

В. И. Кондратьев

ФГУП «Научно-исследовательский институт прикладной акустики, Россия, 141981,  
Московская область, Дубна, 9-го Мая, 7а, e-mail: [kondr4318638@yandex.ru](mailto:kondr4318638@yandex.ru)

## Применение резонансных звукопоглотителей для подавления высокоинтенсивных акустических колебаний в камерах сгорания

Получена 03.12.2018, опубликована 01.04.2019

Статья посвящена исследованиям резонансных звукопоглотителей, применяемых в высокоинтенсивных полях камер сгорания аналогичным, например, камерам сгорания ракетных двигателей. Описана оригинальная установка (интерферометр) для определения активного сопротивления на входе в резонатор и его добротности. Приведены результаты применения резонансных звукопоглотителей в камерах сгорания для уменьшения области возникновения продольных и тангенциальных мод автоколебаний.

Ключевые слова: резонатор, камера сгорания, интерферометр, акустические поля, моды колебаний.

Совершенствование методов определения характеристик и использования резонансных звукопоглотителей (РЗП) в технических устройствах и камерах сгорания при наличии акустических колебаний высоких уровней по-прежнему является актуальной задачей [1-4].

Известные методы и устройства для определения характеристик РЗП ограничены расчетами и экспериментами при низких уровнях звукового давления и ограниченном частотном диапазоне [2]. Представляемая автором статьи установка (интерферометр) для измерения акустического импеданса звукопоглотителей, работающая на основе метода стоячих волн имеет определенные преимущества. Аналог установки описан в работе [5]. Для реализации высоких уровней звукового давления был выбран источник с высокой акустической мощностью и легко регулируемый по частоте, а именно газодинамическая тональная сирена. Разного типа громкоговорители, ввиду их ограниченной мощности для этого случая не подходили. В работе [6] было показано, что при потоках, сопровождаемых работой сирены, поправочный коэффициент в классическую формулу для расчета импеданса при малых числах Маха ( $M \ll 1$ ) можно не вводить. Поэтому установка для измерения импеданса РЗП была сконструирована так, чтобы на участке трубы, являющейся составной частью интерферометра и где выполняются измерения, газовый поток был мал  $M \ll 1$ . Для реализации этого требования один конец интерферометра выполнен с коленовидным разветвлением (рис. 1).

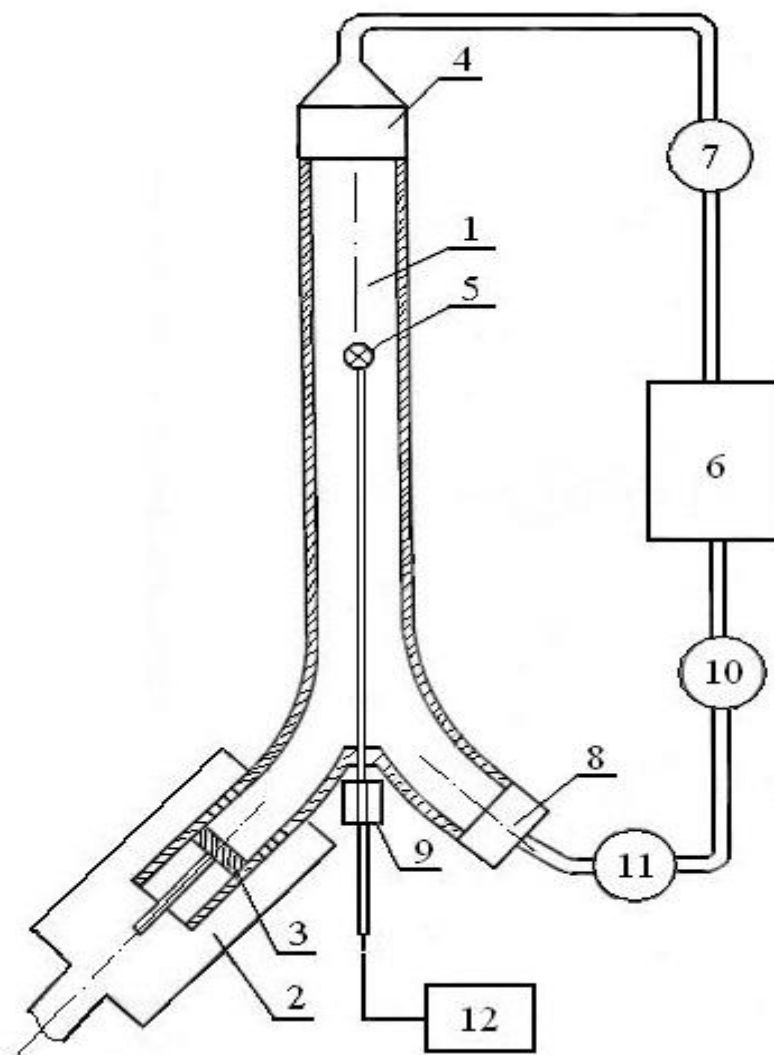


Рисунок 1.

Схема установки для измерения импеданса РЗП:

1 – импедансная труба; 2 – участок с звукопоглотителем; 3 – поршень для настройки на резонанс; 4 – камера с испытуемыми образцами; 5 – акустический датчик; 6 – источник сжатого газа; 7, 10 – газовые редукторы; 8 – газодинамическая сирена; 9 – координатное устройство; 11 – расходомер, 12 – измерительный блок

Установка была использована для измерения акустического импеданса резонансных звукопоглощающих элементов, работающих в условиях проходящего через них потока и без потока [9]. На рисунке 2 показаны резонаторы с различными по конструкции горловинами.

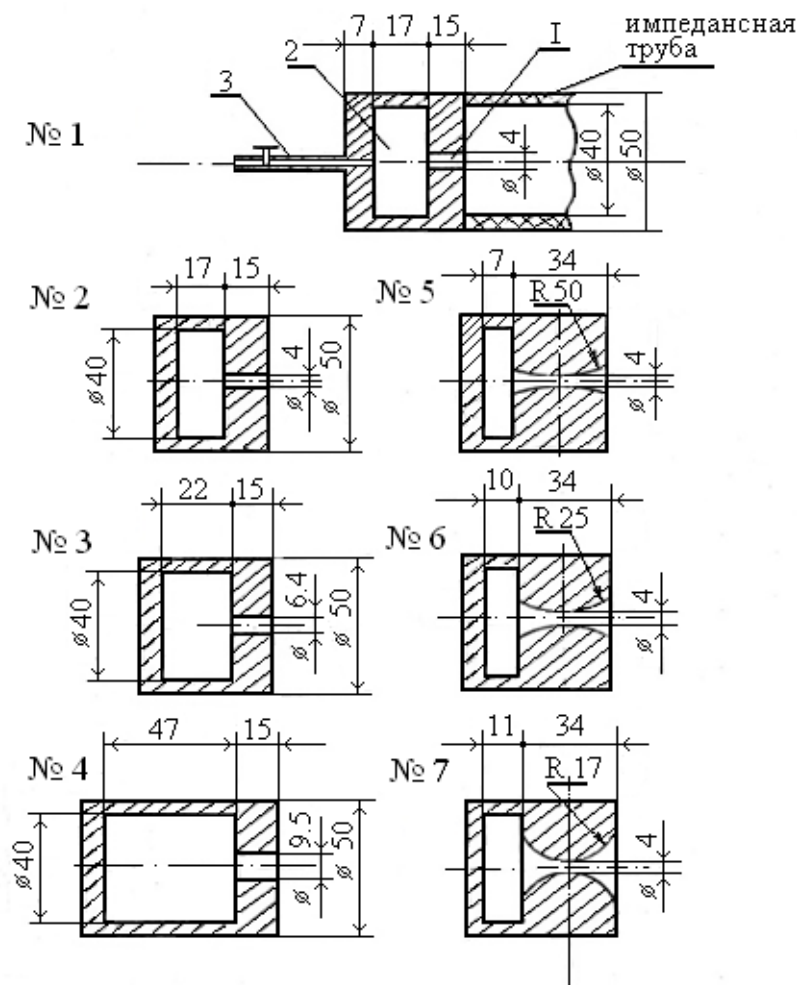


Рисунок 2.

Конструкции элементов резонансных звукопоглотителей. Под № 1 показана система установки элемента РЗП с прохождением через него газового потока

Задняя стенка, представленного на рисунке 2 резонатора № 1 выполнена с каналом, через который можно пропускать сжатый газ. Благодаря такому устройству добротность резонатора можно было регулировать в широких пределах. Установка позволяла измерять добротность резонатора при уровнях звукового давления до 170 дБ.

Схема гидродинамического стационарного течения в круглом цилиндрическом патрубке изображена на рисунке 3.

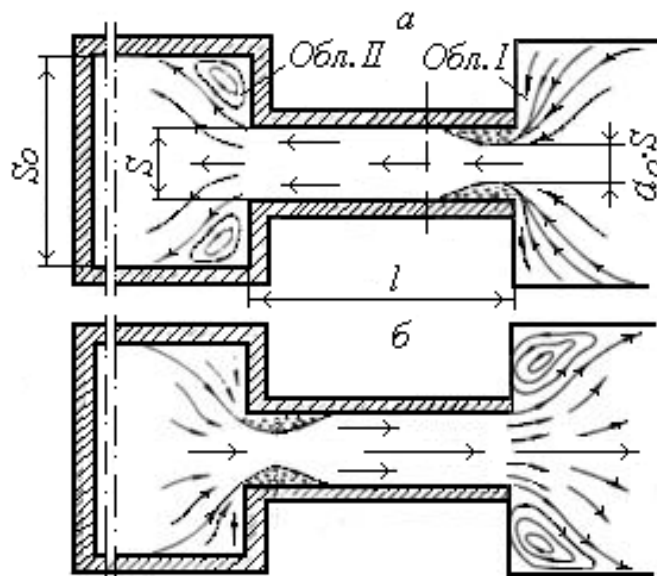


Рисунок 3.

Схема течения газа в резонаторе: а – первый полупериод колебаний (втекание); б – второй полупериод колебаний (вытекание). Здесь  $S$  площадь сечения горловины резонатора,  $S_0$  площадь поперечного сечения резонатора

В области 1 происходит сужение потока до сечения  $\alpha_0 S$  и торможение его за счет возбуждения турбулентности в пристеночной области. В работе, выполненной автором совместно с А. В. Римским-Корсаковым и др. [6], была выведена формула для расчета  $R$  - полного активного сопротивления РЗП на резонансе:

$$R = 1/2 [R_{изл} + \frac{8}{\pi} R_{тр}(\varphi^{-1} + k^{-1})] + \sqrt{\frac{[R_{изл} + \frac{8}{\pi} R_{тр}(\varphi^{-1} + k^{-1})]^2}{4 + \frac{8P_m}{3\pi\gamma P_0} A}}, \quad (1)$$

где  $R_{изл} = S(\omega/c)^2/2\pi$  – коэффициент сопротивления излучения горловины в полубесконечную среду,  $R_{тр} = \left(\frac{2\pi\mu\rho\omega}{S}\right)^{1/2} \frac{l}{\rho c}$ ,  $\rho$  – плотность среды,  $c$  – скорость звука,  $l$  – длина горловины резонатора,  $\omega$  – круговая частота,  $A = \varphi(1 - \varepsilon_0 \alpha_0)^2 + k(1 - \varepsilon_0 \alpha_0)^2$ , где  $\varphi$  – коэффициент торможения потока,  $\varepsilon_0 = S/S_0$  – коэффициент перфорации,  $P_0$  – статическое давление в среде,  $P_m$  – амплитуда звукового давления в среде около резонатора,  $\mu$  – коэффициент вязкости среды в резонаторе,  $u_0 k$  – скорость течения потока наружу,  $u_0 \varphi$  – скорость потока течения внутрь резонатора,  $\gamma$  – показатель адиабаты среды.

Если горловина настолько коротка, что ядро течения не касается ее стенок, и, после сужения расширяясь, касается сразу стенок объема резонатора, то формула для  $R$  несколько видоизменяется и принимает вид:

$$R = \frac{1}{2} R_{\text{изл}} + \sqrt{\frac{R_{\text{изл}}^2}{4 + \frac{8Pm-A}{3\pi\gamma P_0}}} \quad (2)$$

Результаты расчета  $R_1 = R/\varepsilon_0$  по формуле (1) для длинной цилиндрической горловины представлены на рисунке 4.

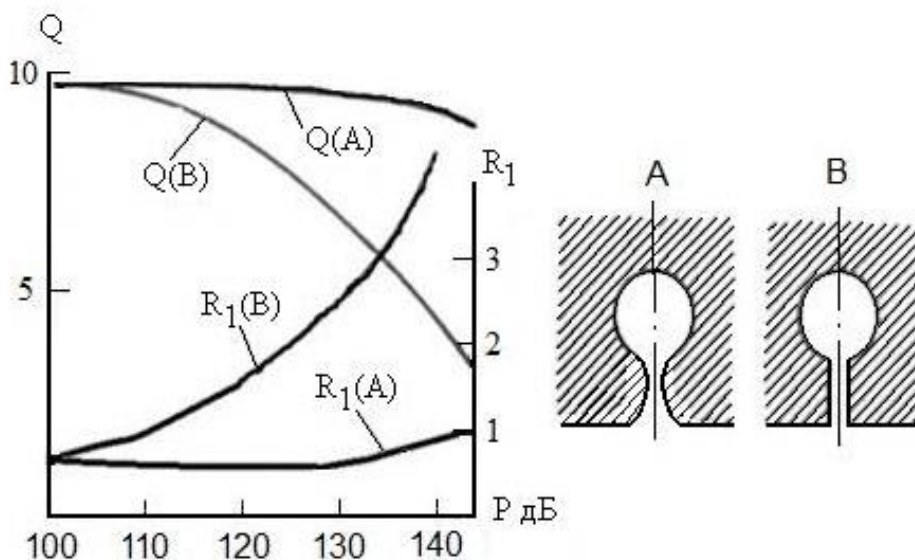


Рисунок 4

Зависимость добротности  $Q$  и активного сопротивления  $R_1$  от уровня звукового давления  $P$  для резонаторов двух типов: А – с профилированной горловиной, В – с цилиндрической горловиной и острыми краями

Обоснование эффективности метода профилирования горловины резонатора для регулирования его добротности дана в работе [8]. Из графика на рисунке 5 видно, что профилирование горловины резонатора снижает его активное акустическое сопротивление (кривые 6 и 7).

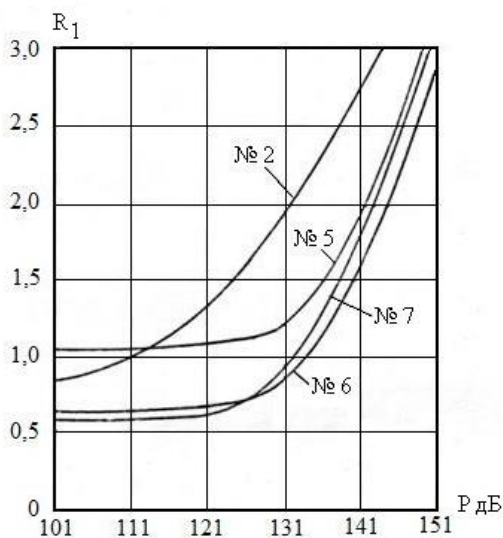


Рисунок 5.

Зависимость активного сопротивления резонаторов, представленных на рисунке 2, от уровня звукового давления при постоянном коэффициенте перфорации

Натурные испытания резонаторов проводилась в камерах сгорания в условиях наиболее часто реализующихся на практике двух видов высокочастотной неустойчивости: продольной и тангенциальной мод автоколебаний. Для исследования влияния конструкции резонаторов при продольных автоколебаниях использовалась камера сгорания [6], схема которой показана на рисунке 6.

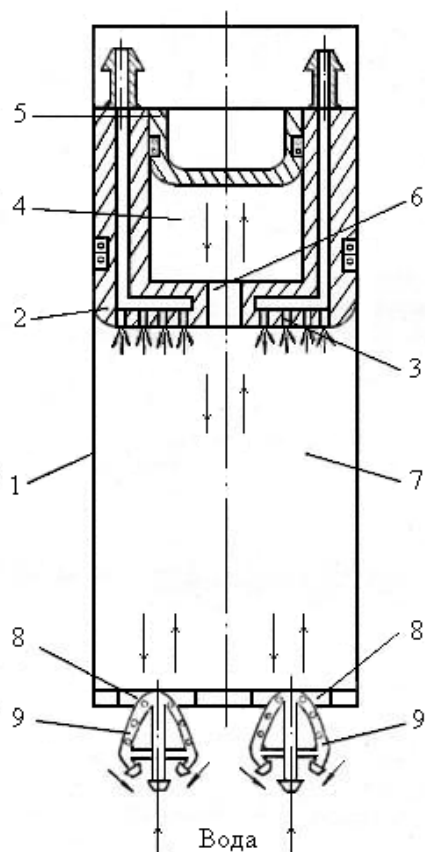


Рисунок 6.

- Камера сгорания:
- 1 – внутренняя стенка корпуса камеры;
  - 2 – поршневая конструкция с топливopодводящей головкой
  - 3; 4 – полость резонатора с подвижным поршнем – 5; 6 – цилиндр для размещения горловин резонатора различных конструкций; 7 – зона горения; 8 – подвижные охлаждаемые водой сопла 9.

Изменение частоты возникающих продольных автоколебаний при горении заранее приготовленной смеси осуществлялось возвратно-поступательным перемещением задней стенки 5 (рис. 6) камеры для подготовки смеси 4. Изменение интенсивности акустических колебаний при горении осуществлялось установкой в полость 6 различных конструкций горловинной части резонаторов, исследованных в интерферометре. Изменение демпфирующих свойств резонаторов достигалось как размещением в них пористых материалов, так и пропусканием через горловину потока газа с заданной скоростью [6, 8].

При горении топливной смеси в камере возбуждались тональные звуковые колебания с частотой от 500 Гц до 900 Гц. Устойчивый срыв продольных автоколебаний происходил при установке в камере резонатора с профилированной горловиной, добротностями около 18 и величиной безразмерного активного сопротивления 0,1. В

целом, наилучшие условия для гашения автоколебаний достигаются при значении модуля акустической проводимости:

$$A_0 = \frac{\sigma [1 - Q^2 (\frac{\gamma-1}{\gamma})^2]^{1/2}}{SR_1} \rightarrow 1,$$

где  $\sigma$  и  $S$ , соответственно, площади поперечных сечений горловины резонатора и камеры,  $Q$  и  $R_1$  – добротность и активное сопротивление резонатора,  $\gamma = \frac{\omega_0}{\omega}$  – отношение собственной частоты резонатора к частоте автоколебаний.

Выбирая из этих условий конструкцию резонатора, можно обеспечить его минимальные габариты и при этом добиваться гашения автоколебаний. Экспериментально было получено полное гашение автоколебаний при коэффициенте перфорации (отношение площадей горловины резонатора и камеры) равном 1%.

Для исследования влияния конструкции РЗП на тангенциальные моды колебаний использовалась камера сгорания аналогичной конструкции [7], что и приведенной на рисунке 6, но большего диаметра (150 мм). Звукопоглощающие элементы размещались в теле сменной форсуночной головки, которая была выполнена в виде плоского диска 1 (рисунок 7) с каналами для подачи топливной смеси 5 и РЗП разных конструкций [7, 10].

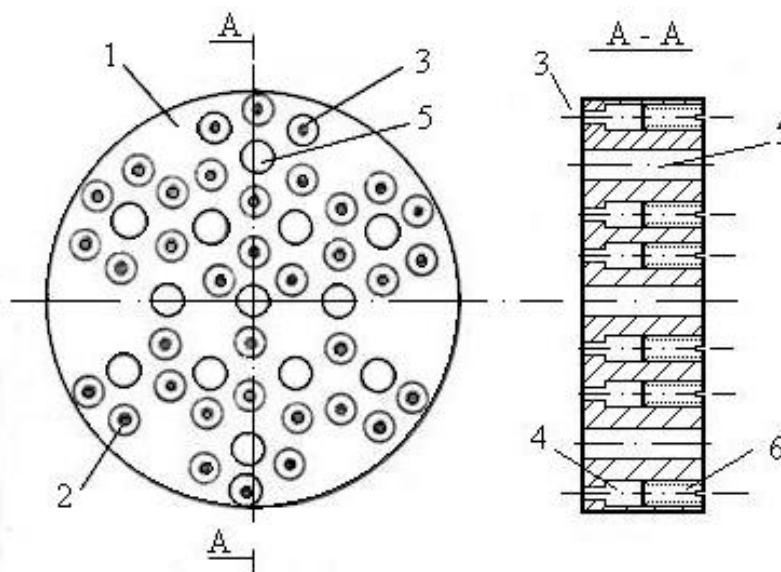


Рисунок 7.

Форсуночная головка камеры с РЗП. 1 – корпус форсуночной головки; 2 – 3 – РЗП; 4 – регулируемый объем РЗП; 5 – каналы для подачи топливной смеси; 6 – резьбовые заглушки

Настройка резонаторов производилась изменением глубины полости резонатора с помощью резьбовых вставок 6. В камере сгорания возникали акустические колебания с уровнем до 175 дБ и частотой 3 кГц. Область существования колебаний определялась в параметрах  $G_2$  (кг/с) (суммарный расход окислителя и горючего) по оси ординат и  $\alpha_{изб}$  – коэффициент избытка окислителя, отложенного по оси абсцисс.

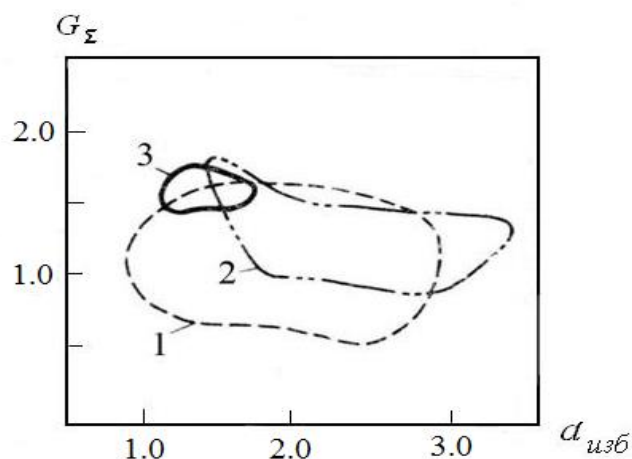


Рисунок 8.

Области высокочастотной неустойчивости (ВЧ) при различном расположении резонаторов: 1 – резонаторы закрыты; 2 – симметричное расположение резонаторов; 3 – несимметричное расположение резонаторов и настройка их на частоты, отличающиеся друг от друга на  $\pm 6\%$

В камерах сгорания наиболее часто реализуются тангенциально-продольные моды колебаний, узловой диаметр которых вращается. Этот факт был подтвержден экспериментально путем измерения акустического давления несколькими охлаждаемыми датчиками, расположенными как по окружности, так и вдоль камеры. Для повышения эффективности РЗП вносилась асимметрия в их расположении в форсуночной головке, что позволяло остановить вращение узлового диаметра. Кроме того в связи с тем, что частота автоколебаний изменялась по мере изменения параметров  $G_\Sigma$  и  $\alpha$  применялся метод настройки резонаторов в диапазоне частот  $\pm 6\%$  относительно средней частоты процесса. На рисунке 8 отображено, как изменяется область высокочастотной неустойчивости при реализации этих способов. Видно, что область 3 тангенциально-продольных автоколебаний значительно меньше области 2, причем уровень звукового давления в области 3 значительно ниже, чем в области 2 на  $\sim 20$  дБ.

## ВЫВОДЫ

1. Предложена конструкция установки (интерферометра) для измерения параметров резонансных звукопоглотителей, используемых в различных устройствах при высоких уровнях звукового давления.
2. Приведены формулы для расчета активного сопротивления резонаторов как с длинными, так и с короткими горловинами. Показана возможность их использования в камерах сгорания различных установок.
3. Экспериментальные исследования акустических автоколебаний в камерах сгорания позволили оптимизировать, как формы РЗП, так и расположение их на форсуночной головке камер, приводящие к значительному сужению области автоколебаний и их интенсивности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Белоус А. А. Изучение частотных характеристик звукопоглощающих материалов методом импедансной трубы / А. А. Белоус, А. В. Шанин, А. И. Корольков



// Волновые явления в неоднородных средах – Волны-2016: сб. тр. XV Всероссийской школы-семинара – М.: Изд-во МГУ, 2016. – С. 62-64.

2. Комкин А. И. Исследование акустических характеристик резонатора Гельмгольца / М.А. Миронов, С.И. Юдин // XXVII сессия Российского акустического общества. - С-Пб, 2014. – 6 С.
3. Комкин А. И. О присоединенной длине отверстий / А. И. Комкин, М. А. Миронов, С. И. Юдин // Акустический журнал. – 2012. – Т. 58 – № 6. – С. 677-682.
4. Ларионов В. М. Автоколебания газа в установках с горением / В. М. Ларионов, Р. Г. Зарипов – Казань: Изд-во Казан. Гос. техн. университета, 2003. – 227 С.
5. Резонатор в поле звуковых волн конечной амплитуды / Громов Ю. И., Кондратьев В. И., Семенов А. Г., Римский-Корсаков А. В. // Акустический журнал. – 1977. – Т. XXIII. – Вып. 1. – С. 160-162.
6. Кондратьев В. И. Влияние входного импеданса резонатора на параметры вибрационного горения / Кондратьев В. И., Сушков А.Л., Римский-Корсаков А. В. // Физика горения и взрыва. – 1976. – № 4. – С. 619-623.
7. Кондратьев В. И. Подавление автоколебаний в камере сгорания резонансными звукопоглотителями / Кондратьев В. И., Сушков А. Л. // Аэроакустика: Сб. трудов. – М.: Наука, 1980 – С. 109-111.
8. Способ регулирования добротности резонансного звукопоглотителя: а. с. 585518 СССР: М. Кл.<sup>2</sup> G 01 K 11/00 / Громов Ю. И., Семенов А. Г., Кондратьев В. И., Сушков А. Л., Еремин Г. И., Котов Р. Г., Новиков Л. В.; № 2367585/28-10; заявл. 20.05.1976; опубл. 25.12.1977, Бюл. № 47. – 2 с.
9. Устройство для измерения акустического импеданса: а. с. 637661 СССР: М. Кл.<sup>2</sup> G 01 N 29/00 / Григорьев Б. А., Еремин Г. И., Кондратьев В. И., Семенов А. Г.; № 2492621/25-10; заявл. 23.05.1977; опубл. 15.12.1978, Бюл. № 46. – 2 с.
10. Резонансный звукопоглощающий элемент: а. с. 861673 СССР: М. Кл.<sup>3</sup> F 01 N 1/10 / Сушков А. Л., Кондратьев В. И., Ершова Н. И.; № 2860565/25-06; заявл. 25.12.1976; опубл. 07.09.1981, Бюл. № 33. – 2 с.