

Внезапная разгерметизация отсека через «рваное» отверстие

Государственное предприятие «АНТОНОВ»

Впервые проведены исследования и установлены основные закономерности аэроакустических процессов при внезапной разгерметизации и истечении газа из отсека через круглое и «рваное» отверстия. Разработана методика обработки спектра пульсаций давления воздуха в отсеке при внезапной разгерметизации. Устойчивые оценки показаний пульсаций давлений воздуха получены с применением фильтра Бесселя и полосой пропускания $\Delta f=(0...400)$ Гц. Спектр УЗД отверстия типа «рваное» с $F_{отн}=(0,486...0,497)$ по отношению к спектру для круглого отверстия имеет три области пересечения.

Ключевые слова: летательный аппарат, отсек, внезапная разгерметизация, уровень звукового давления (УЗД).

Введение

Истечение газа из отсека происходит через отверстие различной конфигурации и площади. Проведены исследования и установлены основные закономерности процессов истечения воздуха из отсека преимущественно через круглое отверстие. Определены основные характеристики движущегося газа в отсеке и в области размещения круглого отверстия. Разработаны основные модели движущегося газа при истечении газа через круглое отверстие при докритическом и закритическом перепаде давления между отсеком и средой, в которую происходит втекание газа. На основании разработанных моделей были проведены расчеты параметров воздуха в отсеках в различных отраслях промышленности.

1. Анализ публикаций

Впервые теоретические исследования течения воздуха через отверстие в канале, по которому движется воздух, провел Николай Егорович Жуковский [1]. Сергей Алексеевич Чаплыгин рассмотрел задачу об истечении газа через отверстие из бесконечного сосуда [2]. Влияние конфигурации отверстия на процессы течения воздуха в работах не рассмотрено.

Дальнейшие исследования газодинамических процессов истечения газа через отверстие с острой кромкой, с радиусом и для дозвуковой, звуковой и сверхзвуковой скорости было осуществлено другими авторами [3,4,5].

В работе [6] описаны процессы обтекания струей газа (жидкости) плоского экрана (стенки). Рассмотрены процессы движения установившегося идеального газа и силовое воздействие свободной струи на экран. Получена математическая модель силового воздействия свободной струи газа на экран. Формула $P = Qv$ (Q -массовый расход газа, v -скорость газа) определяет динамическую силу воздействия струи газа на плоскую стенку, установленную перпендикулярно к потоку. Для идеальной и несжимаемой жидкости определена сила и точка ее приложения на экране.

В работе [7] рассмотрены гидродинамические силы, действующие на различные гидравлические органы. На основании уравнений механики

движущегося тела проведен анализ истечения однородной жидкости из замкнутого сосуда со скоростью v через отверстие поперечного сечения S на экран. При этом, на экране возникает сила (F), равная $F = Mv + (P_1 - P_0)S$ (M - массовый расход жидкости, P_1 - статическое давление жидкости на выходе из отверстия, P_0 - давление окружающего пространства, в которое происходит истечение жидкости). Направление силы совпадает с направлением скорости v . Исследованы некоторые частные случаи течения жидкости и реакции потока, которые вызваны изменением количества движения. Представленные математические модели в работах [6,7] не учитывают статическую и динамическую составляющую движущегося воздуха, что ограничивает область практического применения полученных моделей.

В работе [8] приведены результаты экспериментальных исследований вихревых клапанов с осевым, осерадиальным и щелевым диффузорами. Максимальную пропускную способность имеет вихревой усилитель со щелевым диффузором с коэффициентом расхода $\mu = 1.91$. Рабочая характеристика диффузора имеет две гистерезисных зоны ступенчатого изменения расхода.

Особенности разгерметизации отсеков летательного аппарата (ЛА) изложено в работе Ивлентиева В.С. [9]. Представлены математические модели процессов в отсеке при изменении параметров газа по изотерме, адиабате, политропе. В самом общем виде рассмотрена модель при переменном значении политропы. Разработанные модели имеют ограниченную область применения, с помощью которых не представляется возможным описать изменение газодинамических и аэроакустических процессов воздуха в отсеке при внезапной разгерметизации.

В работе [10] представлен экспериментальный стенд для проведения аэроакустических исследований при внезапной разгерметизации сосуда. Стенд включал сосуд с упругой мембраной. При подаче воздуха в сосуд от внешнего источника давления мембрана или исследуемое отверстие при требуемом давлении разрывалось и происходило внезапное истечение газа в окружающее пространство (атмосферу) или смежный отсек. В процессе внезапной разгерметизации определялись аэроакустические характеристики движущегося воздуха. Впервые определена скорость распространения колебаний давления газа в двух смежных отсеках при внезапном изменении давления газа в одном из отсеков. Приведены результаты измерений шума в зависимости от длины отсека на выходе из мембраны. Конфигурация отверстия при истечении воздуха из отсека не рассмотрена.

Анализ работ [1-10] показывает, что проведены преимущественно исследования при истечении газа из отсека через круглое отверстие и отсутствуют их аэроакустические характеристики. Реальные процессы истечения газа из отсека зачастую имеют отверстия произвольной конфигурации. Характерным примером является истечение воздуха при внезапной разгерметизации отсека ЛА. Истечение воздуха из отсека сопровождается сложными аэроакустическими явлениями. В процессе внезапной разгерметизации зачастую происходит разрушение стекол фонаря кабины, участков фюзеляжа, нарушение целостности конструкции кабины или герметичности. Особенности проведения таких исследований и расчетов определены в соответствии с АП-25. Поэтому возникает необходимость провести дополнительные исследования по

установлению основных закономерностей изменение параметров воздуха в отсеке и отверстия через которое происходит истечение газа.

2. Актуальность проблемы

Анализ опубликованных работ показывает, что установление основных закономерностей газодинамических и аэроакустических процессов в отсеке при внезапной разгерметизации отсека через отверстие произвольной конфигурации является актуальным и представляет научно-прикладную проблему.

3. Цель и задачи исследований

Целью настоящих исследований является изучение основных процессов в отсеке при внезапной разгерметизации через круглое и «рваное» отверстия.

Для достижения цели решаются следующие задачи:

1. Разработать методику обработки спектра пульсаций давления воздуха в отсеке.
2. Установить основные закономерности газодинамических и аэроакустических процессов в отсеках при истечении газа через «рваное» отверстие, провести сравнительную оценку круглого и «рваного» отверстий.

4. Методика обработки спектра пульсаций давления воздуха в отсеке при внезапной разгерметизации

В процессе внезапной разгерметизации отсека может происходить истечение газа через отверстие сложной конфигурации. Механизм образования отверстия в отсеке представляет собой в общем случае случайный процесс, который зависит от многих факторов. Одним из факторов, который оказывает влияние на течение газа из отсека, является форма отверстия.

Исследования по изучению аэроакустических процессов проводились на стенде в соответствии с работой [10]. Стенд включал сосуд (отсек), из которого под воздействием избыточного давления воздуха происходило разрушение исследуемой мембраны и истечение воздуха в атмосферу или смежный сосуд. При разрушении мембраны образовывалось отверстие площадью F_0 с острыми кромками. Относительная площадь отверстия составляет $F_{отн} = F_0/F$, где F - площадь сечения канала (отсека).

В процессе истечения воздуха определялись основные аэроакустические процессы (давление газа и уровень звукового давления (УЗД) на выходе из отсека). Анализ спектра УЗД позволял определить структуру звукового поля, создаваемого движущимся газом при внезапной разгерметизации отсека.

Методика обработки спектра пульсаций давления газа при разгерметизации отсека включала широко применяемые цифровые фильтры Баттерворта, Чебышева и Бесселя. Проводились численные исследования изменения давления газа в отсеке при внезапной разгерметизации с $F_{отн}=1$. Определены предпочтительные параметры фильтра (полоса пропускания и степень фильтра) во всем диапазоне изменения параметров газа. Для частотного анализа аэродинамического шума использован универсальный регистрирующий анализатор виброакустических сигналов "SPECTRAN" (Государственная метрологическая аттестация № 22-0771 от 31.07.2006г). Частота опроса датчиков

давления и температуры составляла 35 кГц. При повышении частоты опроса датчиков до 60 кГц оценка измеряемых параметров существенно не изменялась.

Для спектрального анализа шумов при акустических измерениях использованы фильтры электронные октавные и третьоктавные. Проводился анализ спектра пульсаций давления с применением фильтров с полосой пропускания от $\Delta f=(0...50)$ Гц до $\Delta f=(0...1000)$ Гц. По результатам применения фильтра определялась дисперсия опыта: $\sigma^2=Y=(Y_\phi-Y_b)^2/N$, где Y_ϕ – значение давления газа в отсеке с применением фильтра; Y_b – давления газа в отсеке по результатам измерений на датчике давления; N – количество опытов. Величина дисперсии с увеличением частоты пропускания фильтра монотонно уменьшается по экспоненте и для фильтра Чебышева с полосой пропускания фильтра

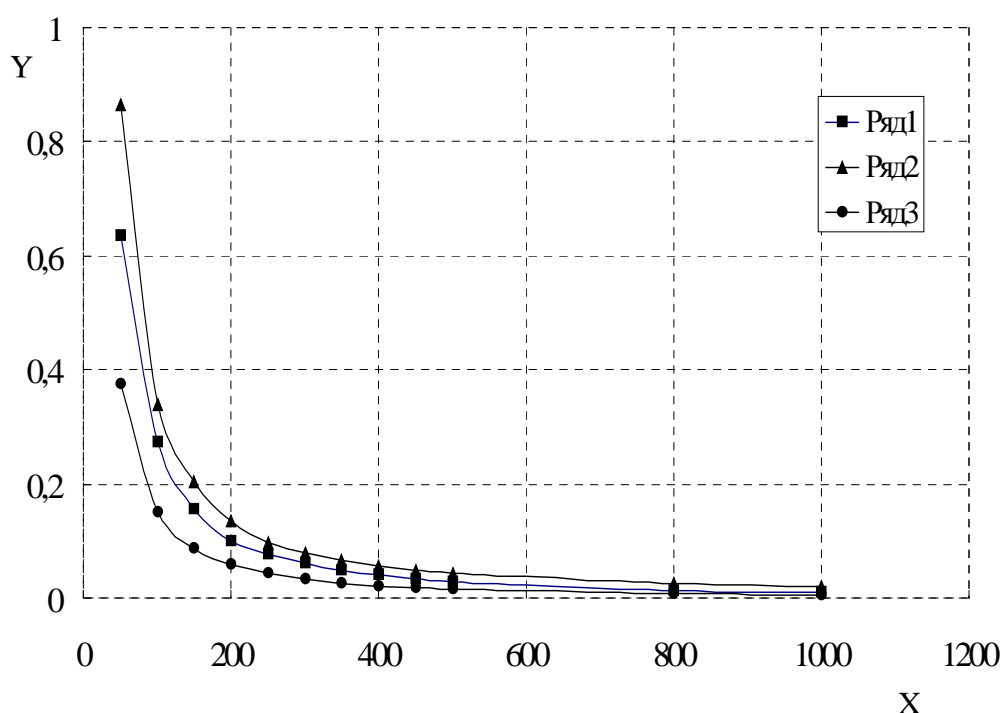


Рис. 1. Зависимость дисперсии ($Y \times 10^{10}$ Па²) от полосы пропускания фильтра (X , Гц) при различных вариантах фильтра:
Ряд 1 – фильтр Баттерворта; Ряд 2 – фильтр Чебышева;
Ряд 3 – фильтр Бесселя

$\Delta f=(0...50)$ Гц составляет $Y=0,865 \times 10^{10}$ Па², а с полосой пропускания $\Delta f=(0...1000)$ Гц – $Y=0,0197 \times 10^{10}$ Па² (рис. 1).

Минимальное значение дисперсии получено для фильтра Бесселя с $\Delta f=(0...50)$ Гц и составляет $Y=0,375 \times 10^{10}$ Па², а с $\Delta f=(0...1000)$ Гц – $Y=0,00528 \times 10^{10}$ Па². Значительное изменение дисперсии получено для исследуемых фильтров до частоты пропускания $\Delta f=(0...400)$ Гц. Для фильтра Чебышева в этой области частот дисперсия уменьшается в ~15 раз. Для фильтров Баттерворта, Чебышева и Бесселя увеличение частоты пропускания фильтра с $\Delta f=(0...400)$ Гц дисперсия монотонно уменьшается в ~4 раза и можно

считается изменяется по линейному закону. Эта область частот пропускания фильтров характеризуется относительно других областей устойчивыми оценками измеряемых параметров в зависимости от типа фильтра. Анализ спектра пульсаций давления газа в отсеке при закритическом отношении давления газа в отсеке показывает, что преобладающий уровень пульсаций давления газа имеет место на частоте $f \approx 230$ Гц. Поэтому предпочтительным является использование фильтра с частотой пропускания свыше 230 Гц. Максимальные отклонения оценок с применением фильтров наблюдается в начале полосы пропускания фильтра (рис. 2). Выбор требуемых параметров фильтра позволяет устранить этот недостаток. Для проведенных исследований эта область использования фильтра находится в начальной области давлений газа перед разрушением мембраны, когда давление газа в отсеке не изменяется. Именно эта область давлений газа в отсеке оказывала существенное влияние на значение дисперсии при оценке эффективности фильтра. Максимальное отклонение оценок получено для фильтров Баттерворта и Чебышева в начале разрушения мембраны при давлении газа в отсеке $P_{изб} \approx 2,97 \times 10^5$ Па и при падении давления газа до атмосферы.

Оценки, полученные с применением фильтра Бесселя, имели минимальные

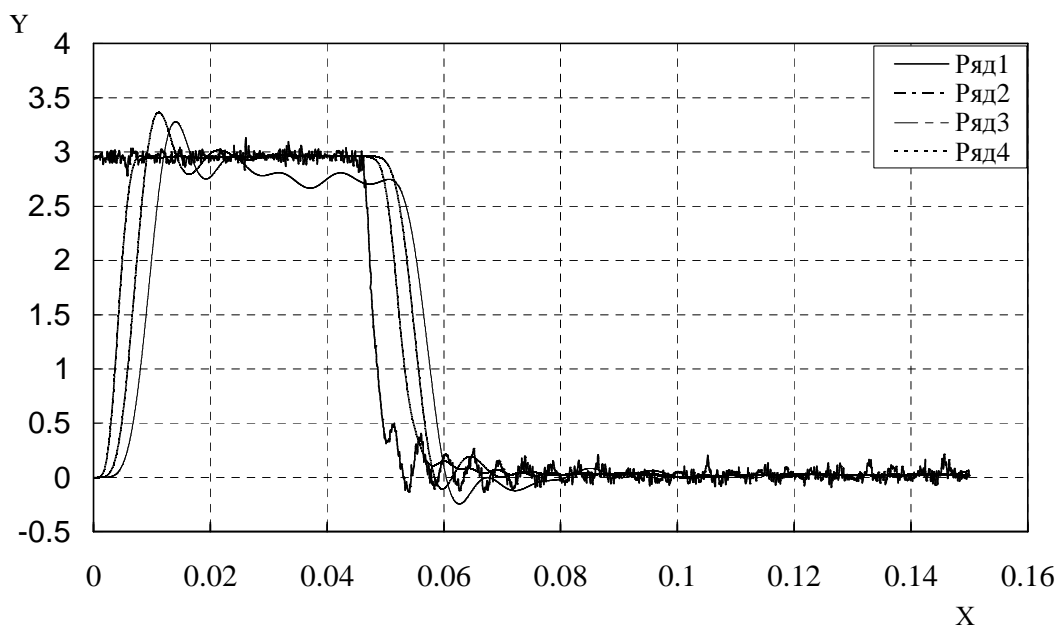


Рис. 2. Зависимость изменения избыточного давления газа в отсеке ($Y \times 10^5$, Па) во времени (X , с) при использовании фильтра с частотой пропускания $\Delta f = (0 \dots 100)$ Гц :

Ряд 1 – эксперимент; Ряд 2 – фильтр Баттерворта;

Ряд 3 – фильтр Чебышева; Ряд 4 – фильтр Бесселя

отклонения относительно экспериментальных данных. В зоне выравнивания давления газа в отсеке до атмосферы оценки давления газа в отсеке с применением рассмотренных фильтров имели смещения по фазе. Для фильтра Бесселя с полосой пропускания $\Delta f = (0 \dots 400)$ Гц получены минимальные

отклонения относительно результатов эксперимента. Значения дисперсии в области положительных и отрицательных отклонений $X=Y_{\text{ф}}-Y_{\text{б}}$ с применением фильтра Бесселя расположены симметрично относительно оси Y с началом координат в точке $X=0$. Следовательно, оценки с применением фильтра Бесселя расположены равномерно относительно экспериментальных данных.

На изменение параметров газа в отсеке в соответствии с моделью, которая использует фильтр, оказывает степень фильтра (рис. 3). При степени фильтра 10 и более рассматриваемые фильтры имеют максимальную дисперсию и с увеличением степени фильтра практически не изменяется. Минимальное значение дисперсии ($\sigma^2=0,00377 \times 10^{10} \text{ Па}^2$) получено для рассмотренных фильтров Баттерворта, Чебышева, Бесселя при степени фильтра равном 1. При степени фильтра больше 1 и меньше 11 минимальную дисперсию имела модель с применением фильтра Бесселя.

Оценки с применением фильтра Бесселя имеют устойчивую линейную зависимость, что указывает о преимуществах его по сравнению с фильтрами

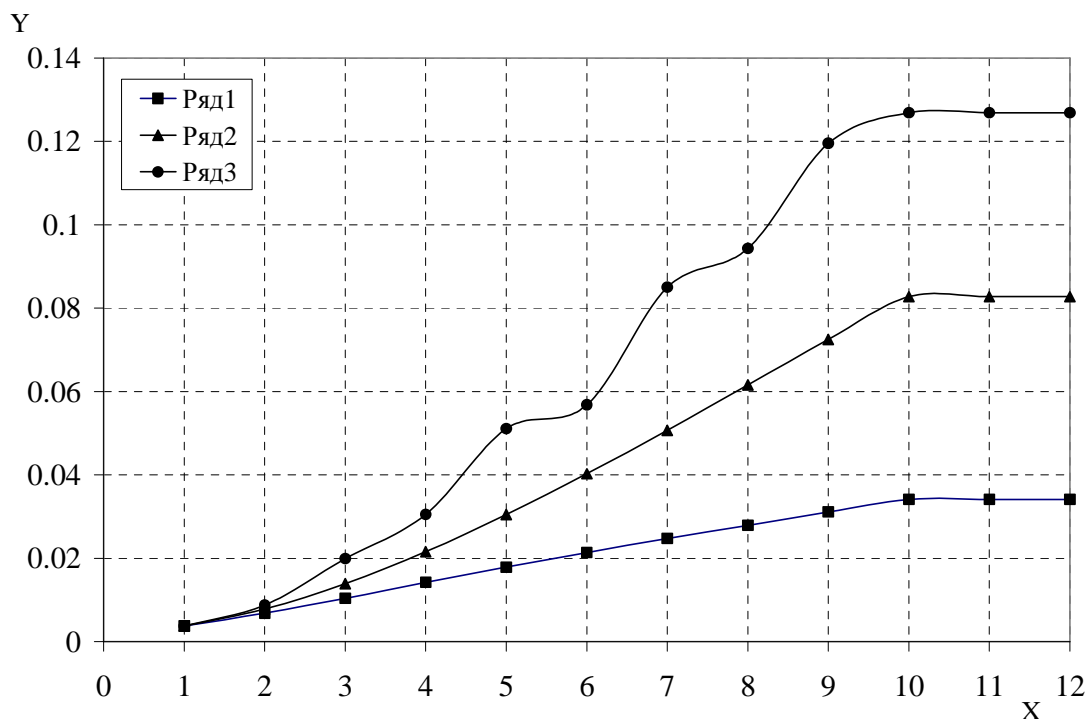


Рис. 3. Зависимость дисперсии ($Y \times 10^{10}, \text{ Па}^2$) от степени фильтра (X) с полосой пропускания фильтра $\Delta f=(0 \dots 400)$ Гц для различных типов фильтра:

Ряд 1 – фильтр Бесселя; Ряд 2 – фильтр Баттерворта;
Ряд 3 – фильтр Чебышева

Баттерворта и Чебышева. Максимальную дисперсию и волнообразное изменение дисперсии от степени фильтра имели оценки при использовании фильтра Чебышева. Степень фильтра оказывает влияние на смещение оценок изменения давления газа в отсеке (рис. 4). Для фильтра Бесселя со степенью 10 происходит запаздывание давления газа в отсеке при $P_{\text{изб}} \approx 2,5 \times 10^5 \text{ Па}$ на 0,0135 с.

Погрешность результатов расчета в соответствии с моделью по сравнению с экспериментом составляет 29%.

С уменьшением давления газа в отсеке до $P_{изб} \approx 0,5 \times 10^5$ Па запаздывание давления газа в отсеке достигает 0,002807 с и погрешность составляет 5,7%.

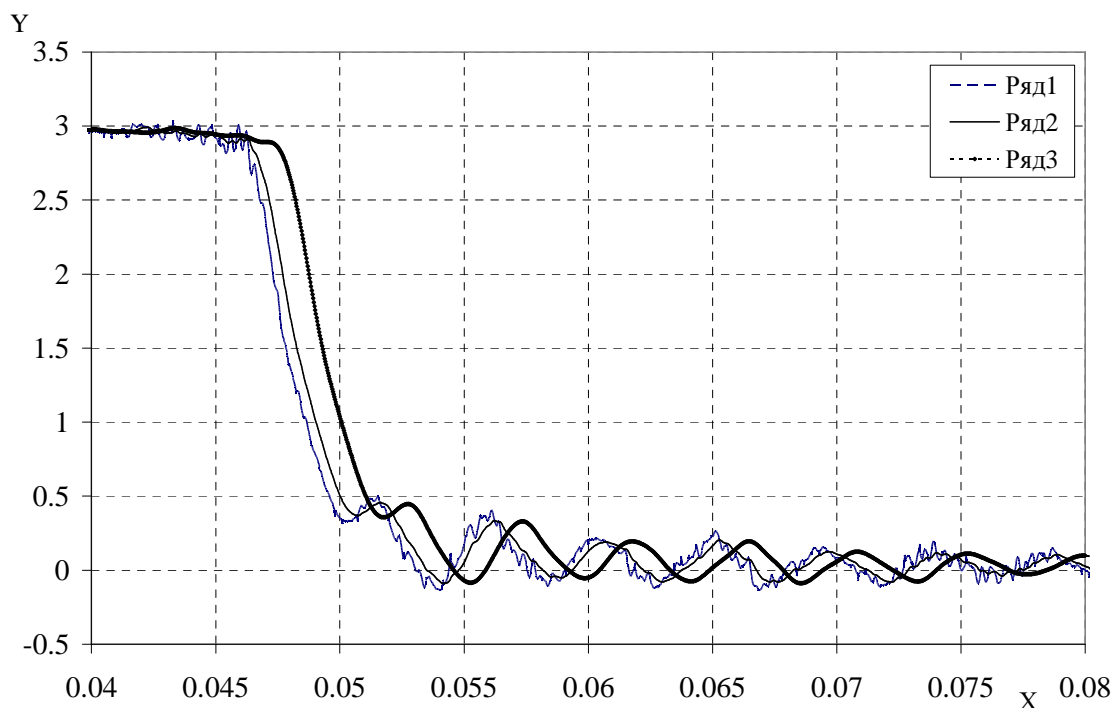


Рис. 4. Зависимость изменения избыточного давления газа в отсеке ($Y \times 10^5$, Па) во времени (X , с) при различных значениях степени фильтра Бесселя:

Ряд 1 – эксперимент; Ряд 2 – степень фильтра 1;
Ряд 3 – степень фильтра 10

Запаздывание давления газа в отсеке во времени получено и для степени фильтра 1. В диапазоне давлений газа $P_{изб} \approx (0,5 \dots 2,5) \times 10^5$ Па запаздывание составляет (0,000275...0,000523) с, а погрешность результатов расчета не превышает (0,6...1,1)%. Периодическое волнообразное изменение параметров газа в отсеке в соответствии с моделью и смещение оценок в противоположные стороны относительно экспериментальных данных при разных фазах изменения давления газа в отсеке позволяет получить равномерное распределение давлений газа относительно экспериментальных данных. По истечении (50...90) с после разгерметизации отсека погрешность модели зависит от случайных пульсаций давления газа. Степень фильтра не оказывает существенное влияние на характер колебательного изменения параметров газа в отсеке в соответствии с моделью, которая использует фильтр Бесселя.

Анализ результатов исследования дисперсии моделей показывает, что минимальное расхождение между экспериментом и моделью получено при использовании фильтров Баттерворта, Чебышева и Бесселя со степенью фильтра 1. При изменении степени фильтра минимальное значение дисперсии и устойчивые оценки имеет модель с применением фильтра Бесселя. Полученная

модель определения параметров газа в отсеке с применением фильтра со степенью 1 отражает характер протекания процесса, описывает изменение давления газа в отсеке с достаточной для практики точностью и может применяться для анализа процессов при внезапной разгерметизации отсека.

5. Аэроакустические характеристики при истечении газа через отверстие типа «рваное»

Эксплуатация ЛА показывает, что имеющиеся случаи внезапной разгерметизации зачастую сопровождаются истечением газа из отсека через отверстие произвольной конфигурации. Такое отверстие может иметь самую разнообразную конфигурацию и зачастую образуется в результате разрушения конструкции ЛА, обшивки фюзеляжа. Отверстие содержит выступающие в поток элементы конструкции, рваные части конструкции, упругие и неподвижные элементы конструкции. В зависимости от свойств конструкции отверстие в процессе истечения газа может изменять форму и проходную площадь. С такими параметрами отверстие будем называть «рваное».

Результаты испытаний отверстия типа «рваное» представлены на Рис. 5, Рис. 6, Рис. 7. При внезапной разгерметизации через отверстие типа «рваное» с $F_{отн}=0,036$ (рис. 7) характер спектра шума при докритическом отношении давления сравнивается со спектрами шума для отверстий типа «щель», «пробка», особенно на частотах до 63 Гц. Близость акустических характеристик для отверстия типа «рваное» наблюдается с круглым отверстием при $F_{отн}=1$.

Для отверстия типа «рваное» при докритическом отношении давления с $P_{изб}=0,77 \times 10^5$ Па и $P_{изб}=0,46 \times 10^5$ Па максимальное изменение пульсаций давления получено в области низких частот в диапазоне (8...31,5) Гц. С повышением частоты пульсаций давления увеличивается УЗД с $L=58,6$ дБ до $L=81,9$ дБ при $P_{изб}=0,46 \times 10^5$ Па, а при $P_{изб}=0,77 \times 10^5$ Па с $L=69,6$ дБ до $L=97,5$ дБ. На частотах выше 31,5 Гц имеет относительно равномерный характер изменения УЗД. При закритическом отношении давления спектр шума имеет максимальные УЗД в области частот (8...16) Гц, (2000...4000) Гц и минимальные УЗД в области частот (250...500) Гц. Преобладающий вклад в общий уровень шума вносят пульсации звукового давления на частотах в области (8...16) Гц. При увеличении давления в отсеке с $P_{изб}=0,46 \times 10^5$ Па до $P_{изб}=2,75 \times 10^5$ Па непрерывно увеличивается СУЗД с $L_{сум}=99,1$ дБ до $L_{сум}=121,2$ дБ. При повышении начального давления в отсеке с $P_{изб}=0,46 \times 10^5$ Па до $P_{изб}=2,75 \times 10^5$ Па увеличение УЗД на частотах (8...125) Гц составляет $\Delta L=(53,6...22,3)$ дБ, на частотах (125...1000) Гц - $\Delta L=(10,2...22,3)$ дБ, на частотах выше 1000 Гц - $\Delta L=(12,2...19,3)$ дБ.

При увеличении отверстия до $F_{отн}=0,095$ (рис. 6) происходит изменение спектра в области закритического отношения давления и относительно низких давлений воздуха в отсеке. Это свидетельствует о том, что происходит перестройка характера течения газа через отверстие. В области давлений газа в отсеке $P_{изб}=(0,3...1,75) \times 10^5$ Па совпадают характеры пульсаций давления для отверстий типа «рваное» и «щель». На частотах выше 31,5 Гц при $P_{изб}=0,26 \times 10^5$ Па совпадают характеры пульсаций давления для отверстия типа «рваное» и «пробка».

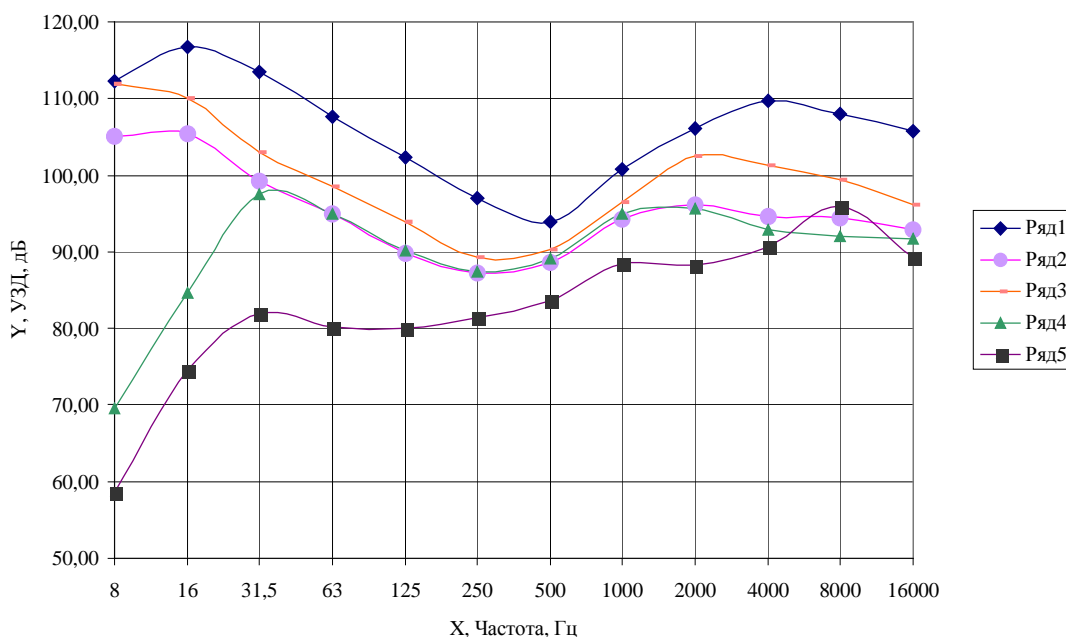


Рис. 5. УЗД (Y, дБ) в октавных полосах частот (X, 1/с) для отверстия типа «рваное» с $F_{отн}=0,036$ при разгерметизации отсека с различными начальными давлениями газа в отсеке:

Ряд 1- $P_{изб}=2,75 \times 10^5$ Па, $L_{сум}=121,15$ дБ;

Ряд 2 – $P_{изб}=1,2 \times 10^5$ Па, $L_{сум}=110,8$ дБ);

Ряд 3 – $P_{изб}=1,3 \times 10^5$ Па, $L_{сум}=115,91$ дБ;

Ряд 4 – $P_{изб}=0,77 \times 10^5$ Па, $L_{сум}=103,68$ дБ;

Ряд 5 – $P_{изб}=0,46 \times 10^5$ Па, $L_{сум}=99,11$ дБ

Анализ спектра (рис. 6) показывает, что максимальное изменение пульсаций давления при исследуемых давлениях в отсеке получено в области низких частот в диапазоне (8...31,5) Гц и составляет $\Delta L=(31,2...63,2)$ дБ при изменении давления в отсеке в области $P_{изб}=(0,26...1,75) \times 10^5$ Па. При повышении начального давления газа в отсеке с $P_{изб}=0,26 \times 10^5$ Па до $P_{изб}=1,75 \times 10^5$ Па в процессе внезапной разгерметизации происходит непрерывное увеличение СУЗД с $L_{сум}=96,6$ дБ до $L_{сум}=127,8$ дБ. При этом, увеличение УЗД на частотах (8...125) Гц составляет $\Delta L=(31,2...63,2)$ дБ, на частотах (125...1000) Гц - $\Delta L=(37...21,8)$ дБ, на частотах свыше 1000 Гц - $\Delta L=(23,9...32,2)$ дБ. Преобладающий вклад в общий уровень шума вносят пульсации звукового давления на частотах в области (31,5...63) Гц, за исключением испытаний при $P_{изб}=0,26 \times 10^5$ Па (преобладающий вклад на частотах (1000...8000) Гц).

При увеличении отверстия до $F_{отн}=0,486$ характер спектра существенно изменяется (рис. 7). Спектр шума имеет пологую характеристику. При повышении частоты пульсаций имеем общий характер понижения УЗД. Некоторое отклонение от этой закономерности наблюдается в области критических режимов течения. Преобладающий вклад в общий уровень шума вносят предельно низкие частоты

(8...16) Гц. Исключением является вклад пульсаций давления на частоте 125 Гц при $P_{изб} = 3,01 \times 10^5$ Па. При повышении начального давления в отсеке $P_{изб} = 0,22 \times 10^5$ Па до $P_{изб} = 3,01 \times 10^5$ Па получено увеличение СУЗД с $L_{сум} = 104,8$ дБ до $L_{сум} = 136,1$ дБ. Увеличение УЗД на частотах (8...125) Гц составляет $\Delta L = (36,8...32,4)$ дБ, на частотах (125...1000) Гц - $\Delta L = (32,4...26,1)$ дБ, на частотах свыше 1000 Гц - $\Delta L = (32,1...24,5)$ дБ.

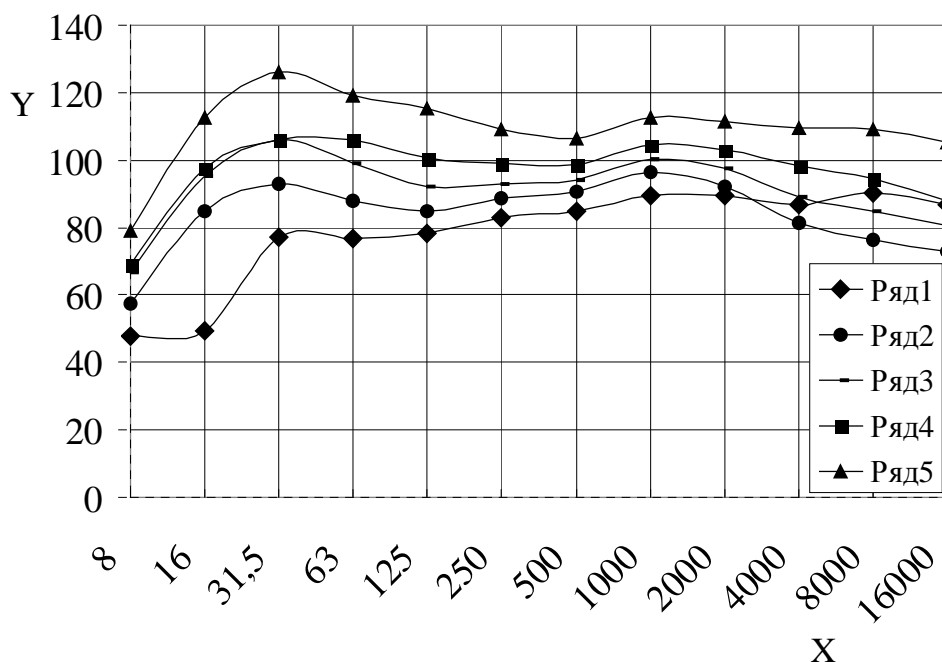


Рис. 6. УЗД (Y, дБ) в октавных полосах частот (X, 1/с) для отверстия типа «рваное» с $F_{отн} = 0,095$ при разгерметизации отсека с различными начальными давлениями газа в отсеке:

- Ряд 1 – $P_{изб} = 0,26 \times 10^5$ Па, $L_{сум} = 96,55$ дБ;
- Ряд 2 – $P_{изб} = 0,3 \times 10^5$ Па, $L_{сум} = 100,62$ дБ;
- Ряд 3 – $P_{изб} = 0,88 \times 10^5$ Па, $L_{сум} = 108,84$ дБ;
- Ряд 4 – $P_{изб} = 1,75 \times 10^5$ Па, $L_{сум} = 112,32$ дБ;
- Ряд 5 – $P_{изб} = 1,35 \times 10^5$ Па, $L_{сум} = 127,77$ дБ

Сравнительный анализ спектров рис. 5 и рис.6 показывает, что при увеличении относительно близких начальных давлений газа в отсеке от $P_{изб} = (0,46...0,3) \times 10^5$ Па до $P_{изб} = (1,3...1,35) \times 10^5$ Па увеличивается СУЗД с $L_{сум} = 99,1$ дБ до $L_{сум} = 115,9$ дБ ($\Delta L_{сум} = 16,8$ дБ) для $F_{отн} = 0,036$ и с $L_{сум} = 100,6$ дБ до $L_{сум} = 127,8$ дБ ($\Delta L_{сум} = 27,2$ дБ) для $F_{отн} = 0,095$. Из анализа спектров рис. 2 и 3 следует, что при увеличении начального давления газа в отсеке с $P_{изб} = (0,22...0,26) \times 10^5$ Па до $P_{изб} = (1,75...1,85) \times 10^5$ Па происходит увеличение СУЗД с $L_{сум} = 96,6$ дБ до $L_{сум} = 112,3$ дБ ($\Delta L_{сум} = 15,7$ дБ) для $F_{отн} = 0,095$ и с $L_{сум} = 104,8$ дБ до $L_{сум} = 128,5$ дБ ($\Delta L_{сум} = 23,7$ дБ) для $F_{отн} = 0,486$. Обобщая результаты проведенных исследований можно сделать вывод, что при внезапной разгерметизации отсека через «рваное» отверстие с увеличением относительной площади отверстия происходит

увеличение СУЗД от минимального значения $L_{\text{сум}}=99,1$ дБ для $F_{\text{отн}}=0,036$ при $P_{\text{изб}}=0,46 \times 10^5$ Па до максимального значения $L_{\text{сум}}=136,1$ дБ для $F_{\text{отн}}=0,486$ при $P_{\text{изб}}=3,01 \times 10^5$ Па. Увеличение относительной площади отверстия приводит к увеличению УЗД во всем диапазоне частот (8...16000) Гц. Преобладающий вклад вносят УЗД в области низких частот в диапазоне (8...16) Гц.

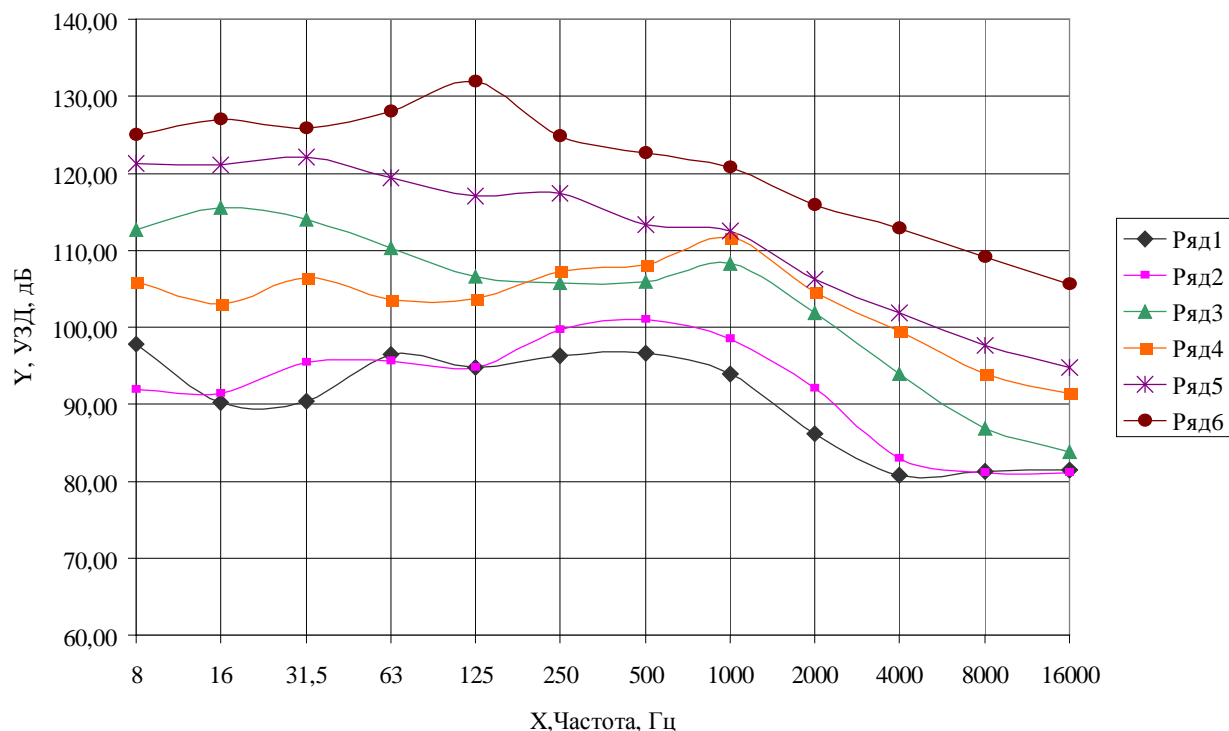


Рис. 7. УЗД (Y, дБ) в октавных полосах частот (X, 1/с) для отверстия типа «рваное» с $F_{\text{отн}}=0,486$ при разгерметизации отсека с различными начальными давлениями газа в отсеке:

- Ряд 1 - $P_{\text{изб}}=0,22 \times 10^5$ Па, $L_{\text{сум}}=104,79$ дБ;
- Ряд 2 - $P_{\text{изб}}=0,4 \times 10^5$ Па, $L_{\text{сум}}=106,83$ дБ;
- Ряд 3 - $P_{\text{изб}}=0,77 \times 10^5$ Па, $L_{\text{сум}}=120,59$ дБ;
- Ряд 4 - $P_{\text{изб}}=1,26 \times 10^5$ Па, $L_{\text{сум}}=117,2$ дБ;
- Ряд 5 - $P_{\text{изб}}=1,85 \times 10^5$ Па, $L_{\text{сум}}=128,54$ дБ;
- Ряд 6 - $P_{\text{изб}}=3,01 \times 10^5$ Па, $L_{\text{сум}}=136,12$ дБ

На основании проведенных исследований представляется возможным провести сравнительный анализ УЗД, создаваемых движущимся потоком при внезапной разгерметизации отсека через круглое отверстие и отверстие типа «рваное». В промежутке между исследуемыми давлениями спектры шума аппроксимируем по линейному закону. С использованием программы UNIGRAPHICS определяем в трехмерном пространстве поверхности спектров шума в третьоктавных полосах частот при внезапной разгерметизации отсека через исследуемые отверстия с $F_{\text{отн}}=0,036$ (рис. 5, рис. 6, рис. 7). При формировании поверхностей масштаб по оси X составляет 1:10000, по оси Z – 1:100, по оси Y – 1:1. По данным рис. 5, рис. 6, рис. 7 определяем линию пересечения поверхностей спектров шума (рис. 8).

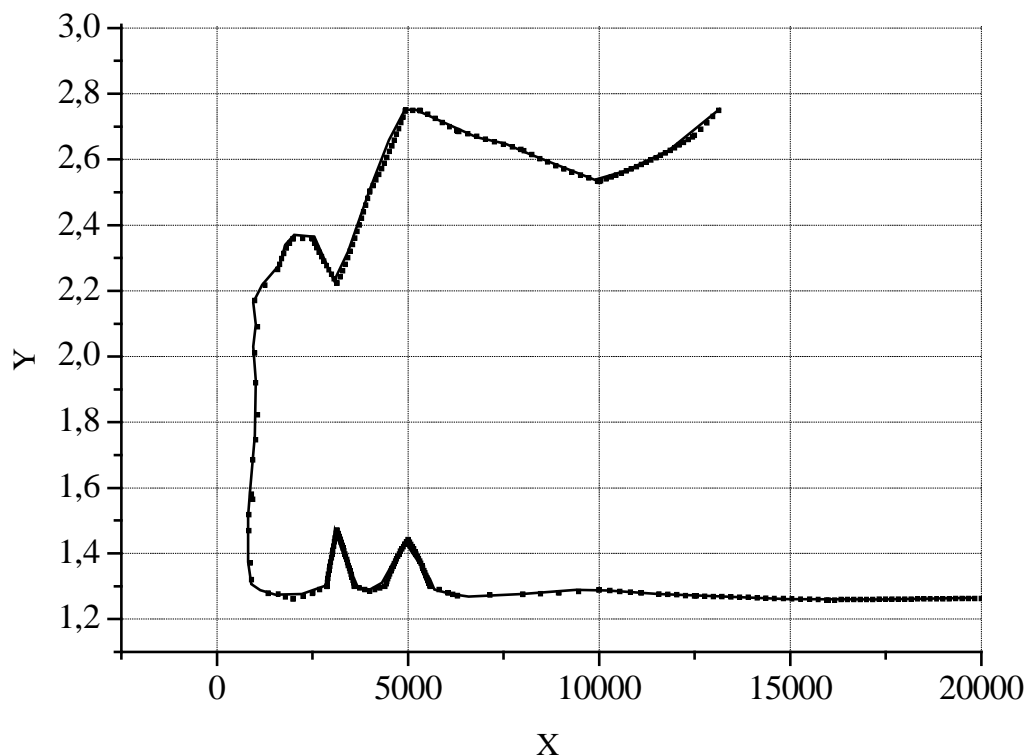


Рис. 8. Зависимость частоты (X, Гц) от избыточного давления в отсеке ($Y \times 10^5$, Па) для линии пересечения поверхностей спектров УЗД круглого отверстия и отверстия типа «рваное» с $F_{отн}=0,036$

В соответствии с рис. 8 определяем области преобладающих УЗД при внезапной разгерметизации отсека в зависимости от конструктивного исполнения отверстия. При истечении газа через круглое отверстие максимальные УЗД получены по сравнению с отверстием типа «рваное» при давлении газа в отсеке $P_{изб} < (1,26 \dots 1,47) \times 10^5$ Па на частотах (1339...20000) Гц, $P_{изб} < (1,28 \dots 2,22) \times 10^5$ Па на частотах $f < (877 \dots 1339)$ Гц, $P_{изб} > (2,22 \dots 2,75) \times 10^5$ Па на частотах (1339...13141) Гц. В области частот (877...1339) Гц при $P_{изб} = (1,28 \dots 2,22) \times 10^5$ Па линия пересечения поверхностей имеет волнообразный характер. В области относительно низких давлений при $P_{изб} = (1,26 \dots 1,29) \times 10^5$ Па на частотах (6000...20000) Гц линия пересечения поверхностей близка к линейной зависимости. Верхняя граница пересечения поверхностей ограничивается максимальными значениями исследуемых параметров. Внутренняя область линии пересечения поверхностей определяет максимальные УЗД при истечении газа из отверстия типа «рваное». Таким образом, при внезапной разгерметизации отсека через отверстие с начальным давлением газа в отсеке и частотой, значения которых расположены во внутренней области линии пересечения поверхностей спектров, преобладающий вклад в общий уровень шума вносит отверстие типа «рваное», во внешней области – круглое отверстие.

Анализ изменения СУЗД в зависимости от формы отверстия при внезапной разгерметизации отсека позволяет установить некоторые закономерности образования пульсаций давления газа. При $P_{изб}=1,9 \times 10^5$ Па получены близкие значения СУЗД ($L_{сум}=118,5$ дБ) для круглого отверстия и отверстия типа «рваное».

В области начальных давлений газа в отсеке при $P_{изб} \geq 1,28 \times 10^5$ Па для круглого отверстия и отверстия типа «рваное» соизмеримы СУЗД. Следовательно, в этой области начальных давлений газа в отсеке при внезапной разгерметизации отсека форма отверстия оказывает влияние на перераспределение спектра шума по частоте. В то время как при $P_{изб} < 1,28 \times 10^5$ Па в процессе истечения газа из отсека форма отверстия оказывает влияние на величину СУЗД и на изменение спектра шума по частоте. Проведенные исследования показывают, что существенных изменений претерпевают уровни пульсаций давления газа. Так при внезапной разгерметизации с начальным давлением газа в отсеке $P_{изб} \approx 0,57 \times 10^5$ Па СУЗД для круглого отверстия составляет $L_{сум}=122,1$ дБ, а для отверстия типа «рваное» - $L_{сум}=100,7$ дБ.

Линии пересечения поверхностей спектров УЗД для круглого отверстия и отверстия типа «рваное» зависят от относительной площади отверстия. При увеличении относительной площади отверстия количество областей пересечения поверхностей возрастает. Так для $F_{отн}=0,486...0,497$ имеется три области пересечения спектров УЗД (рис. 9) и три области (поз.3,4,5) максимальных УЗД для отверстия типа «рваное». Первая область (поз. 3) имеет место при начальном давлении газа в отсеке $P_{изб} > (1,43...1,24) \times 10^5$ Па в диапазоне частот (10551...20000) Гц, $P_{изб} > (1,86...1,43) \times 10^5$ Па в диапазоне частот (10565...10551) Гц, $P_{изб} > (2,3...1,86) \times 10^5$ Па в диапазоне частот (8913...10565) Гц. Эта область открыта и ограничена только нижними значениями давления газа в отсеке. Вторая область (поз. 4) является замкнутой и ограничивается начальными давлениями газа в отсеке при $P_{изб} > (0,7...0,77) \times 10^5$ Па в диапазоне частот (1716...3977) Гц, $P_{изб} > (1,24...0,7) \times 10^5$ Па в диапазоне частот (2025...1716) Гц, $P_{изб} < (1,24...1,21) \times 10^5$ Па в диапазоне частот (2025...6151) Гц, $P_{изб} > (0,77...1,21) \times 10^5$ Па в диапазоне частот (3977...6151) Гц. Третья область (поз. 5) является открытой в области высоких частот (свыше 20000 Гц) и ограничена двумя линиями при $P_{изб} > (0,439...0,507) \times 10^5$ Па и $P_{изб} < (0,507...0,536) \times 10^5$ Па в диапазоне частот (13275...20000) Гц. Третья область относительно двух предыдущих областей имеет относительно небольшую область изменения давления газа в отсеке и частоты пульсаций давления.

Для отверстия типа «рваное» проведен анализ скорости изменения давления газа в начальный момент разгерметизации отсека с относительной площадью отверстия в диапазоне $F_{отн}=(0,036...0,486)$ при изменении начального давления газа в отсеке в диапазоне $P_{изб}=(0,257...3,057) \times 10^5$ Па (рис. 10). Для $F_{отн}=0,036$ при увеличении начального давления газа в отсеке с $P_{изб}=0,536339 \times 10^5$ Па скорость изменения давления газа в отсеке увеличивается с $\frac{dP}{dt} = -$

$1616,93548 \times 10^4$ Па/с и достигает максимального значения $\frac{dP}{dt} = -3612,90323 \times 10^4$

Па/с при $P_{изб}=1,12444 \times 10^5$ Па. Дальнейшее повышение начального давления газа в отсеке приводит к уменьшению скорости изменения давления газа в отсеке и

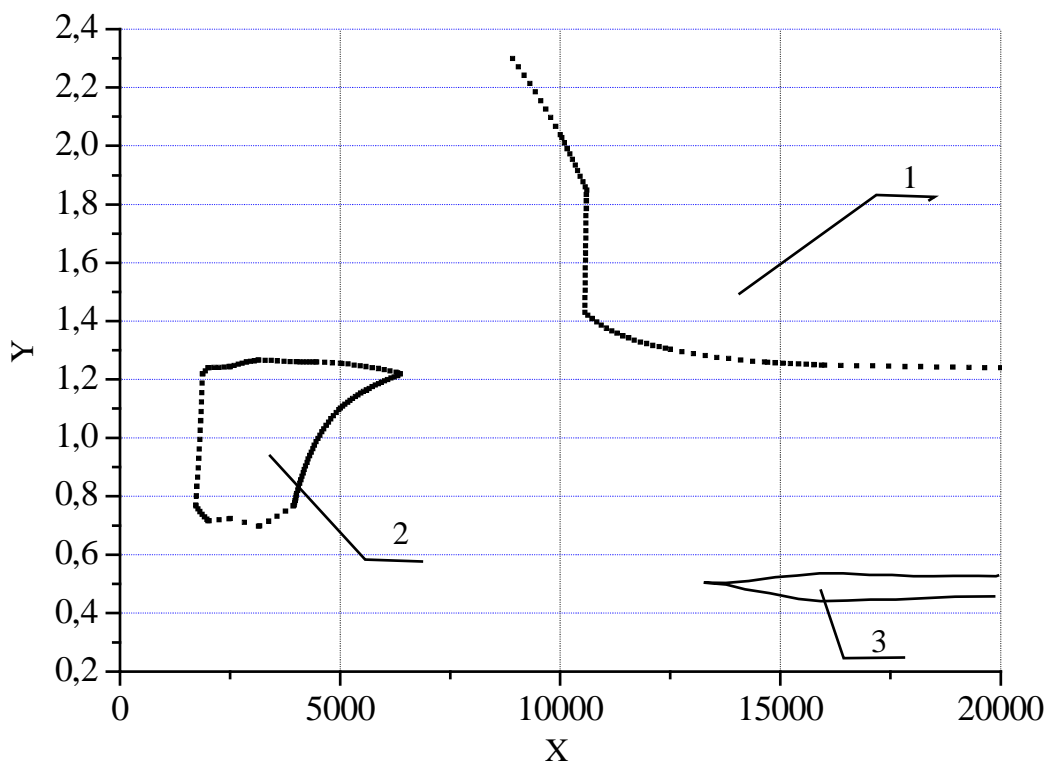


Рис. 9. Зависимость частоты (X, Гц) от избыточного давления в отсеке ($Y \times 10^5$, Па) для линии пересечения поверхностей спектров УЗД круглого отверстия и отверстия типа «рваное» с $F_{отн}=(0,486...0,497)$:
1, 2, 3 – области пересечения поверхностей

при $P_{изб}=2,7632 \times 10^5$ Па составляет $\frac{dP}{d\tau} = -2908,3636 \times 10^4$ Па/с. Увеличение относительной площадью отверстия до $F_{отн}=0,0948$ уменьшает скорость изменения давления газа в отсеке во всем диапазоне исследованных начальных давлений газа в отсеке. В диапазоне начальных давлений газа в отсеке $P_{изб}=(0,257385621...0,299798) \times 10^5$ Па при увеличении начального давления газа происходит уменьшение скорости изменения давления газа в отсеке с $\frac{dP}{d\tau} = -1399,19355 \times 10^4$ Па/с до $\frac{dP}{d\tau} = -952,2636 \times 10^4$ Па/с. Последующее увеличение начального давления газа в отсеке приводит к повышению скорости изменения давления газа в отсеке, максимальное значение которого достигает величины $\frac{dP}{d\tau} = -3016,2727 \times 10^4$ Па/с при $P_{изб}=0,939127 \times 10^5$ Па. В диапазоне начальных давлений $P_{изб}=(0,939127...2,1108) \times 10^5$ Па скорость изменения давления газа в

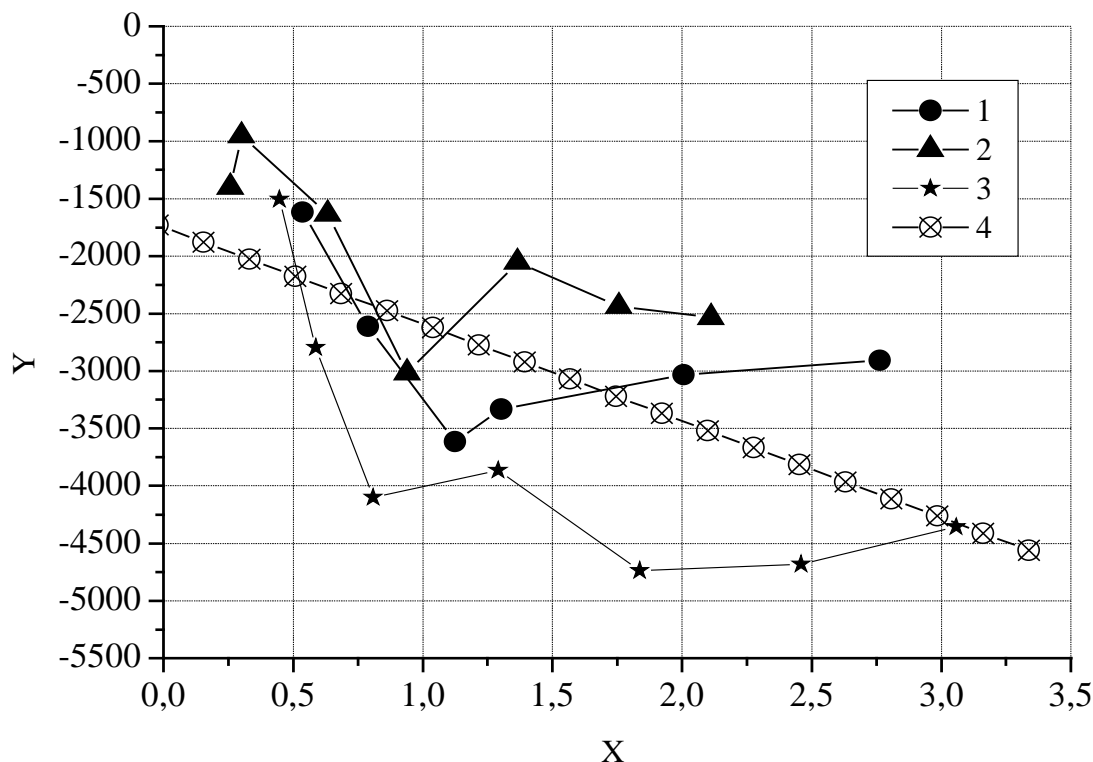


Рис. 10. Зависимость начальной скорости изменения давления газа в отсеке ($Y \times 10^4$, Па/с) в зависимости от начального избыточного давления ($X \times 10^5$, Па) при различных вариантах исполнения отверстия типа «рваное»:
 1 – $F_{отн}=0,036$; 2 – $F_{отн}=0,0948$; 3 – $F_{отн}=0,486$;
 4 – модель, $Y = -1748.04348 - 842.69394 X$

отсеке понижается и достигает минимального значения $\frac{dP}{dt} = -2052,41935 \times 10^4$ Па/с при $P_{изб} = 1,36457516 \times 10^5$ Па. Максимальное значение скорости изменения давления газа в отсеке получено для $F_{отн}=0,486$ при $P_{изб}=1,83697 \times 10^5$ Па ($\frac{dP}{dt} = -4738,796 \times 10^4$ Па/с). В области критических и околокритических отношений давлений ($P_{изб} = (0,446343 \dots 1,1244) \times 10^5$ Па) при увеличении начального давления газа в отсеке получено увеличение скорости изменения давления газа. Обобщив результаты исследований истечения газа через отверстие различной площади можно установить закономерность изменения давления газа в отсеке во времени в зависимости от начального давления. Для относительной площади отверстия в диапазоне $F_{отн}=(0,036 \dots 0,486)$ при увеличении начального давления газа в отсеке давление газа уменьшается со скоростью, которая может быть описана линейной моделью (поз. 4).

Анализ проведенных результатов исследований показывает, что скорость изменения давления газа в отсеке располагается внутри области, которая

ограничена минимальными и максимальными значениями скорости. При внезапной разгерметизации отсека через отверстие типа «рваное» с $F_{отн}=(0,036...0,486)$ давление газа в отсеке изменяется в течении $\tau=(0,00055...0,004399)$ с со скоростью в диапазоне от $\frac{dP}{dt}=-$
 $(952,2636...3016,2727)\times 10^4$ Па/с при $P_{изб}=(0,299798...2,7632)\times 10^5$ Па до $\frac{dP}{dt}=-$
 $(1505,793...4738,796)\times 10^4$ Па/с при $P_{изб}=(0,446343...3,0573)\times 10^5$ Па.

Сравнение результатов анализа изменения давления газа в отсеке при истечении газа через отверстие типа «рваное» и круглое в начальный момент разгерметизации отсека показывает (рис. 5 и рис. 6), что при относительно близких диапазонах изменения относительной площади отверстия для круглого отверстия область скорости изменения давления превышает на границе минимальной скорости в (25...16) раз, а на границе максимальной скорости в (1,7...1,1) раза. Сравнение линейных моделей скорости изменения давления газа в отсеке для круглого отверстия и отверстия типа «рваное» (рис. 10, поз. 4) показывает, что при увеличении начального давления в отсеке для круглого отверстия происходит увеличение падения давления воздуха с большей скоростью. Для сравниваемых отверстий пересечение линейных моделей скорости изменения давления газа происходит в точке при $P_{изб}=0,5076\times 10^5$ Па. Таким образом, при $P_{изб}<0,5076\times 10^5$ Па имеем максимальную скорость изменения давления газа для отверстия типа «рваное», а при $P_{изб}>0,5076\times 10^5$ Па – для круглого отверстия. Этот вывод справедлив без учета влияния относительной площади отверстия. Сопоставим результаты истечения газа из отсека через относительно близкие значения отверстий. Для $F_{отн}=0,036$ скорость изменения давления газа в отсеке через отверстие типа «рваное» по сравнению с круглым отверстием превышает на $-(1602,449...3536,589)\times 10^4$ Па/с в диапазоне начальных давлений в отсеке $P_{изб}=(0,536...2,763)\times 10^5$ Па. При увеличении относительной площади отверстия до $F_{отн}=(0,486...0,407)$ для отверстия типа «рваное» сохраняется превышение скорости изменения давления газа в отсеке на $-(55,353...1919,673)\times 10^4$ Па/с в диапазоне начальных давлений в отсеке $P_{изб}=(0,484...2,325)\times 10^5$ Па. Максимальное относительное снижения давления в отсеке для отверстия типа «рваное» получено при околоскритических отношениях давлений газа. При уменьшении начального давления газа в отсеке для круглого отверстия в области $P_{изб}<0,484\times 10^5$ Па скорость изменения давления увеличивается и по отношению к отверстию типа «рваное» преобладает на $-627,31\times 10^4$ Па/с.

Первоначально предполагалось, что установка на выходе из отсека отверстия с рваными краями приведет к образованию дополнительных источников пульсаций давления газа, а следовательно, и к увеличению гидравлического сопротивления. Это должно привести к уменьшению расхода газа через такое отверстие. Проведенные же экспериментальные исследования опровергли это предположение. Полученные основные зависимости движущегося газа из отсека через круглое и «рваное» отверстия показали, что выходное отверстие оказывает влияние на перераспределение спектра пульсаций давления воздуха, на изменение давления газа в отсеке, а следовательно и на расход воздуха из отсека. Перераспределение спектров пульсаций давления воздуха может приводить как к увеличению расхода воздуха из отсека, так и к его уменьшению. Это подтверждается изменением скорости давления газа в отсеке. Впервые

установлено, что при внезапной разгерметизации отсека через «рваное» отверстие образуется широкополостный спектр шума.

Учитывая сложность протекания процессов при внезапной разгерметизации отсека через «рваное» отверстие необходимо продолжить исследования по установлению основных зависимостей изменения параметров газа в отсеке в зависимости от упругих свойств «рваного» отверстия, начального отверстия, конфигурации отверстия и отсека, начального давления газа в отсеке. На основании проведенных исследований особый интерес представляют процессы течения воздуха через отверстия типа «щель», «пробка» и другие. В реальных случаях разгерметизации отсека такие отверстия могут образовываться и представляют практический интерес.

Выводы

1. Впервые разработана методика обработки спектра пульсаций давления воздуха в отсеке при внезапной разгерметизации. Проведен сравнительный анализ применения цифровых фильтров Баттерворта, Чебышева и Бесселя. Минимальное значение дисперсии и устойчивые оценки показаний пульсаций давлений воздуха получены с применением фильтра Бесселя и полосой пропускания $\Delta f=(0...400)$ Гц.
2. Впервые проведено сравнение спектров УЗД для круглого отверстия и отверстия типа «рваное» при внезапной разгерметизации. Установлено, что отверстие типа «рваное» с $F_{отн}=(0,486...0,497)$ по отношению к круглому отверстию имеет три области пересечения спектров УЗД и максимальных УЗД. Первая область открыта и ограничена нижними значениями давления воздуха при $P_{изб}>(1,43...1,24)\times 10^5$ Па в диапазоне частот (10551...20000) Гц. Вторая область является замкнутой и ограничивается начальными давлениями газа в отсеке при $P_{изб}>(0,7...1,24)\times 10^5$ Па в диапазоне частот (1716...6151) Гц. Третья область является открытой в области высоких частот (свыше 20 кГц) и ограничена двумя линиями при $P_{изб}>(0,439...0,507)\times 10^5$ Па и $P_{изб}<(0,507...0,536)\times 10^5$ Па в диапазоне частот (13275...20000) Гц.
3. Впервые установлено, что при внезапной разгерметизации отсека через «рваное» отверстие струя воздуха на выходе из отсека имеет широкополостный спектр шума.

Список литературы

1. Жуковский Н.Е. Видоизменение метода Кирхгоффа для определения движения жидкости в двух измерениях при постоянной скорости, данной на неизвестной линии тока. –М.-Л.: Гостехиздат. – 1948. - Т.1. - 656 с.
2. Чаплыгин С.А. О газовых струях. – М.-Л.: Гостехиздат, 1949. – 144 с.
3. Прикладная газовая динамика/ Под ред. Г.Н. Абрамовича – М.: Наука,1976. – 888 с.
4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Изд-во 5-е. – М.: Наука, 1978. – 736 с.
5. Быков Л.Т., Егоров М.С., Тарасов П.В. Высотное оборудование самолетов. – М.: Оборонгиз, 1958. – 392 с.
6. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Том 2. –М.: Наука, 1976. – С. 54-58.

7. Гийон М. Исследование и расчет гидравлических систем. Перевод с французского Рождественского С.Н. и Золотарева И.П. – М.: Машиностроение, 1964. – 388 с.
8. Семин Д.А., Павлюченко В.А., Мальцев Я.И. Исследование вихревых усилителей с диффузорами различных типов.//Вестник НТУУ «КПИ».Машиностроение. – К. – 2002. – Вып. 42. – Том 2. – С. 54-56.
9. Ивлентиев В.С. Разгерметизация кабин летательных аппаратов: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.07.02. – М.: МАИ, 1983. – 32 с.
10. Доник В.Д., Запорожець О.І. Аероакустичні процеси в разі розгерметизації посудини з надлишковим тиском газу // Вісн. НАУ. –2006. -№1(27). – С.70-75.
- 11.

Поступила в редакцию 28.08.2014

Рецензент: д.т.н., проф. В. В. Тюрёв Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», г. Харьков

Раптова розгерметизація відсіку через «рваний» отвір

Уперше проведені дослідження і встановлені основні закономірності аероакустичних процесів при раптовій розгерметизації і витіканні газу з відсіку через кругле і «рване» отвори. Розроблено методикку обробки спектра пульсацій тиску повітря у відсіку при раптовій розгерметизації. Стійкі оцінки показань пульсацій тисків повітря отримані з застосуванням фільтра Бесселя і смугою пропущення $\Delta f=(0\dots400)$ Гц. Спектр РЗТ отвору типу «рване» з $F_{отн}=(0,486\dots0,497)$ по відношенню до спектру для круглого отвору має три області перетинання.

Ключові слова: літальний апарат, відсік, раптова розгерметизація, рівень звукового тиску (РЗТ).

Sudden depressurization of compartment trough lacerated-type hole

For the first time were researched and established the basic behaviors of aeroacoustic processes during sudden depressurization and gas outflow from compartment through the round-type and lacerated-type holes. The data processing methodic for air pressure pulsation spectrum at the compartment during sudden depressurization has been developed. The robust estimates of air pressure pulsation values were defined using Bessel filter and $\Delta f = (0\dots400)$ Hz passband. The SPL-spectrum of the lacerated-type hole with $F_{rel} = (0.486-0.497)$ relative area relating to SPL-spectrum of the round-type hole has three intersections.

Keywords: aircraft, airplane, compartment, sudden depressurization, SPL, sound pressure level.