

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ДАВЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО ГАЗА ВНУТРИ НЕГЕРМЕТИЧНОГО ПРИБОРНОГО ОТСЕКА ВЫСОКООРБИТАЛЬНОГО КА

© 2022 г. А. А. Чиров¹, *, Н. Г. Белякова¹

¹Московский авиационный институт, Москва, Россия

*chiroff@mail.ru

Поступила в редакцию 11.12.2021 г.

После доработки 14.02.2022 г.

Принята к публикации 11.03.2022 г.

В статье представлены физико-математическая модель и результаты оценочных расчетов процесса газовой выделенности из конструкционных материалов, находящихся внутри негерметичного приборного отсека (НГПО) высокоорбитального КА. Также представлена модель динамики падения давления остаточного газа внутри НГПО, после прохождения активного участка полета и выхода КА на расчетную орбиту. Показано, что основной причиной значительной (2–3 нед.) продолжительности процесса снижения давления газа внутри НГПО до величины, допускающей включение высокочастотной и высоковольтной аппаратуры, является процесс газовой выделенности из конструкционных и лакокрасочных материалов, находящихся внутри НГПО. Интенсивность газовой выделенности, в свою очередь, зависит от диффузионных процессов веществ газовой выделенности внутри самих материалов. Анализ влияния геометрии вентиляционных отверстий на продолжительность снижения давления внутри НГПО, до необходимого уровня, указал на незначительность этого влияния. Представленные в статье физико-математические модели, дают возможность проводить оценки характерного времени снижения давления внутри НГПО до необходимого уровня, и тем самым осуществлять подбор материалов, находящихся внутри НГПО, с целью снижения периода достижения допустимого давления внутри НГПО.

DOI: 10.31857/S0023420622040033

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на практике нашли широкое применение высокоорбитальные КА, оснащенные приборными контейнерами (отсеками) негерметичного исполнения (НГПО). Эти контейнеры обычно изготавливаются прямоугольной или кубической формы. На боковых поверхностях контейнеров имеются специальные дренажные щели или отверстия, для выхода газа из внутренней полости. Согласно техническим условиям штатной работы аппаратуры КА (особенно высоковольтной и высокочастотной), находящейся внутри НГПО, ее допустимо включать только при снижении давления остаточного газа в контейнере до некоторой определенной величины (обычно $P \leq 10^{-2} - 10^{-3}$ Па).

Поскольку динамика процесса понижения давления в НГПО существенно зависит от его конструкции и применяемых материалов, находящихся в нем, то уже на стадии проектирования КА необходимо иметь метод оценочного расчета времени снижения давления внутри НГПО до необходимого уровня. Разработке модели динамики

снижения давления внутри НГПО и посвящена данная статья.

По предварительным оценкам на начальном этапе выхода КА на орбиту падение давления внутри приборного отсека с атмосферного до 1 Па происходит практически одновременно с падением внешнего давления. Далее, при достижении давления внутри НГПО ниже 1 Па режим течения газа в каналах вентиляционных отверстий становится молекулярным, и темп дальнейшего падения давления резко снижается. Течение внутри объема НГПО при этом является континуальным. При последующем снижении давления (до $0.1 - 10^{-2}$ Па) течение газа во внутреннем объеме НГПО становится переходным, а затем – свободномолекулярным [1]. При этих условиях на величину давления внутри приборного контейнера начинает оказывать существенное влияние процесс выделения газов из различных материалов приборных блоков, находящихся внутри контейнера, и с внутренних поверхностей самого контейнера [2].

Физико-математическая модель, описывающая динамику снижения давления в НГПО, представленная ниже, основывается на двух основных физических процессах:

1. Выделении газообразных летучих веществ из конструкционных материалов. Интенсивность выделения которых, определяется процессами диффузии внутри объемов всевозможных лакокрасочных покрытий и конструктивных материалов.

2. Предположении свободномолекулярного режима течения газа через вентиляционные отверстия НГПО, что справедливо при давлении $P \leq 1$ Па внутри и реализуемых на практике дренажных щелей $\delta = 0.5-5$ мм или отверстий $d = 2-10$ мм.

Модель построена на основе записи уравнения диффузии математической физики и обыкновенного дифференциального уравнения, описывающего баланса массы газа, поступающего в объем НГПО из расположенных в нем материалов, и массой газа, выходящего через вентиляционные отверстия. При этом давлением внешней окружающей КА среды пренебрегаем, так как к моменту выхода КА на орбиту $P_{\text{окр}} \ll P$.

В представленной модели также учитывается, что внутренняя атмосфера НГПО является многокомпонентной и полное давление в нем $P = \sum_{i=1}^n P_i$, где P_i – парциальное давление i -компоненты газа; n – число компонент газа, дающих существенный вклад в P .

1. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИФфуЗИИ И ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ЛЕТУЧИХ КОМПОНЕНТ ИЗ МАТЕРИАЛОВ НГПО

Более общая постановка задачи о газовой выделении из материалов и ее численное решение было осуществлено авторами работ [3, 4]. Но для выполнения оценочных расчетов, на практике применение указанной модели невозможно из-за отсутствия ряда индивидуальных физико-химических параметров диффузии, термической деструкции и газовой выделении реальных материалов. Поэтому здесь мы вынуждены говорить только об эффективных коэффициентах диффузии и десорбции – о параметрах, с помощью которых обычно описываются процессы, наблюдаемые при лабораторных и натуральных экспериментах.

Предлагаемая в данной работе физико-математическая модель диффузии и газовой выделении летучих компонент из материалов, находящихся в НГПО КА, в некоторой степени упрощена, и построена на следующих допущениях.

1. Толщина образца исследуемого материала, нанесенного на непроницаемую подложку, значительно меньше остальных линейных размеров, следовательно можно пренебречь краевыми эффектами и рассматривать одномерную задачу.

2. Эффективные коэффициенты диффузии и десорбции не зависят от времени, а определяются только температурой образца данного полимерного композиционного материала.

3. Термическая деструкция материала и химические реакции выделяющихся летучих компонент отсутствуют.

4. Материал испаряется со всей поверхности с одинаковой скоростью, которая для данного материала зависит только от интенсивности воздействующих факторов (вакуум, температура, радиация).

5. Газовыделение происходит только через границу материал-вакуум.

Учитывая выше приведенные допущения, процесс диффузии летучих компонент в реальных материалах может быть описан одномерным уравнением диффузии. Это однородное линейное уравнение в частных производных второго порядка. В этом случае постановка задачи записывается:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}; \quad t > 0, \quad x \in [0, l]. \quad (1)$$

Начальные условия:

$$U(x, 0) = R(x) \quad \text{при } x \in [0, l]. \quad (2)$$

Граничные условия:

$$\left(a^2 \frac{\partial U}{\partial x} + kU \right) \Big|_{x=l} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \text{при } t > 0, \quad (3)$$

где $U(x, t)$ – концентрация частиц диффузии в материале [мкм^{-3}]; t – время в секундах; l – толщина материала [мкм]; $a^2 = D$ – дифференциальный коэффициент диффузии [$\text{мкм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$]; k – эффективный коэффициент десорбции компоненты [$\text{мкм} \cdot \text{с}^{-1}$]; $R(x)$ – начальное распределение концентрации частиц диффузии в материале по толщине, в частном случае = const.

Плотность потока газовой выделении с поверхности материала $q(t)$ определяется по величине концентрации в поверхностном слое: $q(t) = kU(l, t)$.

Авторами данной работы было получено аналитическое решение поставленной задачи (1), (2), (3) классическим методом Фурье [5] в виде бесконечного ряда.

$$U(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\left(\frac{\mu_n a}{l}\right)^2 t} \cos \frac{\mu_n}{l} x \frac{2}{l} \left(\frac{2\mu_n}{2\mu_n + \sin(2\mu_n)} \right) \times \int_0^l R(\xi) \cos \left(\frac{\mu_n}{l} \xi \right) d\xi. \quad (4)$$

Если $R(x) \rightarrow R(\xi) = \text{const} = R$, решение будет иметь вид:

$$U(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\left(\frac{\mu_n a}{l}\right)^2 t} \cos \frac{\mu_n}{l} x \frac{4R \sin \mu_n}{2\mu_n + \sin \mu_n}, \quad (5)$$

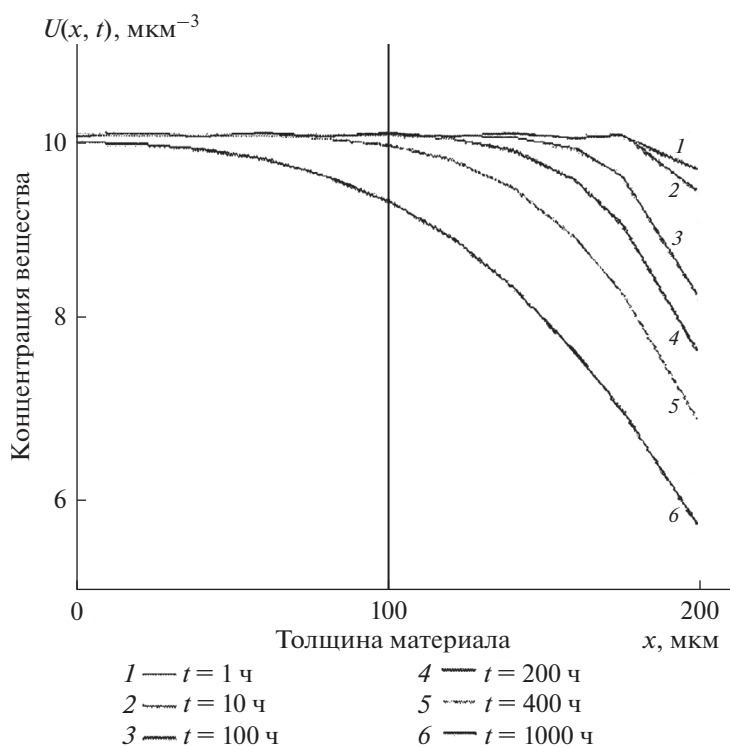


Рис. 1

где μ_n — корни уравнения $\operatorname{ctg} \mu = \frac{\mu}{p}$; $\mu = \lambda l$; $hl = p$;

$h = \frac{k}{D}$; λ — собственные числа задачи Штурма—Лиувилля. Эта задача возникает в процессе решения поставленной задачи методом Фурье.

Преимущество полученного аналитического решения задачи (1), (2), (3) перед численными методами, заключается в том, что оно позволяет значительно проще проводить анализ влияния различных факторов на исследуемый процесс, причем с любой необходимой точностью. Этот анализ был проведен. На рис. 1 и 2 представлены, в качестве примера, графики изменения $U(x, t)$, подсчитанные по формуле (5), и $q(t)$. Расчеты были проведены при: $R = 10$ мкм⁻³; $k = 0.01$ мкм · с⁻¹; $D = 0.005$ мкм² · с⁻¹; $l = 200$ мкм.

Анализ представленной математической модели показал, что именно процесс диффузии частиц газовой выделения в материалах, находящихся внутри НГПО, является определяющим фактором значительной длительности газовой выделения. В свою очередь, газовой выделение летучих компонент из конкретных материалов существенным образом определяется коэффициентами D и k , в меньшей степени $R(x)$. Также отметим, что зависимость $q(t)$, показанная на рис. 2, близка к экспоненциальной зависимости. Такая зависимость

подтверждается многими экспериментальными данными для широкого класса материалов [2, 6].

В представленной ниже модели — “Динамика давления внутри НГПО” используется экспонен-

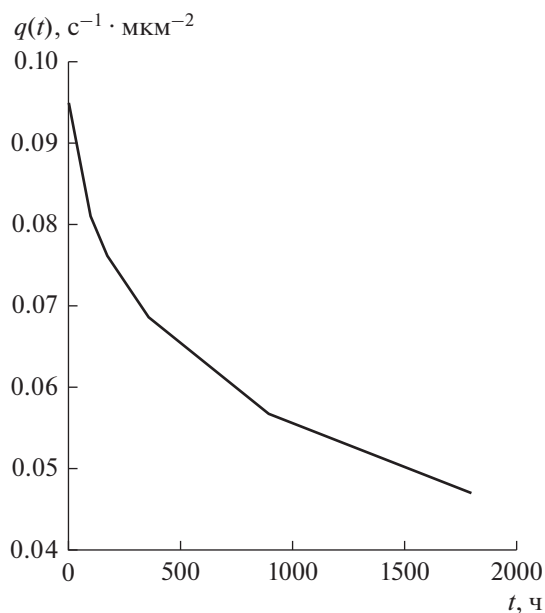


Рис. 2

циальная зависимость газовыделения от времени с поверхности различных материалов.

2. УРАВНЕНИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ДАВЛЕНИЯ ВНУТРИ НГПО КА

В начале рассмотрим упрощенную, в некоторой степени, ситуацию для получения уравнения динамики давления в НГПО, которая поясняется рис. 3. Внутри замкнутого корпуса НГПО (1) находятся приборные блоки и поверхности (2), с общей площадью газовыделения F , способные выделять однородную газообразную компоненту в свободный от приборных блоков объем V контейнера (3). Внутри НГПО газ имеет в данный момент времени t давление P и температуру T , постоянную по величине в течении всего времени. Выход газа из внутреннего объема осуществляется только через отверстие-щель (4). Давление окружающей среды обозначено – $P_{окр}$.

Примем характерный размер щели таким, что при любом возможном значении давления внутри контейнера P через щель выходит газ при молекулярном режиме течения.

В каждый фиксированный момент времени, согласно уравнению состояния идеального газа, внутри контейнера находится газ массой

$$G = VPM / (RT), \quad (6)$$

где M – молярный вес газа; R – универсальная газовая постоянная; T – температура газа.

Запишем изменение массы газа внутри контейнера за достаточно малый промежуток времени Δt , как разность между двумя противоположными процессами: поступления в объем V контейнера массы газа интенсивностью $\dot{G}_{П}$ за счет газовыделения с поверхностей различных материалов, находящихся внутри НГПО, и выхода массы газа интенсивностью $\dot{G}_{В}$ из внутреннего объема V НГПО через щель.

$$\Delta G = \dot{G}_{П}\Delta t - \dot{G}_{В}\Delta t. \quad (7)$$

В вакуумной технике известно [6, с. 377], что в большинстве случаев скорость удельного газовыделения с поверхности при постоянной температуре зависит от времени и подчиняется экспоненциальному закону.

Исходя из этой зависимости, запишем:

$$\dot{G}_{П} = g_0 \exp(-ht)F, \quad (8)$$

где g_0 – начальная скорость удельного газовыделения с поверхности материала [$\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$]; F – площадь газовыделяющей поверхности; h – константа, зависящая от рода материала и предварительной его технологической обработки.

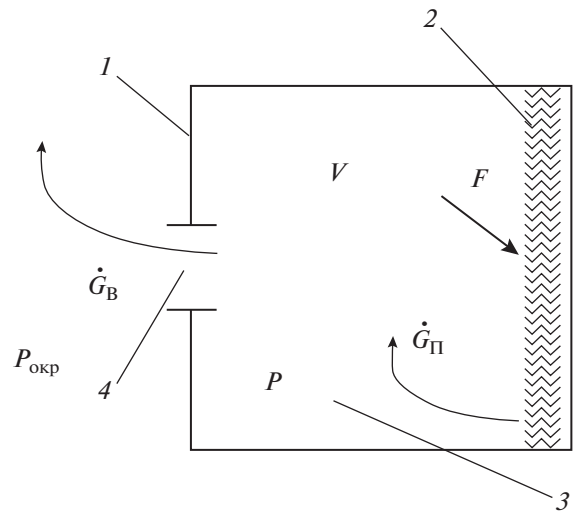


Рис. 3

Интенсивность выхода массы газа из НГПО через щель в космическое пространство, при условии молекулярного режима течения газа через щель, определяется [7]:

$$\dot{G}_{В} = WF_{щ} \left(\frac{M}{2\pi RT} \right)^{1/2} (P - P_{к}), \quad (9)$$

где W – коэффициент Клаузинга данной щели; $F_{щ}$ – площадь щели в плане; $P_{к}$ – давление окружающей космической среды.

Так как на высотах от поверхности Земли уже порядка 500 км $P_{к} = 10^{-4} - 10^{-6}$ Па, что обеспечивает выполнение неравенства $P_{к} \ll P$, то величиной $P_{к}$ в выражении (4) можно пренебречь.

Подставим выражения (8) и (9) в (7), разделим правую и левую части последнего на Δt и перейдем к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$. При этом, в левой части равенства имеем интенсивность изменения массы газа внутри НГПО \dot{G} , выражение для которой получаем путем дифференцирования по времени выражения (6).

В результате всех преобразований и соответствующей группировки членов из (7) в конечном итоге получаем уравнение:

$$\frac{VM}{RT} \frac{dP}{dt} + WF_{щ} \left(\frac{M}{2\pi RT} \right)^{1/2} P = g_0 \exp(-ht) F. \quad (10)$$

Таким образом, полученное уравнение (10) описывает процесс изменения давления газа внутри НГПО спустя нескольких часов после вывода КА в космическое пространство.

Из условий удобства записи решения уравнения (10) введем обозначения:

$$A = \frac{VM}{RT}; \quad B = WF_{щ} \left(\frac{M}{2\pi RT} \right)^{1/2}; \quad D = g_0 F. \quad (11)$$

В этом случае уравнение (10) примет вид:

$$A \frac{dP}{dt} + BP = D \exp(-ht). \quad (12)$$

Причем, все коэффициенты A , B , D в уравнении являются постоянными величинами.

Полученное уравнение (10), или (12), является обыкновенным линейным дифференциальным уравнением 1-ого порядка, его аналитическое решение имеет вид:

$$P = \frac{D}{B - Ah} \exp(-ht) + \left(P_0 - \frac{D}{B - Ah} \right) \exp(-Bt/A). \quad (13)$$

В решении (13) P_0 является начальным давлением ≤ 1 Па, это верхний предел давления в НГПО, с которого начинается отсчет времени процесса падения давления до необходимого уровня и, вообще, достоверно работает вся модель. Величину P_0 для каждого конкретного случая можно оценить из рассмотрения равенства выражений (8) и (9) при условии $t = 0$. Это равенство определяет равновесное значение давления в контейнере, которое зависит только от геометрических параметров НГПО и интенсивности газовыделения из конструктивных материалов. Из указанных условий получаем:

$$P_0 = \frac{g_0 F}{W F_{\text{ш}}} \left(\frac{2\pi RT}{M} \right)^{1/2}. \quad (14)$$

Ценность записи уравнения (10), (12) заключается еще в том, что на его основе можно записать совокупность уравнений, учитывающую специфику как конструкции контейнера, так и газовыделяющих материалов внутреннего содержания НГПО.

В реальных условиях собственная внутренняя атмосфера НГПО является многокомпонентной, и в этом случае полное давление в контейнере есть:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i, \quad (15)$$

где P_i – парциальное давление i -ой газовой компоненты, n – число компонент газовыделения, вносящих ощутимый вклад в величину P .

Следует также учитывать, что i -тая газовая компонента может выделяться одновременно из нескольких разнородных материалов j , находящихся в контейнере. Таких материалов может быть m и каждый из них обладает своими параметрами: g_{0ij} , h_{ij} и F_j .

При необходимости, в уравнение (10), (12) можно внести еще одно уточнение, касающееся дренажных отверстий в корпусе контейнера – щелей. В реальной конструкции корпуса эти отверстия могут быть различной формы и размеров, а,

следовательно, характеризоваться соответствующими параметрами W_k и $F_{\text{ш}k}$.

Учитывая все выше изложенное, наиболее полно процесс динамики давления внутри приборного контейнера описывается совокупностью дифференциальных уравнений для i -той компоненты:

$$\begin{aligned} \frac{VM_i dP_i}{RT dt} + \left(\sum_{k=1}^l W_k F_{\text{ш}k} \right) \left(\frac{M_i}{2\pi RT} \right)^{1/2} P_i = \\ = \sum_{j=1}^m (g_{0ij} \exp(-h_{ij}t) F_j), \end{aligned} \quad (16)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$.

Для того, чтобы система (16) была замкнутой, ее необходимо дополнить выражением (15) и начальными условиями при $t = 0$:

$$P_0 = \sum_{i=1}^n P_{0i} \leq 1 \text{ Па}, \quad (17)$$

где P_{0i} – равновесное парциальное давление i -той компоненты.

На основе полученного решения (13) уравнения (12) запишем аналитическое решение совокупности уравнений (16):

$$\begin{aligned} P_i = \sum_{j=1}^m \left(\frac{D_{ij}}{B_i - A_i h_{ij}} \exp(-h_{ij}t) \right) + \\ + \left(P_{0i} - \sum_{j=1}^m \frac{D_{ij}}{B_i - A_i h_{ij}} \right) \exp\left(-\frac{B_i t}{A_i}\right), \end{aligned} \quad (18)$$

где

$$\begin{aligned} A_i = \frac{VM_i}{RT}; \quad B_i = \sum_{k=1}^l W_k F_{\text{ш}k} \left(\frac{M_i}{2\pi RT} \right)^{1/2}; \\ D_{ij} = g_{0ij} F_j. \end{aligned} \quad (19)$$

Для осуществления полного и всестороннего исследования записанной динамической модели (16)–(19) давления в НГПО КА необходимо иметь большой объем информации о параметрах газовыделения материалов, находящихся внутри НГПО. Отсутствие в значительной степени такой информации на стадии проектирования КА затрудняет проведение необходимых исследований динамики давления внутри НГПО. Не смотря на упомянутые трудности, в работе [8] есть ссылка на существование программного комплекса, позволяющего в некоторой степени провести оценочные расчеты по предлагаемой математической модели для комплекса материалов. В то же время, допуская использование некоторых усредненных значений параметров материалов и используя упрощенную (однокомпонентную) запись модели динамики давления (10)–(14), представляется возможным осуществить аналитический анализ влияния различных параметров газовыделения

материалов на динамику давления в НГПО реального КА. Такой анализ представлен ниже.

3. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ГЕОМЕТРИИ ДРЕНАЖНЫХ ЩЕЛЕЙ НА ДИНАМИКУ ДАВЛЕНИЯ В ПРИБОРНОМ КОНТЕЙНЕРЕ КА

Для осуществления исследований влияния параметров газовыделения материалов и геометрии щелей на период времени падения давления внутри НГПО с $P = 1$ Па до необходимого (для включения аппаратуры) уровня $P = 10^{-2} - 10^{-3}$ Па был выбран некоторый характерный КА, обладающий НГПО прямоугольной формы с габаритными размерами $2.0 \times 1.35 \times 1.35$ м. На всех ребрах контейнера имеются дренажные щели. Толщина стенки контейнера, определяющая глубину щели, принималась $= 8$ мм. Площадь внутренних поверхностей контейнера F , с которых происходит газовыделение, принималась условно $F \approx 10F_0$, где F_0 – площадь поверхности оболочки контейнера. При исследованиях принималось, что в контейнере находится материал только одного конкретного типа и выделяющаяся из материала газовая составляющая является однокомпонентной с молярной массой $M = 40$ и температурой $T = 310$ К. Остальные параметры газовыделения материалов – g_0 , h и ширина щели δ при исследовании модели динамики давления в контейнере варьировались. Необходимо отметить, что с изменением величины δ , при постоянстве глубины щели, меняется и величина коэффициента Клаузинга W [7]. Эта зависимость учитывалась в вычислениях.

Расчеты динамики падения давления во внутренней полости НГПО осуществлялись по формуле (13), величина равновесного давления P_0 находилась из (14). В начале было проведено исследование влияния параметров газовыделения материалов g_0 и h на динамику снижения давления внутри НГПО при ширине щели $\delta = 1$ мм. В качестве газовыделяющих материалов были выбраны четыре характерных материала с значительным различием g_0 , h применяемых на реальных КА [2], представленные в табл. 1.

Результаты вычислений приведены на графике рис. 4. По оси ординат отложена величина P внутри НГПО в логарифмическом масштабе [Па], по оси абсцисс – время t достижения соответствующего давления в часах. Момент $t = 0$ соответствует значению давления внутри контейнера P_0 .

Приведенные результаты расчетов показывают, что даже сравнительно небольшое увеличение параметра h , резко увеличивает наклон кривой и, в результате, значительно сокращается пе-

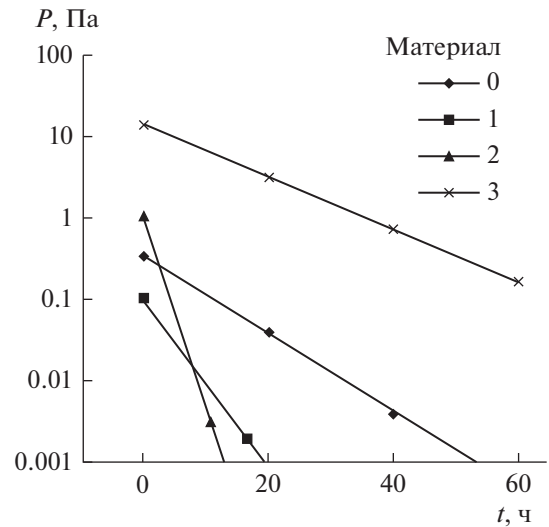


Рис. 4

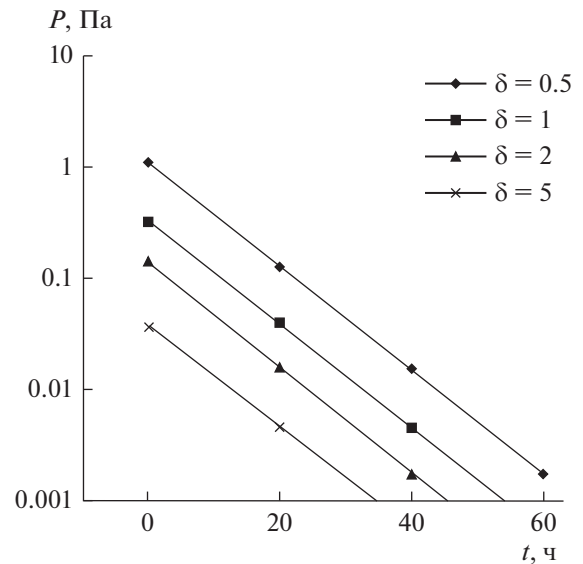


Рис. 5

риод падения давления до требуемого уровня внутри контейнера. Величина параметра g_0 оказывает существенное влияние на равновесное начальное давление в контейнере P_0 , которое принимает большее значение с возрастанием g_0 . Кривая на графике соответствующая материалу (3), который обладает сравнительно высоким значением параметра газовыделения g_0 , указывает на получение наибольшего значения P_0 .

На значение начального равновесного давления P_0 оказывает существенное влияние величина дренажной щели δ . На графике рис. 5 представлены зависимости $P = f(t)$ для различных $\delta = 0.5$; 1.0; 2.0 и 5.0 мм. Эти зависимости получены для

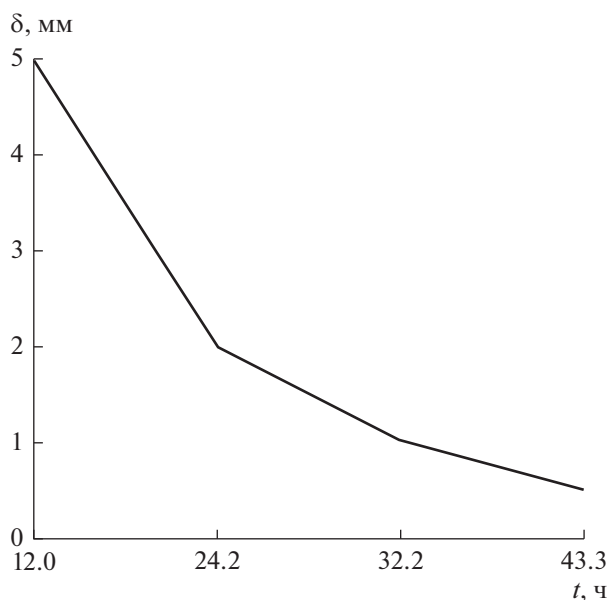


Рис. 6

материала (0). Отметим, что с увеличением δ происходит параллельное смещение кривых вниз, и, как следствие, снижение P_0 и t достижения необходимого допустимого давления в контейнере.

Зависимость периода времени падения давления в контейнере с P_0 до $P = 10^{-2}$ Па от величины щели δ представлена на рис. 6. Кривая получена также для параметров материала (0). Как было показано выше, для данного материала величина P_0 зависит от δ . Следовательно, полное время падения давления с $P = 1$ Па (где начинает работать предлагаемая модель) до $P = 10^{-2}$ Па внутри НГПО происходит за большее время.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная в данной статье модель динамики давления внутри НГПО и проведенные исследования этой модели для некоторого характерного КА и материалов, содержащихся внутри контейнера, позволили выяснить, что основной причиной наличия относительно продолжительного периода процесса снижения давления внутри контейнера до необходимого уровня является интенсивность процессов диффузии летучих веществ и их выделение из материалов и зависимости этих процессов от времени.

Использование рассматриваемой модели даже в упрощенном варианте позволяет получать достоверную оценку времени достижения необходимого давления внутри НГПО КА для широкого диапазона геометрии НГПО и большого разнообразия материалов, находящихся внутри, а также выявлять степень влияния геометрии дренажных устройств.

Представленная модель динамики давления НГПО и проведенные расчетные исследования модели указывают на необходимость проведения исследований процессов газовой выделений из материалов, размещаемых внутри. Наибольший интерес представляет газообразная компонента из общей массопотери материалов, хотя при решении данной задачи следует учитывать и легкоконденсирующаяся компонента, так как она также участвует в рассматриваемом процессе образования газовой атмосферы в НГПО, но с некоторым замедлением распространения в объеме НГПО.

Следует также отметить, что рассмотренная модель динамики давления в НГПО имеет несколько направлений в совершенствовании и развитии. В частности, представляется возможным провести учет процесса замедления продвижения газовой компоненты по объему контейнера к дренажным отверстиям из-за присутствия в нем большого количества приборных блоков. Но учет этого процесса, по-видимому, будет ощутимым только при молекулярном режиме движения частиц газовой компоненты внутри самого контейнера, т.е. при $P < 10^{-2}$ Па.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берд Г. Молекулярная газовая динамика / Под ред. Белоцерковского О.М., Когана М.Г. М.: Мир, 1981.
2. Попов Ю.А. и др. Кинетика газовой выделений летучих конденсирующихся веществ из органических материалов при длительном термовакuumном воздействии. Сборник трудов VIII Всесоюзной конференции по динамике разреженных газов, 1985.
3. Костюков В.И., Хасанишин Р.Х. К вопросу моделирования газовой выделений материалами покрытий КА при термовакuumном воздействии // Космонавтика и ракетостроение. 2002. Т. 28. № 3. С. 155–163.
4. Хасанишин Р.Х. Математическое моделирование процессов газовой выделений полимерными композиционными материалами космического назначения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук. М.: Объединенный институт высоких температур РАН, 2004.
5. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. М.: Высшая школа, 1970.
6. Пипко А.И., Плисковский В.Я., Пенчко Е.А. Конструирование и расчет вакуумных систем. М.: Энергия, 1970.
7. Кошмаров Ю.А., Рыжов Ю.А. Прикладная динамика разреженного газа. М.: Машиностроение, 1977.
8. Надирадзе А.Б., Чиров А.А., Шапошников В.В. и др. Оценка времени обезгаживания негерметичного приборного отсека космического аппарата // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2007. № 1. С. 95–98.