

УДК 629.7.048:612.2

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РИСКА РАЗВИТИЯ
ДЕКОМПРЕССИОННЫХ РАССТРОЙСТВ
НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ
РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ ГЕРМОКАБИНЫ**

Т.В. Матюшев, А.С. Рыбина, А.Д. Малышев, И.Д. Максимова,
А.В. Федяев, К.В. Гвоздкова, А.С. Немцева, М.А. Шеина,
А.Е. Белявский

Докт. биол. наук, канд. техн. наук Т.В. Матюшев; А.С. Рыбина;
А.Д. Малышев; И.Д. Максимова; К.В. Гвоздкова; А.С. Немцева;
М.А. Шеина; докт. техн. наук, доц. А.Е. Белявский (МАИ)
Герой Российской Федерации, летчик-космонавт Российской Федерации,
космонавт-испытатель 3 класса отряда космонавтов ГК «Роскосмос»
А.В. Федяев (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В статье представлена методика анализа режимов декомпрессии при разгерметизации, сформированная на основе комплексной имитационной модели газодинамических процессов. В результате вычислительных экспериментов, имитирующих декомпрессию, проведен теоретический расчет параметров декомпрессии в зависимости от параметров полета и конструктивных особенностей гермокабины. На основе этих вычислительных экспериментов разработана методика оценки переносимости декомпрессии, учитывающая различные уровни переносимости воздействия, позволяющая на стадии проектирования произвести рациональный выбор герметических и газодинамических параметров кабины.

Ключевые слова: разгерметизация, коэффициент расхода, декомпрессия, стратосфера, имитационная модель, физиологические факторы, высотно-декомпрессионная болезнь, гипоксия

**Risk Prediction of Decompression Disorders based on the
Simulation Model of a Cabin Depressurization. T.V. Matyushev,
A.S. Rybina, A.D. Malyshev, I.D. Maksimova, A.V. Fedyaev,
K.V. Gvozdskova, A.S. Nemtseva, M.A. Sheina, A.E. Belyavsky**

The paper presents a methodology to analyze the decompression modes during depressurization developed on the basis of a complex simulation model of gas-dynamic processes. As a result of computational experiments, simulating decompression, theoretical calculation of decompression parameters depending on flight parameters and design features of the pressurized cabin is carried out. On the basis of these computational experiments, a methodology of assessing decompression tolerance has been developed, taking into account different levels of exposure tolerance, which makes it possible to make a rational choice of hermetic and gas-dynamic parameters of the cabin at the design stage.

Keywords: depressurisation, flow coefficient, decompression, stratosphere, simulation model, physiological factors, altitude-decompression sickness, hypoxia

Успех космических полетов в значительной степени зависит от степени обеспечения безопасности экипажа на всех этапах полета, в том числе и на стратосферном участке, на этапах старта и посадки. Орбитальный полет невозможен без герметичной кабины (ГК), параметры внутренней среды которой регулируются так, чтобы обеспечить не только сохранение жизни, но и поддержание работоспособности на необходимом уровне. Актуальность проблемы декомпрессионной безопасности сохраняется с первых космических полетов до настоящего времени. Пример этому гибель экипажа «Союза-11» 30 июня 1971 г.; утечки воздуха из российского модуля на МКС, продолжающиеся несколько лет. Одним из способов замедления декомпрессии и поддержания в кабине давления выше критического уровня при аварийной разгерметизации является увеличение массовой подачи из имеющегося в запасе чистого кислорода или воздуха.

С физиологической точки зрения для учета влияния опасных для организма факторов на этапе проектирования необходим методический и алгоритмический аппарат анализа систем обеспечения жизнедеятельности (СОЖ). Для этого необходимо разработать методику оценки переносимости декомпрессии человеком при вынужденной разгерметизации, учитывающую:

- технические возможности и ограничения существующих средств разработки и регулирования параметров внутренней среды в ГК космического аппарата (КА);
- физиологические эффекты, воздействующие на экипаж в аварийных ситуациях;
- потенциальные технические возможности использования средств и способов оптимизации условий деятельности экипажа.

Перспективным способом оптимизации режимов регулирования давления в ГК может стать математическое моделирование, учитывающее возможности и ограничения перераспределения подачи воздуха для компенсации появившейся утечки. Поэтому цель работы – разработка методики оценки переносимости декомпрессии человеком в космическом полете при разгерметизации на основе комплексной имитационной модели газодинамических процессов. Данная методика позволит теоретически оценить величину резервного времени в зависимости от уровня переносимости воздействия.

Для достижения поставленной цели нам необходимо было решить следующие задачи:

1. На основе существующих подходов сформировать имитационную модель декомпрессии при разгерметизации, позволяющую учитывать влияние декомпрессии на организм в зависимости от параметров полета, характеристик ГК и режимов функционирования системы обеспечения газового состава (СОГС).
2. Провести вычислительные эксперименты, имитирующие разгерметизацию кабины при разных величинах коэффициента утечки. В ходе проведения

вычислительных экспериментов определить время декомпрессии, величину перепадов давления и массовой подачи при изменении давления в ГК.

3. На основе вычислительных экспериментов разработать методику оценки переносимости декомпрессии человеком, учитывающую различные уровни переносимости воздействия.

Имитационная модель декомпрессии ГК при разгерметизации

Современные самолеты оборудованы кабинами компрессорно-вентиляционного типа, для которых допустимы значительные величины утечки воздуха из-за перепада давлений внутри и вне ее. Иначе обстоит дело с герметичностью обитаемых отсеков КА, поскольку такие кабины работают по циклу полностью замкнутой регенерации, утечки из них воздуха должны быть исключены, так как запас воздуха в любом физическом состоянии (сжатом и жидком) даже при минимальной негерметичности не может обеспечить безопасности полета в течение продолжительного времени.

Влияния условий внешней среды на экипаж КА во многом зависит от величины массовой подачи. Подход к выбору этой величины для кабин самолетов и космических кораблей различен. В первом случае расчет величин массовой подачи ведется на основе заданного диапазона температур воздуха, так как основная задача в этом случае сводится к обеспечению необходимого температурного режима, во втором случае – на основе поддержания в необходимых пределах парциального давления кислорода и диоксида углекислого газа.

Проблема обеспечения безопасности при разгерметизации имеет две жизненно важные стороны – физиологическую и техническую. Следовательно, только комплекс мероприятий, предусматривающих как физиологическую, так и прочностную защиту, может обеспечить безопасность полета и сохранение жизни экипажа, а следовательно, и исследование этой проблемы должно быть комплексным. Именно концепция комплексного рассмотрения всей проблемы в целом как с физиологической, так и с технической точек зрения положена в основу исследования.

Для решения комплексной задачи разработки имитационной модели декомпрессии при разгерметизации ГК необходимо решить три взаимосвязанные и взаимозависимые подзадачи:

- провести анализ существующих подходов к моделированию декомпрессии при разгерметизации кабины;
- разработать модель декомпрессии при разгерметизации;
- сформировать модель респираторной системы организма.

Анализ существующих подходов моделирования декомпрессии при разгерметизации показал, что процесс истечения газа через отверстие из ограниченной емкости не является установившимся во времени и должен

рассматриваться как нестационарный процесс, обусловленный в первую очередь непрерывным изменением состояния газа, а также волновой природой рассматриваемого явления. Тем не менее зависимость расхода газа через отверстие может быть хорошо аппроксимирована формулами, разработанными в рамках теории квазиустановившихся процессов. Сравнение результатов расчетов массы и массового расхода во времени по волновой теории и теории квазиустановившихся процессов показало, что зависимость массы от времени при звуковом истечении газа из сосуда конечных размеров может быть хорошо аппроксимирована с применением положений теории квазиустановившихся процессов с использованием поправочных коэффициентов (коэффициента расхода), что позволяет заменить рассматриваемый нестационарный процесс мнимо стационарным.

Математические модели процессов истечения воздуха из отсека представлены в работах [1–5]. В этих публикациях можно выделить подходы В.В. Олизарова, Ю.С. Илюшина [1], М.Г. Аكوпова [2] и Л.Т. Быкова, М.С. Егорова, П.В. Тарасова [3–5], основанные на позициях квазистационарной теории. В этих работах были получены следующие основные математические закономерности истечения из ГК: выведены эмпирические формулы для определения расхода и давления газа при докритическом и закритическом режиме истечения; выведены приближенные формулы для расчета времени декомпрессии ГК при постоянном давлении в атмосфере и изотермическом изменении параметров.

В работе Л.Т. Быкова [3] представлены удобные для предварительных расчетов безразмерные зависимости декомпрессии ГК воздушного судна (ВС) для случая изотермического состояния при истечении газа в среду с постоянным давлением.

Во всех отмеченных выше работах, кроме В.С. Ивлентьева [5] и Л.Т. Быкова [4], кабина рассматривалась как один герметичный объем, а процесс истечения газа происходил в среду с постоянными параметрами, т. е. в предположении, что высота полета в ходе процесса разгерметизации не изменяется. Однако ГК могут быть разделены перегородками на отдельные сообщающиеся друг с другом секции или герметичные отсеки.

При качественном сравнении наиболее адекватным является подход В.В. Олизарова, Ю.С. Илюшина, при расчете по которому давление в конечной точке моделирования составило 42 мм рт. ст., что соответствует имитируемой высоте 20 км.

При расчете по подходам М.Г. Аكوпова и Л.Т. Быкова, М.С. Егорова, П.В. Тарасова соответственно 38 и 78 мм рт. ст., что искажает реальный процесс истечения газа, так как давление в конечной точке не может быть больше или меньше атмосферного. Это приводит к тому, что процесс истечения продолжается при равенстве давлений в кабине и атмосфере. Это противоречит физическому смыслу процесса. Поэтому подход В.В. Олизарова, Ю.С. Илюшина мы приняли как базовый.

При разработке имитационной модели декомпрессии ГК при разгерметизации рассматривали ГК как замкнутый объем, содержащий газовую среду, основными параметрами которой являются давление, объем и температура, плотность и влажность. Основной задачей теории истечения газа является установление связи между расходом и параметрами газа объема и среды, в которую происходит истечение. Теоретические расчеты параметров истечения через отверстие дают величины, отличающиеся от экспериментальных данных. Это различие может зависеть от таких причин, как трение воздуха о края отверстия или вследствие образования завихрений. С помощью коэффициента расхода в работе [6] была сделана попытка учесть эти отклонения введением так называемой эквивалентной площади отверстия, которая меньше истинного геометрического поперечного сечения отверстия:

$$f_3 = S_y \cdot k_{\text{расх}}, \quad (1)$$

где f_3 – эквивалент площади;

S_y – площадь отверстия утечки, м²;

$k_{\text{расх}}$ – коэффициента расхода.

Использование гипотезы квазистационарности в инженерной постановке полностью оправдано и необходимо, т. к. упрощает решение и способствует достижению цели при сохранении достаточной точности практического результата. Исходя из этого, при исследовании приняты следующие допущения:

- термодинамический процесс разгерметизации ГК КА рассматривался как последовательность квазиустановившихся режимов;
- удельные теплоемкости воздуха считались постоянными в течение всего времени разгерметизации;
- воздух принимался за идеальный газ;
- адиабатическое изменение параметров газа в отверстии не влияло на характер изменения состояния газа в объеме;
- в ГК везде реализовалось равномерное распределение давления и температуры в каждый фиксированный момент времени;
- перемещение газа в объеме ГК и локальное ускорение его в отверстии разгерметизации не учитывалось, т. е. состояние воздуха в кабине считается заторможенным.

Основными факторами, определяющими скорость и степень декомпрессии, являются: объем кабины, площадь отверстия, перепад давлений. Количество газа, вытекающего из кабины через неплотности, зависит от суммы площадей всех отверстий, через которые происходит утечка. Для расчета утечки реальная кабина заменялась моделью, у которой имеется лишь одно отверстие для истечения воздуха $S_y = \sum S_i$. Таким образом ГК схематично может быть представлена в виде некоторого герметичного объема с отверстием постоянного сечения, через которое вытекает воздух, причем расход

равен утечке. Пользуясь такой моделью, можно определить зависимость давления в кабине от времени, в течение которого происходит декомпрессия [7].

При формировании модели разгерметизации кабины в комплексную модель нами были включены следующие частные модели:

– модель декомпрессии на основе базовой модели В.В. Олизарова, Ю.С. Илюшина;

– модель респираторной системы, представленная в публикации [8].

При построении модели декомпрессии рассматривались четыре участка: 1 – внешняя среда (атмосфера); 2 – первый отсек – ГК; 3 – технический отсек; 4 – легкие человека. Формализованное описание процесса разгерметизации было дополнено:

– условиями, определяющими параметры атмосферы, позволяющими учесть их влияние при изменении высоты на характер истечения газов:

$$\left. \begin{aligned} t_h &= t_0 + \alpha \cdot h; p_h = p_0 \cdot \left(1 - \frac{h}{44300}\right)^{1/\alpha R}; p_h = p_0 \cdot \left(1 - \frac{h}{44300}\right)^{\frac{1}{\alpha R} - 1} \text{ при } h < 11000 \text{ м;} \\ t_h &= -56,5 \text{ }^\circ\text{C}; p_h = 169,4 \cdot e^{-\frac{h-1100}{6340}}; p_h = 0,3636 \cdot e^{-\frac{h-1100}{6340}} \text{ при } h > 11000 \text{ м;} \end{aligned} \right\} (2)$$

– введением переменного коэффициента расхода, позволяющего повысить точность вычислений [7]:

$$\left. \begin{aligned} k_{\text{расх}} &= 0,55 \text{ при } k_{\text{расх}} \leq 0,55; \\ k_{\text{расх}} &= -0,2785 \cdot \left(\frac{p(j-1)}{p(j)}\right)^2 - 0,065 \cdot \left(\frac{p(j-1)}{p(j)}\right) + 0,852 \text{ при } 0,55 \leq k_{\text{расх}} \leq 0,95; \\ k_{\text{расх}} &= 0,95 \text{ при } k_{\text{расх}} \geq 0,95; \end{aligned} \right\} (3)$$

– соотношениями, позволяющими определить время декомпрессии, представленными в статье В.В. Тарасова [9];

– введением в уравнение [7] и [9] для определения величины давлений изменение массовой подачи ($G_{\text{пер}}$):

$$G_{\text{пер}}(j) = k_{\text{проп}} \cdot \frac{V_k(j) \cdot (p_{\text{пер}} - p_k(j))}{R \cdot T_k(j)}, \quad (4)$$

где V_k – объем кабины, м³;

$p_{\text{пер}}$ – заданное давление, Па;

p_k – давление в кабине, Па;

T_k – температура кабины, °К;

R – газовая постоянная воздуха,

$j = 1, 2, 3$ (где 1 – атмосфера; 2 – ГК; 3 – легкие человека);

– введением нового компонента – легкие человека.

Основными переменными параметрами, определяющими состояние газовой среды в ограниченном пространстве, являются давление, объем

и температура, плотность и влажность. Эквивалентная площадь утечки определялась по формуле (1). Температура воздуха в ГК по формуле из работы [1]:

$$T_k(j) = T_0 \cdot \left(\frac{p_k(j,1)}{p_k(j)} \right)^{\frac{1-n}{n}}. \quad (5)$$

При рассмотрении процесса истечения газов из сосудов неограниченной емкости теорией установлена определенная зависимость между расходом газа, площадью проходного отверстия, параметрами находящегося в кабине газа и параметрами внешней среды. Исходные уравнения будут иметь следующий вид:

– при закритическом истечении $p(j)/p(j-1) \geq 1,89$:

$$G(j) = \frac{f_3(j) \cdot a \cdot p(j)}{\sqrt{T_k(j)}}, \quad (6)$$

$$\frac{dp(j)}{dt} = \frac{R \cdot T_k(j)}{V_k(j)} \cdot (G(j+1) + G_{\text{пер}}(j)) - \frac{a \cdot R \cdot \sqrt{T_k(j)} \cdot p(j)}{N_y(j)}, \quad (7)$$

где $N_y(j) = V_k(j)/f_3(j)$; $a = \sqrt{\frac{k}{R} \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$;

– при докритическом истечении $p(j)/p(j-1) \leq 1,89$:

$$G(j) = \frac{b}{\sqrt{T_k(j)}} \cdot f_3(j) \cdot p(j) \cdot \sqrt{\left(\frac{p(j-1)}{p(j)} \right)^{\frac{2}{k}} \cdot \left(1 - \left(\frac{p(j-1)}{p(j)} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)}; \quad (8)$$

$$\frac{dp(j)}{dt} = \frac{R \cdot T_k(j)}{V_k(j)} \cdot (G(j+1) + \Delta G_{\text{пер}}(j)) - \frac{b_1 \cdot n \cdot R \cdot \sqrt{T_k^{\text{док}}(j)} \cdot p(j)^{\frac{3 \cdot n - 1}{2 \cdot n}}}{N_y \cdot p(j)^{\frac{n-1}{2 \cdot n}}}, \quad (9)$$

где $b = \sqrt{\frac{2}{R} \cdot \left(\frac{k}{k-1} \right)}$; $b_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{R \cdot (k-1)}} \cdot \left(\frac{p(j-1)}{p(j)} \right)^{1/k} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{p(j-1)}{p(j)} \right)^{\frac{k-1}{k}}}$.

Величина утечки определяет скорость изменения давления газовой среды в кабине, которая оказывает вполне определенное влияние на жизнедеятельность экипажа. Чем меньше объем ГК или чем больше размеры отверстия, тем быстрее произойдет декомпрессия. Продолжительность времени, в течение которого газы покинут кабину, имеет жизненное значение в связи с понижением в кабине парциального давления азота, ведущего к развитию высотной декомпрессионной болезни (ВДБ). В соответствии с этим полное время декомпрессии определялось суммой:

$$t_{\text{дек}} = t_{\text{закр}} + t_{\text{докр}}, \quad (10)$$

где $t_{\text{закр}}$ – время закритического истечения; $t_{\text{докр}}$ – время докритического истечения.

Время декомпрессии определялось по формулам (11–15), представленным в работе [9]:

$$\pi_0(j) = \frac{p(j,1)}{p(j)}, \quad \pi_{\text{кр}} = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad a_0 = \sqrt{k \cdot R \cdot T_0}, \quad \text{где } K_a(j) = \frac{V_k(j)}{f_3(j) \cdot a_0}; \quad (11)$$

$$t_{\text{закр}}^1(j) = K_a(j) \cdot \frac{2}{k-1} \cdot \sqrt{\pi_{\text{кр}}^{\frac{k+1}{k}}} \cdot \sqrt{\left(\frac{\pi_0(j)}{\pi_{\text{кр}}}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1} \quad \text{при } \pi_0(j) > \pi_{\text{кр}}; \quad (12)$$

$$t_{\text{закр}}(j) = t_{\text{закр}}^1(j) + K_a(j) \cdot \pi_{\text{кр}}^{0,355 \cdot \frac{2-k}{k}} \cdot \sqrt{\pi_{\text{кр}}^{\frac{k-1}{k}}} \quad \text{при } \pi_0(j) = \pi_{\text{кр}}; \quad (13)$$

$$t_{\text{кр}}(j) = K_a(j) \cdot \pi_{\text{кр}}^{0,355 \cdot \frac{2-k}{k}} \cdot \sqrt{\pi_{\text{кр}}^{\frac{k-1}{k}}} \quad \text{при } \pi_0(j) < \pi_{\text{кр}}; \quad (14)$$

$$t_{\text{докр}}(j) = K_a(j) \cdot \pi_0(j)^{0,145 \cdot \frac{k+1,45}{k}} \cdot \sqrt{\frac{2}{k-1} \cdot \left(\pi_0(j)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right)}. \quad (15)$$

Риск развития ВДБ определялся по формуле, аппроксимирующей кривую безопасного давления, экспериментально определенную В.И. Чадовым [10]:

$$p_{\text{без}}^{\text{деком}} = -3,514 \cdot 10^{-6} \cdot p_{N_2}^3 + 0,005 \cdot p_{N_2}^2 - 1,624 \cdot p_{N_2} + 336,7834. \quad (16)$$

В настоящее время риск возникновения ВДБ оценивается по коэффициенту перенасыщения, являющемуся отношением парциального давления азота до декомпрессии к общему давлению после декомпрессии:

$$K_{\Pi} = \frac{p_{N_2}^I}{p_{\text{без}}^{\text{деком}}}. \quad (17)$$

Для земной атмосферы – 760 мм рт. ст. $K_{\Pi} = 1,6$.

Переход для анализа декомпрессионной безопасности по кривой В.И. Чадова имеет преимущества, так как он применим для различных типов летательных аппаратов, от космических кораблей до воздушных судов, и для различных атмосфер с разными сочетаниями давлений и концентраций.

Расчет привел к вырождению коэффициента перенасыщения до значения 1,6, что и следовало ожидать при давлении 760 мм рт. ст., но применение этого критерия для КА все равно целесообразно, так как он может применяться в нештатных и аварийных ситуациях.

Вычислительные эксперименты по имитации разгерметизации

Целью проведения вычислительных экспериментов был расчет величин утечки газа из кабины и потребной подачи для компенсации этих утечек в зависимости от площади дефекта. Имитировалась разгерметизация в космическом полете без атмосферного пространства для отверстий различного размера. Нами были выбраны следующие величины диаметров: 0,01; 0,015; 0,02; 0,025; 0,03 м; и объемов: 3; 5 и 30 м³. Совершенно очевидно, что площадь отверстия может меняться, быть больше или меньше при постоянном объеме кабины, либо, наоборот, может меняться объем кабины при постоянной площади отверстия. Поэтому для упрощения анализа результатов нами был использован коэффициент утечки ($k_{ут}$) – отношение площади отверстия (S_y) к объему кабины (V_k):

$$k_{ут} = \frac{S_y}{V_k}. \quad (18)$$

Таким образом, одна и та же величина этого отношения может быть получена при самых различных объемах кабины и размерах отверстия.

Особое внимание было уделено исследованию и решению задачи об истечении воздуха из ГК в условиях переменности внешнего противодавления, т. е. в условиях стратосферы. Для имитации космического полета была выбрана односекционная ГК, для стратосферного полета – двухсекционная.

Расчеты проводились в среде программирования Matlab. Дифференциальные уравнения решались методом Рунге – Кутты 4-го порядка.

На рис. 1 представлены графики с результатами расчета для высоты 20 км. В отличие от базовой модели величина эквивалентной площади в нашей модели является динамической величиной, что показано на рис. 1.

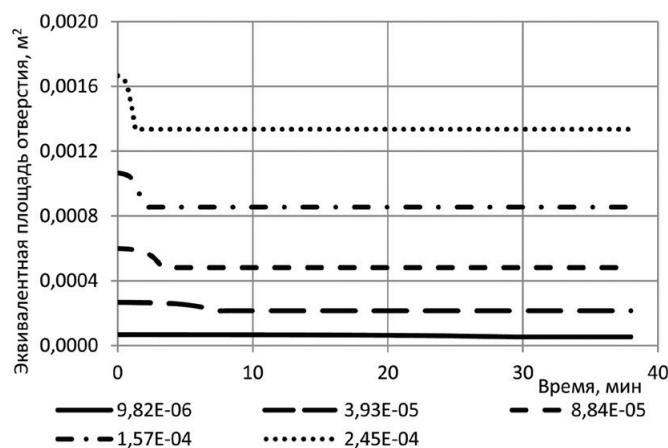


Рис. 1. Динамика эквивалентной площади отверстия при разгерметизации на высоте 20 км при разных отношениях коэффициента утечки

Для космического полета давление в кабине до декомпрессии соответствовало земному 760 мм рт. ст. Полученные зависимости были нами аппроксимированы следующими уравнениями:

– зависимость массовой подачи от давления разгерметизации имела следующий вид:

$$G_{\text{per}} = a \cdot p_k - b, \quad (19)$$

где $a = 2,513 \cdot k_{\text{ут}} - 4,027 \cdot 10^{-8}$; $b = 0,1 \cdot k_{\text{ут}}^3 - 46786,2 \cdot k_{\text{ут}}^2 + 4 \cdot k_{\text{ут}} - 1,12 \cdot 10^{-4}$;

– зависимость утечки от давления разгерметизации имела следующий вид:

$$G = a \cdot p_k, \quad (20)$$

где $a = 2,511 \cdot k_{\text{ут}} + 1,51 \cdot 10^{-7}$.

Результаты вычислений отображены на рис. 2.

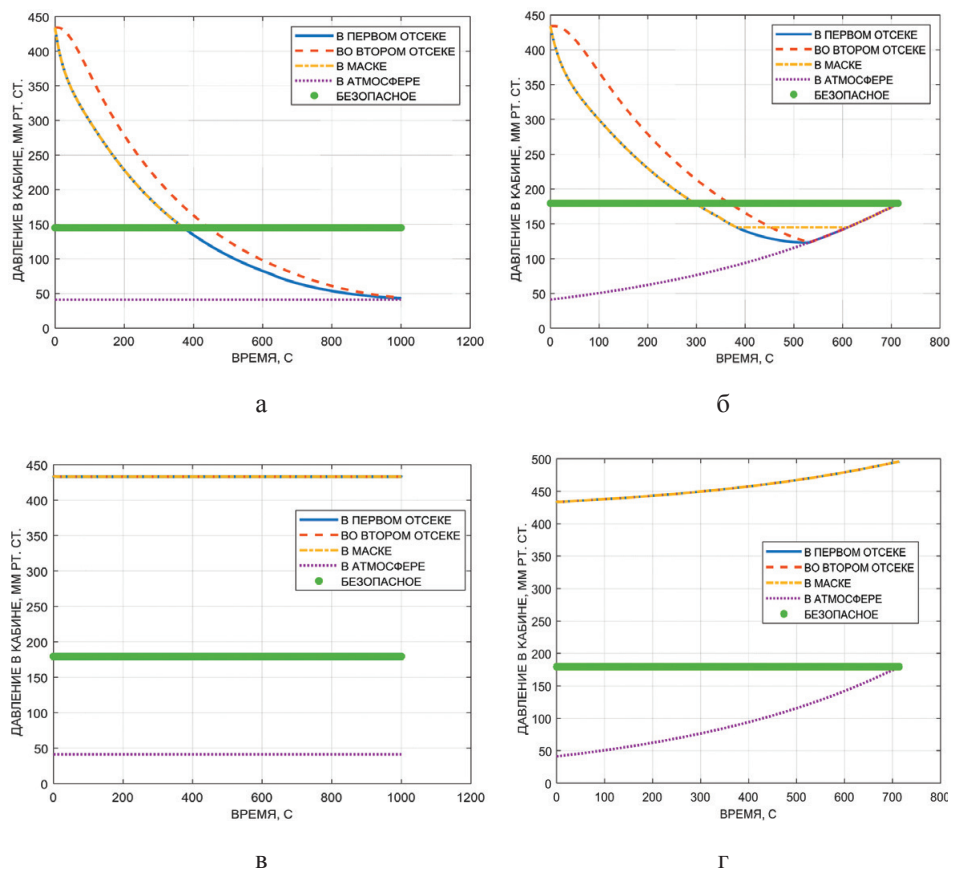


Рис. 2. Динамика давления при разгерметизации на различных режимах системы аварийного регулирования давления:

a – на высоте; $б$ – со снижением; $в$ – с компенсацией; $г$ – со снижением и компенсацией

Методика оценки переносимости декомпрессии человеком

Для решения комплексной задачи – разработки методики оценки переносимости декомпрессии человеком необходимо решить три взаимосвязанные и взаимозависимые подзадачи:

- обосновать уровни переносимости воздействия декомпрессии;
- провести вычислительные эксперименты, имитирующие разгерметизацию ГК;
- аппроксимировать полученные зависимости.

При обосновании уровней переносимости воздействия декомпрессии необходимо учитывать медико-биологические и физиолого-гигиенические ограничения, связанные с использованием существующих средств регулирования параметров давления в ГК в штатных и аварийных ситуациях. С позиций высотной физиологии на организм человека действуют следующие неблагоприятные факторы, обусловленные воздействием давления в кабине, которое зависит от высоты полета и режима работы СОЖ [11, 12]:

- гипоксическая гипоксия (легкой, умеренной степени) при высоте от 2500 до 4500 м в штатном полете и выраженной степени при высоте до 12 000 м после разгерметизации;
- гипобария (умеренной и выраженной степени) при высоте от 6000 м в штатном полете и выраженной степени при высоте до 12 000 м после разгерметизации;
- взрывная декомпрессия (умеренной и выраженной степени) при быстрой разгерметизации ГК на высоте от 4500 до 12 000 м.
- гипотермия (умеренной и выраженной степени) при разгерметизации ГК и понижении в ней температуры от -40 до -56 °С.

Таблица 1

**Время декомпрессии при имитации разгерметизации
при разных величинах диаметров отверстия (м)**

Объем, м ³	Высота, км	Время декомпрессии, с					
		0,005 м	0,01 м	0,015 м	0,02 м	0,025 м	голосовая щель
3	20	–	909,1	404	227,3	145,5	26,83
	15	–	618,7	275	154,7	98,99	18,26
	10	1506	376,5	167,3	94,12	60,24	11,11
5	20	–	1515	673,4	378,8	242,4	26,83
	15	–	1031	458,3	257,8	165	18,26
	10	–	627,5	278,9	156,9	100,4	11,11
30	20	–	–	–	2273	1455	26,83
	15	–	–	–	1547	989,9	18,26
	10	–	–	1673	941,2	602,4	11,11

Таблица 2

**Массовая подача при имитации разгерметизации
при разных величинах диаметров отверстия (м)**

Объем, м ³	Высота, км	Массовая подача, кг/с				
		0,005 м	0, 01 м	0,015 м	0,02 м	0,025 м
3	20	0,002264	0,009051	0,02035	0,03615	0,05641
	15	0,002338	0,009348	0,02102	0,03733	0,05826
	10	0,002449	0,009793	0,02202	0,03911	0,06103
5	20	0,002264	0,009053	0,02036	0,03618	0,05649
	15	0,002338	0,00935	0,02103	0,03736	0,05834
	10	0,002449	0,009795	0,02203	0,03914	0,06111
30	20	0,002264	0,009056	0,02037	0,03622	0,05658
	15	0,002338	0,009353	0,02104	0,0374	0,05844
	10	0,00245	0,009798	0,02204	0,03919	0,06122

Результаты вычислений из представленных таблиц 1 и 2 отображены на рис. 3, 4. Маркерами отмечены расчетные данные, линиями – аппроксимационные зависимости.

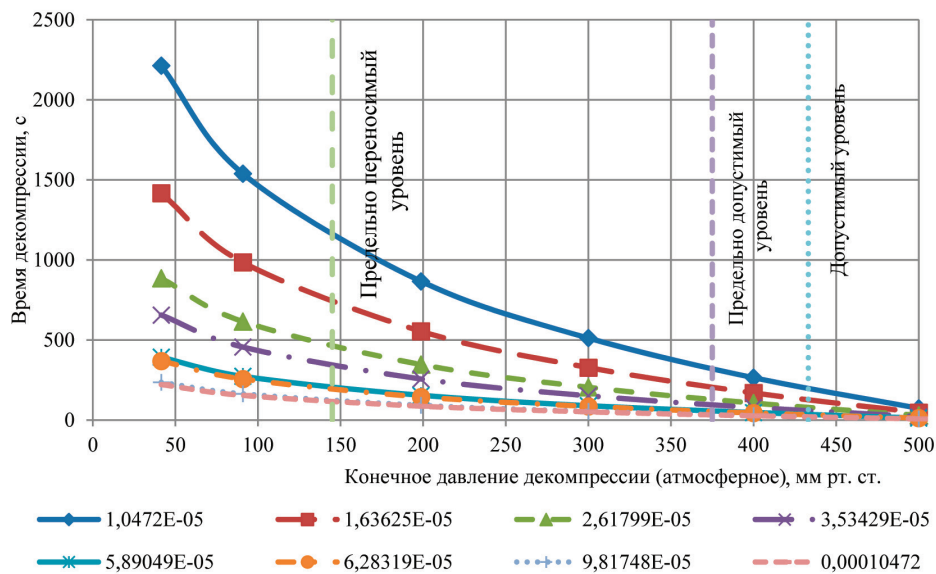


Рис. 3. Время декомпрессии при разных коэффициентах утечки

При анализе этих факторов можно выбрать три уровня переносимости, определяющих величину резервного времени, необходимого для устранения аварии: предельно переносимый, предельно допустимый и допустимый. Эти три уровня соответствуют высотам 4,5; 6; 12 км.

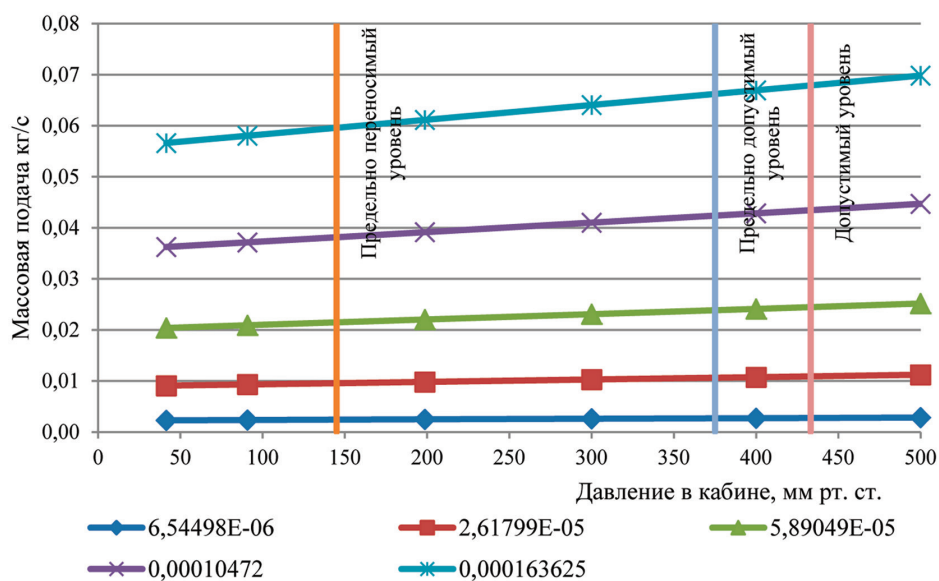


Рис. 4. Зависимость массовой подачи от давления в кабине при разных коэффициентах утечки при объеме 3 м³

Результаты расчета зависимости времени декомпрессии от давления декомпрессии при разных коэффициентах утечки отображены на рис. 3. Зависимость массовой подачи от величины конечного давления в кабине отображена на рис. 4.

Результаты расчета имитации разгерметизации, представленные в табл. 1, были нами аппроксимированы. Полученная зависимость времени декомпрессии от давления декомпрессии имела следующий вид:

$$\tau_{\text{дек}} = \frac{a}{k_{\text{ут}}}, \quad (21)$$

где $a = -0,009 \cdot \ln p_{\text{дек}} + 0,0567$.

Результаты расчета массовой подачи, представленные в табл. 2, были нами аппроксимированы. Зависимость конечного давления в кабине от величины массовой подачи при разных коэффициентах утечки имела следующий вид:

$$p_{\text{дек}} = a \cdot G_{\text{рег}} + b, \quad (22)$$

где $a = 0,1531 \cdot p_{\text{дек}}^2 - 15,2088 \cdot p_{\text{дек}} + 712,6106$; $b = 2,52 \cdot 10^{-11} \cdot p_{\text{дек}}^2 + 7,27 \cdot 10^{-9} \cdot p_{\text{дек}} + 1,49 \cdot 10^{-5}$.

Зависимость массовой подачи от величины конечного давления в кабине при разных коэффициентах утечки имела следующий вид:

$$\tau_{\text{дек}} = a \cdot k_{\text{ут}} + b, \quad (23)$$

где $a = 0,1758 \cdot p_{\text{дек}} + 338,48$; $b = 1,98 \cdot 10^{-8} \cdot p_{\text{дек}} + 2,68 \cdot 10^{-5}$ при $V = 3 \text{ м}^3$;
 $a = 0,2931 \cdot p_{\text{дек}} + 564,9815$; $b = 1,98 \cdot 10^{-8} \cdot p_{\text{дек}} + 1,49 \cdot 10^{-5}$ при $V = 5 \text{ м}^3$;
 $a = 1,767 \cdot p_{\text{дек}} + 3395,422$; $b = 1,64 \cdot 10^{-10} \cdot p_{\text{дек}}^2 - 3,97 \cdot 10^{-8} \cdot p_{\text{дек}} + 3,83 \cdot 10^{-6}$
 при $V = 30 \text{ м}^3$.

Исследование проблемы обеспечения безопасности при разгерметизации ГК было проведено взаимосвязано как с физиологической, так и технической точек зрения, что дало возможность исследовать различные режимы функционирования СОГС. Процесс истечения воздуха из ГК при разгерметизации исследован с позиции теории термодинамики тела переменной массы при возрастающем внешнем противодавлении, т. е. в условиях экстренного снижения на безопасную высоту. Существенным результатом работы является разработка и обоснование комплексной имитационной модели газодинамических процессов при декомпрессии секционированных ГК, которая может использоваться в качестве универсального математического инструмента при решении широкого круга практических задач, связанных с нарушением герметичности, регулированием параметров воздуха, наддувом и вентиляцией.

Выводы

1. Полученная модель позволяет на стадии проектирования произвести рациональный выбор герметических и газодинамических параметров ГК, а также летно-эксплуатационных характеристик ВС с учетом возможной декомпрессии кабины в полете или, наоборот, при заданных параметрах и летных данных оценить степень опасности при разгерметизации и заранее предусмотреть комплекс средств по обеспечению безопасности, а именно: подобрать рациональные соотношения объема ГК проектируемого КА; определить величину возникающих при декомпрессии перепадов давлений между сообщающимися секциями-отсеками, а следовательно, и нагрузки, действующие на элементы конструкции, для проведения прочностных расчетов; определить конструктивные мероприятия, предотвращающие возникновение опасных перепадов давлений в сообщающихся объемах ГК; количественно учесть эффект увеличения продолжительности допустимого времени пребывания людей в условиях понижающегося давления в ГК в процессе декомпрессии; оценить эффективность СОГС в зависимости от высоты, на которой произошла разгерметизация.

2. Разработанная математическая модель позволяет описать процессы, возникающие при разгерметизации кабины. Время достижения безопасного давления может рассматриваться как резервное время по риску возникновения ВДБ, которое может рассматриваться как критерий при оценке риска возникновения ВДБ.

3. Переход для анализа декомпрессионной безопасности по кривой В.И. Чадова имеет преимущества, так как он применим для различных типов летательных аппаратов, от космических кораблей до воздушных судов, и для различных атмосфер с разными сочетаниями давлений и концентраций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Илюшин, Ю. Системы обеспечения жизнедеятельности и спасения экипажей летательных аппаратов / Ю.С. Илюшин, В.В. Олизаров. – Москва: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1972. – 492 с.
2. Акопов, М.Г. Системы оборудования летательных аппаратов / М.Г. Акопов, В.И. Бекасов, В.Г. Долгушев; под ред. А.М. Матвеевко и В.И. Бекасова. – 3-е издание, испр. и доп. – Москва: Машиностроение, 2005. – 558 с.
3. Быков, Л.Т. Высотное оборудование самолетов / Л.Т. Быков, М.С. Егоров, П.В. Тарасов. – Москва: Оборонгиз, 1958. – 392 с.
4. Быков, Л.Т. Высотное оборудование пассажирских самолетов / Л.Т. Быков, В.С. Ивлентиев, В.И. Кузнецов. – Москва: Машиностроение, 1972. – 332 с.
5. Ивлентиев, В.С. Разгерметизация кабин летательных аппаратов: дис. на соис. д-ра техн. наук: 05.07.02. – Москва: МАИ, 1983. – 348 с.
6. Дейч, М.Е. Техническая газодинамика. – Москва: Госэнергоиздат, 1961. – 671 с.
7. Коэнчи, Е.Б. Декомпрессионные явления на искусственных спутниках с живыми существами на борту / Е.Б. Коэнчи; под ред. В.И. Иванова // Человек в условиях высотного космического полета: сборник статей. – Москва: Иностранная литература, 1960. – С. 349–416.
8. Матюшев, Т.В. Моделирование респираторных реакций организма человека при имитации падения барометрического давления в гермообъеме / Т.В. Матюшев, М.В. Дворников, М.А. Петров. – DOI 10.34131/MSF.21.1.89-106 // Пилотируемые полеты в космос. – 2021 – № 1(38). – С. 89–106.
9. Тарасов, В.В. Расчет времени истечения идеального газа из резервуара постоянного объема в среду с постоянным давлением при адиабатическом процессе // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2016. – Т. 2, № 2. – С. 84–95.
10. Чадов, В.И. Экспериментально-теоретическое обоснование декомпрессионной безопасности внекорабельной деятельности экипажей пилотируемых космических объектов автореф. дис. д-ра мед. наук: 05.26.02. – Москва: ФГУ «Всероссийский центр медицины катастроф “Защита”», 2005. – 86 с.
11. Барометрическое давление. Газовый состав / В.Б. Малкин [и др.] // Основы космической биологии и медицины. Т. II, кн. 1. Экологические и физиологические основы космической биологии и медицины. – Москва: Наука, 1975. – С. 11–140.
12. Авиационная медицина: руководство / под ред. И.М. Рудный, П.В. Васильев, С.А. Гозулов [и др.]. – Москва: Медицина, 1986. – 577 с.

REFERENCES

1. Iliushin, Iu.S. Life Support and Rescue Systems for Aircraft Crews / Iu.S. Iliushin, V.V. Olizarov. – Moscow: VVIA Named After Professor N.E. Zhukovsky, 1972. – 492 p.
2. Akopov, M.G. Aircraft Equipment Systems / M.G. Akopov, V.I. Bekasov, V.G. Dolgushev; ed. by A.M. Matveenko and V.I. Bekasov. – 3rd Edition, Corrected and Supplemented. – Moscow: Mashinostroenie, 2005. – 558 p.
3. Bykov, L.T. High-Altitude Equipment of Aircraft / L.T. Bykov, M.S. Egorov, P.V. Tarasov. – Moscow: Oborongiz, 1958. – 392 p.

4. Bykov, L.T. High-Altitude Equipment for Passenger Aircraft / L.T. Bykov, V.S. Ivlientiev, V.I. Kuznetsov. – Moscow: Mashinostroenie, 1972. – 332 p.
5. Ivlientiev, V.S. Depressurization of Aircraft Cabins: Thesis for a Degree of a Doctor of Technical Sciences: 05.07.02. – Moscow: MAI, 1983. – 348 p.
6. Deich, M.E. Technical Gas Dynamics. – Moscow: Gosenergoizdat, 1961. – 671 p.
7. Koenchi, E.B. Decompression Phenomena on Artificial Satellites With Living Beings on Board / E.B. Koenchi; ed. by V.I. Ivanov // A Man Under Conditions of a high-Altitude Space Flight. Collection of Translations From Foreign Periodical Literature. – Moscow: Foreign literature, 1960. – P. 349–416.
8. Matiushev, T.V. Study of a Human Respiratory System Responses During Decompression of a Pressurized Compartment / T.V. Matiushev, M.V. Dvornikov, M.A. Petrov. – DOI 10.34131/MSF.21.1.89-106 // Manned Spaceflight. – 2021 – No 1(38) – P. 89–106.
9. Tarasov, V.V. Calculation of the Time of Outflow of An Ideal Gas From a Constant Volume Reservoir Into a Medium With Constant Pressure During an Adiabatic Process // Bulletin of Tyumen State University. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy. – 2016. – Vol. 2, No 2. – P. 84–95.
10. Chadov, V.I. Experimental and Theoretical Substantiation of Decompression Safety of Extravehicular Activities of Crews of Manned Space Objects. Author's Thesis of Doctor of Medical Sciences: 05.26.02. – Moscow: Federal State Institution “All-Russian Center for Disaster Medicine «Zashchita»”, 2005. – 86 p.
11. Barometric Pressure. Gas Composition / V.B. Malkin [et al.] // Fundamentals of Space Biology and Medicine. Vol. II, Book 1. Ecological and Physiological Foundations of Space Biology and Medicine. – Moscow: Science, 1975. – P. 11–140.
12. Aviation Medicine: guide / ed. by I.M. Rudny, P.V. Vasiliev, S.A. Gozulov [et al.]. – Moscow: Medicine, 1986. – 577 p.