

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ МЕМБРАННОГО БЛОКА КОМПРЕССОРА, ПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО ГАЗ И ЖИДКОСТЬ В РАКЕТНЫХ КОМПЛЕКСАХ, С ПРИМЕНЕНИЕМ ИКТ ПОСРЕДСТВОМ ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА СКАЧКА ДАВЛЕНИЯ

В. И. Кузнецов¹, И. О. Щука²

¹Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

²Сибирский институт бизнеса и информационных технологий,
Россия, 644116, г. Омск, ул. 24 Северная, д. 196, корп. 1

Рассмотрен вопрос повышения ресурса работы мембраны в мембранно-плунжерном компрессоре. Найдено, что равномерное распределение отверстий в подложке для подвода масла в одну полость, а газ — в другую полость, которые расположены между мембраной и подложками, вызывает волнообразное движение мембраны. Показано, какой процесс вызывает возникновение скачков давления, которые сокращают срок работы мембраны до разрушения. Теоретически и экспериментально найдено оптимальное расположение отверстий в подложках для снижения скачков давления и повышения ресурса работы мембраны без разрушения.

Ключевые слова: мембранно-плунжерный компрессор, ресурс, мембрана, подложка, распределительный диск, отверстия.

Введение

Для бесперебойной работы ракетных комплексов возникает необходимость перекачивать газ и жидкость с высокой чистотой, причем не должно быть соприкосновения с другой жидкостью. Такой возможностью обладают мембранные насосы и компрессоры. В данных устройствах мембрана может быть тонкой из-за двустороннего давления.

Частота рабочих циклов мембранного компрессора определяется удельными массогабаритными показателями.

При низкой частоте рабочих циклов ($f < 10$ Гц), будут низкими и массогабаритные показатели мембранного компрессора. Если частота рабочих циклов становится выше ($f = 25 - 50$ Гц), то тогда мембрана подвержена разрушению через $t = 10 - 150$ часов работы вместо необходимого ресурса в 10000 часов. Чтобы создать условия стабильной работы компрессора, производители вынуждены прикладывать запасной пакет мембран и ставить запасной компрессор для обеспечения непрерывной работы.

Актуальность

Актуальность данной работы заключается в том, что до сегодняшнего дня проблема стремительного разрушения мембраны в мембранно-плунжерных компрессорах не найдена, для бесперебойной работы устройства требуется повышение ресурса мембраны, поэтому данная работа актуальна.

Основные решаемые проблемы работы

Основной решаемой проблемой работы является определение оптимальной конструкции распределительного диска, чтобы увеличить длительность

работы мембранного блока мембранно-плунжерного компрессора.

Руководствуясь тем, что в настоящее время наилучшие условия работы в мембранном блоке возможны только при равномерном размещении сопел в распределительном диске мембраны, составляется математическая модель действия мембранного блока [1, 2].

При выполнении эксперимента было выяснено, что результатом быстрого разрушения мембраны является воздействие на нее волнообразного движения [3–4]. Появление данной сложившейся ситуации возможно объяснить тем, что возникает радиальное перемещение жидкости, которое располагается над мембраной.

Доказательство

Прежде чем создать математическую модель работы мембраны следует принять следующую физическую модель. Перемещение газа, расположенного параллельно оси диафрагмы, возможно только тогда, когда расход газа через отверстие в распределительном диске равняется расходу газа, находящегося между мембраной и подложкой непосредственно в данном кольцевом сечении. При таком расположении не возникнет скачка давления газа и не станет появляться дополнительное напряжение, вследствие которых происходит стремительное разрушение мембраны. На основании данных условий составлена замкнутая система уравнений, описывающая работу мембранного компрессора (рис. 1).

Горизонтальная плоскость мембраны описывается уравнением [5]:

$$y = a + bx, \quad (1)$$

где $a = 0$; $b = 0$.

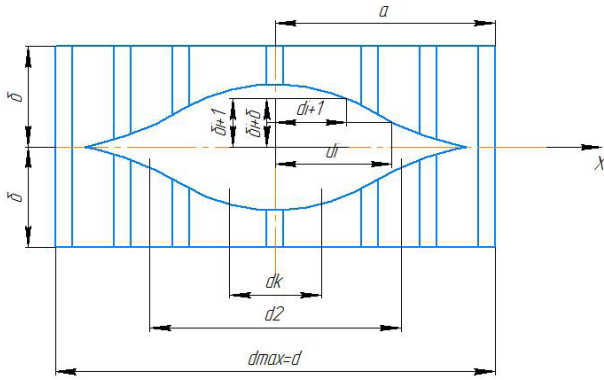


Рис.1. Схема мембранного блока
Fig. 1. Diagram of the membrane block

Уравнение для образующей распределительного диска имеет вид [6]:

$$y = \delta \left(1 - \frac{x^2}{a^2} \right)^2, \quad (2)$$

где y — расстояние между плоскостью мембраны и поверхностью распределительного диска на радиусе x_i ;

δ — максимальный прогиб мембраны при полном ее прижатии к подложке;

a — радиус мембраны.

Вращение образующей вокруг оси определяет объем между подложкой и мембраной [7]:

$$W_i = \int_0^a F(y) dy, \quad (3)$$

где $F(y) = \pi [f(y)]^2 = \pi x^2$.

Решением уравнения (2) является:

$$x = a \sqrt{1 - \left(\frac{y}{\delta} \right)^{0.5}}. \quad (4)$$

Далее определяется функция $F(y)$:

$$F(y) = \pi a^2 \left(1 - \sqrt{y/\delta} \right). \quad (5)$$

С учётом уравнения (5) объём в межмембранном пространстве можно выразить следующим образом:

$$W_i = \int_0^{\delta} \pi a^2 \left(1 - \sqrt{y/\delta} \right) dy. \quad (6)$$

Уравнение (6) интегрируется

$$\begin{aligned} W_i &= \int_0^{\delta} \pi a^2 \left(1 - \sqrt{y/\delta} \right) dy = \\ &= \pi a^2 \left(\int_0^{\delta} dy - \frac{1}{\sqrt{\delta}} \int_0^{\delta} \sqrt{y} dy \right) = \\ &= \pi a^2 \left(y \Big|_0^{\delta} - \frac{1}{\sqrt{\delta}} \frac{y^{1.5}}{1.5} \Big|_0^{\delta} \right) = \\ &= \pi a^2 \left(\delta - \frac{\delta^{1.5}}{1.5\sqrt{\delta}} \right) = \frac{\pi a^2 \delta}{3}. \end{aligned} \quad (7)$$

Заменяв радиус мембраны a на диаметр мембраны в заделке (7), получим, что объём W_i будет равен:

$$W_i = \frac{\pi}{12} d_i^2 \delta. \quad (8)$$

Величина жидкости, вытесняемая за один двойной ход, равна [8]:

$$W_{II} = 2W_i = \frac{\pi}{6} d^2 \delta. \quad (9)$$

Площадь сопла для прохода жидкостей в мембранном блоке имеет вид [9]:

$$S_{\text{омв.}\epsilon} = \frac{Q_m}{\mu} \sqrt{\frac{\rho}{2\Delta p}}, \quad (10)$$

где Q_m — объём жидкости, которая поступает в мембранный блок, кг/с;

ρ — плотность жидкости, кг/м³;

μ — расходный коэффициент;

Δp — перепад давлений в сопле, Па.

i -ый объём площади сопла определяется уравнением:

$$S_i = S_{\Sigma} \frac{W_i}{\sum_{i=1}^k W_i}. \quad (11)$$

За один двойной ход компрессор пропускает следующий объём:

$$Q = w f_1 = Z S_{\text{пл}} \frac{h_i}{2} \omega \sin \alpha, \quad (12)$$

где f_1 — число двойных ходов мембраны в секунду;

Z — число поршней;

$S_{\text{пл}}$ — площадь поршня (м²);

h_i — ход поршня (м);

ω — угловая скорость (1/с).

Сила, действующая на мембрану, определяется произведением давления на площадь мембраны:

$$P = p_c S_m. \quad (13)$$

Площадь сопла должна быть такой, чтобы усилие было больше усилия от давления жидкости:

$$S_{\text{омв.}\min} \geq P/p_n, \quad (14)$$

где p_n — давление нагнетания, Па.

Диаметр сопла должен быть меньше максимально возможного [10]

$$d_{\text{омв}} \leq d_{\text{max}}', \quad (15)$$

где d_{max} — максимальный диаметр сопла, который выдерживает максимальные нагрузки.

Количество сопел в подложке определяется уравнением:

$$n = \frac{S_{\min}}{S_1} = \frac{4S_{\text{омв}\Sigma}}{\pi d_{\text{омв}}^2}. \quad (16)$$

Расход газа через сопло определяется:

$$Q_{\text{мн.}} = \frac{z S_{\text{пл}} h_i}{\Delta l} = z S_{\text{пл}} \frac{h_i}{2} \omega \sin \alpha, \quad (17)$$

где z — плунжеры (их количество), одновременно вытесняющие газ в напорный трубопровод;

$S_{\text{пл}}$ — площадь плунжера, м²;

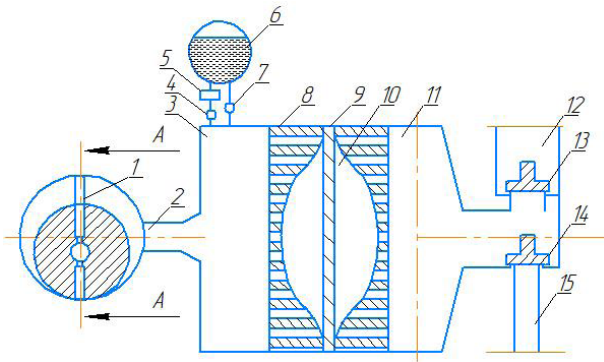
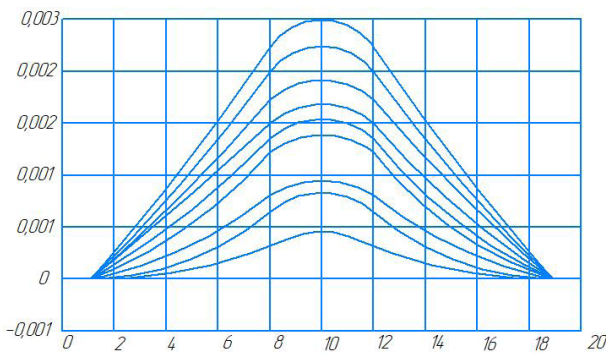
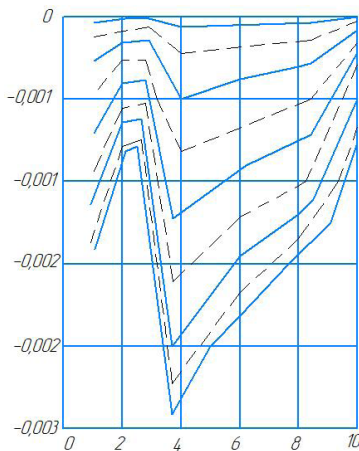


Рис.2. Схема мембранно-плунжерного компрессора
Fig. 2. Diagram of the diaphragm-plunger compressor



а)



б)

Рис. 3. Расположение мембраны во время движения жидкости или газа от нейтрального положения к распределительному диску:
а) оптимально располагающиеся отверстия в подложке;
б) равномерно располагающиеся отверстия в подложке
Fig. 3. The location of the membrane during the movement of liquid or gas from the neutral position to the distribution disk:
a) Optimally positioned holes in the substrate;
b) Evenly spaced holes in the substrate

h_i — расстояние, пройденное плунжером за время Δt .

Путь, пройденный плунжером, равен [11]:

$$h_i = \varepsilon(1 - \cos\alpha), \quad (18)$$

где ε — эксцентриситет.

Данная система уравнения является замкнутой, по ней можно определить минимальные нагрузки, возникающие в процессе при безударном движении компонентов, присутствующих между мембраной и подложками.

Мембранный компрессор работает следующим образом: перед началом работы мембрана 9 располагается на мембранном диске 12 (рис. 2), в нижней мертвой точке (н.м.т.) находится плунжер 1. В режиме всасывания давление на подложке 11 падает. После заполнения рабочего объема подложкой 8 и мембраной 9 начинается процесс вытеснения жидкости в напорный трубопровод.

Подача мембранно-плунжерного компрессора может быть определена различными устройствами [12, 13].

На основании математической модели были составлены методики расчёта положения фронта газа в процессе нагнетания оптимальных и равномерных расположений отверстий, учитывая абсолютную гибкость мембраны по радиусу.

Результаты расчёта по этим методикам приведены на рис. 3. Здесь видно, что мембрана изгибается плавно и нет резких скачков давления, прогибающих мембрану.

Равномерное расположение сопел вызывает на поверхности мембраны резкие скачки давления, приводящие к преждевременному выходу мембраны из строя (поломке).

В связи с этим следует располагать отверстия в распределительном диске таким образом, чтобы исключалось радиальное движение рабочих компонентов мембранного блока.

На базе решения математической модели был составлен алгоритм распределения сопел в мембранном диске. Далее, на основе замкнутой системы уравнений с применением языка программирования «С+», составлена программа расчета гидравлического удара мембранно-плунжерного компрессора с целью оптимизации работы мембранного блока, перекачивающего газ и жидкость в ракетных комплексах.

Заключение

Показано, что если отверстия в мембране располагать равномерно, то возникают проблемы из-за радиального движения, в котором участвуют жидкость и газ, располагающиеся между мембраной и распределительным диском. Это приводит к возникновению скачка давления, возникновению волнообразного движения мембраны, в связи с чем мембрана быстро выходит из строя (мембрана ломается), а при оптимальном расположении отверстий скачки давления не будут возникать и ресурс мембраны увеличивается в десятки раз.

Составлена замкнутая математическая модель, описывающая оптимальное расположение отверстий в корпусе, благодаря которому исключается возможность появления скачка давления, приводящее к разрушению мембраны из-за гидравлического удара.

На базе данной модели, были разработаны несколько методик, при помощи которых возможно рассчитать положение сопел на мембранном диске для исключения возникновения гидравлического удара и возможности безаварийной работы мембранного блока во всем диапазоне эксплуатации. На основе замкнутой системы уравнений, с применением языка программирования «С+», составлена

программа расчета гидравлического удара мембранно-плунжерного компрессора с целью оптимизации работы мембранного блока, перекачивающего газ и жидкость в ракетных комплексах.

Программа расчета гидравлического удара мембранно-плунжерного компрессора с целью оптимизации работы мембранного блока, перекачивающего газ и жидкость в ракетных комплексах

A program for calculating the hydraulic impact of a diaphragm-plunger compressor in order to optimize the operation of a membrane unit pumping gas and liquid in rocket complexes

```

#include <conio.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <stdlib.h>
void main ()
{
char str [ 80 ];
double h, mu, delta, l, E, a, r ;          // начальные данные
                                           // вычисляемые величины
double epsilon,                          // относительное удлинение
        sigma,                            // напряжение
        D, q, Wmax,                       //
Wactual,                                  // фактический прогиб в центре
sigmaRad,                                 // радиальное напряжение
sigmaTetta,                              // напряжение
sigmaEffect;                             // эффективное напряжение
double dl, d2, d3;
char ch;
for ( ; ; )
    {
clrscr ( ) ;
gotoxy (1,1); printf ( " введите начальные данные " )
gotoxy (1,2) ; printf ( "h (толщина пластины) :");
    gets ( str ) ;
    if ( str [0] == 'q' || str [0] == 'Q') return ;
    h = atof ( str ) ;
gotoxy ( 1,3 ) ; printf ( "mu (коэффициент Пуассона) :");
    gets ( str ) ;
    if ( str [0] == 'q' || str [0] == 'Q') return ;
    mu = atof(str) ;
    . . .
gotoxy ( 1,4 ) ; printf ( "delta (макс. прогиб мембраны) :");
    gets ( str ) ;
    if ( str [0] == 'q' || str [0] == 'Q') return ;
    delta = atof ( str ) ;
    . " ) ;
gotoxy ( 1,5 ) ; printf ( "l длина струны :");
    gets ( str ) ;
    if ( str [0] == 'q' || str [0] == 'Q') return ;
    l = atof ( str ) ;
gotoxy ( 1,6 ) ; printf ( "E (модуль упругости) :");
    gets ( str ) ;
    if ( str [0] == 'q' || str [0] == 'Q') return ;
    E = atof ( str ) ;
gotoxy (1,7) ; printf ( "r (для радиального напряжения) : )" );
    gets ( str ) ;
    if ( str [0] == 'q' || str [0] == 'Q') return; r = atof( str ) ;
/*
gotoxy (1,8) ; printf ( "a (радиус мембраны)
" ) ;
    gets (str);
    if ( str [0] == 'q' || str [0] == 'Q') return ;
    a = atof(str) ;
*/
    a=1 .
        '
        / /-----
// 1)
dl=delta/l ;

```

```

dl = dl * dl ;
epsilon = (dl/2) * (1.0 - dl/4) ;
// 2)
sigma = E * epsilon ;
// 3) D = E * h * h / (12.0 * (1 - mu * mu)) ;
// 4)
dl = a * a * a * a ,
q = 64.0 * D * delta / dl ;
// 5)
Wmax = 200 * dl / (64.0 * D) ;
// 6)
Wactual = q * dl / (64.0 * D) ;
// 7)
d2 = 24.0 * D * delta / (h * h * dl) ;
sigmaRad = d2 * (a * a * (1.0 + mu) - r * r * (3.0 + mu)) ;
// 8)
sigmaTetta = d2 * (a * a * (1.0 + mu) - r * r * (1 + 3 * mu)) ;
// 9)
sigmaEffect = sigmaRad - sigma T etta ;

```

gotoxy (1,9) ; clrntf (" - Результаты-----"

```

gotoxy (1,10) ;
clrntf ( "%C (относительное удлинение)          :%g" ,243 ,epsilon ) ;
gotoxy (1,11) ;
clrntf ( "sigma (напряжение в струне)           :%g" , sigma ) ;
gotoxy (1,12) ;
clrntf ( "D                                     :%g" , D ) ;
gotoxy (1,13) ;
clrntf ( "q (изгибающее напряжение)            :%g" , q) ;
gotoxy (1,14) ;
clrntf ( "W max (максимальный прогиб)          :%g" , W tax) ;
gotoxy (1,15) ;
clrntf ( "W act (фактический прогиб)           :%g" , W actual ) ;
gotoxy (1,16) ;
clrntf ( "Sigma (радиальное)                   :%g" , sigmaRad) ;
gotoxy (1,17) ;
clrntf ( "Sigma Tetta :%g" , sigmaTetta ) ;
gotoxy (1,18) ;
clrntf ( "Sigma (эфффективное)                  :%g" , sigmaEffect) ;
gotoxy (1,20) ; clrntf ( "Enter - продолжить, ESC - выход" ) ;
ch=getch ( ) ;
if(ch==27 || ch=='q' || ch=='Q')return;
{
}

```

Список источников

- Алтухов С. М., Жуков А. В., Кузнецов В. Д. [и др.]. Современное состояние и направления развития мембранных компрессорных установок в СССР и за рубежом. Москва: ЦИНТИХимнефтемаш, 1982. 38 с.
- Кузнецов В. И., Щука И. О. Мембранные компрессоры для стартовых ракетных комплексов. Проблемы, перспективы и стратегические инициативы развития теплоэнергетического комплекса: материалы междунар. науч.-практ. конф. Омск, 2011. 319 с.
- Кузнецов Л. Г., Бураков А. В., Михайлов Д. С. [и др.]. Применение дожимающих мембранных компрессорных установок для технических газов на заказах ВМФ // Морской вестник. 2020. № 1. С. 61–63.
- Алтухов С. М., Румянцев В. А. Мембранные компрессоры. Москва: Машиностроение, 1967. 127 с.
- Кузнецов В. И., Щука И. О. Процесс возникновения гидравлического удара в мембранно-плунжерном насосе // Динамика систем, механизмов и машин: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. Омск: Изд-во ОмГТУ, 1999. С. 271–272.
- Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике. Москва: АСТ: Астрель, 2006. 991 с.

- Кузнецов В. И., Щука И. О. Физическая модель взаимодействия жидкости и мембраны в мембранно-плунжерном насосе // Внутрикамерные процессы в энергетических установках, акустика, диагностика, экология, ВАУ. Казань, 2000. С. 109–111.
- Коева А. А., Петров П. В. Концепция исследований устройств гидроавтоматики сложных энергетических систем // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 5 (50). С. 103–108.
- Даль Г. Ф., Соколов В. А., Гриднев Э. С. Унифицированные мембранные компрессоры // Компрессорное машиностроение. Серия ХМ-5. Москва: ЦИНТИХимнефтемаш, 1980. 13 с.
- Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Иосилевич Г. Б. Расчет на прочность деталей машин: справ. Москва: Машиностроение, 1993. 640 с.
- Елагин М. Ю. Математическое моделирование рабочих процессов многоступенчатых поршневых компрессоров // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 9. С. 395–399. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-9-395-399.
- Пат. SU 1645828 A1 Франция, МПК G 01 F 1/78. Расходомер для жидкостей и газов / Заилов В. М., Кауфман И. М., Хабарин Ю. А. № 438895/10; заявл. 09.03.1988; опубл. 30.04.1991, Бюл. № 16.
- Пат. 2145060 Российская Федерация, МПК G 01 F 1/78; G 01 F 1/28. Устройство для определения массового расхода

текучих сред / Бубнов А. В., Кузнецов В. И., Федоров В. К.,
Щука И. О. № 97122228; заявл. 23.12.1997; опубл. 27.01.2000,
Бюл. № 3.

КУЗНЕЦОВ Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Авиа- и ракетостроение» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 1763-0468

AuthorID (РИНЦ): 161955

ResearcherID: N-9618-2016

Адрес для переписки: vi.kuznetsov@yandex.ru

ЩУКА Ирина Олеговна, кандидат технических наук, доцент факультета очного отделения Сибирского института бизнеса и информационных технологий, г. Омск.

SPIN-код: 8418-3130

AuthorID (РИНЦ): 486124

Адрес для переписки: oat-schuka@mail.ru

Для цитирования

Кузнецов В. И., Щука И. О. Оптимизация работы мембранного блока компрессора, перекачивающего газ и жидкость в ракетных комплексах, с применением ИКТ посредством программы расчета скачка давления // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 3. С. 9–16. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-3-9-16.

Статья поступила в редакцию 09.06.2022 г.

© В. И. Кузнецов, И. О. Щука

OPTIMIZATION OF THE OPERATION OF THE COMPRESSOR DIAPHRAGM UNIT PUMPING GAS AND LIQUID IN ROCKET COMPLEXES BY MEANS OF A PRESSURE JUMP CALCULATION PROGRAM

V. I. Kuznetsov¹, I. O. Shchuka²

¹Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

²Siberian Institute of Business and Information Technologies,
Russia, Omsk, 24 Severnaya st., 196/1, 644116

The issue of increasing the service life of the membrane in a diaphragm-plunger compressor is considered. It is found that the uniform distribution of holes in the substrate for the supply of oil to one cavity and gas to the other cavity, which are located between the membrane and the substrates, causes a wave-like movement of the membrane. It is shown which process causes the occurrence of pressure surges that shorten the life of the mekmbra6a to destruction. Theoretically and experimentally, the optimal arrangement of holes in the substrates has been found to reduce pressure surges and increase the service life of the membrane without destruction.

Keywords: diaphragm-plunger compressor, resource, membrane, substrate, distribution disk, holes.

References

1. Altukhov S. M., Zhukov A. V., Kuznetsov V. D. [et al.]. Sovremennoye sostoyaniye i napravleniya razvitiya membrannykh kompressornykh ustanovok v SSSR i za rubezhom [Current state and development trends of membrane compressor units in the USSR and abroad]. Moscow, 1982. 38 p. (In Russ.).
2. Kuznetsov V. I., Shchuka I. O. Membrannyye kompressory dlya startovykh raketnykh kompleksov. Problemy, perspektivy i strategicheskiye initsiativy razvitiya teploenergeticheskogo kompleksa [Membrane compressors for launch rocket systems. Problems, prospects and strategic initiatives for the development of the thermal power complex]. Omsk, 2011. 319 p. (In Russ.).
3. Kuznetsov L. G., Burakov A. V., Mikhaylov D. S. [et al.]. Primeneniye dozhimayushchikh membrannykh kompressornykh ustanovok dlya tekhnicheskikh gazov na zakazakh VMF [The use of booster membrane compressor units for industrial gases on the orders of the Navy] // Morskoy vestnik. *Morskoy Vestnik*. 2020. No. 1. P. 61–63. (In Russ.).
4. Altukhov S. M., Rumyantsev V. A. Membrannyye kompressory [Diaphragm compressors]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1967. 127 p. (In Russ.).
5. Kuznetsov V. I., Shchuka I. O. Protsess vozniknoveniya gidravlicheskogo udara v membranno-plunzhernom nasose [The process of occurrence of hydraulic shock in a diaphragm-plunger pump] // Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. Omsk: OmSTU Publ., 1999. P. 271–272. (In Russ.).
6. Vygodskiy M. Ya. Spravochnik po vysshey matematike [Handbook of Higher Mathematics]. Moscow: AST: Astrel', 2006. 991 p. (In Russ.).
7. Kuznetsov V. I., Shchuka I. O. Fizicheskaya model' vzaimodeystviya zhidkosti i membrany v membranno-plunzhernom nasose [Physical model of fluid-membrane interaction in a diaphragm-plunger pump] // Vnutrikamernyye protsessy v energeticheskikh ustanovkakh, akustika, diagnostika, ekologiya, VAU. Intra-chamber Processes in Power Plants, Acoustics, Diagnostics, Ecology, HAI. Kazan, 2000. P. 109–111. (In Russ.).
8. Koyeva A. A., Petrov P. V. Kontsepsiya issledovaniy ustroystv gidroavtomatiki slozhnykh energeticheskikh sistem [Concept of compound energy systems hydroautomatic devices researches] // Vestnik UGATU. *Vestnik UGATU*. 2012. Vol. 16, no. 5 (50). P. 103–108. (In Russ.).
9. Dal' G. F., Sokolov V. A., Gridnev E. S. Unifitsirovannyye membrannyye kompressory [Unified diaphragm compressors] // Kompessornoye mashinostroyeniye. Seriya KhM-5. *Kompessornoye mashinostroyeniye. Seriya KhM-5*. Moscow, 1980. 13 p. (In Russ.).
10. Birger I. A., Shorr B. F., Iosilevich G. B. Raschet na prochnost' detaley mashin: sprav [Strength calculation of machine parts: handbook]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1993. 640 p. (In Russ.).
11. Elagin M. Yu. Matematicheskoye modelirovaniye rabochikh protsessov mnogostupenchatykh porshnevnykh kompressorov [Mathematical modeling of working processes of multi-stage reciprocating compressors] // Izvestiya TulGU. *Tekhnicheskkiye nauki. News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2021. No. 9. P. 395–399. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-9-395-399. (In Russ.).
12. Patent SU 1645828 A1 France, IPC G 01 F 1/78. Raskhodomer dlya zhidkostey i gazov [Flowmeter for liquids and gases] / Zalilov V. M., Kaufman I. M., Khabarin Yu. A. No. 438895/10. (In Russ.).
13. Patent 2145060 Russian Federation, IPC G 01 F 1/78; G 01 F 1/28. Ustroystvo dlya opredeleniya massovogo raskhoda tekuchikh sred [Device for determining of mass flow rate of fluids media] / Bubnov A. V., Kuznetsov V. I., Fedorov V. K., Shchuka I. O. No. 97122228. (In Russ.).

KUZNETSOV Viktor Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of Aviation and Rocketry Department, Omsk State Technical University, Omsk. SPIN-code: 1763-0468
AuthorID (RSCI): 161955
ResearcherID: N-9618-2016
Correspondence address: vik.kuznetzov@yandex.ru
SHCHUKA Irina Olegovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Faculty of the Full-time Department, Siberian Institute of Business and Information Technologies, Omsk.



SPIN- code: 8418-3130
AuthorID (RSCI): 486124
Correspondence address: oat-schuka@mail.ru

complexes by means of a pressure jump calculation program // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2022. Vol. 6, no. 3. P. 9–16 DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-3-9-16.

For citations

Kuznetsov V. I., Shchuka I. O. Optimization of the operation of the compressor diaphragm unit pumping gas and liquid in rocket

Received June 09, 2022.

© **V. I. Kuznetsov, I. O. Shchuka**