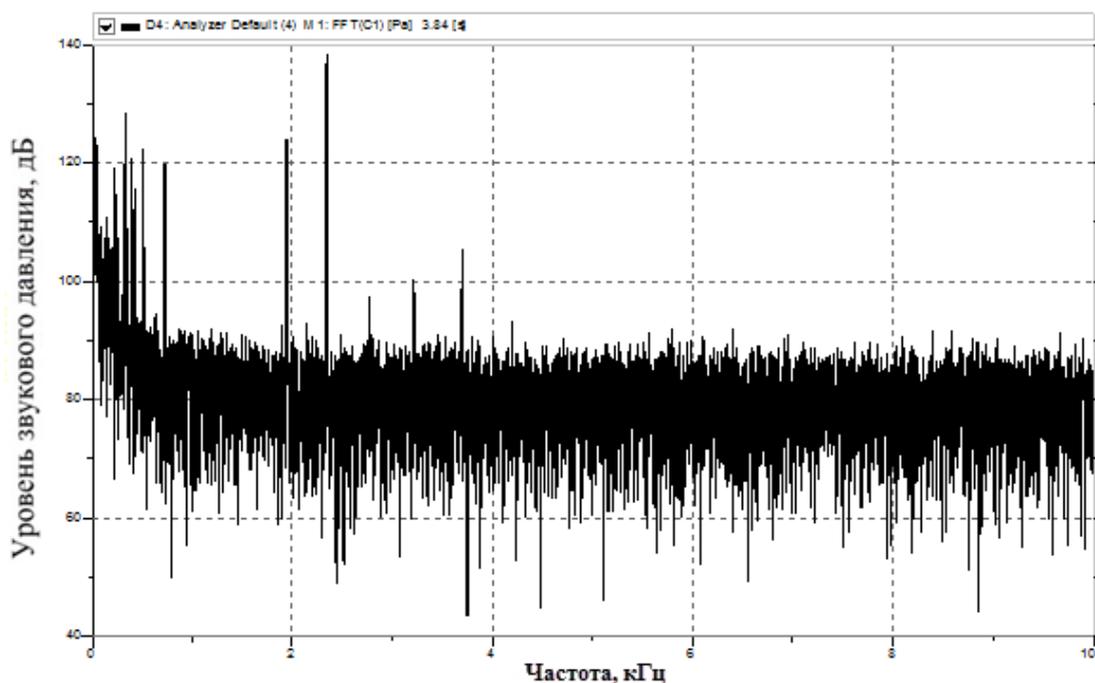


Рис. 11. Спектр звукового давления, полученный при простукивании прижимной пружины РДУ-50

2. Шток РДУ-50. Частота 4543 Гц.

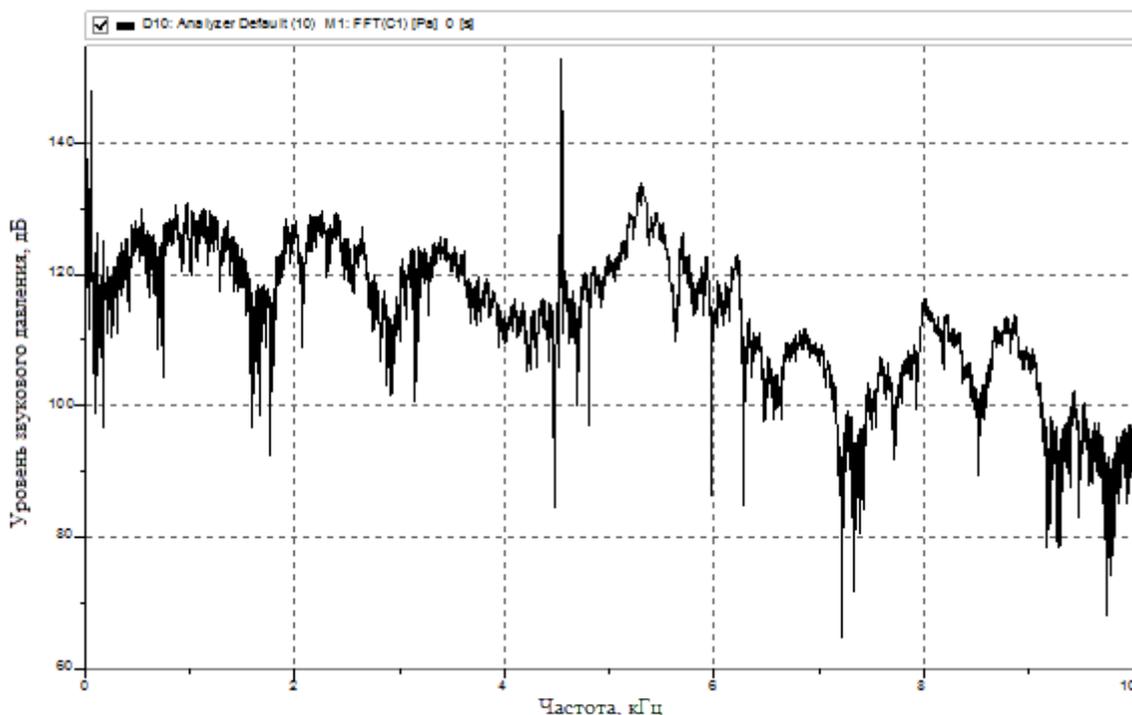


Рис. 12. Спектр звукового давления, полученный при простукивании штока РДУ-50

3. Выходной фланец РДУ-50. Частота 3544 Гц (2442, 4068 Гц).

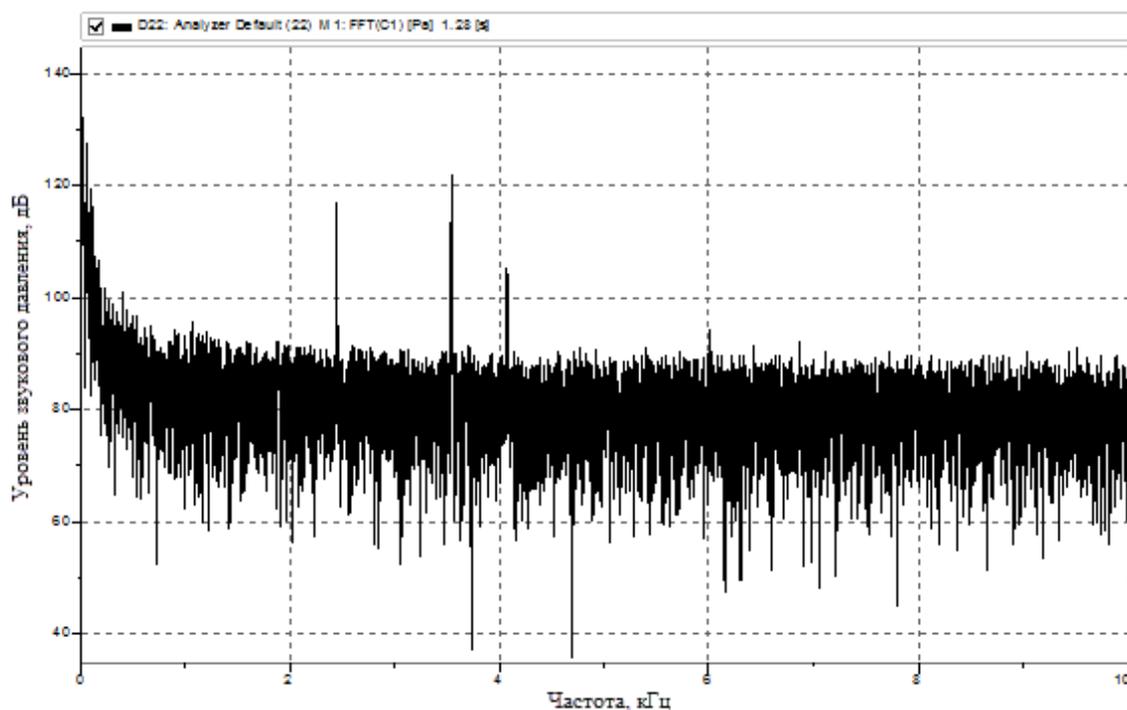


Рис. 13. Спектр звукового давления, полученный при простукивании выходного фланца РДУ-50

## 4. Входной фланец РДУ-50. Частота 2713 Гц (3699 Гц).

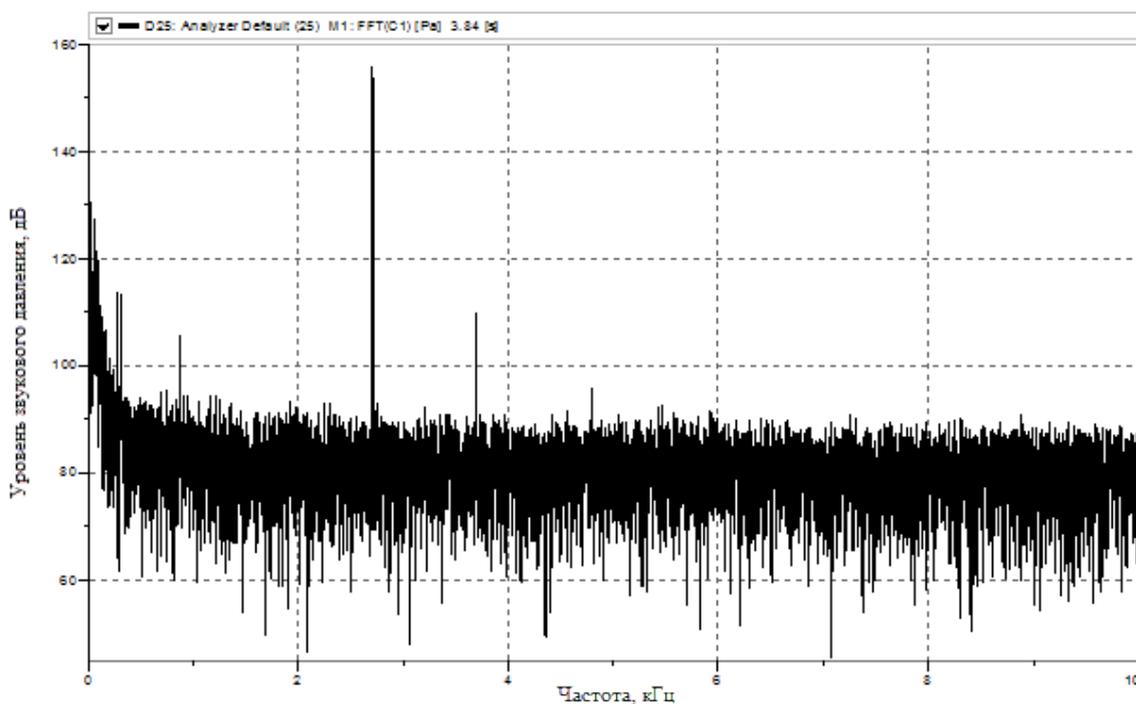


Рис. 14. Спектр звукового давления, полученный при простукивании входного фланца РДУ-50

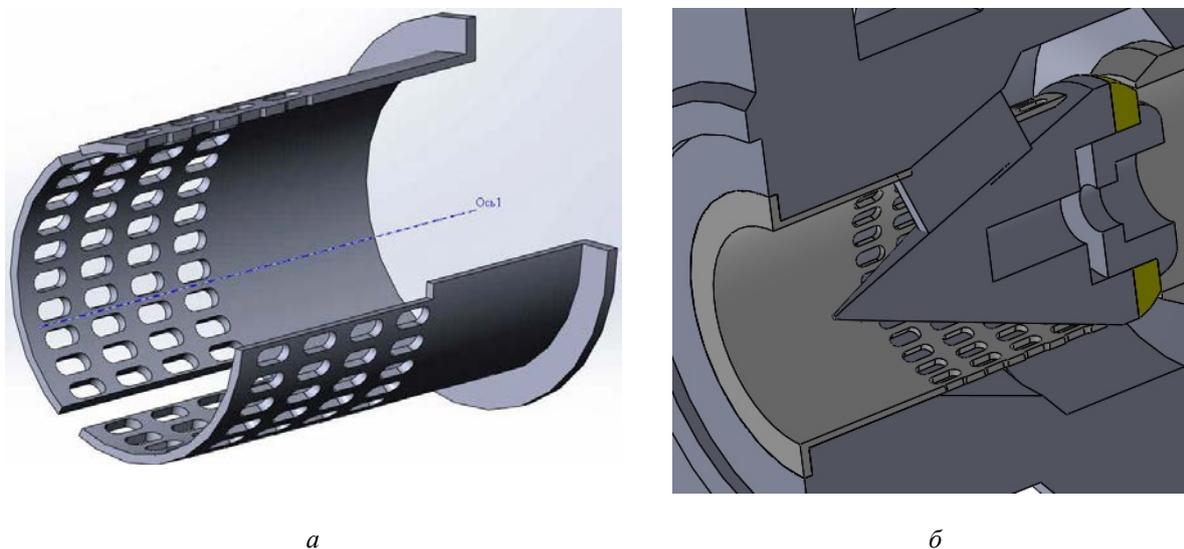


Рис. 15. Перфорированная втулка (а) и её расположение в РДУ-50 (б)

Другим важным мероприятием по устранению резонансных режимов является установка в выходной канал регулятора перфорированной втулки (рис. 15), которая позволяет разбивать крупновихревые структуры и снижать их гидродинамическое воздействие на пилоны.

### Заключение

В результате проведённых исследований выявлен механизм возникновения резонансов регуляторов и предложены мероприятия по их предотвращению:

1. Снижение выходной скорости потока газа за счёт увеличения перепада давления на гасителе пульсаций давления.

2. Изменение структуры потока в выходном канале за счёт использования перфорированной втулки или профиля седла.

### Библиографический список

1. Арзуманов Э.С. Гидравлические регулирующие органы систем автоматического управления. М.: Машиностроение, 1985. 256 с.

2. Юдин Е.Я. Борьба с шумом на производстве. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.

3. Иоффе В.К., Корольков В.Г., Сапожков М.А. Справочник по акустике. М.: Связь, 1979. 312 с.

4. ANSI/ISA - 75.17-1989. Control Valve Aerodynamic Noise Prediction, ISBN 1-55617-207-9. 1989. 32 p.

5. Шорин В.П. Разработка методов физического моделирования глушителей шума сверхзвуковых пульсирующих струй. Самара: СГАУ, 2008. 72 с.

### Информация об авторах

**Шабанов Константин Юрьевич**, начальник технического отдела, ОАО «Газпром Трансгаз Самара». E-mail: [K.Shabanov@samaratransgaz.gazprom.ru](mailto:K.Shabanov@samaratransgaz.gazprom.ru).

Область научных интересов: газодинамические процессы в трубопроводах газораспределительных станций.

**Крючков Александр Николаевич**, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kan@ssau.ru](mailto:kan@ssau.ru). Область научных интересов: автоматизация систем управления, динамика и виброакустика технических систем.

**Ермилов Михаил Анатольевич**, аспирант кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [emasamara@gmail.com](mailto:emasamara@gmail.com). Область научных интересов: гидравлика, пневматика.

**Баляба Максим Владимирович**, инженер, Институт акустики машин, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [bmw-surgut@yandex.ru](mailto:bmw-surgut@yandex.ru). Область научных интересов: динамика и виброакустика технических систем.

### ELIMINATION OF GAS DYNAMIC RESONANCE MODES OF VIBRATION LOADS OF GAS DISTRIBUTION STATION PIPELINE FITTING

© 2014 K. U. Shabanov<sup>1</sup>, A. N. Kryuchkov<sup>2</sup>, M. A. Ermilov<sup>2</sup>, M. V. Balyaba<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Gazprom Transgas Samara plc, Samara, Russian Federation

<sup>2</sup>Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

<sup>3</sup>Machine Acoustics Institute, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The article contains a study of the modes of resonance interaction of a high-speed gas flow exiting from the metering sections of pressure regulators with their elements. It is shown that the interaction leads to a signifi-

cant increase of the valve noise due to the tone component of the spectrum of vibration energy which occurs at the frequency characteristics of pressure fluctuations in the pipeline, the vibration of the controller output flange, as well as the external valve noise. The results of analyzing the prerequisites for resonant interaction of the gas flow with the regulator structural elements including the pylons of the central fairing are presented in the paper. It is shown that an increase in the output flow rate above a certain value (about 40 m / s) gives rise to discrete components of the spectrum of pressure fluctuations. The results of experimental analysis of the pressure regulator elements showing practical coincidence of the frequencies of discrete components of the flow pulsation spectrum and free oscillations of construction elements are also presented. Modal analysis of the natural oscillations of regulator elements is performed by tapping. Measures to remove resonant interaction of the output flow with the pylons that consist in installing special flow-splitting structures - perforated cylindrical sleeves are proposed. Other measures to eliminate the resonant interaction under consideration are also possible.

*Gas transportation system, resonance interaction, pressure regulator, flow pulsations, noise, valve, natural frequencies and mode shapes, flux of vorticity, flutter.*

### References

1. Arzumanov E.S. *Gidravlicheskie reguliruyushie organy system avtomaticheskogo upravleniya* [Hydraulic regulating elements of automatic control systems]. Moscow: Mashinostroeniye Publ., 1985. 256 p.
2. Udin E.Ya. *Borba s shumom na proizvodstve* [Noise control in manufacture]. Moscow: Mashinostroeniye Publ., 1985. 400 p.
3. Joffe V.K., Korol'kov V.G., Sapozhkov M.A. *Spravochnik po akustike* [Reference book on acoustics]. Moscow: Svyaz' Publ., 1979. 312 p.
4. ANSI/ISA-75.17-1989 *Control Valve Aerodynamic Noise Prediction*, ISBN 1-55617-207-9. 1989. 32 p.
5. Shorin V.P. *Razrabotka metodov fizicheskogo modelirovaniya glushiteley shuma sverkhzvukovykh pulsirujushih struy* [Development of methods of physical modeling of supersonic pulse jet noise dampers]. Samara: Samara St. Aerosp. Univ. Publ., 2008. 72 p.

### About the authors

**Shabanov Konstantin Yurievich**, Chief Technical Officer, Gazprom Transgas Samara plc, Russian Federation. E-mail: [K.Shabanov@samaratransgaz.gazprom.ru](mailto:K.Shabanov@samaratransgaz.gazprom.ru). Area of research: gas-dynamic processes in pipelines of gas distribution stations.

**Kryuchkov Alexander Nicolayevich**, Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Automatic Systems of Power Plants, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [kan@ssau.ru](mailto:kan@ssau.ru). Area of research: computer-aided control systems, dynamics and vibroacoustics of technical systems.

**Ermilov Mikhail Anatolyevich**, post-graduate student, Department of Automatic Systems of Power Plants, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [emasamara@gmail.com](mailto:emasamara@gmail.com). Area of research: hydraulics, pneumatics.

**Balyaba Maxim Vladimirovich**, engineer, Machine Acoustics Institute, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [bmw-surgut@yandex.ru](mailto:bmw-surgut@yandex.ru). Area of research: dynamics and vibroacoustics of technical systems.