

На правах рукописи

Воронов Владимир Андреевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПИРАЛЬНОГО ДЕТАНДЕРА
НА РАЗЛИЧНЫХ РАБОЧИХ ВЕЩЕСТВАХ**

**Специальность 05.04.03 - Машины и аппараты, процессы холодильной и
криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете
им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Кандидат технических наук, доцент
Леонов Виктор Павлович

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, доцент
Прилуцкий Андрей Игоревич
Университет ИТМО, кафедра криогенной
техники

Кандидат технических наук
Малахов Сергей Борисович
ООО «КРИОМАШ-БЗКМ»

Ведущая организация: ПАО «ВНИИХОЛОДМАШ-ХОЛДИНГ»

Защита состоится «1» июня 2016 года в в 16:30 на заседании
Диссертационного совета Д 212.141.16 в Московском Государственном
Техническом Университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва,
Лефортовская наб., д. 1, корпус «Энергомашиностроение».

С диссертацией до защиты можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им.
Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по
указанному адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-ая Бауманская, д.5.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.16
кандидат технических наук, доцент



Колосов М.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В наше время спиральные компрессоры находят всё большее применение: активно вытесняют поршневые машины в холодильной технике и кондиционировании, используются для сжатия воздуха. Это происходит благодаря существенным преимуществам спиральных компрессоров: отсутствие мёртвого объёма, малый шум и вибрации, низкая неравномерность вращения, компактность, малое количество деталей. Существуют и недостатки, из-за которых спиральные компрессоры стали массово производить только последние десятилетия: сложная поверхность спиралей и очень высокие требования к точности их изготовления, большой периметр утечек. В то же время массовый выпуск спиральных детандеров до сих пор не налажен, а интерес к данным машинам стал появляться лишь в последние годы.

Если сравнивать характеристики спиральных и поршневых компрессоров по неравномерности вращения, шумовым характеристикам и изоэнтропному КПД, то преимущество спиральных компрессоров не вызывает сомнений. Геометрическое подобие поршневых компрессоров и поршневых детандеров, спиральных компрессоров и спиральных детандеров даёт основания полагать, что данные соотношения будут верны и при сравнении поршневых и спиральных детандеров. Кроме того, для осуществления процесса расширения в поршневом детандере необходимо наличие клапанов принудительного действия, в то время как спиральные машины могут работать без клапанов. Эти данные показывают, что исследование спирального детандера представляет интерес.

Спиральные машины могут работать при относительно малых мощностях (от 20 Вт до 10 кВт) и степенях расширения (от 2). Исходя из приведённых данных, можно обозначить 5 приоритетных направлений, в которых возможно использование данной машины:

1. Двигатель в цикле Ренкина
2. Компрессор-детандерный агрегат в цикле Чистякова-Плотникова
3. Расширительное устройство в холодильном цикле
4. Пневмомотор
5. Детандер в криогенных циклах

Цель работы. Целью работы является исследование спирального детандера на различных рабочих веществах и создание алгоритма его расчёта.

Основные задачи:

1. Определение экспериментальной зависимости изоэнтропного КПД (η_s), объёмного расхода, крутящего момента на валу от степени расширения при постоянных частотах вращения для воздуха, аргона, гелия, хладона R141b. Оценка влияния частоты вращения при степени расширения,

соответствующей максимуму η_s . Экспериментальное определение суммарных потерь на трение и перетечки. Испытания в режиме пневмомотора на воздухе. Построение механических характеристик для различных степеней расширения.

2. Разработка алгоритма теплового и геометрического расчёта спирального детандера с учётом особенностей протекания рабочего процесса.

3. Создание расчётной модели потерь для данной машины и сравнение их с экспериментальными. Оценка распределения потерь при разных режимах.

4. Анализ полученных результатов. Сравнение характеристик с другими типами детандеров и данными других исследований.

5. Выработка практических рекомендаций для совершенствования параметров рабочего процесса и характеристик спирального детандера для повышения термодинамической эффективности.

Научная новизна:

1. Создан алгоритм теплового и геометрического расчёта спирального детандера. Алгоритм был проверен с помощью проведённых экспериментов.

2. Получены данные о работе одного спирального детандера на воздухе, углекислоте, гелии, аргоне, хладоне R141b. Проведено сравнение характеристик при работе на указанных рабочих телах.

3. Получены экспериментальные данные о зависимости изоэнтропного КПД от температуры рабочего тела на входе в детандер.

4. Выявлена стабильная работа спирального детандера при условии подачи на вход машины парожидкостной смеси при работе на R141b.

5. Проведены испытания машины как в режиме детандера, так и в режиме пневмомотора. Проведено сравнение максимума изоэнтропного КПД при работе в режиме детандера и минимума удельного расхода при работе в режиме пневмомотора.

Практическая значимость работы:

1. Разработанный и проверенный алгоритм расчёта позволяет получать геометрические характеристики проектируемых спиральных детандеров.

2. Создана методика проведения эксперимента, с помощью которой возможно испытать другие спиральные детандеры. Полученные значения относительных потерь можно использовать при сборе статистики для машин различных типоразмеров. Эти данные позволят с допустимой инженерной точностью рассчитывать новые спиральные детандеры.

3. Экспериментальные данные показывают, что максимум изоэнтропного КПД примерно одинаков для различных рабочих веществ (доказано для аргона, воздуха, углекислоты, хладона R141b), но достигается при разных степенях расширения. Таким образом, возможно для вновь

создаваемых спиральных детандеров моделировать экспериментом на воздухе работу на других рабочих телах.

4. Проведённые эксперименты в режиме компрессора доказывают возможность обратимости машины.

5. Стабильная работа детандера в парожидкостной области свидетельствует о том, что спиральный детандер способен работать вместо дросселя в пароконденсационных холодильных машинах.

Внедрение результатов работы.

Данные экспериментальных исследований спиральной машины в режиме пневмомотора использованы в научной работе Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук.

Созданный экспериментальный стенд внедрён в учебный процесс на кафедре «Холодильной, криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Достоверность и обоснованность полученных результатов.

Достоверность полученных экспериментальных данных обеспечивается применением поверенных средств измерения, апробированных методик измерения, использованием классических зависимостей и сравнением с данными других исследований.

На защиту выносятся:

1. Экспериментальные данные зависимости изоэнтропного КПД от степени расширения для воздуха, аргона, гелия, углекислоты, хладона R141b. Зависимость изоэнтропного КПД и удельного расхода от частоты вращения.

2. Зависимость момента трения от частоты вращения и расхода перетечек от степени расширения.

3. Блок-схема расчёта. Результаты расчёта машины для условий максимума КПД при работе на воздухе. Сравнение расчётной зависимости объёмного расхода на выходе из детандера с экспериментальной.

4. Результаты деления потерь при работе на воздухе на различных режимах.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы были представлены на 3 конференциях: Международной конференции «Криоген-экспо» (Москва, 2011), Международной конференции с элементами научной школы для молодёжи «Инновационные разработки в области техники и физики низких температур» (Москва, 2011), Международной конференции «Чиллвента» (Москва, 2012).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 4 в журналах из перечня ВАК.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов, списка литературы и приложения. Работа изложена на 144 страницах текста, содержит 80 рисунков, 34 таблицы и список литературы из 33 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена краткая информация о достоинствах и истории спиральных машин, приводятся зависимости неравномерности вращения, шумовых характеристик, изоэнтропного КПД спиральных компрессоров по сравнению с поршневыми и компрессорами с катящимся поршнем.

Первая глава носит обзорно-постановочный характер и состоит из двух разделов.

Первый раздел посвящён областям применения спирального детандера и существующим исследованиям машины. В работах S. Quoilin в качестве двигателя в цикле Ренкина используется спиральная машина. Приведены данные не только об эффективности цикла, но и об эффективности машины. Показана возможность использования спирального компрессор-детандерного агрегата в цикле Чистякова-Плотникова. В статье Н. Nagata и др. приведены данные о работе спирального детандер-компрессорного агрегата, установленного вместо дроссельного устройства в сверхкритическом пароконденсационном холодильном цикле на диоксиде углерода. В работе В.М. Бозрова и В.И. Ивлева приведена информация о теоретическом исследовании механических характеристик спирального пневмомотора, которое показало перспективность использования машины в данной области. А. Goodwin и J. Derby показали возможность применения спиральных пневмомоторов для привода электрогенераторов для использования в качестве резервных источников энергии. Плюсами машины в данной области является быстрое время выхода на режим по частоте вращения и мощности на валу (около 200 мс) и надёжность.

Во втором разделе рассматриваются существующие методики расчёта спиральных компрессоров. Показано, что, так как спиральные компрессор и детандер геометрически подобны, то расчёт геометрических характеристик спиралей для компрессора можно с небольшими изменениями использовать для расчёта детандера. Рассмотрены формулы расчёта объёма парной полости спиралей из полуокружностей (Быков А.В.), для спирали Архимеда (Тимофеевский Л.С.) и спирали Архимеда переменной толщины (Ефремов С.Н., Шестакович И.А.). Приведены данные о расчёте расхода перетечек и относительных потерь на перетечки. Приведена формула расчёта удельного числа оборотов. Был сделан вывод, что в указанных источниках не приводится полная методика расчёта, разделения потерь, недостаточно информации о работе на различных рабочих телах, и влиянию термодинамических свойств веществ на характеристики спирального детандера. Это делает затруднительным оптимизацию характеристик

спиральных машин, и не позволяет прогнозировать параметры систем с их применением.

На основании проведённого анализа были сформулированы цели и задачи исследования.

Вторая глава посвящена экспериментальному исследованию спирального детандера. Глава состоит из восемнадцати разделов.

В первом разделе описана установка для испытаний спирального детандера (Рисунок 1). При испытаниях на воздухе газ подавался от воздушного компрессора, при испытаниях на аргоне, углекислоте, гелии – от баллона, при испытаниях на хладоне R141b установка модифицировалась (см. ниже). Для поддержания давления на входе в детандер использовался редуктор. Температура на входе и выходе из детандера контролировалась платиновыми термометрами сопротивления, давление на входе – образцовым манометром. Мощность на валу снималась порошковым электромагнитным тормозом, подвешенным на статическом датчике крутящего момента, который измерял крутящий момент на валу машины. Частота вращения вала замерялась лазерным тахометром. Расход на выходе из машины фиксировался с помощью ротаметра. Так как для испытаний использовался маслозаполненный спиральный детандер, то в газ перед входом в машину подмешивалось кремнийорганическое масло. Так как его температура кристаллизации составляет около минус 120 °С, то оно позволяло работать машине на всех допустимых режимах. Приведены данные о геометрических характеристиках спиралей испытываемой машины и характеристики измерительных приборов.

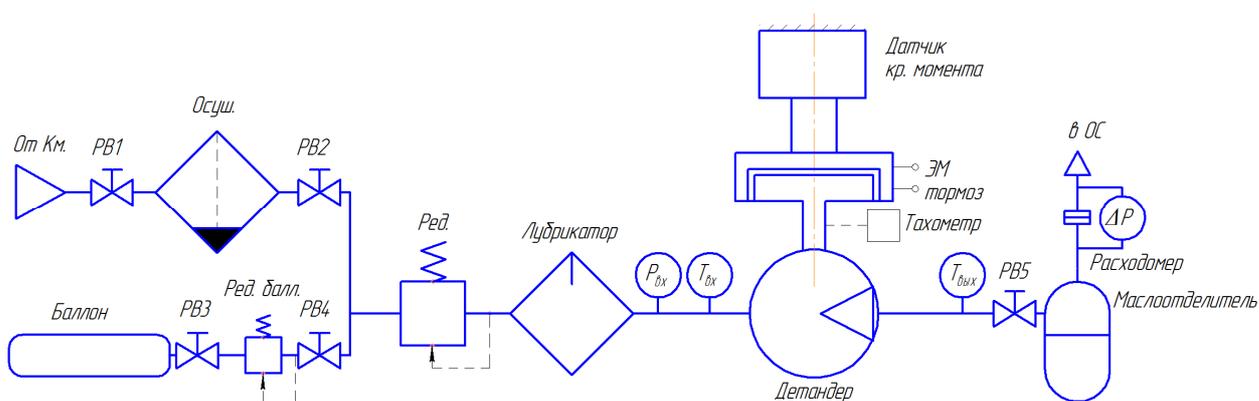


Рисунок 1. Схема установки для испытаний спирального детандера. Км – компрессор, Осуш. – осушитель воздуха, Ред. – редуктор

Во втором разделе приведена методика проведения эксперимента:

1. Измерение температуры на входе $T_{вх}$ и выходе $T_{вых}$, объёмного расхода V , крутящего момента на валу $M_{кр}$ при постоянных частотах вращения n_0 и изменении степени расширения π_d . Рабочее тело – воздух, аргон, углекислота, гелий, хладон R141b. Определение максимума η_s .

2. Измерение температуры на входе $T_{вх}$ и выходе $T_{вых}$, расхода V , крутящего момента $M_{кр}$ при степени расширения, соответствующей максимуму η_s при изменении частоты вращения вала n_0 для воздуха.

3. Испытания в режиме пневмомотора на воздухе – измерение частоты вращения n_0 , расхода V при заданной степени расширения π_0 и изменении крутящего момента на валу $M_{кр}$.

Указана формула для расчёта изоэнтروпного КПД на основе экспериментальных данных:

$$\eta_s = \frac{\Delta h}{\Delta h_s} = \frac{h_{вх} - h_{вых}}{h_{вх} - h_{sвых}}, \quad (1)$$

где Δh и Δh_s – реальная и изоэнтропная разность энтальпий на входе и выходе из машины, кДж/кг.

В третьем разделе приведены зависимости изоэнтропного КПД от степени расширения (Рисунок 2) и зависимость изоэнтропного КПД от частоты вращения при работе на воздухе. Определён максимум изоэнтропного КПД, который составил в данной серии экспериментов 49,1%.

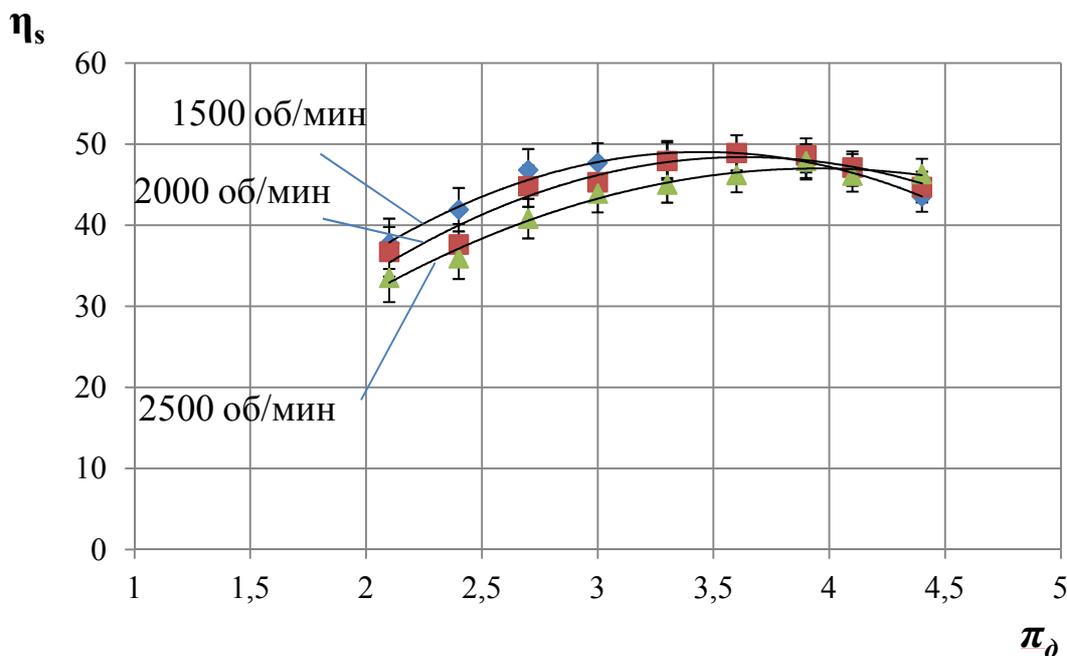


Рисунок 2. Зависимости изоэнтропного КПД от степени расширения для различных частот вращения при работе на воздухе

В разделах 2.4, 2.5, 2.6 приведены данные об испытаниях на аргоне, углекислоте и гелии соответственно. На аргоне и углекислоте была получена зависимость изоэнтропного КПД от степени расширения при одной частоте вращения, для гелия получена одна точка (Рисунок 3,4). Максимум изоэнтропного КПД для аргона составил 48,8 %, для углекислоты – 47,3 %. Для гелия КПД составил 29,3 %.

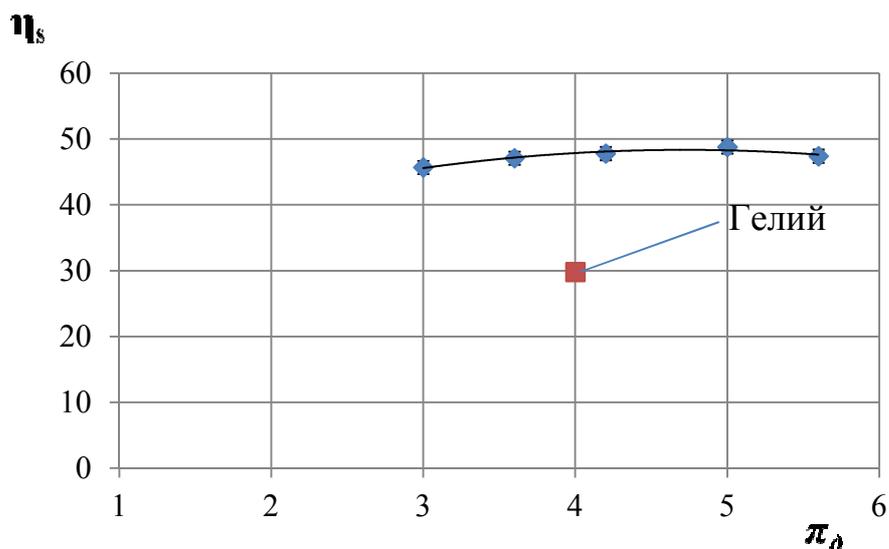


Рисунок 3. Зависимость изоэнтропного КПД от степени расширения для аргона и экспериментальная точка для гелия (1350 об/мин)

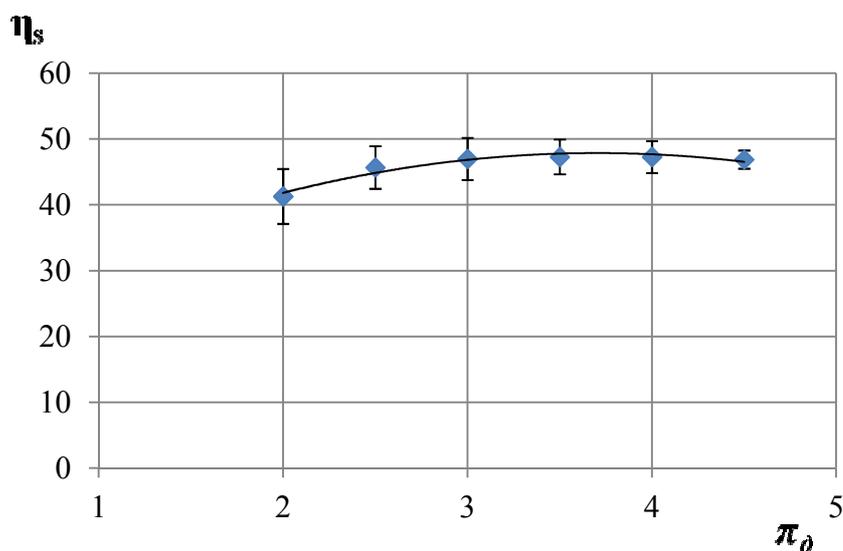


Рисунок 4. Зависимость изоэнтропного КПД от степени расширения для углекислоты (1500 об/мин)

Раздел 2.7 посвящён описанию установки и результатам эксперимента на хладоне R141b. Вместо баллона в установке подключался парогенератор, заполненный хладоном. Парогенератор представляет собой стальную ёмкость объёмом 110 л, внутри которой размещён теплообменник, подключённый через фланцевое соединение снизу. Давление пара создавалось за счёт подвода теплоты в парогенераторе к жидкому R141b через трубчатый теплообменник. Через него проходила проточная вода из системы горячего водоснабжения, которая дополнительно подогревалась в электроводонагревателе мощностью 21 кВт, таким образом, её температура повышалась до примерно плюс 100 °С. На выходе рабочее тело попадало вместо маслоотделителя в конденсатор. Конденсатор охлаждался проточной водой. Жидкий фреон из конденсатора стекал в ресивер. Для контроля

давления на выходе был установлен манометр. Результаты эксперимента показаны на Рисунке 9. Для сравнения данных с зависимостями, полученными на других веществах, зависимость изоэнтропного КПД была приведена к температуре на входе плюс 20 °С.

В разделе 2.8 показано, как машина выходит на режим по температуре на выходе и приведены графики зависимости температуры на выходе от времени эксперимента. В среднем, выход на режим происходит в течение 40 минут.

Девятый раздел посвящён зависимости изоэнтропного КПД от температуры на входе в детандер при работе на воздухе. Данная зависимость представлена на Рисунке 5. Было установлено увеличение КПД с ростом температуры на входе. Максимальное полученное значение изоэнтропного КПД в данном эксперименте является максимальным из всей серии экспериментов и составляет 58,9 %.

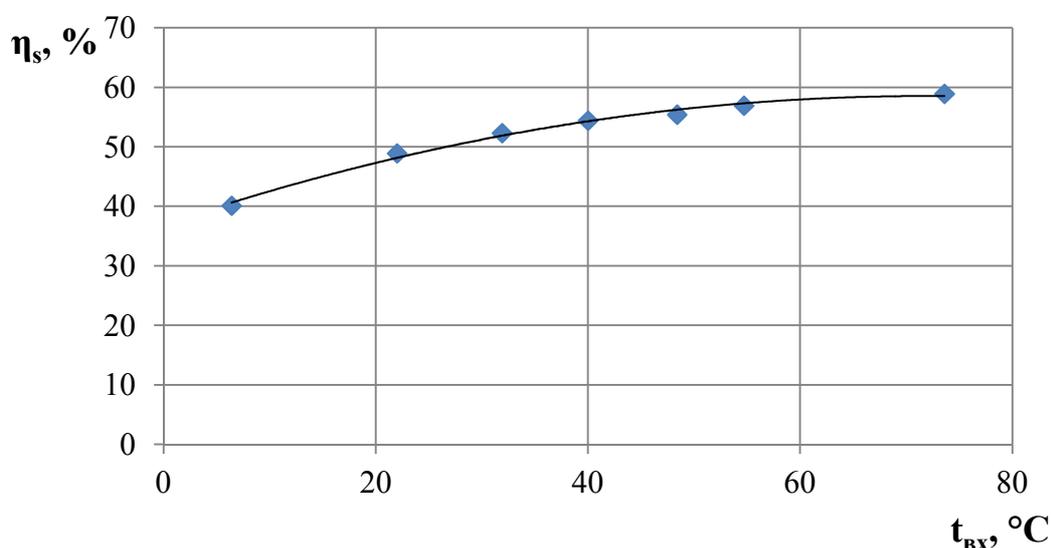


Рисунок 5. Зависимость изоэнтропного КПД от температуры на входе в детандер при частоте вращения 1500 об/мин, степени расширения – 3,6

В десятом разделе проведено испытание машины в режиме компрессора. К машине через ременную передачу был подключен асинхронный электродвигатель частота вращения которого регулировалась частотным преобразователем. Изоэнтропный КПД в эксперименте составил 75,6 %.

Одиннадцатый раздел посвящён тепловому балансу установки. Для испытываемой машины должно выполняться равенство холодопроизводительности, мощности на валу, и теплоты, снятой с электромагнитного тормоза (охлаждается проточной водой). Было установлено, что эти 3 величины равны с точностью 5%.

В разделе 2.12 описано экспериментальное определение механических потерь в детандере. Был определён момент трогания вала детандера с помощью штанги, закреплённой на валу детандера и подвешенным к ним

грузикам. Для определения зависимости момента трения от частоты вращения к валу был подключен электродвигатель, частота вращения которого задавалась частотным преобразователем. Зависимость представлена на Рисунке 6. Относительные потери на трения рассчитывались по формуле:

$$\zeta_{тр} = \frac{N_{тр}}{N_e + N_{тр}}, \quad (2)$$

где $N_{тр}$ – мощность трения, кВт;

N_e – мощность на валу, кВт.

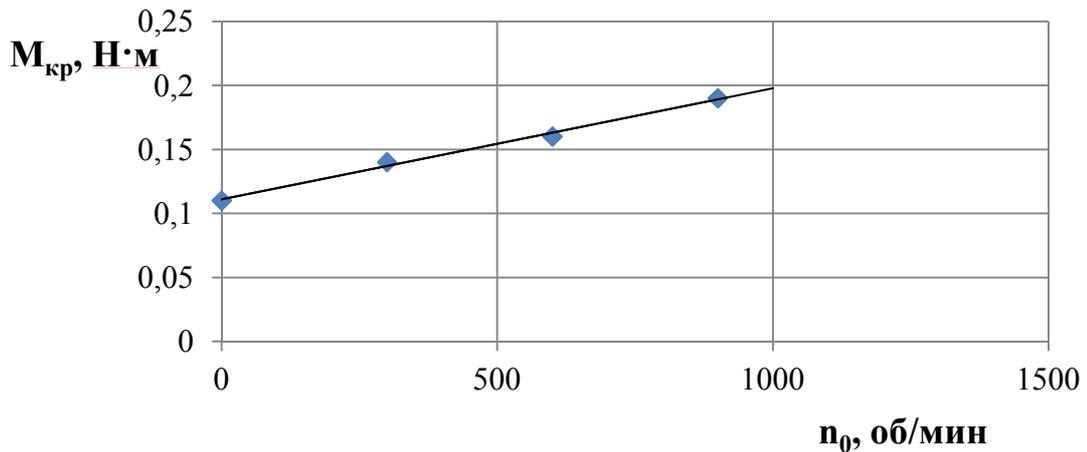


Рисунок 6. Зависимость момента трения от частоты вращения

Раздел 2.13 посвящен определению суммарных потерь на перетечки в спиральном детандере. Расход перетечек измерялся у машины при застопоренном валу (Рисунок 7). Данные были проверены путём построения зависимости расхода от частоты вращения с линейной экстраполяцией до 0 частоты вращения. Спиральный детандер – машина объёмного типа действия и расход у неё линейно зависит от частоты вращения. Была указана формула для расчёта относительных потерь на перетечку:

$$\zeta_{пер} = \frac{G_{пер}}{G}, \quad (3)$$

где $G_{пер}$ – массовый расход перетечек, кг/с;

G – массовый расход рабочего тела через детандер, кг/с.

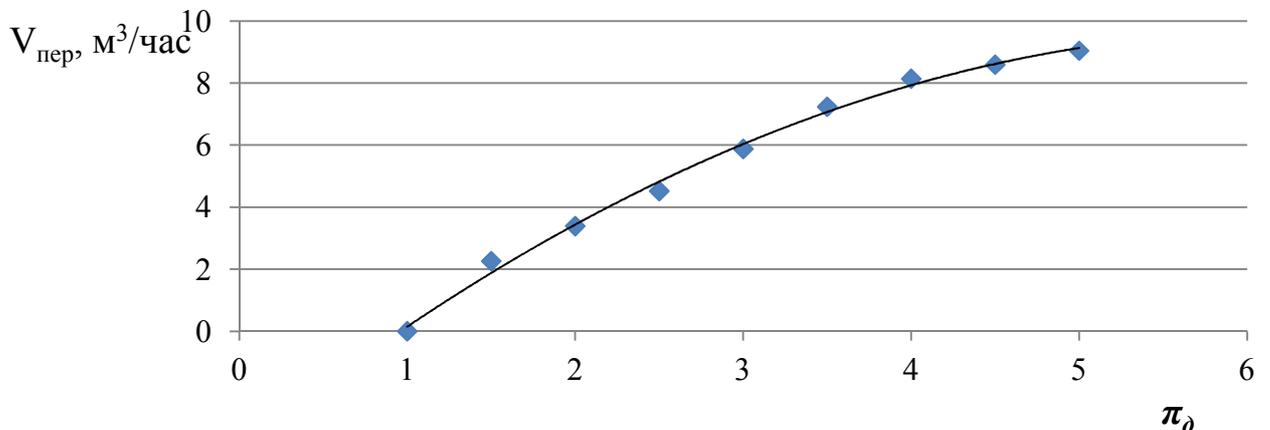


Рисунок 7. Зависимость расхода перетечек от степени расширения

В разделе 2.14 описан расчёт относительных потерь на охлаждение масла. Так как на вход в детандер с помощью лубрикатора подаётся масло, на его охлаждение тратится часть холодопроизводительности детандера. Эту долю можно оценить с помощью следующей формулы:

$$\zeta_{\text{масл}} = \frac{c_M \cdot \Delta T \cdot G_M}{\Delta h_s \cdot G}, \quad (4)$$

где c_M – удельная теплоёмкость масла, кДж/(кг·К);

ΔT – разница температур на входе и выходе из детандера, К;

G_M – расход масла, кг/с.

Раздел 2.15 посвящён определению погрешности эксперимента при работе в режиме детандера. Результаты показывают, что абсолютная погрешность изоэнтропного КПД для воздуха максимальна при низком давлении и составляет примерно $\pm 3,1\%$ и минимальна при высоком давлении – $1,9\%$. Все точки графиков попадают в доверительный интервал, что говорит о корректности проведённого эксперимента и отсутствии промахов.

Раздел 2.16 посвящён описанию эксперимента в режиме пневмомотора. Представлены особенности проведения эксперимента в режиме пневмомотора на воздухе.

В разделе 2.17 приведены результаты испытаний машины в режиме пневмомотора на воздухе. Построены зависимости мощности, расхода, удельного расхода от частоты вращения для различных степеней расширения.

В разделе 2.18 произведена оценка погрешностей эксперимента при работе в режиме пневмомотора. Расчёты показали, что экспериментальные данные попадают в доверительный интервал.

Третья глава посвящена созданию алгоритма расчёта спирального детандера и состоит из семи разделов.

В первом разделе описаны особенности исследуемой машины, которые необходимо учитывать при расчёте, полученные в ходе экспериментального исследования. Высказан тезис о том, что невозможно произвести расчёт, не зная величин потерь в машине, и о том, что большую часть потерь можно оценить только экспериментально. Описаны основные возможные потери в спиральной машине, их влияние и вывод о необходимости их учитывать в расчёте.

Второй раздел посвящён выбору математического описания геометрии спиралей. Были выбраны уравнения, описывающие геометрию спиралей Архимеда переменной толщины, описанные в первой главе.

В третьем разделе приведена информация о расчёте объёма парной полости спиралей путём интегрирования уравнений спирали.

В разделе 3.4 отмечено, что способ получения значения объёма парной полости путём интегрирования не всегда удобен, и учитывая, что зависимость объёма парной полости от угла поворота в случае процесса расширения газа – линейная, можно вывести простую зависимость. Аналитическое решение интеграла было затруднительно из-за его крайней

сложности, поэтому было принято решение вывести уравнение численными методами. Выведенное уравнение даёт погрешность для $2\pi \leq \theta \leq 4\pi$ по сравнению с данными, полученными интегрированием, не более $\pm 2\%$ и выглядит следующим образом:

$$\bar{V}(\theta) = \frac{h}{2} (36,729r_0e - 12,324e^2 + (12,893r_0e - 0,0281e^2) \cdot (\theta - 2\pi)), \quad (5)$$

где h – высота спирали, м;

r_0 – полярный радиус спирали, м;

e – эксцентриситет спирали, м;

θ – угол поворота вала машины, рад.

В пятом разделе описано построение зависимости давления от угла поворота вала для получения индикаторной диаграммы.

Шестой раздел посвящён оценке потерь на выхлоп или впуск газа. Отмечено, что в момент раскрытия спиралей в зависимости от давления на входе в детандер может быть давление как выше давления на выходе, так и ниже. В первом случае будет наблюдаться процесс выхлопа, во втором – впуска газа. Данный эффект возникает в связи с тем, что машина – с геометрической степенью расширения, отношение объёмов парных полостей в начале расширения и в конце является постоянной величиной и зависит от геометрических характеристик спиралей. Путём исследования индикаторных диаграмм была выведена формула расчёта относительных потерь на выхлоп или впуск газа:

$$\zeta_{\text{выхл}} = 1 - \frac{1 - \frac{1}{k} \left(\frac{P_0}{P_1}\right)^{\frac{1-k}{k}} - \frac{k-1}{k} \left(\frac{P_0}{P_1}\right)^{\frac{1}{k}} \frac{P_2}{P_0}}{1 - \frac{P_0}{P_2}^{\frac{1-k}{k}}} \quad (6)$$

В разделе 3.7 представлен разработанный алгоритм расчёта спирального детандера. Алгоритм позволяет по введённым давлению на входе, температуре на входе, давлению на выходе, частоте вращения вала и расходу получать геометрические характеристики машины. Расчёт ведётся по реальным свойствам веществ, сравнивая идеальный изоэнтропный процесс расширения с реальным, благодаря найденным в эксперименте относительным потерям и рассчитанной потере на выхлоп.

Четвёртая глава посвящена расчётному определению характеристик машины и разделению потерь, состоит из четырёх разделов.

В первом разделе приведена информация по расчёту объёмного расхода машины по известным геометрическим характеристикам машины и расходу перетечек. Проведено сравнение расчётной зависимости объёмного расхода от частоты вращения с экспериментальными данными. Показано, что зависимость попала в доверительный интервал.

Во втором разделе описано, как по известным значениям относительных потерь найти изоэнтропный КПД:

$$\eta_s = 1 - \zeta_{\text{пер}} - \zeta_{\text{тр}} - \zeta_{\text{масл}} - \zeta_{\text{выхл}} \quad (7)$$

Отмечено, что основными потерями в спиральном детандере являются:

1. Перетечка газа от входа к выходу
2. Трение
3. Охлаждение смазывающего масла
4. Выхлоп или впуск газа на выходе

По указанным выше формулам был произведён расчёт относительных потерь для различных степеней расширения (Рисунок 8). Показано, что влияние выхлопа при данных условиях несущественно, поэтому он не показан.

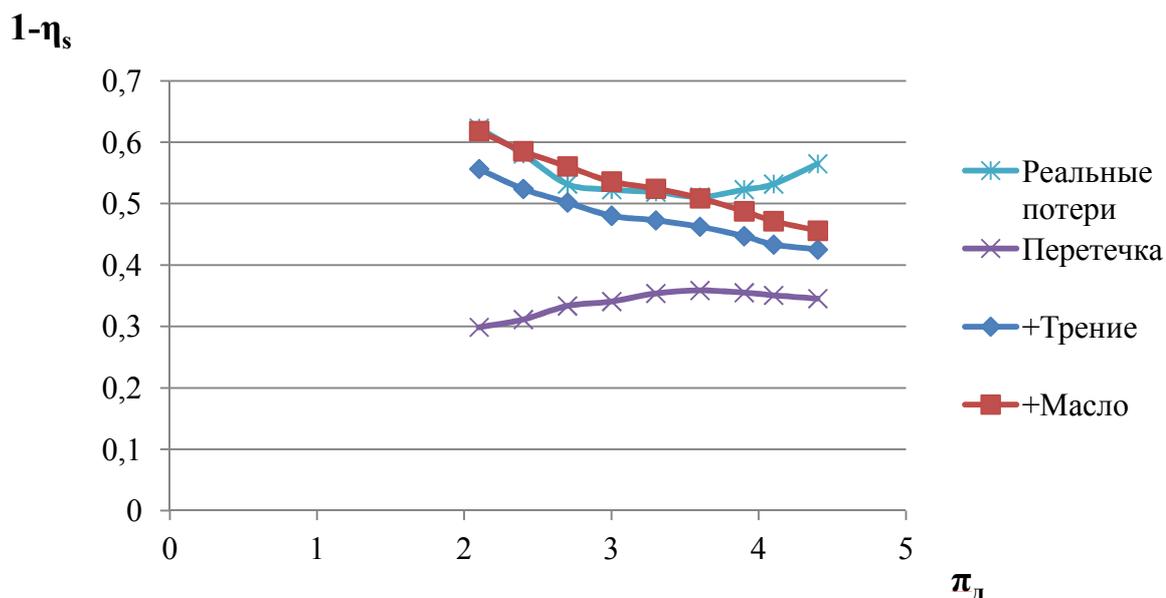


Рисунок 8. Зависимость потерь от степени расширения при работе на воздухе при частоте вращения 1500 об/мин

Было установлено, что если взять все потери за 100%, то в точке максимального изоэнтропного КПД на воздухе потери на перетечку составили 66,5%, на трение – 24,5%, на охлаждение масла – 9%.

Раздел 4.3 посвящён расчёту коэффициент быстроходности машины. Установлено, что на режиме максимума КПД при работе на воздухе и в случае работы в режиме компрессора на хладоне R134a коэффициенты быстроходности примерно равны.

В разделе 4.4 проведена проверка разработанного алгоритма расчёта. Было принято решение рассчитать машину на условиях, при которых был найден максимум КПД при работе на воздухе. Было установлено, что отличие полученных геометрических характеристик машины от характеристик испытываемой машины не более чем на 7%, что допустимо для инженерных расчётов.

Пятая глава посвящена анализу полученных результатов и рекомендациям. Состоит из трёх разделов.

В первом разделе описан анализ результатов в режиме детандера. Выявлено, что полученные значения изоэнтропного КПД являются достаточно высокими, учитывая, что машина работает при относительно невысоких расходах и степенях расширения. Проведено сравнение полученных результатов со сходными данными другого исследования (Рисунок 9); уровни максимального изоэнтропного КПД, полученного на хладоне, примерно совпадают.

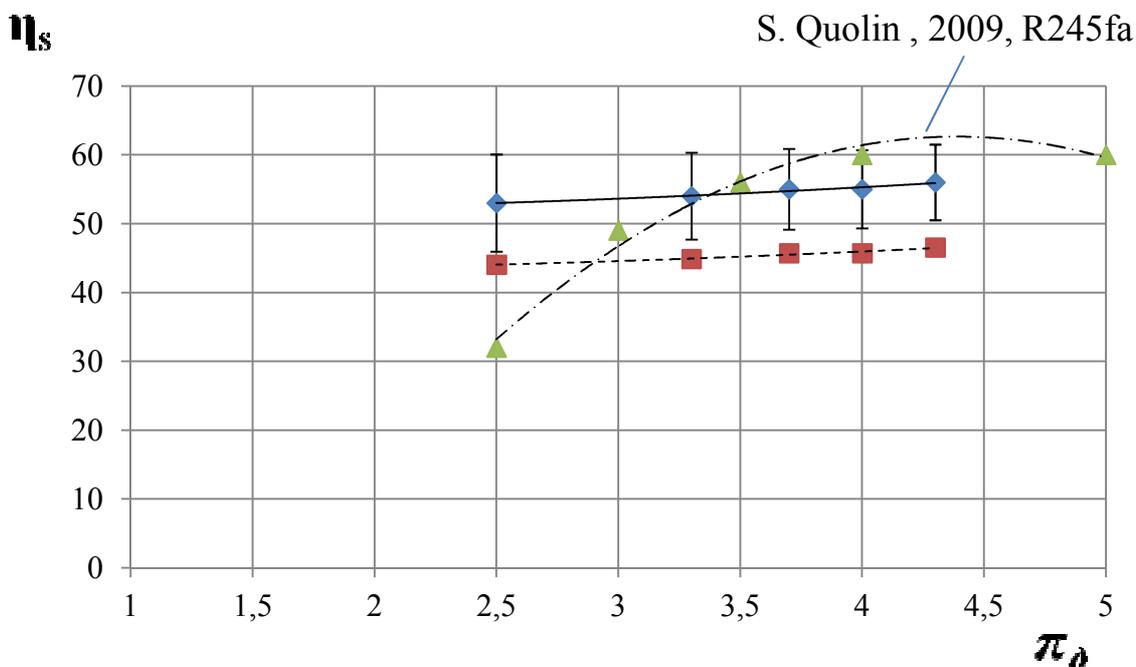


Рисунок 9. Зависимость изоэнтропного КПД от степени расширения для хладона R141b. Пунктиром показан график с приведённой к 20 °С температурой на входе

Также был поставлен ряд вопросов, которые необходимо будет решить в дальнейших исследованиях.

Во втором разделе проведён анализ результатов в режиме пневмомотора. Показано, что испытанная машина обладает характеристиками лучше существующих серийных образцов для данного диапазона мощностей на валу.

Третий раздел посвящён сравнению характеристик при работе в режиме детандера и пневмомотора. Была построена зависимость изоэнтропного КПД и удельного расхода (Рисунок 10). Рисунок показывает, что максимум изоэнтропного КПД и минимум удельного расхода достигается при приблизительно одной частоте вращения – 1750 об/мин. Таким образом, одну машину можно эффективно использовать одновременно для получения холода и выработки работы.

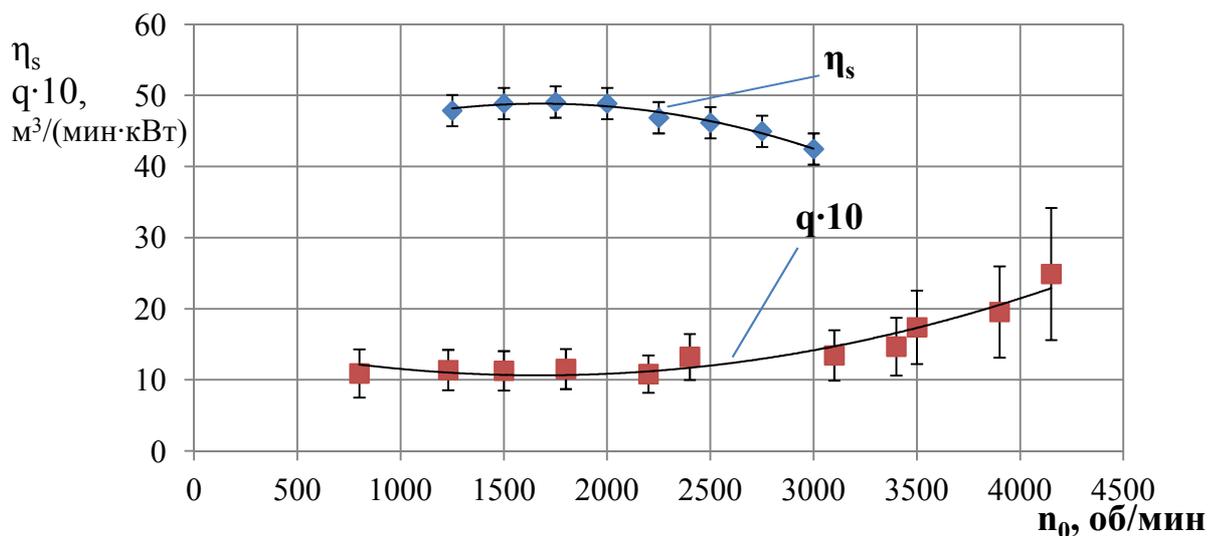


Рисунок 10. Зависимость изоэнтропного КПД (давление на входе – 2,6 бар) и удельного расхода (давление на входе – 2,5 бар) от частоты вращения на воздухе

Шестая глава посвящена выработке рекомендаций и состоит из двух разделов.

В первом разделе описаны рекомендации по улучшению машины. Отмечено, что одними из главных потерь в машине являются потери на перетечки газа. Перетечки можно снизить путём увеличения точности изготовления спиралей, совершенствованием уплотнений. Также возможно использование полученного алгоритма расчёта для целей оптимизации относительных потерь, что позволит в дальнейшем создавать машины с большим изоэнтропным КПД. Однако для осуществления оптимизации необходимо набрать статистику по потерям в различных спиральных детандерах. Было установлено, что потери на выхлоп не оказывают существенного влияния на изоэнтропный КПД при относительно малых степенях расширения. За счёт уменьшения габаритов спирали, можно добиться снижения потерь на трение и эффективно использовать процесс выхлопа.

Во втором разделе даются рекомендации по использованию машины. Отмеченные выше преимущества машины, дают основания полагать, что спиральный детандер может работать в составе малорасходных воздушных холодильных машин. Например, для целей охлаждения кабин. Надёжность и простота спирального детандера позволит использовать его в качестве двигателя в цикле Ренкина и цикле Чистякова-Плотникова. Полученная информация о возможности работы в парожидкостной области, дают основания полагать, что спиральный детандер возможно использовать в качестве замены дросселя в парокомпрессионных холодильных машинах. Полученные экспериментальные данные о работе машины в режиме пневмомотора говорят о том, что использование спиральной машины в

качестве пневмопривода и в системах резервного электроснабжения перспективно.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1.1. Проведено экспериментальное исследование машины в режиме детандера при степенях расширения от 2,1 до 5,6 и частоте вращения от 1250 до 3000 об/мин с использованием различных рабочих тел: воздух, аргон, гелий, углекислота.

1.2. Получены зависимости изоэнтропного КПД от степени расширения и частоты вращения вала детандера.

1.3. Выполнена оценка погрешности измерений – максимальная погрешность определения η_s при работе на воздухе составляет $\pm 3,1\%$.

1.4. Доказано, что спиральная машина может работать эффективно как в режиме компрессора, так и в режиме детандера; максимум η_s , полученный в эксперименте составляет 58,9%.

1.5. Установлена устойчивая работа спирального детандера в парожидкостной области для хладона R141b.

1.6. Проведено исследование спиральной машины в режиме пневмомотора на воздухе. Установлено, что максимумы КПД при работе в режиме детандера и пневмомотора совпадают.

2. Предложена и разработана методика расчёта спирального детандера. Методика была проверена сравнением расчёта с экспериментальными данными.

3. Произведен анализ структуры потерь и основные составляющие. Построены зависимости относительных потерь от степени расширения и частоты вращения для воздуха. Произведено сравнение суммы относительных потерь с изоэнтропным КПД, полученным в эксперименте.

4. Проведён анализ полученных результатов, который показал, что предложенная методика позволяет с точностью приемлемой для инженерных расчётов (7%), рассчитывать геометрические характеристики машины, проводить сравнение исследуемой машины с существующими образцами и результатами других исследований.

5. Предложены рекомендации по улучшению спиральной машины для работы в режиме детандера. Показаны предполагаемые области применения.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

1. Публикации в центральных изданиях, включённых в перечень периодических изданий ВАК РФ:

1. Бозров В.М., Ивлев В.И., Воронов В.А. Экспериментальное определение механических характеристик спирального пневмомотора // Проблемы машиностроения и автоматизации, 2013. №4. С. 52-54 (0,35 п.л./0,1 п.л.).

2. Бозров В.М., Ивлев В.И, Воронов В.А. Оценка технических показателей перспективных спиральных пневмомоторов // Компрессорная техника и пневматика, 2014. №1. С. 26-29 (0,46 п.л./ 0,12 п.л.).

3. Бозров В.М, Ивлев В.И, Воронов В.А. Исследование работы спиральной машины в режиме пневмомотора-детандера // Проблемы машиностроения и надёжности машин, 2015. №2. С. 16-21 (0,67 п.л./ 0,2 п.л.).

4. Воронов В.А., Леонов В.П. Испытания спирального детандера на различных режимах // Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2015. №1. С. 23-25 (0,33 п.л./ 0,28 п.л.).

2. Публикации в других изданиях:

1. Воронов В.А., Леонов В.П. Спиральные детандеры: особенности, возможное применение, расчёт //Сборник тезисов студенческой весны МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. С. 188-189 (0,17 п.л./ 0,15 п.л.).

2. Воронов В.А. Установка для испытаний спирального детандера // Сборник тезисов криоген-экспо, 2011. С. 25-27 (0,21 п.л./ 0,21 п.л.).

3. Воронов В.А., Леонов В.П. Установка для испытаний спирального детандера // Сборник тезисов конференции «Чилвента», 2012. С. 3 (0,06 п.л./ 0,05 п.л.).

4. Воронов В.А., Леонов В.П., Розеноер Т.М. Испытания спирального детандера // Вестник МГТУ серия «Машиностроение», спецвыпуск №1, 2013. С. 132-136 (0,45 п.л./ 0,38 п.л.).

5. Воронов В.А., Леонов В.П., Розеноер Т.М. Двухступенчатый холодильный цикл с детандером на диоксиде углерода // Вестник МГТУ серия «Машиностроение», спецвыпуск №1, 2013. С. 137-141 (0,43 п.л./ 0,35 п.л.).

6. Спиральный детандер: патент на полезную модель 130055 РФ / Воронов В. А. заявл. 01.02.2013; опубл.10.06.2013.