

УДК 621.565

В.А. Наер, М.Б. Кравченко, А.В. Рожнецев

Учебно-научный институт холода, криотехнологий и экоэнергетики им. В.С. Мартыновского ОНАПТ, ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, 65026

КРИОГЕННЫЕ СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ – ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ

В статье рассмотрены запасы эксергии в газобаллонных и криогенных подводных аппаратах. Показано, что в криогенных аппаратах запас эксергии может быть в 5 – 6 раз больше, чем в обычных аквалангах и он может быть практически использован. Приведены схемы с полупроводниковой термопарой для выработки электроэнергии, а также схемы для обогрева и охлаждения водолаза. Предложены термодинамическая и математическая модели криогенных дыхательных аппаратов. Проведенное экспериментальное исследование опытных образцов подтвердило их работоспособность и позволило определить их реальные рабочие характеристики. Сравнение опытных и расчетных рабочих характеристик криогенных аппаратов показало, что они удовлетворительно совпадают и что последние могут быть использованы на стадии проектирования этих систем.

Ключевые слова: Дыхательный аппарат – Жидкий воздух – Криоланг – Жизнеобеспечение – Теплозащита

Exergy reserves in the compressed gas and cryogenic underwater apparatuses are considered in the article. It is shown that the exergy reserve in the cryogenic apparatuses might be 5 - 6 times greater than in conventional aqualungs and it may be used practically. The schemes with the semiconductor thermopile for electricity generation, as well as schemes for heating and cooling of the diver are presented. Both thermodynamic and mathematical models of the cryogenic breathing apparatus are proposed. The conducted experimental research of the prototypes proved their efficiency and allowed to determine their actual performance characteristics. Cryogenic devices experimental and estimated performances comparison showed that they adequately coincide and that the latter may be used at the design stage of such systems.

Key words: Breathing apparatus – Liquid air – Cryolung – Life-support – Thermal shielding

I. ВВЕДЕНИЕ

Впервые термодинамический анализ криогенных систем жизнеобеспечения (КСЖ) был проведен сотрудниками Одесской государственной академии холода (ОГАХ), [1, 2]. В этих работах основное внимание было уделено применению теоретических циклов для использования эксергии криогенной жидкости (жидкого воздуха) как для случаев наземных так и для подводных, аппаратов, но далеких от практики. В настоящей работе анализ уделен, в основном, подводным аппаратам. В разработке этих аппаратов и в их исследовании принимали участие сотрудники ОГАХ – Витюк А.В., Тешин Н.А., Балетов А.Н., Барсуков В.В. и др., [3 – 10]

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Прежде чем перейти к термодинамическому анализу КСЖ проведем сравнительную оценку величины эксергии в криоланге – подводном криогенном дыхательном аппарате и в акваланге.

Индивидуальные подводные дыхательные аппараты (газобаллонные и криогенные) представ-

ляют собой типичные открытые термодинамические системы, передающие в окружающую среду рабочее тело m и обменивающиеся со средой теплотой Q и работой L . Для такой системы первый и второй законы термодинамики записываются в виде:

$$\delta Q + \sum_{k=1}^n (u_k + p_k v_k) \cdot dm_k = dU + \delta L, \quad (1)$$

$$\delta Q = TdS - \sum_{k=1}^n T \cdot s_k dm_k, \quad (2)$$

где u_k , v_k , s_k , p_k , m_k – удельные внутренняя энергия, объем, энтропия, давление и масса k -го потока рабочего тела; U , S , T – полные значения энергии, энтропии и температуры системы.

В газобаллонном аппарате член δQ учитывает теплообмен газа в баллоне с окружающей средой. Этот теплообмен позволяет рассматривать процесс выдачи газа из баллона как изотермический и считать, что рабочее тело находится в равновесии со средой. В криогенном аппарате рабочее тело значительную часть времени не находится в термодинамическом равновесии с окружающей средой. В начальный момент после заправки аппа-

рата рабочее тело находится лишь в механическом равновесии со средой, а после завершения процесса разгонки устанавливаются постоянными как давление рабочего тела так и его температура. Поэтому для криогенного аппарата имеет смысл производить оценку эксергии рабочего тела до разгонки аппарата и после него. Именно вторая величина должна далее рассматриваться как реальная. При расчете эксергии будем считать, что состав рабочего тела в аппарате не меняется. Будем также вначале считать, что подводные аппараты работают вблизи поверхности воды, а затем внесем поправку на глубину и температуру воды.

В соответствии с первым и вторым законами термодинамики уравнение для определения эксергии рабочего тела имеет вид:

$$e = (i - T_c \cdot S) - (i_c - T_c S_c), \quad (3)$$

где T_c , i_c , S_c – температура, энтальпия и энтропия среды; i , S – энтальпия и энтропия рабочего тела.

Полагая температуру и давление среды равными соответственно 300К и 0,1 МПа, давление воздуха в сосуде акваланга равным 15МПа и, используя термодинамические таблицы для воздуха, получим, что $e = 440$ кДж/кг. Это и есть то максимальное количество работы, которое можно получить от 1 кг сжатого воздуха.

В современных расходных аппаратах (аквалангах) обычно максимальное количество воздуха составляет примерно 4,5 кг. Следовательно, общая эксергия дыхательной смеси в таком аппарате составляет величину 1980 кДж.

Введем поправки. По условиям работы легочного автомата избыточное давление перед ним должно находиться в пределах 0,3...0,5 МПа. В соответствии с этим, воздух может расширяться с производством работы в реальном аппарате до давления не менее 0,3...0,5 МПа и затем поступать на дыхание. Отметим, что при среднем давлении перед легочным автоматом равном 0,4 МПа вели-

чина общей эксергии снижается до значения 1510 кДж.

При плавании на глубине 20м минимальное давление воздуха перед легочным автоматом возрастает до 0,7 МПа, а температура среды понижается до 280 К. В этом наиболее реальном случае величина общей эксергии снижается до значения 1260 кДж.

Рассмотрим криогенный аппарат при тех же параметрах среды. В этом случае эксергия 1 кг жидкого воздуха равна $e = 740$ кДж/кг. В криогенных аппаратах рассматриваемого класса при давлении среды 0,1 МПа может находиться 17,5 кг жидкого воздуха, полная величина эксергии которого составит 12950 кДж.

При давлении перед легочным автоматом равном 0,4МПа давление в сосуде и давление среды также следует принять 0,4 МПа. В этом случае полезный массовый заряд жидкого воздуха снижается до 16 кг, а удельная эксергия уменьшается до величины $e = 560$ кДж/кг. Общая эксергия составляет 8960 кДж. На глубине 20 м и температуре среды 280 К общая эксергия рабочего тела в криогенном аппарате равна 7200кДж.

Таким образом, проведенные оценки показывают, что величина эксергии сжиженного воздуха в аппарате примерно в 6 раз больше эксергии сжатого воздуха в газобаллонном аппарате. При этом следует учитывать также и тот факт, что переменная во времени эксергетическая мощность воздуха в газобаллонном аппарате из-за падения давления во времени практически не дает возможности получить теоретическую работу. В криогенных же аппаратах эксергия жидкого воздуха даже при использовании преобразователей энергии с к.п.д. (10...15)% достаточна для получения реальной работы порядка (700...1100) кДж и ее можно использовать для питания различных приборов. Некоторые схемы аппаратов, в которых возможно использовать эксергию жидкой дыхательной смеси, показаны на рисунках 1 - 3.

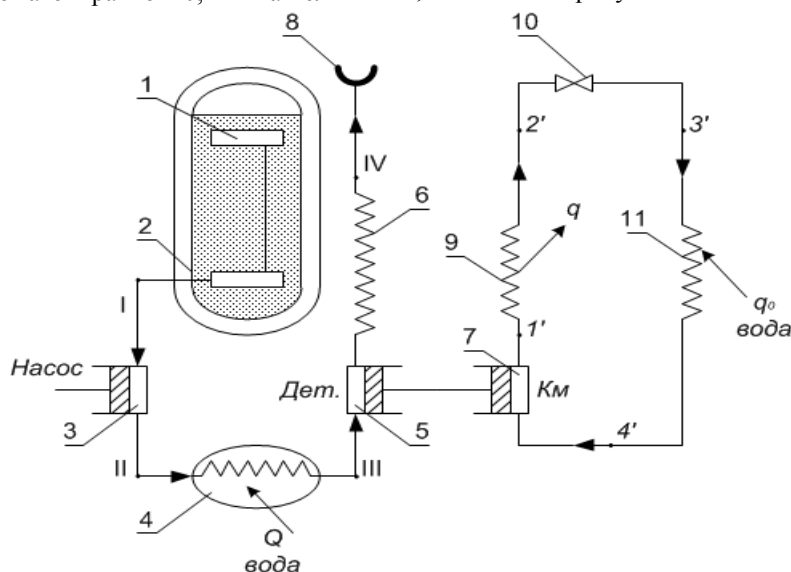


Рисунок 1 – Автономная система обогрева-охлаждения человека

На рисунке 1 показана одна из возможных схем использования эксергии жидкого воздуха для обогрева или для охлаждения человека. Схема состоит из следующих элементов и работает таким образом.

Жидкий воздух после отборника жидкости 1, расположенного в вакуумном теплоизолированном сосуде с внутренней стенкой 2, поступает в насос высокого давления 3 (описание насоса смотри ранее [1]), где сжимается до давления 20...30 МПа. Затем он поступает в теплообменник 4, в котором переводится за счет тепла Q , подводимого из окружающей среды, в газ высокого давления. Далее газ, расширяясь изотермически в детандере 5 и теплообменнике 6, передает работу расширения

компрессору теплонасосной установки 7 и направляется в легочный автомат 8 на дыхание человека.

Элементы теплонасосной установки: 9 – конденсатор, 10 – дроссель, 11 – испаритель.

Процессы, происходящие с воздухом и с рабочим телом теплонасосной установки, показаны в $T-S$ диаграмме на Рис. 2. Здесь обозначено: II – состояние воздуха после насоса, III – воздух после теплообменника, IV – воздух после изотермического расширения в детандере.

Процессы, происходящие со специальным агентом в теплонасосной установке, также показаны на рисунке 2. Здесь позициями 1', 2', 3' и 4' обозначены состояния агента соответственно после компрессора, конденсатора, дросселя и испарителя.

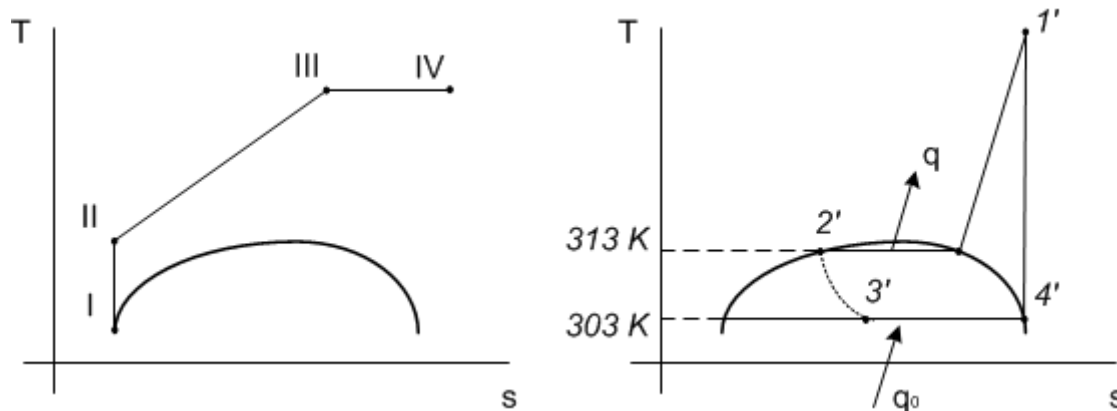


Рисунок 2 – T-s диаграмма процессов в автономной системе жизнеобеспечения

Если теплонасосная установка работает в режиме нагрева, то теплота конденсации рабочего тела этой установки q используется для обогрева человека. Если установка работает как холодильная машина, то теплота испарения q_0 используется для охлаждения человека.

Эксергию жидкого воздуха можно использовать и для выработки электроэнергии. На рисунке 3 показана схема подводного криогенного аппарата с полупроводниковой термобатареей. Аппарат работает следующим образом. После заправки сосуда 1 жидким воздухом его внутренняя стенка приобретает температуру жидкого воздуха (80...100) K (в зависимости от давления в сосуде). Внешний корпус сосуда, ключ переключения и горячие спаи термобатареи омываются водой и имеют температуру 290...300 K.

При необходимости выработки электроэнергии водолаз нажимает на ключ переключения и приводит в соприкосновение с внутренним корпусом сосуда днище 7. При этом, между холодными и горячими спаями термобатареи возникает разность температур порядка 200 K и это приводит к появлению термоэдс, которая может быть использована для электропитания различных приборов. После проведения необходимых замеров водолаз с

помощью ключа прерывает тепловой контакт термобатареи с жидким воздухом. Таковы некоторые примеры использования эксергии в КСЖ.

Математическая модель криогенного дыхательного аппарата должна отражать три возможных периода эксплуатации аппарата. Первый – бездренажное хранение жидкого воздуха, при котором давление и температура жидкости в аппарате поднимаются до значений, определенных условиями равновесия при температуре среды или до значений, заданных прочностными характеристиками аппарата. Второй – дренажное хранение, при котором часть жидкости сбрасывается через предохранительный клапан в окружающую среду. Третий – рабочий период или период непосредственной эксплуатации аппарата, когда из него отбирается жидкость на дыхание. Все эти режимы изложены в разделах криогенной техники, описывающей системы хранения и газификации криогенных жидкостей.

При бездренажном хранении простейшее уравнение, дающее связь между временем хранения и температурой насыщенной жидкости T в теплоизолированном сосуде (а, следовательно, и между временем и давлением), имеет вид:

$$\tau = \frac{m_c \cdot c + m_{жс} \cdot c'}{k \cdot F} \cdot \ln \frac{T_c - T}{T_c - T_o}. \quad (4)$$

Здесь m_c , $m_{жс}$ – массы стенки сосуда и криогенной жидкости; c и c' – удельные теплоемкости металла и криогенной жидкости; kF – теплопроводимость теплоизоляции сосуда; T_o – начальная температура криогенной жидкости, T_c – температура среды.

Связь между температурой и давлением может быть определена аппроксимацией линии насыщения вида:

$$p = 0.1 \cdot e^{\left(A_1 + \frac{A_2}{T}\right)}, \text{ (МПа)} \quad (5)$$

где для жидкого воздуха $A_1 = 8,9510$ и $A_2 = -705,50$.

В режиме дренажного хранения давление сохраняется постоянным, а потери жидкости однозначно связаны с теплопритоками в сосуд и легко рассчитываются.

На рисунке 4 показаны опытные графики изменения давления в подводном аппарате, в котором жидкий воздух хранится в бездренажном и

дренажном режимах при различных первичных заполнениях сосуда.

В рабочем периоде подача дыхательной смеси в легочный автомат осуществляется под воздействием избыточного давления в криогенном блоке и в значительной мере определяется режимом дыхания, а также условиями гидродинамики и теплообмена в теплообменнике – газификаторе. Следовательно, описание рабочего режима (рабочих характеристик аппарата) предполагает решение как внутренней задачи (динамика давления в криогенном блоке) так и внешней (газификация и подогрев дыхательной смеси).

Рассмотрим процессы, определяющие внутреннюю задачу. В этом случае в термодинамическую систему входит ограниченный внутренней поверхностью сосуд с жидкой и паровой фазами дыхательной смеси и отборники жидкости. Сосуд обменивается теплом со средой. Состояние такой системы определяется рядом параметров, каждый из которых является функцией начальных условий и времени. Поведение системы однозначно определяется обыкновенными дифференциальными уравнениями с одной независимой переменной – временем τ , а ее состояние в каждый момент времени может быть описано с учетом равновесия фаз как функция давления.

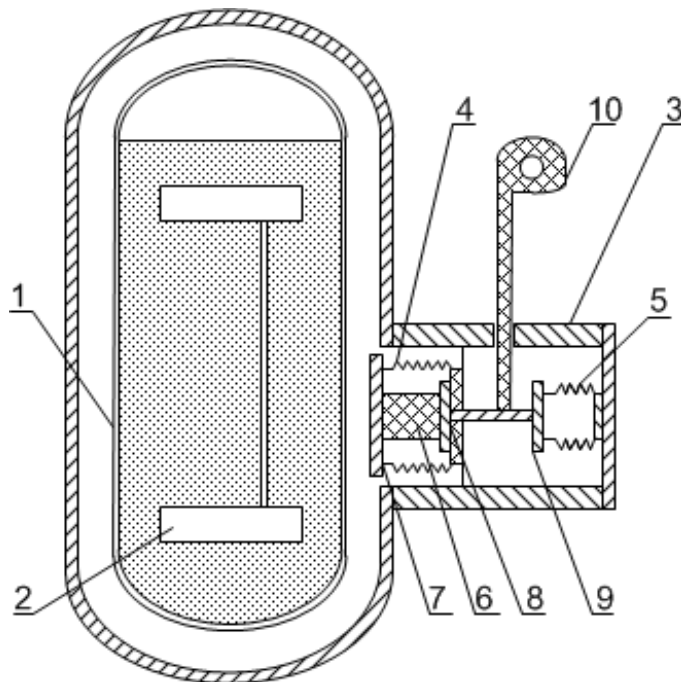


Рисунок 3 – Подводный криогенный аппарат с полупроводниковой термобатареей

1 - внутренний корпус сосуда с жидким воздухом, 2 – пористый отборник жидкости, 3 – камера для полупроводниковой термобатарей, 4 и 5 – сильфоны, в которых соответственно размещены термобатарея и вакуумный сильфон, 6 - полупроводниковая термобатарея, к теплопроводным днищам которой 7 и 8 присоединены соответственно холодные и горячие спаи термобатарей, 9 – днище вакуумного сильфона и 10 – ключ переключения.

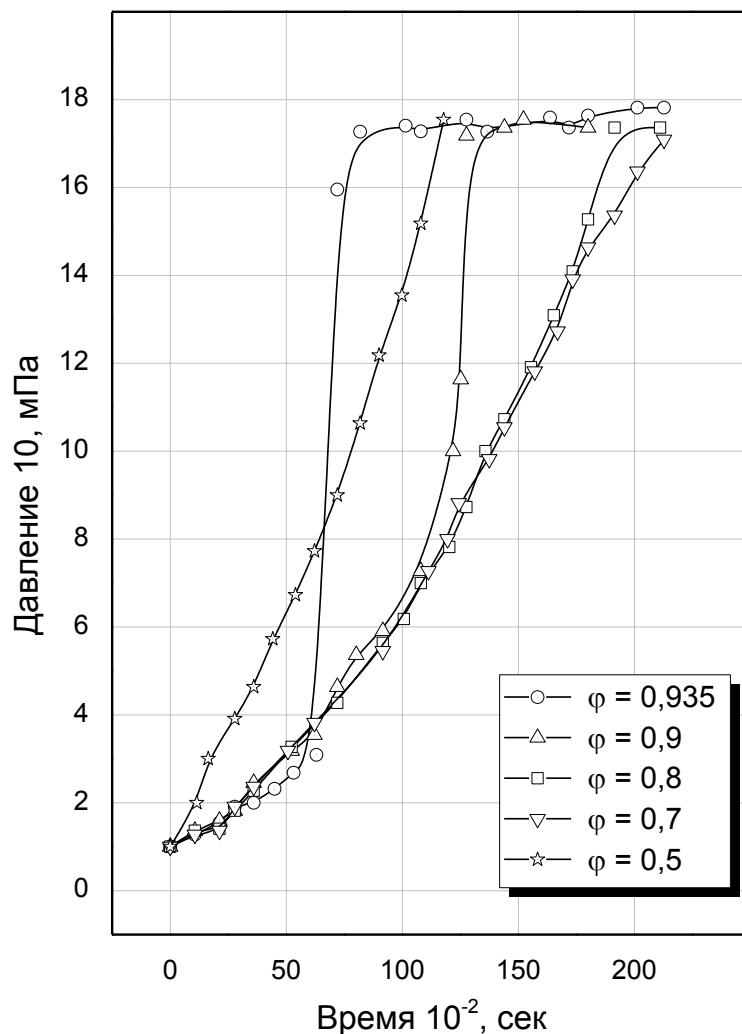


Рисунок 4 – Динамика давления при хранении жидкого воздуха в аппарате при различных степенях его заполнения воздухом - φ

Используя первый закон для открытых систем, закон сохранения масс и условия равновесия между жидкой и паровой фазами, получим следующую систему уравнений, описывающих рабочий режим аппарата:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dP}{d\tau} &= \frac{k \cdot F \cdot (T_0 - T) - (i_n - i_{жс}) \cdot \frac{dm_n}{d\tau}}{m_n \cdot \frac{di_n}{dP} + m_{жс} \cdot \frac{di_{жс}}{dP} + m_c \cdot \frac{dT}{dP} - V}, \\ -v_n \cdot \frac{dm_n}{d\tau} &= v_{жс} \cdot \frac{dm_{жс}}{d\tau} + \frac{dP}{d\tau} \cdot (m_{жс} \cdot \frac{dv_{жс}}{dP} - m_n \cdot \frac{dv_n}{dP}), \\ -\frac{dm_{жс}}{d\tau} &= \frac{dm_{0жс}}{d\tau} + \frac{dm_n}{d\tau} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Здесь, кроме упомянутых ранее обозначений, m_n , v_n , и $v_{жс}$ – масса пара, удельные объемы пара и

жидкости, соответственно. Член $\frac{dm_{0жс}}{d\tau} = \text{const}$, учитывает скорость отбора дыхательной смеси из аппарата. Объем сосуда - V .

Укажем еще раз, что для решения вышеприведенной системы уравнений ее следует дополнить связями:

$$\begin{aligned} T &= f_1(p), \quad i_n = f_2(p), \quad i_{жс} = f_3(p), \\ v_n &= f_4(p), \quad v_{жс} = f_5(p), \end{aligned} \quad (7)$$

которые известны из термодинамических свойств воздуха.

Решение внешней задачи.

Модельные представления, использованные при решении, иллюстрирует рисунок 5. Жидкая дыхательная смесь поступает из баллона 1 через отборник 2 и адиабатный участок 3 (длиной l_3) в теплообменник-газификатор, представляющий

собой трубку длиной L , свитую в спираль. Из газификатора испарившаяся и подогретая дыхательная смесь поступает в легочный автомат 6. Будем считать, что одна часть теплообменника (длиной l_4) является только газификатором 4, а другая часть (длиной l_5) – только подогревателем 5. Между ними существует подвижная граница раздела фаз. Для основных элементов теплообменника можно записать уравнения теплового и материального балансов. Укажем принятые допущения.

1. В теплообменнике отсутствует радиальное распределение температур.
2. Температура жидкой дыхательной смеси в газификаторе 4 постоянна и равна температуре насыщения на границе раздела фаз.

3. Газообразная дыхательная смесь подчиняется законам идеального газа.

Составляя математическую модель системы, представленной на Рис.5, следует отметить, что в общем случае система- отборник жидкости – газификатор – подогреватель – легочный автомат работает в пульсирующем режиме. Из-за периодичности процесса дыхания масса смеси, отбираемая легочным автоматом, не всегда равна массе жидкости, поступающей в газификатор. Поэтому в рассматриваемой системе могут происходить пульсации давлений и масс дыхательной смеси в газификаторе и подогревателе, приводящие к изменению длин и поверхностей теплообмена на участках труб, охватывающих газификатор и подогреватель.

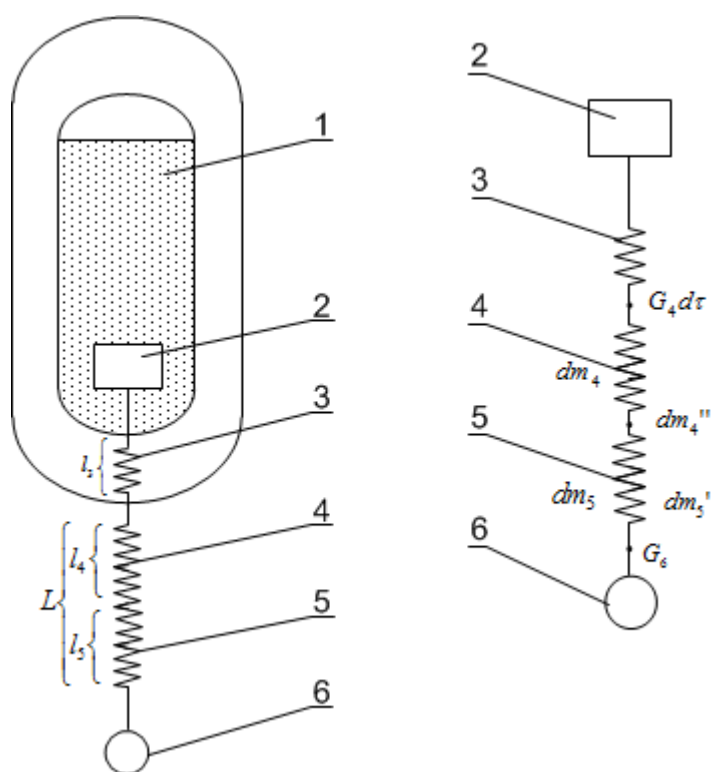


Рисунок 5 – Схема аппарата 1-жидкий воздух, 2- отборник жидкости, 3- адиабатный участок газификатора, 4- газификатор, 5- подогреватель, 6 – легочный автомат.

Изменение массы жидкой дыхательной смеси в газификаторе 4 (dm_4) определяется разностью между массами поступающей из баллона ($G_4 d\tau$) и испаряющейся (dm_4'') жидкости:

$$dm_4 = G_4 \cdot d\tau - dm_4'' \quad (8)$$

Масса испаряющейся дыхательной смеси (dm_4'') связана с теплопритоком из среды Q_4 , который зависит от разности температур ($T_c - T_4$), линейного коэффициента теплопередачи k_4 и длины газификатора l_4 :

$$dm_4'' = Q_4 \cdot d\tau \cdot \frac{1}{r}, \quad Q_4 = k_4 l_4 \cdot (T_c - T_4), \quad (9)$$

где r – теплота испарения жидкости.

Длина газификатора l_4 является переменной величиной, зависящей от массы жидкости:

$$l_4 = \frac{m_4 \cdot v_{жс}}{F_4}, \quad (10)$$

где F_4 - площадь поперечного сечения трубки газификатора.

Изменение массы газообразной дыхательной смеси в подогревателе 5 (dm_5) зависит от масс испаряющейся (dm''_4) и уходящей через легочный автомат 6 смеси ($G_6 d\tau$):

$$dm_5 = dm''_4 - G_6 \cdot d\tau, \quad (11)$$

Повышение средней температуры газообразной дыхательной смеси $\bar{T}_5$ происходит за счет теплового потока Q_5 , который определяется аналогично Q_4 . При этом необходимо учитывать энтальпии выходящего и входящего потоков смеси (i_5 , i_6).

$$d\bar{T}_5 = \frac{(Q_5 d\tau + i_5 dm''_4 - i_6 G_6 d\tau)}{C_p m_5}, \quad (12)$$

где C_p - удельная изобарная теплоемкость дыхательной смеси в подогревателе,

$$Q_5 = (T_c - \bar{T}_5) \cdot k_5 \cdot l_5, \quad (13)$$

$$l_5 = L - l_4. \quad (14)$$

Вышеприведенные уравнения представляют собой математическую модель газификации и подогрева дыхательной смеси в аппарате. При решении этих уравнений необходимо учитывать дополнительные зависимости между искомыми параметрами. Такими зависимостями являются связи на пограничной кривой насыщения, уравнения состояния идеального газа, уравнение Хагена-Пуазейля и закон Дарси для течения несжимаемых жидкостей в трубах и в капиллярно-пористых телах соответственно:

$$\begin{cases} p_n = \exp\left(A_1 + \frac{A_2}{T_4}\right), \\ \bar{p}_5 l_5 \frac{\pi d^2}{4} = m_5 R \bar{T}_5, \\ G_4^2 \frac{8(l_3 + l_4)}{\rho_4 \pi^2 d^5} - \Delta p_{пор} - (p_i - p_1) = 0, \\ G_5^2 \frac{4l_5}{\rho_5 \pi^2 d^5} = (p_n - \bar{p}_5) \end{cases} \quad (15)$$

Систему уравнений следует решать при таких начальных условиях:

$$\begin{aligned} \tau = 0, \quad p_1 = p_n = \bar{p}_5, \\ m_4 = m''_4 = 0, \quad \bar{T}_5 = T_c, \quad T_4 = T_0. \end{aligned}$$

Здесь G_4 и G_5 - расходы жидкости и газообразной дыхательной смеси в газификаторе и подогревателе соответственно; p_1 , p_n , $\bar{p}_5$ - начальное

давление в баллоне, текущее давление насыщения и среднее давление в подогревателе; d - диаметр трубки теплообменника; $\Delta p_{пор}$ - падение давления в пористом отборнике жидкости; ρ_1 и ρ_2 - плотности дыхательной смеси в газификаторе и подогревателе; R - универсальная газовая постоянная; T_0 - начальная температура жидкой дыхательной смеси.

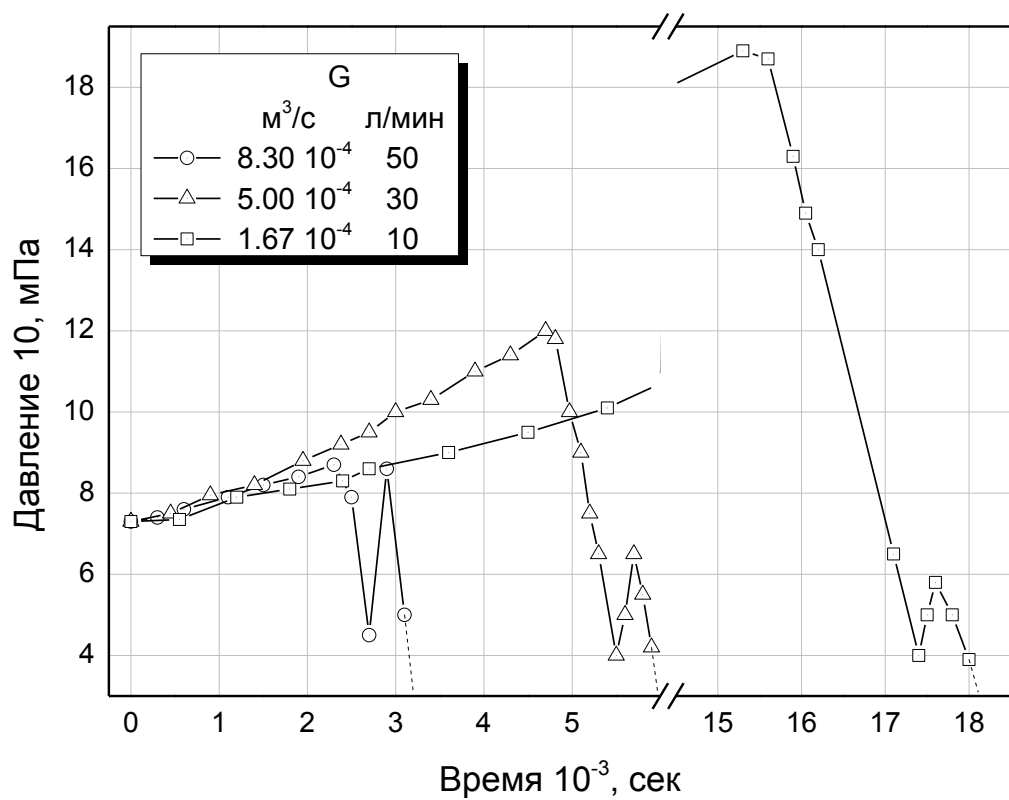
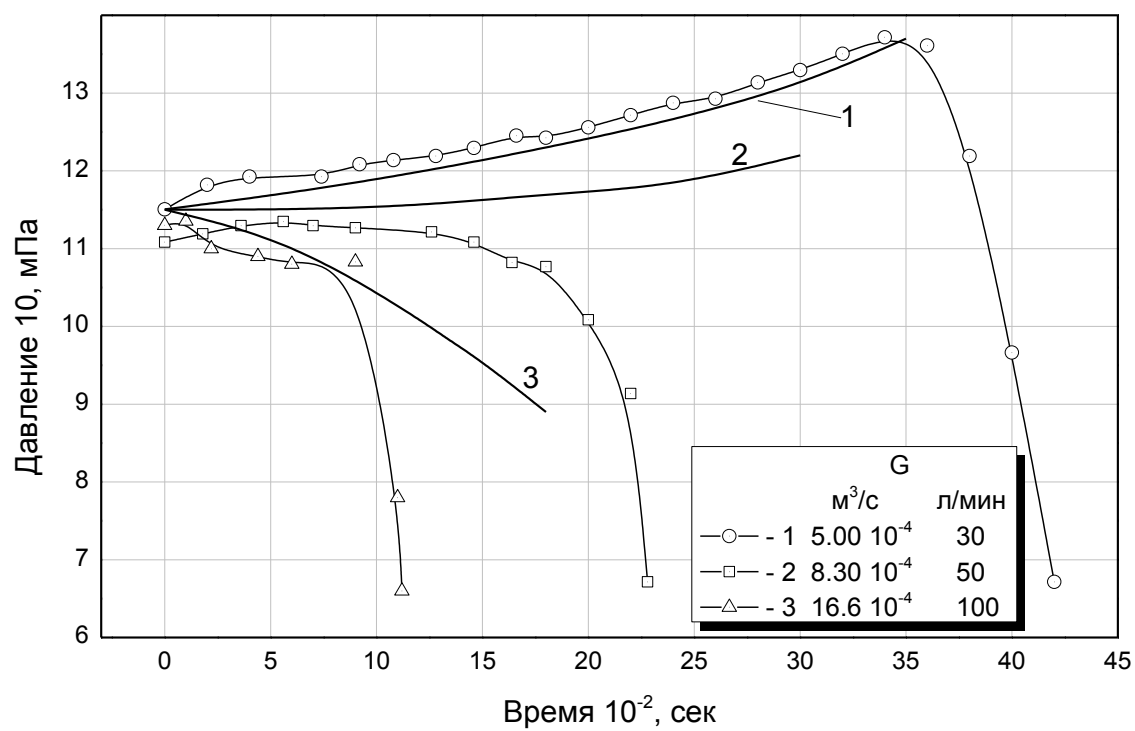
На Рис.6 и Рис.7 показаны измеренные и рассчитанные рабочие характеристики опытных образцов криогенных аппаратов, предназначенных для подводного плавания. Характеристики сняты для различных постоянных расходов дыхательной смеси, которые охватывают диапазоны физических нагрузок водолаза от состояния покоя до тяжелой физической нагрузки (100 л/мин). Всего было проведено две серии испытаний при исходных давлениях в аппарате $P_o = 1,15$ МПа и $P_o = 0,73$ МПа, что соответствует глубинам погружения 50...60 м и 0...10 м. На рисунке 6 показаны только опытные данные, а на рисунке 7 сплошными линиями показаны расчетные характеристики.

Изменение давления в работающем аппарате определяется взаимодействием двух противоположно действующих факторов - теплопритоков в криогенный сосуд и отбором жидкости на дыхание. Как видно из графиков при малых расходах на дыхание превалирует влияние теплопритоков и давление в аппарате увеличивается со временем, достигает максимальных значений, а затем начинает резко падать. Последнее можно объяснить значительной выработкой жидкости, приводящей к осушке верхних отборников жидкости и происходящим затем проскоком пара через этот отборник.

Графики, приведенные на рисунке 6, отличаются от графиков, приведенных на рисунке 7. Объясняется это тем, что во втором случае ($P_o = 0,73$ МПа) при падении давления до 0,3...0,4 МПа водолаз переключает аппарат на контур стабилизации давления и одновременно с процессом отбора жидкости производится дополнительная разгонка аппарата. Как видно из графиков давление удавалось поднять повторно, однако, после обратного переключения на нормальный контур дыхания оно вновь резко падало.

Из графиков видно также максимально возможная длительность пребывания человека под водой при различных физических нагрузках. Так в состоянии покоя ($G = 10$ л/мин) человек может находиться вблизи поверхности воды примерно до 300 мин. При работе средней тяжести ($G = 30$ л/мин) это время сокращается до 100 мин.

Удовлетворительное совпадение экспериментальных данных с расчетными в период основного времени работы аппарата позволяет рекомендовать систему уравнений (4) - (15) для оценочных расчетов на стадии проектирования.

Рисунок 6 – Рабочие характеристики аппарата при $P_0 = 0.73$ мПаРисунок 7 – Рабочие характеристики аппарата при $P_0 = 1.15$ мПа

ВЫВОДЫ

1. Проведенный термодинамический анализ криогенных систем жизнеобеспечения указывает пути и возможности использования в практических целях эксергии криогенной жидкости, находящейся в аппарате.
2. Разработанные математические модели отражают основные процессы, происходящие в криогенных системах жизнеобеспечения, режимы их работы и могут быть использованы на стадии проектирования этих систем.
3. Испытания опытных образцов показали их работоспособность и возможность использования в практических целях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Наер В.А., Кравченко М.Б., Роженцев А.В. Криогенные системы жизнеобеспечения – схемы и конструкции аппаратов. Холодильная техника и технология, № 5, 2012 г.
2. Наер В.А., Балетов А.Н., Лоскутов А.К., Кравченко М.Б. Криогенные системы жизнеобеспечения. Холодильная техника и технология, вып. 39, 1984 г.
3. Мамонтов Д. Жидкая вода, жидкий воздух. Популярная механика № 7, 2009 г.
4. Кравченко М.Б. и др. Автономная система жизнеобеспечения. А.с. № 1821980, 1992г.
5. Наер В.А., Витюк А.В. и др. Устройство для испытаний дыхательных аппаратов. А.с. №1243727, 1986г.
6. Наер В.А., Балетов А.Н., Лоскутов А.К., Кравченко М.Б. Методика расчета рабочих процессов в криогенных дыхательных аппаратах. Деп. Рукопись в УКРНИИИТИ, №1673, 1985г.
7. Балетов А.Н. и др. Разработка и испытания криогенной автономной теплозащитной дыхательной системы. ЦИНТИХимнефтемаш, 1984г.
8. Наер В.А., Витюк А.В., Балетов А.Н., Тешин Н.А., Лоскутов А.К., Токаев А.А. Криогенный дыхательный аппарат для подводного плавания. А.с. № 786179, 1980г.
9. Наер В.А., Витюк А.В., Балетов А.Н. Теплозащитная дыхательная система скафандра. А.с. № 702558, 1979 г.
10. Витюк А.В. и др. Автономная теплозащитная система. А.с. № 698625, 1979 г.

Получена в редакции 18.03.2013, принята к печати 20.03.2013