

УДК 621.534

DOI: 10.18287/2409-4579-2019-5-2-18-25

О СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ СХЕМЫ КОРРЕКЦИИ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗОНДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В ГТД

Известно, что пульсации давления оказывают влияние на работоспособность энергетических установок, в том числе газотурбинного двигателя, снижая запас газодинамической устойчивости компрессора, создавая условия для вибрационного горения в камере сгорания. Для доводки двигателя с учётом пульсаций давления необходимы средства их измерения в условиях повышенных температур и вибраций. Наиболее приемлемым из таких средств является зонд, состоящий из подводящего волновода, датчика пульсаций давления и корректирующего элемента в виде длинной линии. Однако в области низких частот возникает неравномерность амплитудно-частотной характеристики зонда, обусловленная уже влиянием отраженных волн давления от закрытого конца длинной линии. Предлагается на выходе длинной линии установить акустический RC-фильтр с сопротивлением, равным волновому сопротивлению длинной линии. В работе теоретически показано, что такое усовершенствование зонда позволяет расширить диапазон частот измерения пульсаций давления. Материал статьи будет полезен специалистам, разрабатывающим и применяющим средства измерения пульсаций давления в экстремальных условиях, например, при доводке газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: Газотурбинный двигатель; пульсации давления; измерение; зонд; динамическая погрешность; корректирующий элемент; акустический RC-фильтр

**А.Г. Гимадиев,
Н.Д. Быстров,
А.И. Сафин**

Самарский национальный
исследовательский университет
имени академика С. П. Королева
Московское шоссе, 34,
г. Самара, Российская Федерация,
443086
gimadiev@gmail.ru

1. Введение

В практике эксплуатации авиационной техники одной из наиболее распространённых причин отказов является нарушение устойчивой работы ГТД, что ведёт к аварийным ситуациям. Нестационарность потока воздуха на входе в компрессор ГТД может возникнуть в силу разных причин: косая обдувка воздухозаборника; несимметричный поток воздуха на входе в двигатель; изменение режима работы самого двигателя; нештатная работа топливной автоматики и др. Помпажные явления приводят к поломкам лопаток компрессора, перегреву лопаток турбины, низкочастотной вибрации двигателя, и, как следствие, к повышенным динамическим напряжениям [1].

Поскольку высоко информативным параметром являются пульсации давления по газо-воздушному тракту газотурбинного двигателя, не случайно в последние годы возросла актуальность применения

акустических зондов для измерения пульсаций давления.

Условия работы датчиков быстропеременных давлений в точках измерения по тракту газотурбинного двигателя зачастую не соответствуют допустимым для датчиков из-за высоких температур и уровней вибраций, наличия взвешенных частиц в продуктах сгорания, то нежелательна установка датчиков непосредственно в точке измерения. Чтобы не подвергать датчики пульсаций давления экстремальным условиям эксплуатации, их выносят из зоны измерения на определённое расстояние с помощью волноводного канала. Из-за резонансных свойств подводящего канала приходится создавать специальное устройство под названием акустический зонд, включающий в свой состав акустический корректирующий элемент, устраняющий искажение измеряемых пульсаций давления из-за резонансов в подводящем волноводе.

Существуют отечественные [2-7, 10, 13-15] и зарубежные разработки корректирующих элементов [6, 8-9, 11], основанные на применении длинных линий. Причём длина линий может варьироваться от 20 м [7] и до 60 м и более [2]. В ЦИАМе в 2000 годы проводились работы по исследованию характеристик зондов с корректирующими элементами в виде длинных линий [2]. Представлены результаты аналитических и экспериментальных исследований частотных характеристик зонда с волноводом диаметром 4 мм и длинами от 0,7 м до 2 м при нормальной и повышенной (до 100 °С) температуре рабочей среды совместно с длинными линиями 30 м и 60 м. Полученные экспериментальные результаты подтверждены аналитическими расчётами в рамках предложенной авторами математической модели.

В практике эксплуатации газотурбинных двигателей нашли применение зонды для измерения пульсаций давления в камере сгорания стационарного ГТД, включающие в свой состав 40 м линию, уложенную в виде компактной катушки и подключеную к выходу волновода [8]. Для удаления горячего газа из волновода к выходу длинной линии организован подвод воздуха с меньшей температурой и большим относительно давления на входе в зонд давлением. В описываемом варианте зонда температура газа в месте расположения датчика пульсаций не превышает 200 °С.

В работе [8] даётся рекомендация, как избежать нежелательных отражений в пределах измерительной трубки. Желательно, чтобы длина согласующей длинной линии была больше её диаметра примерно в 7000 раз. Кроме этого есть рекомендация по созданию постоянной продувки охлаждающим газом.

Принцип действия зонда с корректирующей длинной линией основан на том, что пульсации давления передаются по волноводу, воздействуют на датчик давления и далее без отражения распространяются в «бесконечно» длинную

линию. При этом в идеальном случае дополнительная погрешность определяется только влиянием потерь на трение по длине волновода.

Недостатком корректирующего элемента в виде длинных линий является большие габариты и остаточная погрешность в области низких частот, обусловленная отражением колебаний давления от её закрытого конца и их малым рассеиванием.

Попытки создать малогабаритное корректирующее устройство в виде акустического демпфера, которое могло бы конкурировать с длинной линией, натолкнулись на необходимость проведения достаточно трудоёмких исследований по доводке предлагаемого устройства [16].

2. Теоретические основы применения длинной линии с РС—фильтром

Длинная линия является одним из лучших корректирующих элементов для акустических зондов пульсаций давления. Это связано прежде всего с тем, что, подобрав длину согласованной линии практически всегда можно минимизировать неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) зонда в максимально возможном для данного датчика и волновода диапазоне частот колебаний. Тем не менее, практика применения длинной линии в качестве корректирующего элемента свидетельствует о наличии значительной неравномерности АЧХ акустического зонда с длинной линией в области низких частот пульсаций. Для преодоления отмеченного выше недостатка предложено объединить корректирующие свойства длинной линии и акустического РС-фильтра, устанавливаемого на конце длинной линии (см. рисунок 1). В предложенной схеме зонда снижается уровень отражённых волн давления от конца длинной линии, что приводит к устранению неравномерности его АЧХ в области низких частот и расширяется диапазон частот измерения пульсаций давления с допустимой динамической погрешностью.

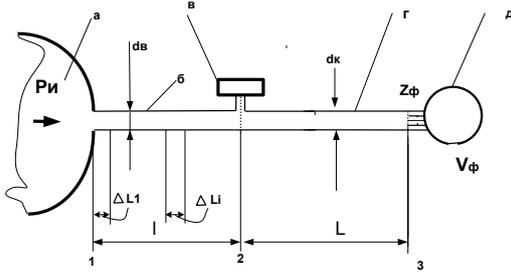


Рисунок 1. Расчётная схема акустического зонда с длинной согласующей линией: а – объект контроля; б – поводящий канал; в – датчик пульсаций давления; г – участок согласующей линии; д - расширительная камера акустического RC-фильтра, установленная за дросселирующим элементом

Для описания процессов передачи колебаний давления в трубопроводных элементах акустических зондов, как правило, используются линейные или линеаризованные математические модели. При рассмотрении ламинарного режима колебательного движения вязкой теплопроводной сжимаемой рабочей среды в жестком трубопроводе постоянного сечения будем полагать:

- постоянство коэффициента вязкости и теплопроводности среды;
- малость средней скорости движения среды в сравнении со скоростью распространения звука;
- малость нормированного изменения плотности среды $\Delta\rho / \rho_0$ в протекающих процессах;
- отсутствие градиента давления по поперечному сечению трубопровода;
- малость отношения диаметра трубопровода к его длине;
- отсутствие теплоотвода от стенок трубы.

Принятые допущения дают возможность использовать для описания процессов в трубопроводах систему уравнений, полученных из решения уравнений количества движения, неразрывности, энергии и состояния. Например, для участка 1-2 схемы (см. рисунок 1) правомерны следующие соотношения [3]:

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ q_1 \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} p_2 \\ q_2 \end{bmatrix},$$

$$[A] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch\Gamma l & Z_\phi sh\Gamma l \\ \frac{1}{Z_\phi} sh\Gamma l & ch\Gamma l \end{bmatrix}.$$

Здесь: p_1, p_2 и q_1, q_2 – динамические составляющие или комплексные амплитуды колебаний давления и объёмного расхода газа в начале и конце участка; Z_ϕ – акустическое волновое сопротивление подводящего трубопровода; Γ – постоянная распространения волнового процесса; l – длина трубопровода. Зависимости для расчёта волнового сопротивления Z_ϕ и постоянной распространения волн давления Γ определяются геометрией участка, режимом движения рабочей среды.

Для последующего участка схемы 2-3 применимы такие же приведённые выше соотношения.

Для акустического RC-фильтра с активным сопротивлением Z_ϕ и ёмкостью V_ϕ правомерно соотношение вида [3]:

$$Z_3 = Z_\phi + 1 / j\omega C_\phi,$$

где Z_ϕ - сопротивление дросселя фильтра; C_ϕ - акустическая ёмкость фильтра; $\omega = 2\pi f$ - угловая частота колебаний давления; f - циклическая частота, Гц; $j = \sqrt{-1}$.

В инженерной практике используются простые приближенные зависимости, обеспечивающие достаточно высокое соответствие расчётных результатов экспериментальным данным. Показано, что для расчёта частотных характеристик газовых трубопроводных цепей может быть использована так называемая высокочастотная теория.

Авторами статьи разработана программа РУДИП (Расчёт Устройств Для Измерения Пульсаций) [17], позволяющая на основании вышеприведённых допущений осуществлять инженерные расчёты частотных

характеристик акустических зондов, в том числе и зондов, выполненных по схеме, представленной на рисунке 1.

3. Результаты вычислительного эксперимента

Для проверки усовершенствованной схемы коррекции частотной характеристики в качестве примера для проведения вычислительного эксперимента выбрана геометрия одной из схем, состоящей из подводящего волновода и длинной линии, приведённых в работе [2].

Рисунок 2 иллюстрирует АЧХ зонда с длинной линией без акустического фильтра при среднем (рабочем) давлении 1,1 МПа, температуре $T = 300$ К, длине подводящего канала 2 м с диаметром 4 мм, длине согласующего трубопровода 30 м с диаметром 4 мм и приведённым объёмом полости датчика 10 мм^3 . На рисунке здесь и далее обозначено: $M(f) = |p_2 / p_1|$ - модуль частотной функции зонда.

Из рисунка 2 следует, что на низких частотах (до 60 Гц) наблюдается значительная неравномерность амплитудно-частотной характеристики зонда. Пилообразный характер АЧХ зонда связан с тем, что датчик давления воспринимает суммарный колебательный процесс, обусловленный отражением резонансных волн как от конца длинной линии (низкочастотный «частоток» на АЧХ), так и от самого себя волн в подводящем трубопроводе (высокочастотная огибающая «частотокола» на АЧХ).

На рисунке 3 – рисунке 5 представлены результаты вычислительного эксперимента по определению АЧХ усовершенствованного акустического зонда, включающего корректирующее устройство в виде длинной линии (см. рисунок 2) и RC-фильтра с объёмом полости фильтра $0,5 \cdot \text{дм}^3$ и сопротивлением дросселя $Z_{\phi} = 3,47 \cdot 10^8 \text{ Па} \cdot \text{с} / \text{м}^3$.

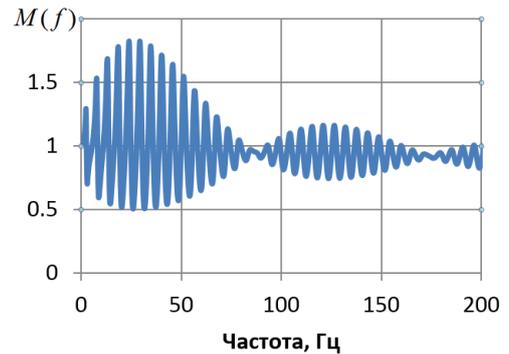


Рисунок 2. Расчётная амплитудно-частотная характеристика акустического зонда с волноводом и корректирующей длинной линией

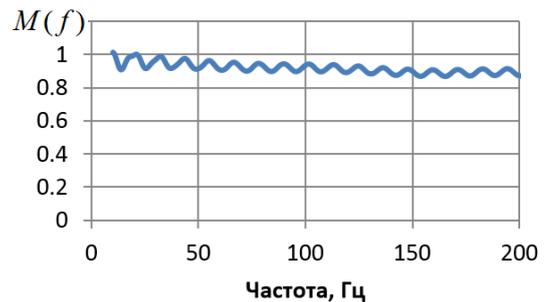


Рисунок 3. Расчётная амплитудно-частотная характеристика акустического зонда с однородным волноводом, корректирующей длинной линией и RC-фильтром при рабочем давлении 1,1 МПа

График на рисунке 3 иллюстрирует более чем в 10 раз снижение неравномерности АЧХ зонда в области низких частот в случае применения новой схемы коррекции на расчётном режиме, когда сопротивление фильтра соответствует волновому сопротивлению длинной линии.

В свою очередь рисунки 4 и 5 иллюстрируют возможности новой схемы при 20 % отклонении рабочего давления в сторону как увеличения, так и уменьшения.

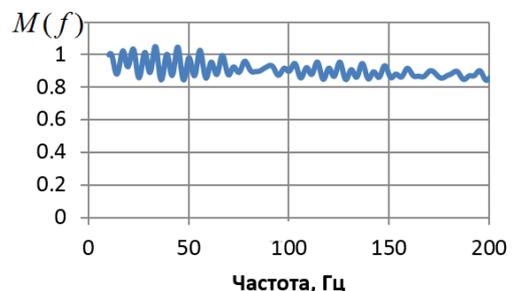


Рисунок 4. Расчётная амплитудно-частотная характеристика акустического зонда с волноводом, корректирующей линией и RC-фильтром при рабочем давлении 0,88 МПа

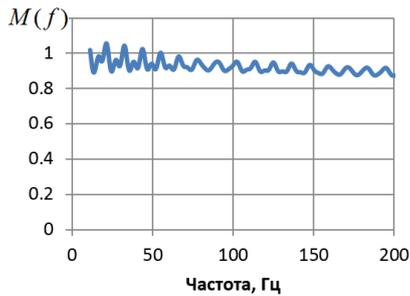


Рисунок 5. Расчётная амплитудно-частотная характеристика акустического зонда с однородным волноводом, корректирующей длинной линией и RC-фильтром при рабочем давлении 1,32 МПа

Из графиков видно, что суммарная неравномерность на нерасчётных режимах работы по рабочему давлению не превышает +5 % и -13 % в диапазоне частот от нуля до 200 Гц, тогда как неравномерность АЧХ с одной только длинной линией составляет +80 % и -50 % в том же частотном диапазоне.

4. Конструктивная реализации усовершенствованного зонда пульсаций давления

Усовершенствованная схема коррекции АЧХ зонда пульсаций давления получила конструктивную реализацию, описанную в патенте на полезную модель [18] (рисунок 6).

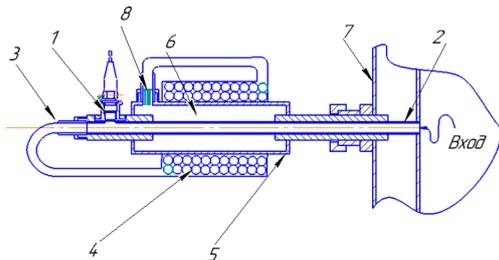


Рисунок 6. Усовершенствованный зонд для измерения пульсаций давления газа с корректирующим элементом в виде длинной линии с RC-фильтром на конце

Зонд пульсаций давления, представленный на рисунке 6, состоит из датчика пульсаций давления 1, подключенного с одной стороны к выходу подводящего трубопровода 2, а с другой стороны к входу согласующего трубопровода 3, намотанного в виде бухты 4 на корпус 5, внутренняя полость которого

представляет собой замкнутую камеру 6 (ёмкость RC-фильтра). Вход подводящего трубопровода 2 подключен к объекту испытаний 7, в котором предполагается измерение пульсаций давления. Согласующий трубопровод 3 выполнен с проходным сечением, равным проходному сечению подводящего трубопровода 2. На конце согласующего трубопровода 3 установлен дросселирующий элемент 8, например из материала МР [3], выход которого соединён с камерой 6. Акустическое сопротивление Z_{ϕ} дросселя 8 равно волновому сопротивлению $Z_e = \rho \cdot c / S$ подводящего трубопровода 2, где ρ – плотность газа; c – скорость распространения звука в подводящем 2 и согласующем 3 трубопроводах; S – площадь проходного сечения подводящего трубопровода 2.

Устройство работает следующим образом. Пульсации давления газа с объекта испытаний 7 передаются на вход подводящего трубопровода, распространяясь по нему до датчика пульсаций давления 1 и далее входят в согласующий трубопровод 3 с RC-фильтром на конце. Пульсации давления, распространяясь по согласующему трубопроводу 3, постепенно затухают и достигают дросселя 8. Так как дроссель 8 обладает сопротивлением, равным акустическому волновому сопротивлению согласующего трубопровода 2, то остаточные пульсации давления, не погашенные полностью по его длине, гасятся (без отражения) на акустическом RC-фильтре. При этом исключается возникновение низкочастотных резонансных колебаний давления газа в измерительной цепи, что предотвращает искажение воспринимаемых датчиком пульсаций давления.

5. Основные выводы

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Предложена схема усовершенствованного акустического зонда пульсаций давления с корректирующим

элементом в виде свёрнутого в катушку длинного трубопровода с проходным сечением, равным сечению подводящего канала и дополненного акустическим РС-фильтром на конце.

2. На основе расчётов установлено, что применение предложенной схемы зонда пульсаций давления с минимизацией неравномерности амплитудно-частотной характеристики в области низких частот существенно расширяет его частотный диапазон.

3. В рамках патента на полезную модель представлена конструктивная реализация предложенной схемы коррекции амплитудно-частотной характеристики зонда с длинной линией и акустическим РС-фильтром.

4. Зонд с корректирующей длинной линией и акустическим РС-фильтром может найти применение для измерения пульсаций давления при доводочных испытаниях ГТД.

Список использованных источников

[1] Чигрин В. С. Исследование методов обнаружения неустойчивых режимов работы осевых компрессоров с использованием анализа вибраций / В. С. Чигрин, С. В. Епифанов, Ф. Мохаммадсадеги // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2015. - № 6(7). - С. 23-34.

[2] Фурлетов В. И. Определение частотной характеристики измерительной системы «датчик колебаний давления-волновод» при повышенных параметрах газа / В. И. Фурлетов, А. Н. Дубовицкий, Г. С. Ханян // Развитие средств и методов испытаний авиационных двигателей (Сборник статей). - М.: ЦИАМ, 2010. - 252 с.

[3] Шорин В. П. Гидравлические и газовые цепи передачи информации / В. П. Шорин, А. Г. Гимадиев, Н. Д. Быстров. - М.: Машиностроение, 2000. - 328 с.

[4] Шорин В. П. Акустические методы и средства измерения пульсаций давления / В. П. Шорин, Е. В. Шахматов, А. Г. Гимадиев, Н. Д. Быстров. - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. - 132 с.

[5] Варшавский Л. А., Федорович В. Н. Акустический зонд: пат. СССР № 49969; опублик. 1936.

[6] Eamon P. G., Walter J. S., Robert J. N., Fei Han Dynamic pressure probe holder and method of obtaining a dynamic pressure signal, United States Patent No.: US 2004/0168520 A1.

[7] Шорин, В. П. Разработка и экспериментальное исследование частотных характеристик акустических зондов для измерения пульсаций давления в газогенераторе / В. П. Шорин, А. Г. Гимадиев, Н. Д.

Быстров, С. А. Ильинский, Т. Г. Александрова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета), 2012. - №3(34)-2. - С. 269-274.

[8] Zinn H., Noiray N., Schuermans B., Pahari D., Rajkovic D. Prob for measuring pressure oscillations in the combustor of a gas turbine, United States Patent No.: US 2015/0268121 A1.

[9] Brehm A., Evers W., Wetter H., Zinn H. Probe for measuring pressure vibrations, United States Patent No.: US 6550336 B2.

[10] Богданов В. В. Влияние пульсаций потока в самолетных воздухозаборниках на работу компрессора ТРД (по материалам иностранной печати за 1966-1972гг.) / В. В. Богданов, А. Г. Кукинов, А. К. Хвостова, Н. И. Куканова // Обзор ЦАГИ. - М.: ЦАГИ, 1973. - № 400. - 166 с.

[11] Zinn H. Developments and experiences with pulsation measurements for heavy-duty gas turbines / H. Zinn, M. Habermann // Proceedings of the ASME Turbo Expo. - 2007. - Vol. 1. - P. 639-648.

[12] Englund D. R. The infinite line pressure probe / D. R. Englund, W. B. Richards // NASA Technical Memorandum. -1984. - No. 83582.

[13] Федорович В. Н. Акустический зонд / Федорович В. Н., Салтыков С. Я. // Журнал технической физики. - 1939. - Т. 9. - Вып. 8. - С. 737-742.

[14] Gimadiev A. Correcting frequency characteristics of pressure pulsations probes (review) / A. Gimadiev, N. Bystrov, D. Stadnik // 24th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2017, 23-27 July. - London, 2017. - Vol. 4. - P. 3015-3022.

[15] Гимадиев А. Г. Анализ схем коррекции динамических характеристик акустических зондов для измерения пульсаций давления в газотурбинных двигателях / А. Г. Гимадиев, Н. Д. Быстров, Е. С. Дягилева // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. - 2018. - Т. 17. - № 3. - С. 56-67.

[16] Шорин В. П. О разработке компактных акустических зондов для измерения пульсаций давления в ГТД / В. П. Шорин, А. Г. Гимадиев, Н. Д. Быстров // Динамика и виброакустика машин: Сб. трудов 2-й международной научно-технич. конф. - Самара, 2014. - С. 486-492.

[17] Гимадиев А. Г. Разработка методики и программы расчёта неоднородных газовых измерительных цепей / А. Г. Гимадиев, Н. Д. Быстров, А. В. Устинов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королева. - 2012. - №3 (34). - Ч. 2. - С. 263-268.

[18] Гимадиев А. Г., Дягилева Е. С., Касьянов С. А., Быстров Н. Д. Устройство для измерения пульсаций давления газа: пат. на полезную модель РФ № 184246 получен 26.10.2018.

ABOUT IMPROVEMENT OF THE SCHEME OF CORRECTION OF FREQUENCY CHARACTERISTICS OF PROBES FOR MEASUREMENT OF PULSATIONS OF PRESSURE IN GTE

**Asgat G. Gimadiev,
Nikolay D. Bystrov,
Arthur I. Safin**

Samara National Research University
34, Moskovskoe shosse, Samara,
443086, Russian Federation
gimadiev_ag@mail.ru

It is known that pressure pulsations affect the performance of power plants, including a gas turbine engine, reducing the reserve of gas-dynamic stability of the compressor, creating conditions for oscillatory combustion in the combustion chamber. When fine-tuning the engine in the context of the pressure pulsations there is need for measuring means working at extreme temperatures and vibrations. The most acceptable of these means is a probe consisting of a supply waveguide, a pressure pulsation sensor and a corrective element in the form of a long line. However, in the low frequency region there is an uneven amplitude-frequency characteristic of the probe, due to the influence of the reflected pressure waves from the closed end of the long line. It is proposed to install an acoustic RC-filter with resistance equal to the wave resistance of the long line at the output of a long line. The paper theoretically shows that such an improvement of the probe allows to expand the frequency range of measurement of pressure pulsations. The material of the article will be useful for specialists who develop and use tools for measuring pressure fluctuations in extreme conditions, for example, when developing gas turbine engines.

Key words: gas turbine engine; pressure pulsations; measurement; probe; dynamic error; correcting element; acoustic RC-filter

References

- [1] Chigrin, V.S., Epifanov, S.V. and Mohammadzadeh F. (2015), "Study of methods for the detection of unstable operation of axial compressors using vibration analysis", *East European journal of advanced technologies*, vol. 6, no. 7, pp. 23-34.
- [2] Furlotov, V.I., Dubovitsky A.N. and Hanyan, G.S. (2010), *Determination of the frequency characteristics of the measuring system "pressure oscillation sensor-waveguide" at elevated gas parameters*, Development of means and methods of testing of aircraft engines, Collection of articles, TsIAM, Moscow, Russia, 252 p.
- [3] Shorin, V.P., Gimadiev, A.G. and Bystrov, N.D. (2000), *Hydraulic and gas chains of information transmission*, Mechanical Engineering, Moscow, Russia, 328 p.
- [4] Shorin, V.P., Shakhmatov, E.V., Gimadiev, A.G. and Bystrov, N.D. (2007), *Acoustic methods and means of measuring pressure pulsations*, Samara state aerospace university, 132 p.
- [5] Warshawski, L.A. and Fedorovich, V.N. (1936), *Acoustic probe*, USSR, Pat. 49969.
- [6] Eamon, P.G., Walter, J.S., Robert, J.N. and Fei Han. *Dynamic pressure probe holder and method of acquiring a dynamic pressure signal*. United States, Pat. US 2004/0168520 A1.
- [7] Shorin, V.P., Gimadiev, A.G., Bystrov, N.D., Ilyinsky, S.A. and Alexandrova, T.G. (2012), "Development and experimental study of frequency characteristics of acoustic probes for measuring pressure fluctuations in the gas generator", *Vestnik of samara university. Aerospace and mechanical engineering*, no. 3-2(34), pp. 269-274.
- [8] Zinn, H., Noiray, N., Schuermans, B., Pahari, D. and Rajkovic, D. *Prob for measuring pressure oscillations in the combastor of a gas turbine*, United States Pat. US 2015/0268121 A1.
- [9] Brehm, A., Evers, W., Wetter, H. and Zinn, H. *Probe for measurement vibrations*, United States Pat. US 6550336 B2.
- [10] Bogdanov, V.V., Kalinov, A.G., Khvostov, A.K. and Kukanov, A.N. (1973), "The effect of pulsation flow in aircraft inlet on the compressor turbojet engine (on materials of the foreign press for 1966-1972)", *TSAGI*, no. 400, Moscow, Russia, 166 p.
- [11] Zinn, H. and Habermann, M. (2007), "Developments and experiences with pulsation measurements for heavy-duty gas turbines", *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, vol. 1, pp. 639-648.
- [12] Englund, D.R. and Richards, W.B. (1984), *The infinite line pressure probe*, NASA Technical Memorandum, No. 83582.
- [13] Feydorovits, V.N. and Saltykov, S.J. (1939), "Akusticheskiy zond", *Technical physics*, vol. 9, no. 8, pp. 737-742.

[14] Gimadiev, A., Bystrov, N. and Stadnik, D. (2017), "Correcting frequency characteristics of pressure pulsations probes", *24th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2017*, London, United Kingdom, 23 - 27 July 2017, vol. 4, pp. 3015-3022.

[15] Gimadiev A.G., Bystrov N.D. and Dyagileva E.S. (2018), "Analysis of schemes of correction of dynamic characteristics of an acoustic probe for measuring pressure pulsations in gas turbine engines, *Vestnik of Samara University, Aerospace engineering, technology and mechanical engineering*, vol. 17, no. 3, pp. 56-67.

[16] Shorin, V.P., Gimadiev, A.G. and Bystrov, N.D. (2014), "About development of compact acoustic probes for measurement of pressure pulsations in GTE", *V. SB. proceedings of the 2nd international scientific and technical. Conf. "Dynamics and vibroacoustics of machines"*, Samara, Russia, 15-17 September 2014, vol. 2, pp. 486-492.

[17] Gimadiev, A.G., Bystrov, N.D. and Ustinov, A.V. (2012), "Development of methods and programs for calculation of heterogeneous gas measuring circuits", *Vestnik of Samara state aerospace University*, no. 3(34), part 2. pp. 263-268.

[18] Gimadiev, A.G., Dyagileva, E.S., Kasyanov, S.A. and Bystrov, N.D. (2018), *A device for measuring pressure pulsation of the gas*, Patent for useful model RF № 184246.