

Моделирование газодинамических и аэроакустических процессов при внезапной разгерметизации отсеков летательного аппарата

Государственное предприятие «АНТОНОВ»

Впервые обобщены и представлены основные принципы, законы, уравнения, правила и способы для определения параметров воздуха внутри отсека при разгерметизации, включая внезапную. Представлены результаты численных и экспериментальных исследований влияния показателя политропы и площади отверстия (круглое, типа «пробка», «щель», «рваное») на результаты моделирования давления воздуха во времени. Погрешность результатов расчета давления воздуха в отсеке в соответствии с разработанной математической моделью с постоянным показателем политропы составила 5,2%, пульсаций давления воздуха – 10,2%.

Ключевые слова: летательный аппарат, математическая модель, политропа, показатель политропы, внезапная разгерметизация.

Введение

История развития авиации и космонавтики показывает, что возникают условия эксплуатации, когда происходит вырыв или самопроизвольное открытие двери, люков, разрушение стекол фонаря кабины, разрушение участков фюзеляжа, нарушение целостности конструкции кабины или герметичности.

Кабина летательного аппарата (ЛА) может содержать один или несколько отсеков, разделенных перегородками с отверстиями для перетекания воздуха. В самом общем случае кабина ЛА представляет собой сосуд (отсек или отсеки) с избыточным давлением газа по отношению к окружающему пространству или атмосфере.

1. Анализ публикаций

По данным Федерального управления гражданской авиации (ФАА) США за период с 1959 г. по 1976 г. отмечено более 300 случаев разгерметизации кабин пассажирских самолетов. Имели место катастрофы самолетов «Комета» в 1954 г., DC-10 и L-1011 с человеческими жертвами. По данным ГА СССР в Аэрофлоте за 1970-1972 гг. зарегистрировано 13 случаев разгерметизации кабин различных типов самолетов. 8 мая 2003 года на высоте 2 км в Демократической Республике Конго произошла разгерметизация фюзеляжа украинского самолета Ил-76 со 120 пассажирами на борту. На борту самолета в хвостовой части образовалась щель. Самолет совершил вынужденную посадку, все члены экипажа и пассажиры не пострадали. 9 апреля 2010 года в аэропорту Воронежа совершил аварийную посадку самолет Ан-24 с 30 пассажирами на борту. Пострадавших нет. Причиной аварийной посадки стал сигнал о разгерметизации салона. В кабине пилотов лопнуло стекло, образовалась щель через которую происходили утечки воздуха из гермокабины. Аналогичные случаи разгерметизации имели место и в космонавтике, что приводило к гибели людей (30 июня 1971 года – «Союз 11», 28

января 1986 года космического Шаттла «Челленджер», 1 февраля 2003 года космического корабля многоразового использования «Колумбия») [1,2].

Для установления основных закономерностей в отсеке при разгерметизации, включая внезапную, были проведены натурные испытания отсеков самолета DC-6 с положительным и отрицательным избыточным давлением [3]. По настоящее время не представлены математические модели изменения параметров воздуха в отсеках реальных самолетов.

Внезапное изменение давления газа наблюдается при разрушении шасси самолета. Так, 25 июля 2000 года во Франции (Париж) при взлете самолета «Конкорд» при разрушении пневматика был поврежден топливный бак, что привело к загоранию двигателя [1]. Падение самолета произошло на этапе взлета, погибли все пассажиры и члены экипажа (109 человек) и 4 человека на земле.

Введение АП-25 (в США FAR-25) впервые привело к необходимости проведения газодинамических расчетов в отсеках ЛА при внезапной разгерметизации. Процессы истечения воздуха из отсека отнесены к классу задач, которые оказывают влияние на безопасность полета ЛА. В настоящее время отсутствуют математические модели для определения параметров воздуха в отсеке при внезапной разгерметизации для обеспечения безопасности ЛА.

Впервые теоретические исследования течения воздуха через отверстие в канале, по которому движется воздух, провел Николай Егорович Жуковский [4]. Учитывая важность решения этих задач, работы в этой области продолжили ученики, единомышленники и последователи Н.Е. Жуковского. Сергей Алексеевич Чаплыгин в докторской диссертации «О газовых струях» [5] рассмотрел задачу об истечении газа через отверстие из бесконечного сосуда и исследовал обтекание пластины, установленной перпендикулярно к набегающему потоку. Работы Н.Е. Жуковского и С.А. Чаплыгина можно по праву отнести к основным и фундаментальным работам при рассмотрении газодинамических процессов истечения газа из отсека. Однако в работах не представлены модели течения воздуха при внезапном изменении параметров воздуха, а также не рассмотрены процессы течения газа в зазоре между отсеком и пластиной.

Для исследования движения газа используют методы Лагранжа и Эйлера [6,7]. Широкое распространение получил метод Эйлера. В движущемся воздухе рассматривается контрольный объем, который стягивается в точку. В каждой точке на основании законов сохранения энергии, массы, количества движения записываются основные зависимости между параметрами движущегося газа (жидкости). При изучении процессов вдоль линии тока рассматривают два сечения, между которыми записываются основные уравнения и определяются основные зависимости изменения параметров газа. В работах не представлены модели ударного расширения воздуха в отсеке.

Для описания процессов ударного сжатия газа получена одна из основных зависимостей между плотностью, давлением и температурой до и после ударного сжатия, которая получила название ударная адиабата, или адиабата Гюгио [6]. Исследованы области применения адиабаты Гюгио и адиабаты Пуассона. В соответствии с законами сохранения массы, импульса и энергии представляется возможным осуществить ударную волну (УВ) как сжатия, так и разрежения. Согласно второму началу термодинамики осуществимы только УВ, в которых энтропия увеличивается. Этому требованию удовлетворяют УВ сжатия и не удовлетворяют УВ разрежения. Показано, что в идеальном газе с постоянной

теплоемкостью «возникновение ударной волны разрежения невозможно как с термодинамической точки зрения, так и с точки зрения устойчивости» [8]. Нарушение этих основных закономерностей получено для ударной адиабаты при наличии излома или перегиба. Основные закономерности протекания процессов в отсеке при внезапном расширении не рассмотрены.

Математические модели процессов истечения воздуха из отсека представлены в работах [9–13]. Рассмотрены массообменные, теплообменные процессы в отсеке для однообъемной и многообъемной кабин. Установлены основные уравнения при изменении параметров воздуха по изотерме, адиабате, политропе. Для определения параметров воздуха в отсеках при разгерметизации отсеков ЛА была разработана математическая модель с переменным показателем политропы. Так как показатель политропы зависит от показателя адиабаты, подводимого и отводимого расхода воздуха, подводимой и отводимой энергии, то описание процессов внутри отсека существенно усложнилось. Такая модель не получила практического применения. Широкое распространение получили уравнения состояния и политропы. Однако с помощью таких уравнений не представлены модели ударного расширения газа в отсеке. Несмотря на накопленный опыт проведения расчета параметров воздуха в отсеках для различных случаев эксплуатации ЛА, результаты исследований не были обобщены и не сформулированы основные принципы, правила описания процессов в отсеках при разгерметизации, включая внезапную.

2. Актуальность проблемы

Анализ опубликованных работ показывает, что разработка математических моделей процессов в отсеке при разгерметизации, включая внезапную, является актуальной и представляет собой научно-прикладную проблему.

Введение АП-25 явилось основанием для проведения этой работы и привело к необходимости продолжить исследования по изучению процессов внутри отсека при внезапной разгерметизации отсеков ЛА.

Стремление авиационных предприятий расширить рынок сбыта авиационной продукции на зону действия стандартов Европы и США приводит к повышению требований к разрабатываемым ЛА, усложнению выполнения работ и делает их более актуальными.

3. Цель и задачи исследований

Целью настоящих исследований является разработка математических моделей газодинамических и аэроакустических процессов при внезапной разгерметизации отсека ЛА.

Для достижения цели решают следующие задачи:

1. Сформулировать основные принципы, законы, уравнения, правила и способы для моделирования процессов внутри отсека при разгерметизации, включая внезапную.
2. Провести исследование параметров воздуха в отсеке на основании разработанной математической модели.
3. Сопоставить результаты расчета и эксперимента для разработанной математической модели при внезапной разгерметизации отсека.

4. Основные положения определения параметров воздуха в отсеках ЛА при разгерметизации, включая внезапную

На основе обобщения результатов исследований отсеков ЛА в соответствии с работами [4-13] сформулированы следующие принципы, законы, уравнения, правила и способы для определения параметров воздуха внутри отсека при разгерметизации, включая внезапную:

1. Фюзеляж ЛА представляют в виде герметичной и негерметичной части. Герметичная часть фюзеляжа содержит отсек, внутри которого имеется объем воздуха. В объеме воздуха происходят исследуемые термодинамические процессы. Внутри отсека может втекать, вытекать или перетекать воздух из одного отсека в другой. Отсеки могут быть разделены между собой перегородками, в которых имеются площади (F) для перетекания воздуха, выполненные в виде перфорированных панелей, откидных панелей или открывающихся дверей при заданном избыточном давлении, щелей, кранов с регулируемой проходной площадью и т.д. Истечение воздуха из отсека происходит при постоянной ($F=const$) или переменной ($F=var$) площади.
2. Внутри отсека выполняются основные законы газодинамики и аэроакустики (сохранения массы вещества, количества движения, энергии, распространения, отражения и преломления волн).
3. Термодинамические процессы внутри отсека подчиняются теории квазистационарности.
4. Режим течения газа определяют путем сопоставления параметров газа (по объему) и параметров отсека.
5. Газодинамические процессы в отсеке рассматривают с учетом выравнивания во времени параметров газа.
6. Изменение состояния воздуха в отсеке подчиняется политропному закону с переменным показателем политропы. Зависимость между давлением и плотностью воздуха определяется в соответствии с уравнением $\frac{P}{\rho^n} = var$.

При переходе к процессам за конечный промежуток времени последовательно изменяют состояние параметров воздуха в отсеке с выполнением условия:

$$d\left(\frac{P}{\rho^n}\right) \rightarrow \min, \text{ когда } \frac{P}{\rho^n} = const, n = const.$$

7. Изменения давления и температуры воздуха в отсеке объемом V во времени (τ) определяют в соответствии с уравнениями:

$$\frac{d^2P}{d\tau^2} = f_1(n, P, V, T, G_1, G_2, \frac{dP}{d\tau}, \frac{dV}{d\tau}, \frac{dT}{d\tau}, \frac{dG_1}{d\tau}, \frac{dG_2}{d\tau}, \frac{dq}{d\tau}, \frac{dl}{d\tau}, \frac{d^2V}{d\tau^2}, \frac{d^2q}{d\tau^2}, \frac{d^2l}{d\tau^2}),$$

$$\frac{dT}{d\tau} = f_2(n, P, T, \frac{dP}{d\tau}), G_1 = f_3(n_1, P_0, P, T, \varphi, F_1, A_1), G_2 = f_4(n_2, P_0, P, T, \varphi, F_2, A_2),$$

$$n = const.$$

Для площади отверстия (F) и параметра уравнения политропы (A) расчет параметров воздуха в отсеке производят по параметрам в заторможенном потоке (P_0, ρ_0, T_0, a_0) при $P_0 = var$ или по параметрам движущегося потока (P, ρ, T, a) при $P_0 = const$ (a – скорость звука).

8. Изменение массы воздуха в отсеке (m) во времени определяется зависимостью $\frac{dm}{d\tau} = G_1 - G_2$.
9. Изменение параметров воздуха в отсеке подчиняется законам идеального газа, уравнению состояния идеального газа для движущегося и заторможенного потока соответственно: $P\rho^{-1} = RT, P_0\rho_0^{-1} = RT_0$ (R - удельная газовая постоянная).
10. Для «большого» отсека параметры воздуха и скорость звука определяют по условию равенства числа Маха $M \approx 0$: $P_0 = P, \rho_0 = \rho, T_0 = T, a_0 = a$.
11. Для давления (P) и плотности (ρ) воздуха в отсеке с учетом возмущений ($p_\epsilon, \rho_\epsilon$) выполняются условия: $P = P_0 + p_\epsilon, \rho = \rho_0 + \rho_\epsilon$.
12. При неравномерности распределения параметров воздуха в отсеке (давления, температуры, скорости, плотности и т.д.) проводят последовательное деление объема отсека на подобъемы до тех пор, пока не будет достигнута равномерность распределения параметров воздуха по объему.
13. Газодинамические и аэроакустические процессы в отсеке рассматривают с учетом подводимого и отводимого газа, смешения газов и выравнивание во времени параметров газа в исследуемом отсеке.
14. Параметры воздуха внутри отсека описывают в виде математической модели при энергетической изолированности (закрытой термодинамической системе) и неизолированности (открытой).
15. Формирование математической модели изменения параметров газа в отсеках производится с учетом совершения внутренней и внешней работы.
16. Для математической модели (в виде системы уравнений), которая описывает процессы внутри отсека и содержит большее количество неизвестных параметров, чем количество основных уравнений, получение решения уравнений производят в соответствии с общей теорией некорректно поставленной задачи по А.Н. Тихонову.
17. Для отсека, из которого происходит истечение воздуха в окружающее пространство (атмосферу), параметры воздуха на выходе из отсека задают в виде граничных условий.
18. Для каждого исследуемого случая течения газа проводят расчет и анализ изменения давления и температуры газа в отсеках во времени и по высоте полета ЛА, что позволяет определить максимальные перепады давления на исследуемой конструкции отсека.
19. Адекватность модели определяют по критерию минимума суммы квадратичного отклонения при нормальном законе распределения: $S = \sum_{i \in N} (d_i)^2 \rightarrow min$, где $d_i = Y_i^{(p)} - Y_i, Y_i^{(p)}$ – расчетное значение параметра для i -го опыта, Y_i – экспериментальное значение параметра для i -го опыта,

N - количество опытов. Для повышения устойчивости оценок модели используются помехоустойчивые методы [14, 15].

По сравнению с методом Эйлера определение параметров воздуха в отсеках включает в себя пункты 1, 2, 4, 12, 13, 14, 15, 18, по сравнению с работами [9-13] – пункты 4, 5, 13, 14, 15, 18.

При разгерметизации отсека, включая внезапную, зависимость между параметрами воздуха внутри отсека с учетом подвода, отвода воздуха, энергии запишем в виде дифференциального уравнения второго порядка:

$$\frac{d^2 P_0}{d\tau^2} + \frac{d^2 P_\epsilon}{d\tau^2} = n (A - B + C), \quad (1)$$

где

$$A = R \left\{ \left[V \left(\frac{dT_0}{d\tau} + \frac{dT_\epsilon}{d\tau} \right) - (T_0 + T_\epsilon) \frac{dV}{d\tau} \right] \frac{G_1 - G_2}{V^2} + \frac{T_0 + T_\epsilon}{V} \left(\frac{dG_1}{d\tau} - \frac{dG_2}{d\tau} \right) \right\},$$

$$B = \left[V \left(\frac{dP_0}{d\tau} + \frac{dP_\epsilon}{d\tau} \right) - (P_0 + P_\epsilon) \frac{dV}{d\tau} \right] \frac{1}{V^2} \frac{dV}{d\tau} + \frac{P_0 + P_\epsilon}{V} \frac{d^2 V}{d\tau^2},$$

$$C = \left[(T_0 + T_\epsilon) \left(\frac{dP_0}{d\tau} + \frac{dP_\epsilon}{d\tau} \right) - (P_0 + P_\epsilon) \left(\frac{dT_0}{d\tau} + \frac{dT_\epsilon}{d\tau} \right) \right] \frac{1}{R(T_0 + T_\epsilon)^2} \left(\frac{dq}{d\tau} - \frac{dl}{d\tau} \right) + CC,$$

$$CC = \frac{P_0 + P_\epsilon}{R(T_0 + T_\epsilon)} \left(\frac{d^2 q}{d\tau^2} - \frac{d^2 l}{d\tau^2} \right).$$

В соответствии с уравнением устанавливают зависимость между давлением (P_0), пульсациями давления (P_ϵ), температурой (T_0), пульсациями температуры (T_ϵ) от расхода подводимого (G_1) и отводимого (G_2) воздуха, изменения расхода (dG_1, dG_2), объема отсека (V), изменения объема (dV, d^2V), подводимой (q) и отводимой (l) энергии, изменения энергии (dq, dl, d^2q, d^2l) во времени (τ). Параметры воздуха в отсеке изменяются по политропе (n). Исследования модели показывают, что массообменные явления описываются моделью с одним показателем политропы, а процессы, связанные с пульсациями параметров газа, могут иметь другое значение показателя политропы (например, $n = k = 1,4$).

При численном решении дифференциального уравнения второго порядка (1) использовали метод Рунге-Кутты и стандартные программы Fortran 6.

Рассмотрим некоторые частные решения, которые вытекают из уравнения (1). При отсутствии пульсаций давления воздуха, подвода и отвода энергии к отсеку, постоянном объеме отсека и при закритическом отношении давлений между отсеком и окружающей средой, в которую происходит истечение воздуха, давление воздуха в отсеке определяют по уравнению

$$\frac{d^2 P_0}{d\tau^2} = \frac{B}{P_0} \frac{dP_0}{d\tau},$$

где $B = 137,7792 \frac{1}{V} G_1$; G_1 – критический расход воздуха.

Опуская промежуточные выкладки, получаем решение уравнения в таком виде

$$\tau = \frac{a}{C_1^a} \int \frac{e^{aS}}{S} dS + C_2 = \frac{a}{C_1^a} \left[\ln/S + \sum \frac{(aS)^i}{i \times i!} \right] + C_2,$$

где $a = \frac{1}{B}$; $S = \ln(P_0^B C_1)$; C_1, C_2 – постоянные величины.

Значения параметров C_1, C_2 определяются по начальным данным. Таким образом, полученное уравнение устанавливает зависимость между давлением воздуха в отсеке и временем внезапной разгерметизации отсека при критическом режиме течения воздуха.

5. Газодинамические характеристики процессов внутри отсека при внезапной разгерметизации

На основании математической модели представляется возможным определить параметры воздуха в отсеке в зависимости от показателя политропы, подводимой и отводимой энергии, начальной площади отверстия, начального значения производной площади по времени, отверстия, начального значения производной давления воздуха в отсеке по времени, начальной температуры воздуха в отсеке, объема отсека, утечек воздуха из отсека в связи с негерметичностью, характера протекания процесса внутри отсека, переменного значения уравнения политропы, конструкции отсека, индивидуальных особенностей отсека и других факторов. Представляется возможным определить изменение давления воздуха во времени, амплитуду, частоту колебаний воздуха внутри отсека при внезапной разгерметизации в атмосферу через круглое отверстие с $F_{отн} = F_0/F = 1$ (F_0 – площадь отверстия, F – площадь сечения отсека, канала) в зависимости от основных параметров (факторов).

Одним из важных параметров, который оказывает влияние на результаты моделирования процессов внутри отсека, является показатель политропы (n). Определим изменение параметров воздуха в отсеке при условии, когда в течение всего рассматриваемого процесса показатель политропы $n = const$. Исследуем характерные процессы в отсеке при $n \geq 0$ и истечении воздуха из отсека в атмосферу [16]. При внезапной разгерметизации для начального давления воздуха в отсеке $P = 126166,9$ Па получены зависимости изменения давления воздуха в отсеке во времени (τ) в зависимости от показателя политропы n (рис. 1). Для проведенных исследований при $n \leq 20$ график функции $P = f(n, \tau)$ носит характер затухающих колебаний, асимптотически приближаясь к давлению окружающей среды, в которую происходит втекание воздуха. При протекании процесс по адиабате ($n = 1,4$) вначале разгерметизации логарифмический

декремент затухания колебаний давления воздуха в отсеке составляет $\delta = 5,39 \times 10^{-3}$. При этом, максимальные колебания давления воздуха уменьшаются со средней скоростью $\frac{dP}{d\tau} = -10114,0 \text{ Па/с}$, а в конце

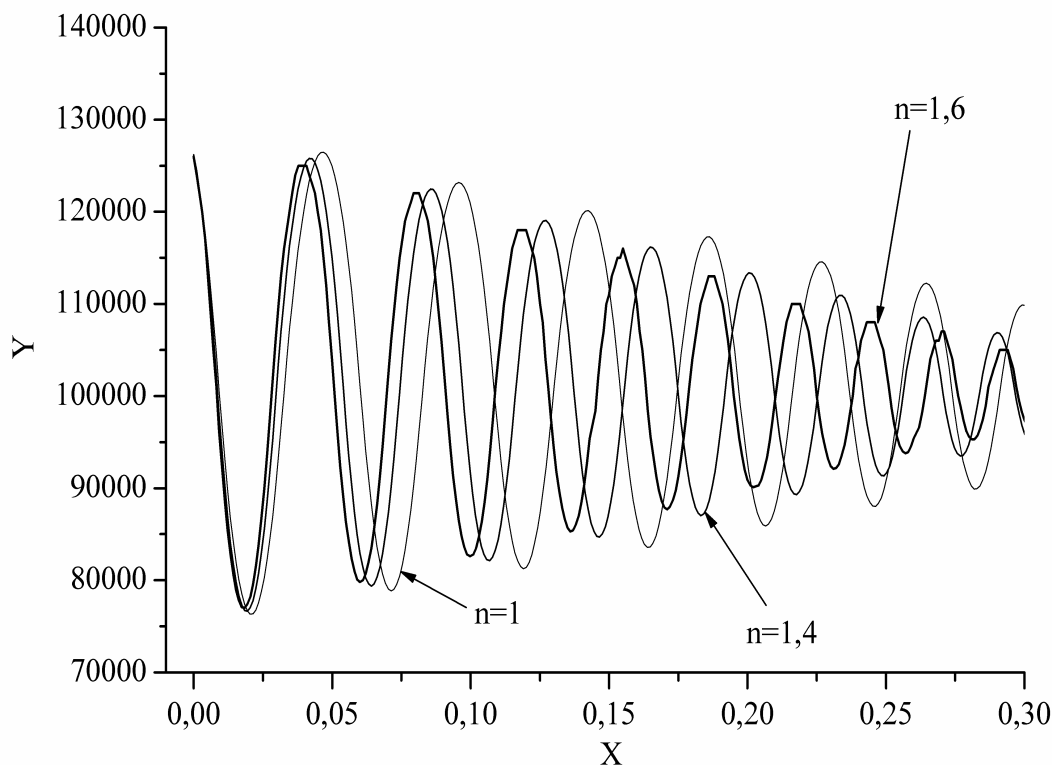


Рис. 1. Зависимость давления воздуха в отсеке (Y, Па) от времени (X, с) и показателя политропы (n)

рассматриваемого интервала времени ($\tau = (0,26...0,3) \text{ с}$) имеем $\delta = 1,63 \times 10^{-2}$, $\frac{dP}{d\tau} = -63672,7 \text{ Па/с}$. Максимальная амплитуда затухания колебаний давления воздуха уменьшается за $\tau = 0,3 \text{ с}$ на 15,3%. По сравнению с зависимостью $P = f(n, \tau)$ при $n = 1,4$ с увеличением и уменьшением показателя политропы наблюдается разный характер изменения давления воздуха в отсеке. С уменьшением показателя политропы до $n \approx 1,1$ логарифмический декремент затухания колебаний давления воздуха вначале составляет $\delta = -2,51 \times 10^{-3}$ и происходит некоторое увеличение давления воздуха со средней скоростью $\frac{dP}{d\tau} = 6775,2 \text{ Па/с}$. В конце интервала логарифмический декремент составляет

$\delta = 2,12 \times 10^{-2}$ и средняя скорость падения давления $\frac{dP}{d\tau} = -68146,4$ Па/с. В интервале времени до $\tau \leq 0,045817$ с происходит увеличение максимальной амплитуды колебаний на 0,2%, а затем уменьшается амплитуда на 13%. При дальнейшем увеличении показателя политропы увеличиваются затухание колебаний и скорость падения давления воздуха (рис. 2). Вначале разгерметизации логарифмический декремент затухания колебаний давления воздуха в отсеке, средняя скорость изменения давления воздуха и падение максимальной амплитуды колебаний давления воздуха (P_a) составляют:

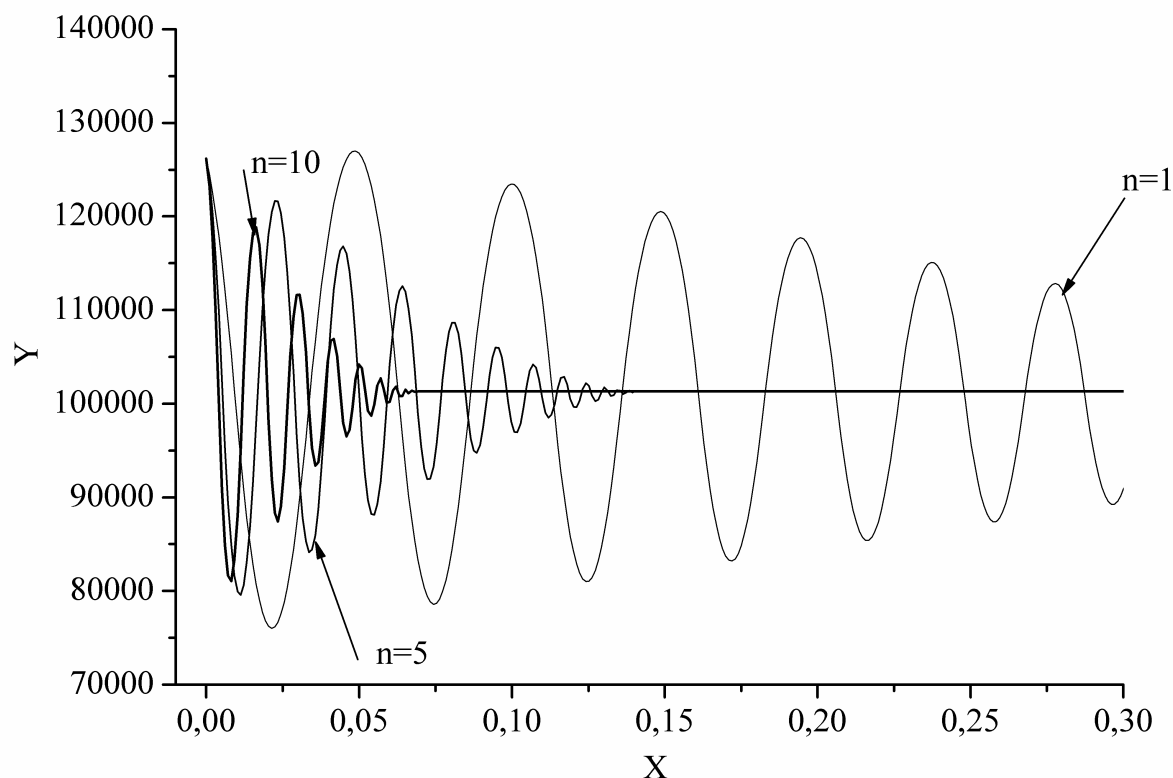


Рис. 2. Зависимость давления воздуха в отсеке (Y, Па) от времени (X, с) и показателя политропы (n)

$\delta = 2,65 \times 10^{-2}$, $\frac{dP}{d\tau} = -111535,1$ Па/с, $P_a = 2,6\%$ при $n \approx 3$; $\delta = 3,63 \times 10^{-2}$,

$\frac{dP}{d\tau} = -200696,04$ Па/с, $P_a = 3,6\%$ при $n = 5$; $\delta = 6,43 \times 10^{-2}$, $\frac{dP}{d\tau} = -514496,3$ Па/с,

$P_a = 7\%$ при $n = 10$. Для рассматриваемого промежутка времени наблюдается выравнивание давлений воздуха в отсеке и окружающей среде. Происходит уменьшение максимальной амплитуды колебаний давления воздуха на 19,7% в течении: $\tau = 0,233035$ с для $n \approx 3$; $\tau = 0,131285$ с для $n = 5$; $\tau = 0,06919$ с для $n = 10$. Несмотря на уменьшение времени затухания колебаний давления воздуха

в отсеке, наблюдается увеличение частоты пульсаций давления воздуха. Рассматривая зависимости изменения давления воздуха в отсеке, можно прийти к следующим выводам. По мере увеличения показателя политропы затухающие колебательные процессы характеризуются, с одной стороны, уменьшением времени выравнивания давления воздуха в отсеке, а с другой стороны повышением частоты пульсаций давления воздуха. Если определить число пульсаций в отсеке для всего рассматриваемого промежутка времени при заданном показателе политропы относительно количества пульсаций при $n=1,4$, то относительная величина пульсаций увеличивается до 694% при $n=10$ и уменьшается до 18,8% при $n=1$.

6. Сопоставление результатов расчета и эксперимента.

Одним из существенных факторов, который оказывает влияние на истечение воздуха из отсека при внезапной разгерметизации, является площадь отверстия (F). Экспериментально определить изменение площади отверстия при внезапной разгерметизации затруднительно или практически невозможно. На основании проведенных стендовых испытаний определены изменения давления воздуха в отсеке во времени при внезапной разгерметизации. Определим численным методом параметры (прежде всего, площадь отверстия и показатель политропы) математической модели (1), которые с достаточной для практики

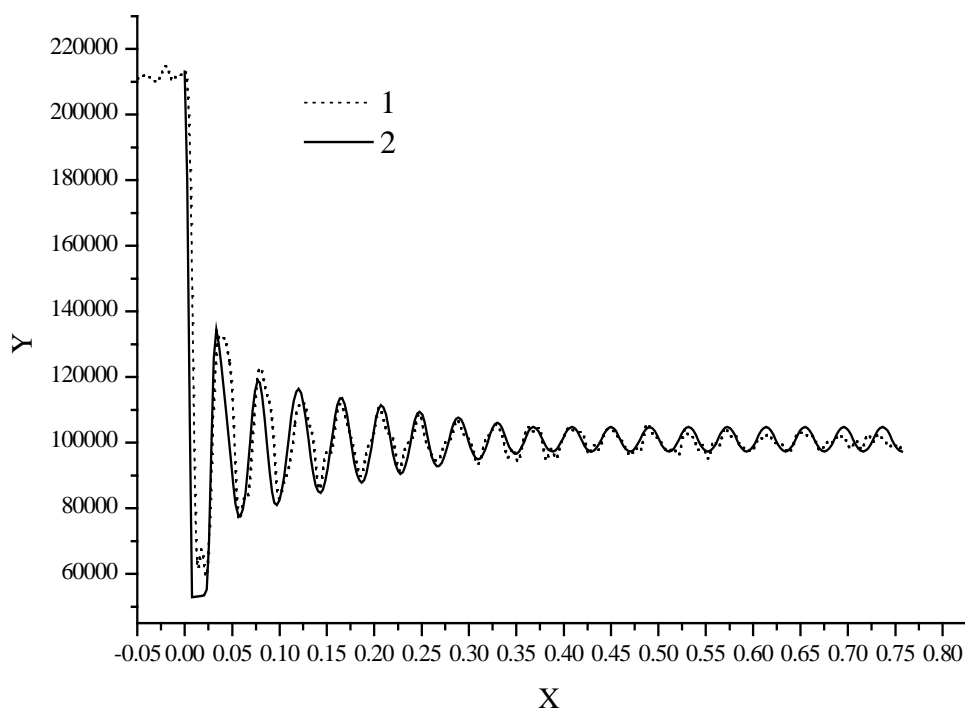


Рис. 3. Зависимость давления воздуха в отсеке (Y , Па) от времени (X , с) для круглого отверстия при $F_{отн}=1$:
1 – эксперимент; 2 – расчет

точностью описывают изменение давления воздуха в отсеке с течением времени. Искомые параметры математической модели будем определять при внезапной разгерметизации отсека в атмосферу через круглое отверстие, щель, типа «пробка», «рваное». Представим некоторые характерные результаты таких исследований.

Для круглого отверстия при закритическом отношении давлений воздуха внутри отсека (P) и атмосферой ($P_{\text{атм}}$) с $P_{\text{отн}}=P/P_{\text{атм}}=2,1$ и $F_{\text{отн}}=1$ разработанная математическая модель отражает характер протекания процесса и описывает изменение давления воздуха в отсеке во времени (рис. 3). Максимальная погрешность 20,7% получена по истечении $\tau \approx (0,0128 \dots 0,0242)$ с в области завершения переходного процесса при минимальных значениях давления воздуха в отсеке и критическом отношении давлений воздуха в отсеке и окружающей среде. В течение всего промежутка времени разгерметизации погрешность результатов расчета составила 5,2%. Предпочтительный показатель политропы составил $n = 1,361$. При истечении воздуха из отсека площадь круглого отверстия изменяется с течением времени в соответствии с рис. 4. График зависимости площади отверстия от времени представляет собой монотонно возрастающую

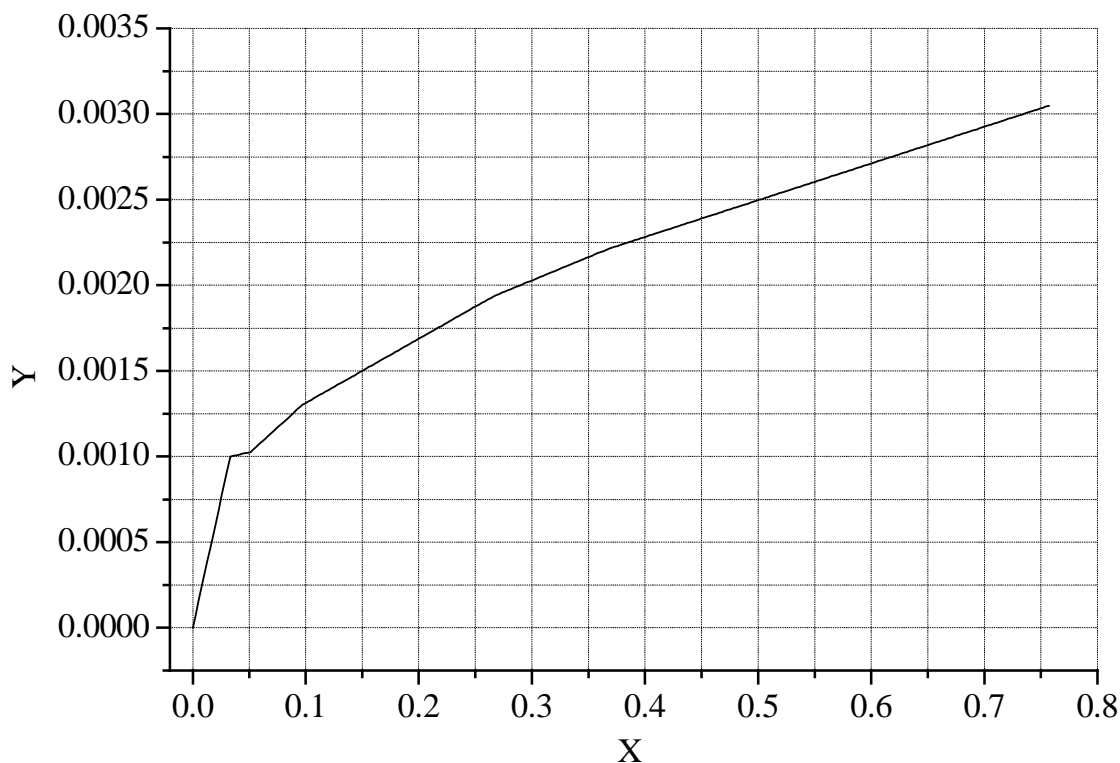


Рис. 4. Зависимость площади отверстия (Y , м²) от времени (X , с) для круглого отверстия при $F_{\text{отн}}=1$

функцию, которая близка по своим свойствам к логарифмической. Вблизи критического отношения давлений воздуха в отсеке функция имеет ступеньку в течение $\tau \approx 0,0153$ с. По истечении более (0,2...0,3) с график функции приближается к линейной зависимости между площадью отверстия и временем.

При уменьшении относительного давления воздуха в отсеке до $P_{отн}=1,25$ расчетное значение давления воздуха в отсеке имеет максимальное отклонение в области минимальных и максимальных значений давления воздуха. Максимальная погрешность расчета давления воздуха в отсеке составила 18,5%. Средняя погрешность результатов расчета составила 4,83%. Результаты расчета изменения давления воздуха в отсеке во времени отражают характер колебательного процесса выравнивания давления воздуха в отсеке с окружающей средой. Предпочтительный показатель политропы по статистическим характеристикам составил $n = 1,382$. График функции зависимости площади отверстия от времени включает в себя три линейных участка изменения площади отверстия. Точки пересечения этих прямых имеют координаты: точка 1 – $\tau \approx 0,0306$ с, $F=3,0151 \times 10^{-4} \text{ м}^2$; точка 2 – $\tau \approx 0,2483$ с, $F=0,00128 \text{ м}^2$.

При уменьшении относительной площади до $F_{отн}=0,036$ и $P_{отн}=4,01$ максимальная погрешность расчета давления воздуха в отсеке изменялась в диапазоне (6,1...9,8)%. Минимальное значение погрешности достигается в области высоких давлений воздуха в отсеке, а максимальное значение – при

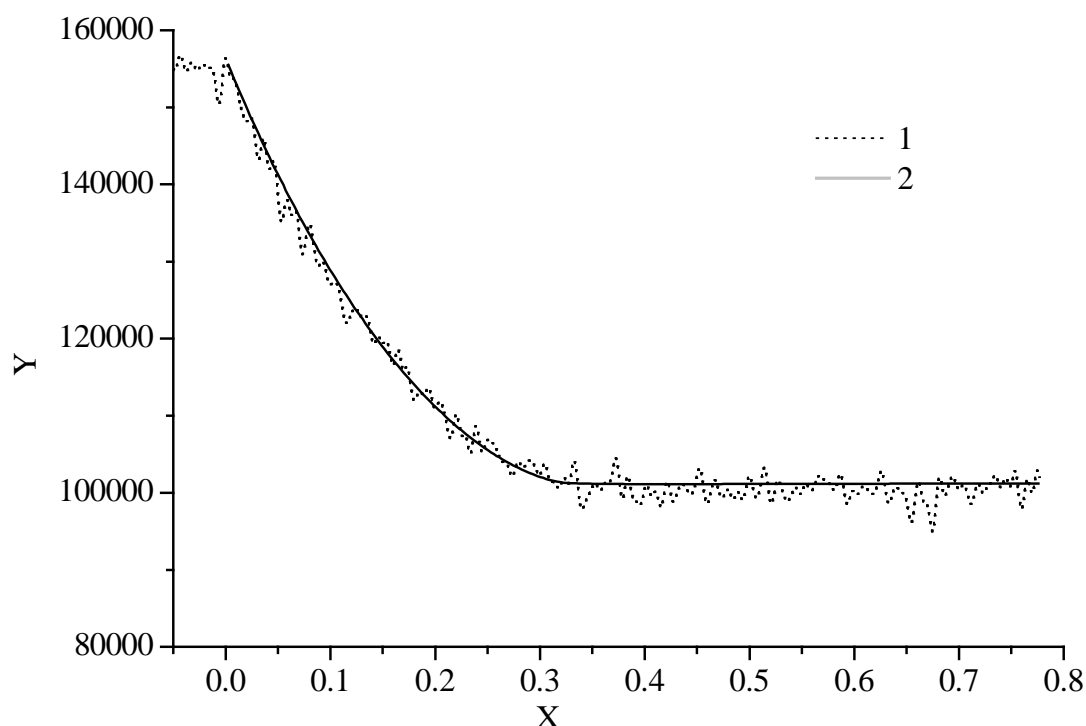


Рис. 5. Зависимость давления воздуха в отсеке (Y, Па) от времени (X, с) для отверстия типа «пробка» при $F_{отн}=0,04$:

1 – эксперимент; 2 – расчет

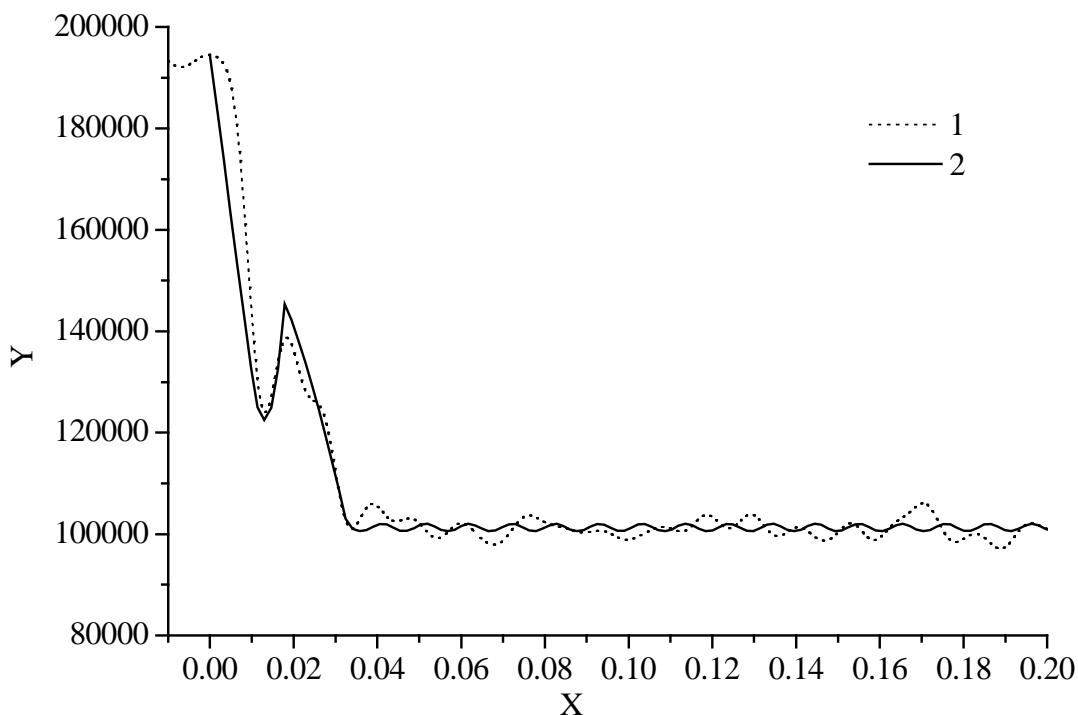


Рис. 6. Зависимость давления воздуха в отсеке (Y , Па) от времени (X , с) для отверстия типа «щель» при $F_{отн}=0,04$ и переменном значении правой части уравнения политропы:
1 – эксперимент; 2 – расчет

относительном значении давления воздуха в отсеке меньше 1,1. Площадь отверстия при разгерметизации отсека изменялась по линейному закону: $F=2,09280E-4+4,02154E-5\tau$. Предпочтительный показатель политропы составил $n = 1,34$.

Для отверстия типа «пробка» при $F_{отн}=0,04$ и $P_{отн}=1,54$ максимальная погрешность результатов расчета давления воздуха в отсеке получена в области низких давлений и составила 6,2%, а в области высоких давлений – 3,5% (рис. 5). Сравнительный анализ результатов расчета и эксперимента показывает, что разработанная математическая модель описывает изменение давления воздуха в отсеке со средней погрешностью 5,12% во всем рассматриваемом интервале времени. В процессе истечения воздуха из отсека площадь отверстия изменялась по линейной зависимости: $F=1,65263E-4+1,000113E-4\tau$. Показатель политропы составил $n = 1,29$.

Для отверстия типа «щель» при $P_{отн}=1,92$ проведены исследования для двух вариантов изменения уравнения политропы. При постоянном уравнении политропы математическая модель имеет максимальные погрешности 24,6% в области переходного процесса. На основании разработанной математической модели не представляется возможным определять параметры воздуха при изменении направления скорости давления воздуха. Значительные отклонения результатов расчета наблюдается при скорости свыше 2972,1 кПа/с. Для таких

изменений параметров воздуха происходит существенное смещение результатов расчета, что особенно отражается на значении показателя политропы и характера изменения давления воздуха в отсеке. При переменном значении правой части уравнения политропы с помощью математической модели представляется возможным описать области различных изломов и перегибов функции зависимости изменения давления воздуха в отсеке во времени (рис. 6). Максимальное значение погрешности в этой области достигает значений 4,4%. Площадь отверстия изменялась по линейной зависимости:

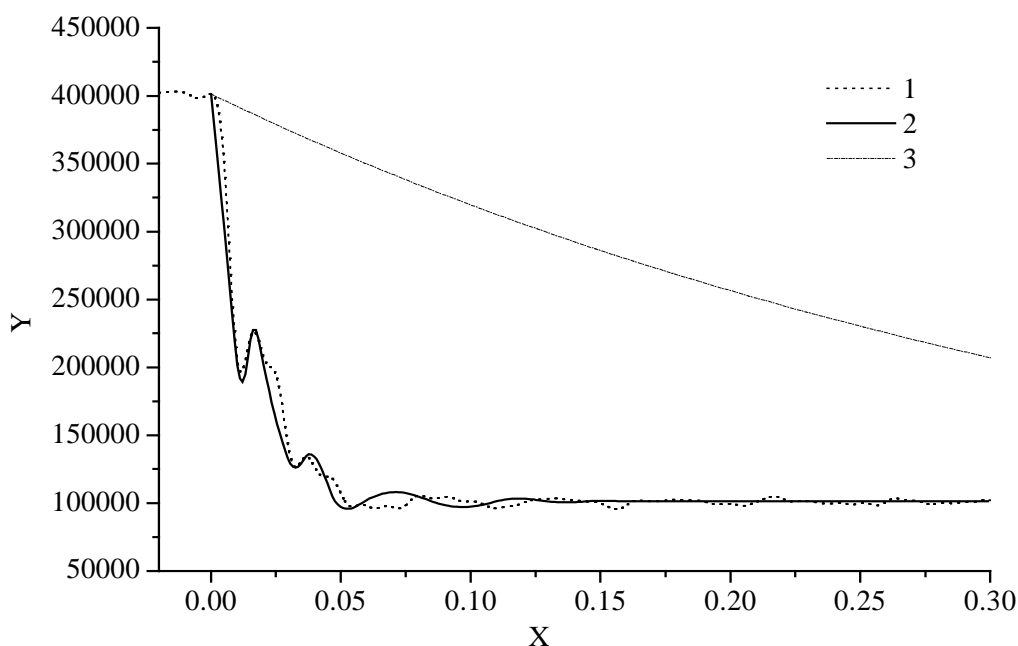


Рис. 7. Зависимость давления воздуха в отсеке (Y , Па) от времени (X , с) для отверстия типа «рваное» при $F_{отн}=0,49$:

1 – эксперимент;

2 – расчет в соответствии с моделью (1);

3 – расчет в соответствии с [12,13]

$F=3,2224E-7+0,0999 \tau$. Предпочтительный показатель политропы составил $n = 1,46$.

Для отверстия типа «рваное» при закритическом отношении давлений в отсеке $P_{отн}=3,96$ максимальная погрешность расчета давления воздуха в отсеке составила 10,8% в области низких давлений по истечении более 0,05 с. Коэффициент множественной корреляции составил 0,892, расчетное значение критерия Фишера – 10,23, дисперсия результатов расчета давления воздуха в отсеке – 41,2 кПа. Коэффициент множественной корреляции близок к единице и статистически значим при уровне 0,1. Таким образом, результаты расчета в соответствии с разработанной моделью отражают основные закономерности исследуемого процесса. Математическая модель адекватно описывает реальный

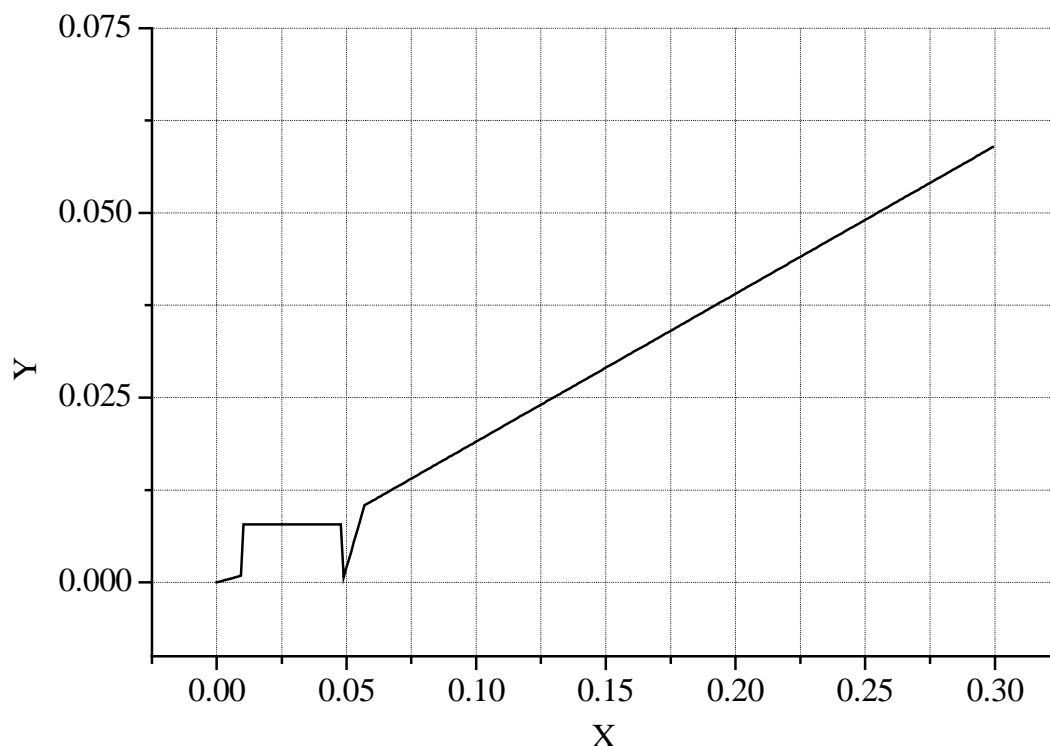


Рис. 8. Зависимость площади отверстия (Y , м²) от времени (X , с) для отверстия типа «рваное» при $F_{отн}=0,49$

процесс и несет полезную информацию об исследуемых параметрах.

При истечении воздуха из отверстия площадь изменялась во времени в соответствии с рис. 8. Значительные изменения площади для отверстия типа «рваное» происходят в области переходного процесса. Такие изменения сопровождаются процессами преобразования энергии, что приводит к увеличению показателя политропы до $n = 1,491$. Учитывая сложный процесс разрушения и образования отверстия для перетекания воздуха, показатель политропы изменялся в диапазоне (1,15...1,64) при изменении начального относительного давления воздуха в отсеке в диапазоне (1,1...4,3). По истечении более 0,057 с площадь отверстия изменяется по линейной зависимости.

При внезапной разгерметизации проведено сопоставление результатов эксперимента и расчета в соответствии с математической моделью изменения давления воздуха в отсеке, которая описана в работах [12,13]. Представленная авторами математическая модель для разгерметизации отсека не отражает характер изменения давления воздуха в отсеке при внезапной разгерметизации. Максимальная погрешность расчета составила 274,01% (рис. 7, кривая 3). Значительные расхождения между моделью и экспериментальными данными параметров воздуха получены на переходных режимах течения, что особенно проявляется в начальный момент внезапной разгерметизации отсека. Такая модель практически не описывает колебательное изменение давления воздуха в отсеке при внезапной разгерметизации. При уменьшении скорости изменения

давления воздуха в отсеке разработанная модель позволяет описать изменение параметров воздуха с достаточной для практики точностью.

Внезапная разгерметизация отсека включает в себя газодинамические и аэроакустические процессы. Эти процессы образуются в отсеке при изменении давления, температуры воздуха, истечении воздуха из одного отсека в другой или атмосферу и оказывают взаимное влияние. Газодинамические процессы происходят при массообменных и энергетических взаимодействиях. Эти взаимодействия сопровождаются образованием пульсаций давления воздуха в отсеке, движущемся воздухе на входе и выходе из отсека. При определенном их взаимном влиянии может происходить увеличение или уменьшения пульсаций

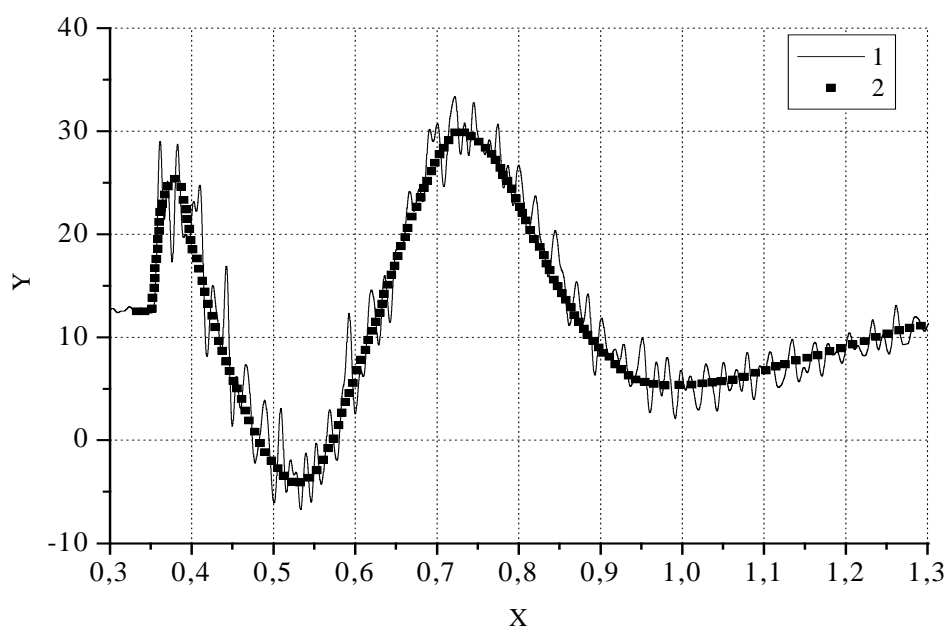


Рис. 9. Зависимость пульсаций давления воздуха (Y , Па) от текущего времени (X , с):

1 – эксперимент; 2 – расчет в соответствии с моделью (1)

давления воздуха. Результаты расчета пульсаций давления воздуха в отсеке при внезапной разгерметизации с показателем политропы $n=1,4$ и при относительном давлении воздуха в отсеке $P=0,59$ показано на рис. 9. Максимальная погрешность результатов расчета составила 10,2%. Разработанная математическая модель (1) отражает характер протекания процесса и адекватно описывает пульсации давления воздуха в отсеке.

Выводы

1. Получили дальнейшее развитие и впервые сформулированы основные принципы, законы, уравнения, правила и способы для определения параметров воздуха внутри отсека при разгерметизации, включая внезапную.
2. Впервые представлена математическая модель изменения давления и пульсации давления воздуха в отсеке во времени при внезапной

разгерметизации с подводом, отводом и перетеканием воздуха для круглого отверстия типа «пробка», «щель», «рваное». Разработанная математическая модель при изменении параметров воздуха по политропе с постоянным показателем политропы описывает изменение давления воздуха в отсеке во времени с достаточной для практики точностью. Погрешность результатов расчета давления воздуха в отсеке в течение до 1,3 с составила 5,2%, пульсаций давления воздуха – 10,2%.

3. На основе разработанной математической модели при внезапной разгерметизации отсека получены частные решения и аналитические зависимости изменения параметров воздуха в отсеке во времени.
4. Впервые представлены результаты исследований влияния показателя политропы и изменения площади отверстия при внезапной разгерметизации отсека. Для газодинамических процессов показатель политропы изменялся в диапазоне $n=(1,15\dots1,64)$, для волновых процессов составлял $n=1,4$. На основе численного метода установлена зависимость изменения площади отверстия от времени, которая включала в себя характерные скачкообразные и линейные области.

Список литературы

1. Сто великих авиакатастроф/ Автор-сост. И.А. Муромов. – М.: Вече, 2003. – 528 с.
2. Катастрофи в авіації. Криміналістичний аналіз. Науково-практичне видання. – К.: Видавництво “КВІЦ”, 2005. – 500 с.
3. Discussions of the Lektore// Journal of the Aeronautical Sciences. – 1952. – V. 19. - № 3. – P. 168 – 172.
4. 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.
5. Чаплыгин С.А. О газовых струях. – М.-Л.: Гостехиздат, 1949. – 144 с.
6. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Изд-во 5-е. – М.: Наука, 1978. – 736с.
7. Прикладная газовая динамика/ Под ред. Г.Н. Абрамовича – М.: Наука,1976. – 888 с.
8. Зельдович Я.Б. Теория ударных волн и введение в газодинамику. – Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». – 2004. – 188 с.
9. Мамонтов М.А. Вопросы термодинамики тела переменной массы. -М.: Оборонгиз, 1961. - 56 с.
10. Гершкович А.М. Метод расчета времени истечения газа из резервуара постоянного объема// Кислород. – 1948. - N 1. – С. 11 - 13.
11. Быков Л.Т., Егоров М.С., Тарасов П.В. Высотное оборудование самолетов. – М.: Оборонгиз, 1958. – 392 с.
12. Быков Л.Т., Ивлентиев В.С., Кузнецов В.И. Высотное оборудование пассажирских самолетов –М.: Машиностроение, 1972. - 332 с.
13. Ивлентиев В.С. Разгерметизация кабин летательных аппаратов: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.07.02. – М.: МАИ, 1983. – 32 с.
14. Касьянов В.А., Доник В.Д. Помехоустойчивый метод для полиномиальных моделей со свободным коэффициентом. – К., 1987. – Деп. ВИНТИ 1.04.88, №25303-В88. – 8 с.

15. Доник В.Д. Алгоритм сглаживания экспериментальных данных с минимизацией остатков. – К., 1987. – Деп. ВИНТИ 1.04.88. N2534-B88. –8с.
16. Доник В.Д., Запорожець О.І. Аероакустичні процеси в разі розгерметизації посудини з надлишковим тиском газу// Вісн. НАУ. – К. – 2006. - №1(27). – С. 70 - 75.

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

Поступила в редакцию:15.01.2014

Моделювання газодинамічних і аероакустичних процесів при раптовій розгерметизації відсіків літального апарату

Уперше узагальнено й наведено основні принципи, закони, рівняння, правила й способи для визначення параметрів повітря усередині відсіку при розгерметизації, включаючи раптову. Подано результати числових та експериментальних досліджень впливу показника політропи й площі отвору (круглий, типу «пробка», «щілина», «рваний») на результати моделювання тиску повітря в часі. Погрішність результатів розрахунку тиску повітря у відсіку відповідно до розробленої математичної моделі з постійним показником політропи становила 5,2%, пульсацій тиску повітря – 10,2%.

Ключові слова: літальний апарат, математична модель, політропа, показник політропи, раптова розгерметизація.

Mathematical model of gas-dynamic and aeroacoustics processes at sudden depressurization of aircraft compartment

For the first time were summarized and presented the main principles, laws, equations, basic rules and means to define the parameters of the air inside the compartment at its depressurization including the sudden one. Were presented the results of numerical and experimental researches of the impact of polytropic exponent ratio and hole square (of various types – round, “plug”, “slot”, “lacerated hole”) on the results of air pressure time simulation (modeling). The 5.2% tolerance of pressure calculation results for the air in the compartment in accordance with the developed mathematical model with the constant polytropic exponent ratio and 10.2% tolerance of air pressure pulsation were defined.

Keywords: aircraft, airplane, mathematical model, polytropic, polytropic exponent ratio, sudden depressurization.