

# ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С СИЛЬФОННЫМИ РАБОЧИМИ ПОЛОСТЯМИ

Лукачев С.В., Довгялло А.И., Белозерцев В.Н.

Самарский государственный аэрокосмический университет

Как энергопроизводящие так и энергопотребляющие установки, в том числе и бортового применения, требуют новых, более совершенных термомеханических преобразователей, способных удовлетворить противоречивые требования экономичности, безопасности, экологичности, комфорта.

Установки, работающие по замкнутым прямым и обратным циклам Ренкина, Стирлинга, Брайтона а также дроссельные системы охлаждения нуждаются в полной герметизации и чистоте внутреннего контура. Кроме того, в микроэнергетике, для уровня малых мощностей, когда масштабный фактор в значительной степени влияет на совершенство рабочего процесса, существующие для этих машин проблемы герметизации, смазки, теплообмена еще в большей степени вступают в противоречие с экономичностью и надежностью.

Частично или полностью эти проблемы могут быть решены в конструкциях машин, в которых рабочие цилиндры выполнены в виде складывающегося мембранного сильфона.

В настоящей публикации приводятся сведения о разработке и исследовании сильфонных: двигателя внешнего подвода тепла, газовой холодильной машины и компрессора.

## Сильфонный двигатель внешнего подвода тепла (Стирлинг)

На рис.1 представлена схема модуля сильфонного двигателя внешнего подвода тепла (СДВПТ). Тепло подводится к горячему сильфону в камере подогрева, отводится от холодного сильфона в камере охлаждения. Между полостями установлен регенератор, рабочий объем заполнен газом (гелием), сдвиг фаз обеспечивается кинематикой силового механизма.

Очевидные преимущества сильфонов для ДВПТ тем не менее потребовали количественных оценок.

Широко распространенная методика расчета рабочего процесса первого уровня, известная как изотермическая методика Шмидта/11/, обеспечивает степень достоверности в 30% и не учитывает конструктивные особенности машины. Поэтому была создана математическая модель расчета рабочего процесса СДВПТ и методика третьего уровня.

Она основана на применении уравнения энергии для переменной массы рабочего тела:

$$Q + dI = dU + P dV.$$

Это уравнение составлялось для каждой из рабочих полостей СДВПТ, после чего оно представлялось в дифференциальной форме и записывалось для каждой фазы перемещения рабочего тела.

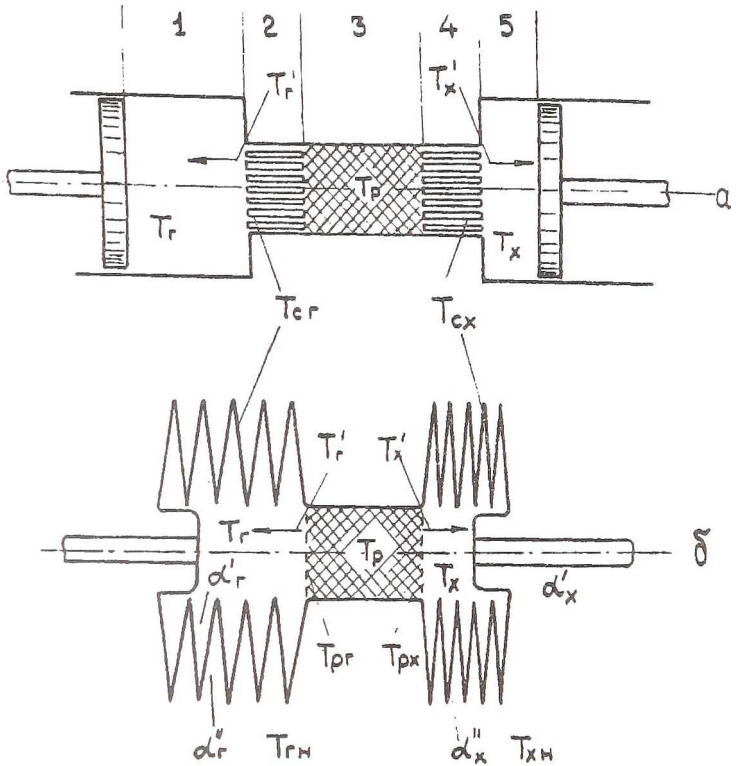


Рис. 1. Схемы рабочих полостей поршневой и сифонной машин Стирлинга

При решении дифуравнений объемы горячей и холодной полостей задавались как функции угла поворота с учетом кинематики приводного механизма, текущие коэффициенты теплопередачи подсчитывались по локальным коэффициентам теплоотдачи с последующим усреднением по поверхности [8].

В конечном виде методика учитывала: динамику передачи тепла, к.п.д. регенератора с учетом его несимметричности, перетечки тепла по корпусу и регенератору, влияние параметров рабочего тела на его теплофизические характеристики.

Характеристики цикла: подведенное в цикл тепло  $Q_{\Gamma}$ , отведенное тепло  $Q_X$  и работа цикла  $L$ , подсчитывались интегрированием за оборот в соответствии с теорией цикла Стирлинга

$$Q_{\Gamma} = \oint P \cdot dV_{\Gamma} \quad Q_X = \oint P \cdot dV_X \quad L = \oint P \cdot dV \quad \eta = \frac{L}{Q_{\Gamma}}$$

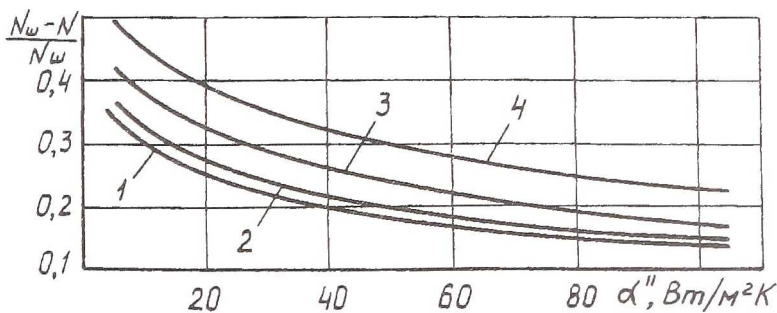
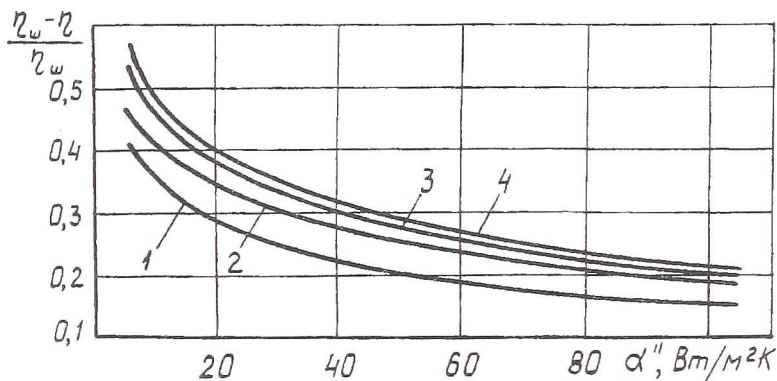


Рис 2. Зависимости относительных разностей к.п.д.  $\eta_{ш}$  и мощности  $N_{ш}$ , подсчитанных по методике Шмидта и  $\eta_i$  и  $N_i$  подсчитанных по уточненной методике, от внешней теплоотдачи  $\alpha''$  и частоты вращения коленвала  $n$ : 1 – 400, 2 – 600, 3 – 800, 4 – 1000 1/мин

Полученные таким образом расчетные характеристики цикла сравнивались с данными по методике Шмидта. Результатом сравнения является зависимости, приведенные на рис. 2. Из их анализа следует, что при приемлемых коэффициентах теплоотдачи снаружи сиффона  $\alpha' = 60 - 80 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$  степень расхождения характеристики по сравнению с идеальной методикой не превышает в среднем 20%, в то время как обычно как методика первого уровня изотермическая методика дает расхождение в 60 - 70 %.

Этот факт свидетельствует с одной стороны о необходимости применения уточненных методик, но с другой стороны о высокой степени совершенства рабочего процесса в сиффонном ДВПТ по сравнению с поршневыми машинами.

С целью экспериментального подтверждения этих положений был изготовлен и исследован сиффонный двигатель /1/. Он был выполнен на четырех сиффонах по оппозитной схеме /2/. Такая конструкция позволила разгрузить механизм привода от давления заправки и улучшить пусковые качества СДВПТ. На рис.3 представлено фото сиффонного модуля. В эксперименте индицировалась рабочая полость, осуществлялась запись температуры в крайних сечениях регенератора (малоинерционные датчики температуры - проволочные сопротивления, вольфрам 5 мкм), регистрировались температуры внешних теплоносителей (воздух) и другие параметры.

Результатом обработки экспериментов были индикаторные циклограммы горячей, холодной и общей полостей модуля двигателя и характеристики цикла (рис.4). Хорошая степень совпадения экспериментальных данных с расчетными подтверждает правильность методики и более высокое чем в поршневых машинах совершенство рабочего процесса.

Эксперименты проводились на сиффонах 100 x 30 x 0,2. Индикаторная мощность модуля достигала 150 Вт (для двигателя 300 Вт). К.п.д. СДВПТ превышал для данных температур эффективность поршневого двигателя на 8 - 12 %.

Таким образом эксперименты подтвердили перспективность сиффонов и одновременно позволили выявить ряд проблем и недостатков, что способствовало формированию концепции дальнейших перспектив их использования на двигателе.

Так для достижения большего эффекта следует при увеличении размеров сиффонной полости снижать рабочую частоту. Это позволит перейти на жидкостные теплоносители снаружи сиффонов и использовать двухфазное рабочее тело внутри сиффонов. Все это приводит к увеличению к.п.д. и возможности утилизировать тепло

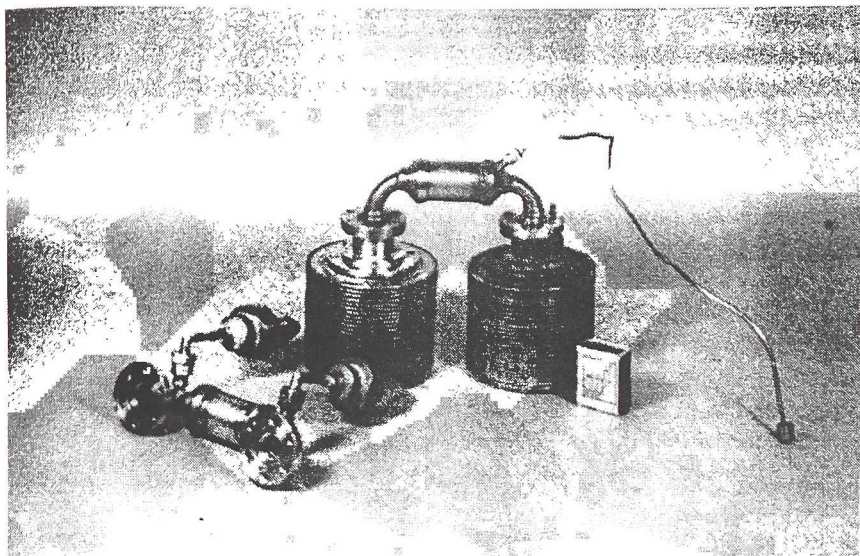


Рис 3. Сильфонный модуль двигателя внешнего подвода тепла.

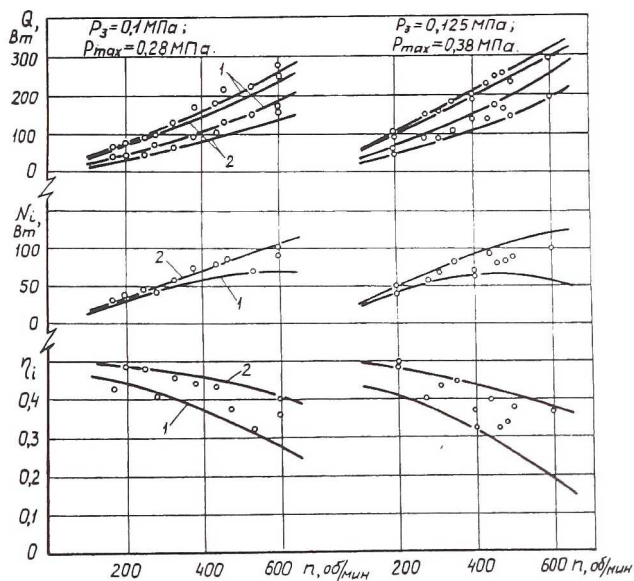


Рис. 4. Зависимости характеристик цикла от частоты оборотов  $n$  при различных давлениях загрузки  $P_3$  и уровнях внешних коэффициентов теплоотдачи  $\alpha''$ , 1 – 10, 2 – 20,  $\text{Вт/м}^2 \text{К}$

низкопотенциальных источников (геотермальные, вторичные, сбросные...), что особо важно в энергосбережении и решения экологических проблем.

#### Сильфонная газовая холодильная машина.

Использование сильфонов в газовой холодильной машине, работающей по обратному циклу Стирлинга, или иному циклу, также представляет определенный интерес.

Очевидно, что сильфонная холодильная машина не может выдерживать такие же давления рабочего тела, какие имеют место в поршневых ГХМ, и поэтому температуры азотного уровня 80 К и ниже могут быть не достижимы. Однако (как будет показано ниже), температурный уровень 150 К для сильфонной газовой холодильной машины (СГХМ) вполне реален.

С целью изучения рабочего процесса такой СГХМ на базе сильфонов 35 x 27 x 0,08 была создана малогабаритная холодильная машина, модуль которой конструктивно аналогичен двигателю. Расчет характеристик СГХМ осуществлялся по уточненной методике, составленной на базе теории рабочего процесса ДВПТ. Однако от предыдущей методики в энергетическом балансе СГХМ были учтены все виды потерь и перетечек тепла, характерные именно для исследуемой конструкции вплоть до тепла гистерезиса сильфона как упругого элемента.

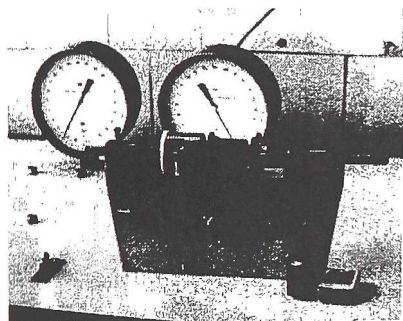
Так же как и для двигателя коэффициенты теплопередачи для холодного и горячего сильфонов вводятся в расчет отдельной подпрограммой как текущие параметры, подсчитанные с учетом временных изменений температуры и давления в каждой полости.

Тепло гистерезиса (внутреннего трения сильфона как упругого элемента) определялось расчетным путем с учетом жесткости сильфона и свойств материала (З6НХТЮ) и температуры. Это тепло на уровне температуры 150 - 200 К составляло величину порядка 0,4 - 0,45Вт и учитывалось как дополнительная тепловая нагрузка.

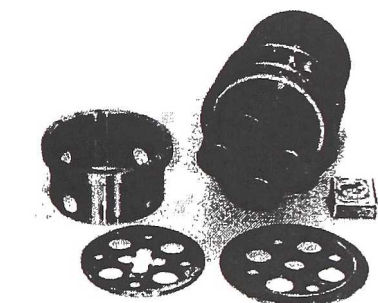
В результате работы над холодильной машиной были созданы и испытаны микро - СГХМ следующих модификаций.

Одномодульная СГХМ с кулачковым приводом, четырехмодульная СГХМ с приводом "косая шайба", одномодульная СГХМ с косой шайбой, двухмодульная СГХМ рядной-оппозитной схемы, рис.5. Испытания показали, что оптимальным давлением заправки исследуемой СГХМ является уровень  $P_3 = 0,3$  МПа. При этом при температуре термостатирования  $T_x = 150$  К холодопроизводительность по циклу составляет величину  $Q_x = 10$  Вт, индикаторная мощность  $N = 40 - 50$  Вт, полезная нагрузка  $Q_p = 1 - 3$  Вт. Из сравнения расчетных и экспериментальных характеристик СГХМ (рис.6) следует, что физическая модель и

методика расчета с достаточной точностью описывает происходящие в рабочем контуре процессы. Степень соответствия расчетной методики и эксперимента составляет 6% по температуре  $T_x$  и 15% по энергетическим характеристикам.



СГХМ с кулачковым приводом



Четырехмодульный СГХМ  
с приводом «косая шайба»

Одномодульная СГХМ с  
приводом «косая шайба»

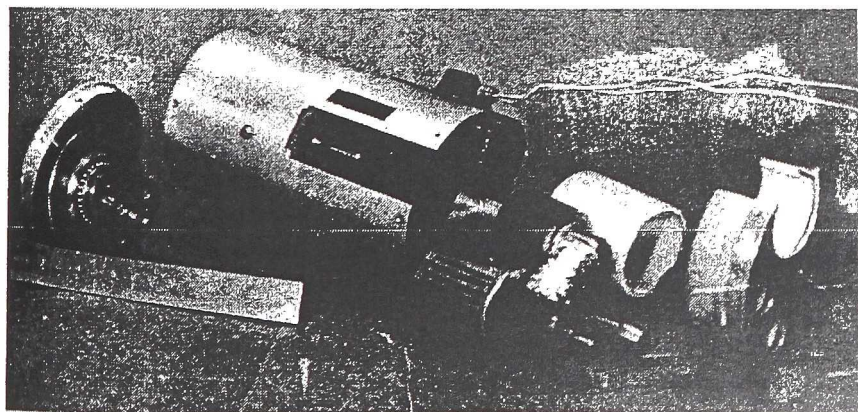


Рис. 5 Сильфонные газовые холодильные машины различных конструктивных схем.

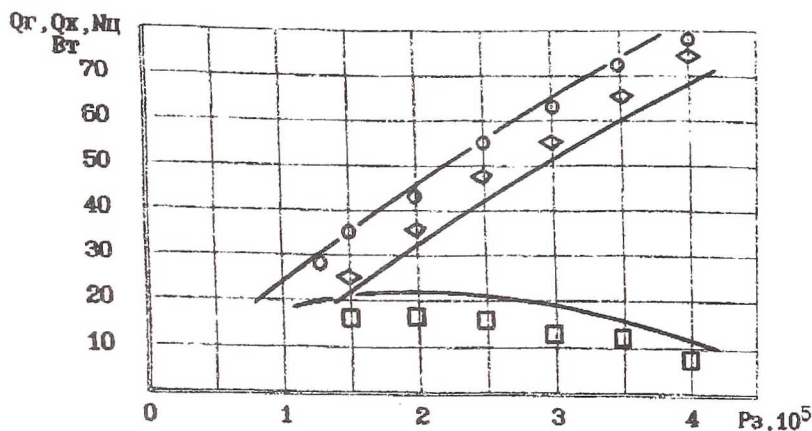


Рис. 6. Характеристики цикла модуля СГХМ по давлению заправки:  
 $Q_g$  – отводимое тепло  $\circ$ ,  $Q_x$  – холодопроизводительность  $\square$ ,  
 $N_{\text{ц}}$  – мощность цикла  $\diamond$ .

С целью подтверждения идеи авторского свидетельства 1177610 были проведены экспериментальные исследования резонансной СГХМ, рис.7 (работающий по обратному циклу аналог свободнопоршневого двигателя Стирлинга). Здесь внешний привод осуществляется только на один сильфон, а деформация и сдвиг фазы второго обеспечивается инерционным воздействием массы регенератора в условиях резонанса. Особенностью такой машины является "жесткая" привязка упругих свойств сильфона и давления заправки (последнее в свою очередь определяет жесткость сильфона по давлению) к частоте.

Недостатком такой машины является тот факт, что холодным контуром является незакрепленный сильфон, а это исключает возможность контактного теплоотвода с объекта охлаждения.

Испытанные СГХМ различных модификаций имели ограниченный (10-50 часов) ресурс, что предполагает одноразовое использование машины или ее модуля. Для военных целей это бывает приемлемо. В представленном виде такие СГХМ предпочтительно применять в качестве подсистемы в каскаде предварительного охлаждения, например термоэлектрического охладителя.

Дальнейшее совершенствование сильфонных ГХМ может идти по пути увеличения циклоустойкости сильфона и совершенствования тепловой защиты холодной полости /4/.



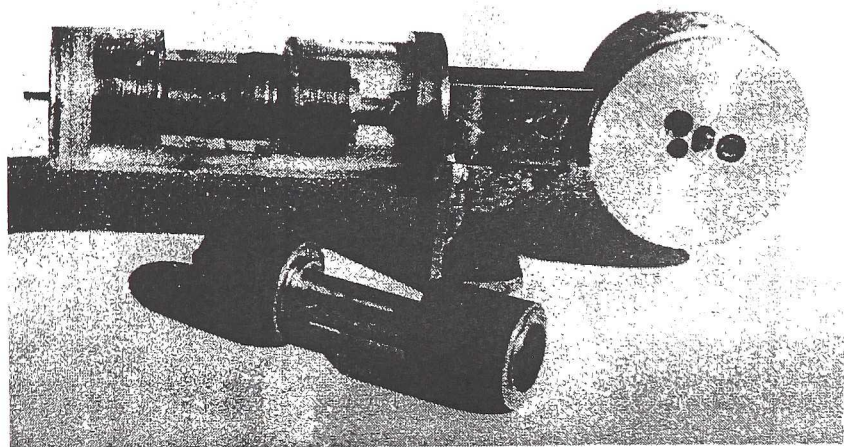


Рис. 7. Резонансная СГХМ

На базе сильфонов возможно также реализовать теплоиспользующую холодильную машину, работающую по циклу Волюмьера, а.с. 1222991 /6/. Здесь давление от рабочего тела не выводится через силовое воздействие на механизм привода, поэтому последний имеет затраты энергии только на трение, и его задача осуществлять перемещение горячего, теплого, и холодного сильфонов в соответствующих рабочему процессу фазах. Энергия в цикл из вне подводится к рабочему телу в виде тепла от нагревателя. Причем, если в качестве последнего использовать сам сильфон, то эффективность подвода тепла заметно повышается, что приводит к улучшению характеристик машины.

#### Сильфонный микрокомпрессор

Особое практическое значение представляет создание сильфонного компрессора /9/. Известные преимущества сильфонной рабочей полости обеспечивают чистоту рабочего тела, герметичность контура, хороший теплосъем в процессе сжатия. Эти качества компрессора необходимы как для чистых технологий (медицина, фармацевтика, биология, научные исследование и др.), так и для замкнутых дроссельных систем.

Выпускаемые отечественной промышленностью "чистые" компрессоры как правило бывают двух типов: поршневые компрессоры сухого трения и мембранные /7/. Такие компрессоры часто не могут удовлетворить современным требованиям по надежности, вибрациям, шуму, и это объективно, так как, к примеру, за габариты и массу приходится "платить" ресурсом и децибеллами шума.

Применение сиффона в качестве рабочей полости в условиях гидропривода (по аналогии с мембранным) кроме перечисленных выше преимуществ дает возможность получить низкочастотный компрессор с весьма совершенным рабочим процессом. Действительно, при заданной производительности по сравнению с мембранным сиффонный компрессор может иметь частоту рабочего процесса (в первом приближении) в число раз  $N_c$  (количество секций сиффона) меньшее чем у мембранного прототипа.

В условиях гидропривода и малой частоты теплосъем с сиффона внутри камеры с капельножидким теплоносителем обеспечивает малое значение показателя политропы процесса сжатия и приближает компрессор к изотермическому. Разгруженность сиффона от перепада давлений, а также отсутствие жесткой механической связи с приводом гарантирует его максимальную циклоустойкость. Уменьшение частоты на порядок и более снижает потери в гидроприводе, а если учесть, что в мембранном компрессоре гидравлические потери составляют 36% от всех видов потерь [7], которые в свою очередь потребляют 30% подводимой мощности, то только за счет снижения потерь в гидроприводе следует ожидать повышение экономичности компрессора на 10 - 20%.

На основании этих предпосылок были проведены расчетно-теоретические и экспериментальные исследования в направлении создания сиффонного микрокомпрессора (СМК) с гидроприводом, (патент N4826762 /10/).

На рис.8 представлена конструкция двухступенчатого СМК, особенности которого заключаются в том, что во-первых он выполнен двухмодульным, а во-вторых диаметры плунжеров выполнены равными диаметрам эффективной площади каждого из сиффонов. Первое позволяет при работе механизма СМК сохранять постоянным объем картерной полости, что очень важно для заполнения последней маслом, второе гарантирует отсутствие перепада давления на сиффоне. Экспериментальные исследования проводились с сиффонами двух типов размеров: 70 x 47 x (2 x 0,08) и 70 x 18 x (2 x 0,08) первой и второй ступени соответственно (фото рис.9). Индикация рабочей полости позволила получить цикл и индикаторные характеристики рабочего процесса в диапазоне частот до 10 Гц. Потери в гидравлической камере определялись индикацией гидравлической полости. Производительность в зависимости от давления нагнетания определялась термодинамическим методом по наполнению баллона. Механические потери оценивались прокруткой привода СМК без сиффона и масла в камере.

Ресурсно выгодным был выбран диапазон частот до 5 Гц ( 300 1/мин ). для этих частот были получены характеристики по производи-

тельности, индикаторной и эффективной мощности, коэффициентам подачи.

Анализ характеристик показал, что при производительности до 60 л/мин, частоте привода до 5 Гц и общей степени повышения давления в двух ступенях = 25 преимущества СМК проявляются в следующем: увеличении коэффициента подачи на 10%, снижении эффективной мощности на 30-50% по сравнению с поршневым и в два раза по сравнению с мембранным, достижении изотермического к.п.д. = 0,8 - 0,9.

**Заключение.**

Приведенные в настоящей публикации результаты исследований по применению складывающихся мембранных сифонов в термомеханических преобразователях различных типов показывают возможность создания термодинамически более совершенных машин по сравнению с поршневыми. Очевидно, что это относится не ко всем диапазонам режимных параметров по частоте, температурам, давлениям и др., но для определенных их уровней сифонные машины могут иметь характеристики, максимально приближенные к теоретическим циклам.

Особенно перспективным является использование сифонов в низкооборотных машинах с гидроприводом, причем в гидравлической камере, непосредственно снаружи сифона может применяться сам теплоноситель.

В качестве энергопроизводящих сифонными термомеханическими преобразователями могут быть двигатели внешнего подвода тепла (Стирлинг, Эриксон) и энергосистемы работающие по циклу Ренкина. Причем в последних замена турбинного детандера сифонным позволит за счет непосредственного подвода тепла в процессе реализовать не адиабатное, а почти изотермическое расширение. Это существенно повышает к.п.д. цикла, что с учетом влияния масштабного фактора на эффективность турбины особо важно для установок малой мощности.

Все это весьма актуально для проблемы утилизации вторичных энергоресурсов и низкопотенциального тепла природных источников (тепло технологических процессов, геотермальное тепло, использование тепла океана и соляных прудов).

В холодильной технике наиболее предпочтительно сифонные машины применять в системах с ограниченным ресурсом или одноразового действия. Здесь целесообразно их использование в микроохладителях с холодопроизводительностью от 1 до 50 Вт и температурой термостатирования от -100С до -150С.

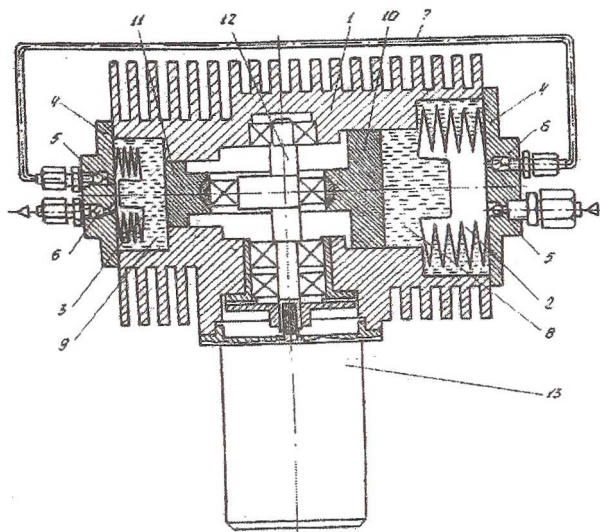


Рис. 8. Двухступенчатый сильфонный микрокомпрессор с гидроприводом.

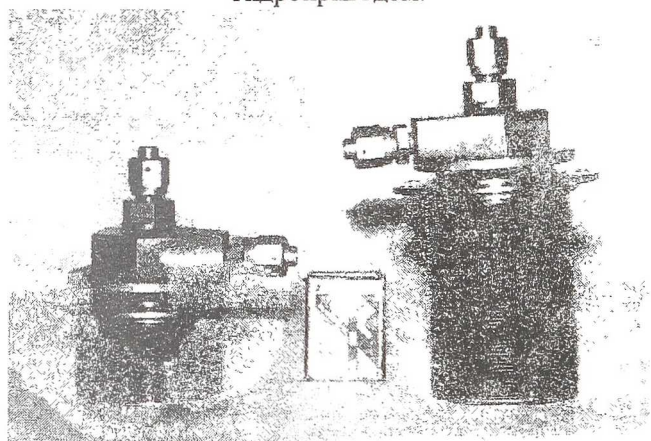


Рис. 9. Рабочие полости первой и второй ступеней сильфонного микрокомпрессора.

Наиболее перспективным является применение сильфона в компрессоре малой производительности (до 100 л/мин). Работа сильфона в условиях низкочастотного гидропривода (до 5 Гц) обеспечивает ресурс порядка 5 - 10 тыс часов с вдвое меньшим энергопотреблением чем у мембранного аналога.

Большой ход мембранных сильфонов, полная герметичность и высоко стабильные характеристики по механической жесткости и перестановочной силе делают его незаменимым в термопневмоприводах, которые могут применяться в наземных и бортовых системах авиационно-космической техники.

Использование сильфонов как рабочих полостей является новым, перспективным техническим направлением и будет способствовать заполнению ряда масштабных и параметрических "ниш" в малой энергетике, энергосбережении, экологии, природопользовании.

### Список литературы

1. А.с. 847758. Двигатель внешнего сгорания/. Андреев В.И., Довгялло А.И., Меркулов А.П. N1697300/25-06. Заявл.20.09.71; Оpubл.13.03.81.Бюл.N21.
2. А.с. 855241. Двигатель внешнего сгорания /Довгялло А.И., Меркулов А.П., Мелентьев А.Г. N2831657/25-06.Заявл.19.10.79; Оpubл.15.08.81.Бюл.N30.
3. А.с. 1177610 SU A1. Газовая холодильная машина/. Довгялло А.И., Меркулов А.П., Белозерцев В.Н. N3739589/23-06; заявл. 07.05.84; Оpubл.07.09.85. Бюл.N33.
4. А.с. 1601475 SU A1. Газовая холодильная машина/. Довгялло А.И., Белозерцев В.Н. и др. N4605083/23-06; Заявл. 15.11.08; Оpubл.23.10.90. Бюл.N39.
5. А.с. 1651054 SU A1. Двухкаскадная газовая холодильная машина/. Довгялло А.И., Меркулов А.П. и др. N4647818/23-06; Заявл. 06.02.89; Оpubл.23.05.91. Бюл.N19.
6. А.с. 1222991. Теплоиспользующая газовая холодильная машина/. Довгялло А.И., Белозерцев В.Н. и др. N3808232/23-06; Заявл. 31.10.84. Оpubл.07.04.86. Бюл.N39.
7. Грезин А.К., Зинovieв В.С. Микрокриогенная техника.-М.: Машиностроение, 1977. - 232 с.
8. Довгялло А.И., Белозерцев В.Н., Великанов А.Г., Кузькин В.И. Теплообмен в складывающемся мембранном сильфоне. ЦИНТИХим-нефтемаш, Деп.19.02.90.N2091-1990. 5 с.
9. Довгялло А.И., Кузькин В.И. Современное состояние развития сильфонных компрессоров. ВИНТИ, Деп. 27.07.93. N2123-B93.
10. Патент, N4826762 Россия. Сильфонный компрессор с гидроприводом/. Довгялло А.И., Великанов А.Г., Кузькин В.И.
11. Уокер Г. Двигатели Стирлинга. - М.: Машиностроение, 1985.-408 с.