

## Серия конференций IOP: Материаловедение и инженерия

БУМАГА • ОТКРЫТЫЙ ДОСТУП

# Миниатюрный роторный компрессор со степе

## нью сжатия 1:10.

Для цитирования этой статьи: Olly Dmitriev et al 2015 IOP Conf. Сер.: Матер. науч., англ., 90 012055

Посмотреть [статью онлайн](#) для обновлений и улучшений.

Вам также может понравиться

- CFD-исследование двигателя винтового компрессора  
[Анализ охлаждения](#)  
Свесть
- Проект пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора температуры регулируемого для детской комнаты  
В. Перес-Торрадо, Э. Эспиноль-Бланко и Т. Веласке-Перес
- Анализ сжатия данных без потерь  
[Алгоритмы для сетей с низкой пропускной способностью](#)  
Вогдерс Семигулис и Балачандра Паттанаик



The Electrochemical Society  
Advancing solid state & electrochemical science & technology

## 242nd ECS Meeting

Oct 9 – 13, 2022 • Atlanta, GA, US

Early hotel & registration pricing  
ends September 12

Presenting more than 2,400  
technical abstracts in 50 symposia

The meeting for industry & researchers in

**BATTERIES**  
**ENERGY TECHNOLOGY**  
**SENSORS AND MORE!**



**Register now!**



**ECS Plenary Lecture featuring  
M. Stanley Whittingham,**  
Binghamton University  
Nobel Laureate –  
2019 Nobel Prize in Chemistry



# Миниатюрный роторный компрессор со степенью сжатия 1:10.

Олли Дмитриева, Юджин Таботта, Профессор Ян Арбон Юинг, CEng, FIMechE

aVERT Rotors, 12 Miller Row, Эдинбург, EH4 3BQ

olly@VERTrotors.com

Абстрактный. Микрокомпрессоры находят применение в медицинских устройствах, робототехнике и «наноспутниках». Проблема активного охлаждения фотоприемников «наноспутниках» становится все более актуальной, поскольку большинство космических миссий нацелены на наблюдение Земли, а пассивное охлаждение не обеспечивает требуемых температур для достижения желаемых уровней SNR. Поршневые компрессоры используются в криоохлаждениях, вызывают вибрации. VERT Rotors построил роторный компрессор с низкой вибрацией с винтами длиной 40 мм, и наш прототип обеспечивает степень сжатия 1:10.

Этот «нано» компрессор представляет собой нетрадиционный конический тип, состоящий из внутреннего конического винтового ротора, вращающегося внутри внешнего винтового ротора.

1. Необходимость разработки очень маленького роторного компрессора с высокой степенью сжатия. Отвод тепла и контроль температуры были очень важной проблемой для «наноспутников» (100x100x100 мм – масштаб, так называемые «CubeSats») и не больших спутниковых платформ (1 м. x 1 м x 1 м - масштаб). Существенные ограничения мощности на CubeSats, увеличение требований к мощности радиосвязи и более высокими скоростями передачи данных требуются технология активного отвода тепла. Задачи для такой системы включают удаленные джэковатт от источника тепла для излучения на внешнюю поверхность, чтобы поддерживать охлаждение радиоблок и оптических линз, или для передачи этого тепла другой подсистеме на орбитах, где есть длительные периоды затмения (например, поддержание батареи при рабочей температуре без использования расточительного нагревателя).

Термический контроль CubeSats обычно пассивный с радиаторами и оптической системой на внешней конструкции, поддерживающей структуру, за исключением несолнечных панелей, в диапазоне примерно от 258 К до 313 К для солнечно-синхронных орбит [1]. Этого недостаточно для охлаждения фотодетекторов до 180°C. 200K, что становится основным требованием, когда наблюдение Земли и дистанционное зондирование, по оценкам, составляют 52% миссий малых спутников в 2014-2016 гг. [2,3]. Отношение сигнал/шум (SNR) фотодетекторов зависит от температуры, поскольку тепловой шум от теплового возбуждения увеличивается с ростом температуры, как следует из температурной зависимости концентрации электронов в зоне проводимости, показанной в уравнении ниже:

$$n_0 = k_3 T^{-1} \exp(-k_4/T) \quad (1)$$

где  $n_0$  — концентрация электронов в зоне проводимости,  $T$  — температура,  $k_3$  и  $k_4$  — константы, зависящие от технологии. Исходя из этого уравнения, для получения отношения сигнал-шум 100 требуется температура около 187 К [4]. Хотя это всего лишь частный пример, в целом верно то, что для достижения разумного отношения сигнал-шум охлаждения датчика становится необходимостью.

В космосе лишнее тепло от спутников можно отвести только излучением солнечных панелей. Из-за ограниченной площади внешней поверхности CubeSat эффективность пассивного охлаждения излучением ограничена. Активная система была бы значительно более эффективной, если бы компрессор нагнетал газообразный хладагент посредством сжатия. В частности, закон Стефана-Больцмана гласит, что, хотя полная энергия, излучаемая на единицу площади поверхности черного тела, линейно зависит от площади поверхности излучающих панелей, это зависит от четвертой степени температуры термодинамической температуры  $T$ :



$$P = A \varepsilon \sigma T \text{Rad}^4 \quad (2)$$

где  $P$  — мощность, излучаемая в космос, Вт,  $A$  — площадь поверхности излучателя,  $\text{м}^2$ ,  $\varepsilon$  — коэффициент излучения черных панелей,  $\sigma$  — постоянная Стефана-Больцмана ( $5,6704 \times 10^{-8} \text{ Вт} / \text{м}^2 \text{ К}^4$ ) [5].

Активная система охлаждения, повышающая температуру газа за счет сжатия и усиливающая излучение тепла через черные панели, была бы наиболее подходящим решением. Не несколько ключевых требований к компрессору в активной системе: - Обеспечить степень сжатия не менее 1:3 для нагрева газа.

- Поддерживать отвод 10-20 Вт тепла.
- Очень маленькая занимаемая площадь в пределах 100 мм x 100 мм x 40 мм.
- Малая масса, не менее 100 г, из-за высокой стоимости доставки полезной нагрузки в космос.
- Самое главное, чтобы компрессор производил как можно меньше вибрации, т.к.

вибрация неблагоприятна для оптики спутников наблюдения Земли.

Другие доступные не большие компрессоры хорошо подходят для определенных приложений, но для миссий по наблюдению Земли уровень вибрации должен быть низким, чтобы уменьшить воздействие на датчики изображения.

Существующие микрокомпрессоры поршневого типа, естественно, имеют собственные вибрации. Один такой компрессор производства Lockheed Martin имеет массу 190 г; чистая холодопроизводительность этой машины составляет 650 мВт при 150 К, что соответствует удельной мощности 15,4 Вт/Вт [6]. Более продвинутые активные методы, такие как испаряющиеся в космосе криокуллеры Стирлинга и Дюлю-Томсона, превосходят возможности кубатов по объему и массе.

В качестве примера можно привести 4,3-килограммовый криокуллер Oxford, используемый на UARS, с охлаждающей способностью 0,8 Вт при 80 К [1].

Был сделан вывод, что роторная конструкция будет наиболее подходящей для очень маленького компрессора с низким уровнем вибрации. Проблема безмасляных роторных конструкций заключается в том, что они не обеспечивают высокой степени сжатия более 1:1,5 при очень малых размерах. По этой причине компрессоры поршневого типа обычно используются в очень больших приложениях.

## 2. Проектирование «нано» конического роторного компрессора

### 2.1. Результаты конструкторского проекта

Разработан нанороторно-конический компрессор с соотношением объемов 1:4 (кодовое название «МК03»). Длина вала составляет 40 мм, и он подходит для печатной платы размером 100 мм x 100 мм. МК03 представляет собой роторный компрессор, обеспечивающий очень низкую вибрацию.

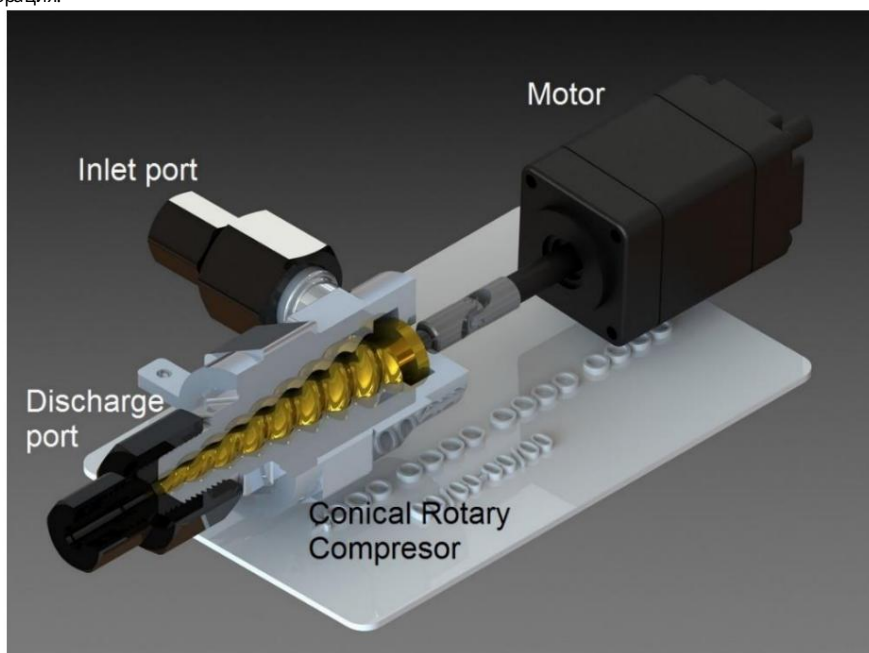


Рисунок 1. МК03 в сравнении с кредитной картой

Слово «нано» здесь не буквальное, оно говорит о том, что это тот компрессор рассчитан на сателлиты весом 1-10 кг, которые обычно называют «наноспутниками» [2].

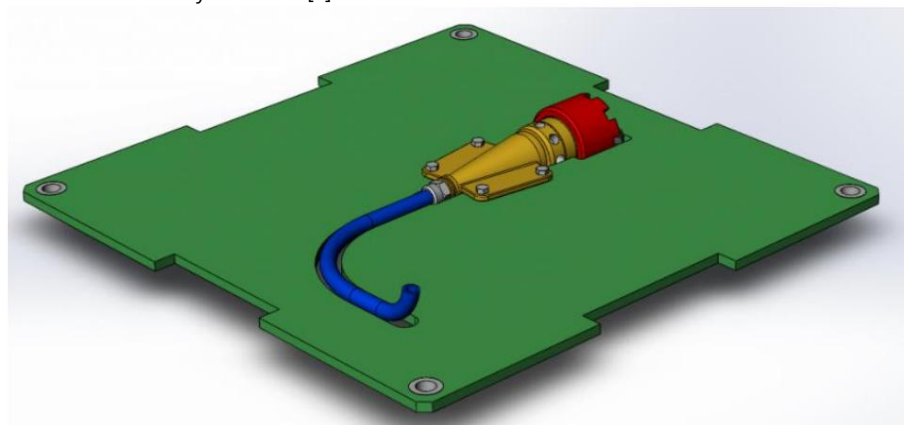


Рис. 2. Nano CRC, установленный на плате 100 x 100 мм

МК03 представляет собой конический роторный компрессор (CRC) новой конструкции, состоящий из одного внутреннего конического винтового ротора, вращающегося внутри внешнего конического винтового ротора. Для сравнения, обычные двухвинтовые компрессоры состоят из трех элементов, два винта вращаются внутри корпуса.

#### TWIN-SCREW



#### CONICAL SCREW

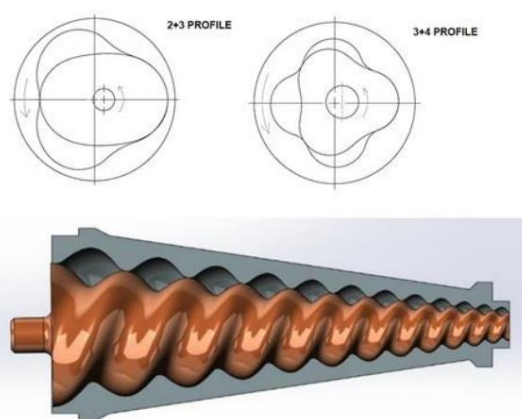


Рис. 3. Сравнение профилей двухшнекового и конического шнеков

Для создания МК03 была разработана математическая формула и алгоритм построения сопряженных конических винтовых роторов. Было написано программное обеспечение 3D CAD, которое выводит профиль винтов в формате 3D, пригодном для дальнейшей обработки и механической обработки CAD-CAM. После нескольких лет оптимизации создание профилей шнеков было полностью автоматизировано, а продолжительность процесса сократилась до нескольких часов.

#### 2.2. Работа конического роторного компрессора

Камера сжатия образована объемом, заключенным между внутренним и внешним роторами.

Ось внутреннего ротора смещена под углом от оси внешнего ротора и вращается внутри нее, как вращается сам ротор.

При работе сжимаемый газ втягивается в узел на большом конце конуса. Камера сжатия находится в положении, при котором поток будет перекрыт всасывающего патрубка [7].

По мере вращающегося внутреннего ротора и внешнего ротора каждая из закрытых камер уменьшается в размере по мере того, как она перемещается от большого конца к меньшему концу конуса, тем самым сжимая газ. Газ под высоким давлением выходит из узла на узком конце конуса.

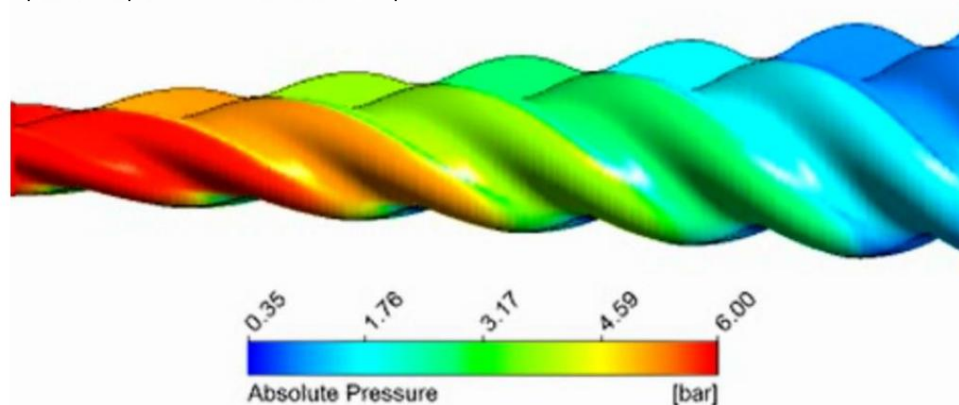


Рисунок 4. Постепенное повышение давления в КРР

### 2.3 Сравнение конструкций с коническим и двухшнековым винтами

Возможно, наиболее важным отличием является то, что в CRC внутренний ротор совершает вращательное движение внутри внешнего ротора, тем самым используя весь объем внутри внешних роторов, поэтому CRC не имеет «дыкало», что является типичным признаком двухвинтовых компрессоров [8]. Утечка потока является основной причиной снижения эффективности двухвинтовых компрессоров [9]. «Дыхание» представляет собой зазор, где встречаются два винта и корпуса, и сжатый газ из области высокого давления просачивается обратно в область низкого давления. Чтобы решить эту проблему, безмасляные двухвинтовые компрессоры работают на высоких скоростях вращения. CRC, не имеющий «дыкало», потенциально может работать с более высокой эффективностью, но его работу может ухудшить более высокое трение. Чтобы реализовать свой потенциал, CRC должен быть изготовлен из материалов с низким коэффициентом трения.

Во-вторых, за счет малой площади нагнетания и постепенного уменьшения рабочего объема, степень внутреннего давления КРК «самонастраивается» на внешние давления, т.е. требуемые давления системы, в которой работает компрессор, что позволяет компрессору для работы с оптимальным давлением нагнетания. Следовательно, CRC не страдает от чрезмерного или недостаточного сжатия [7].

Эффективность объемного компрессора (поршневого, спирального, винтового, пластинчатого или любого другого) во многом зависит от способности машины регулировать отношение внутреннего давления к «внешнему» или системе, коэффициент давления.

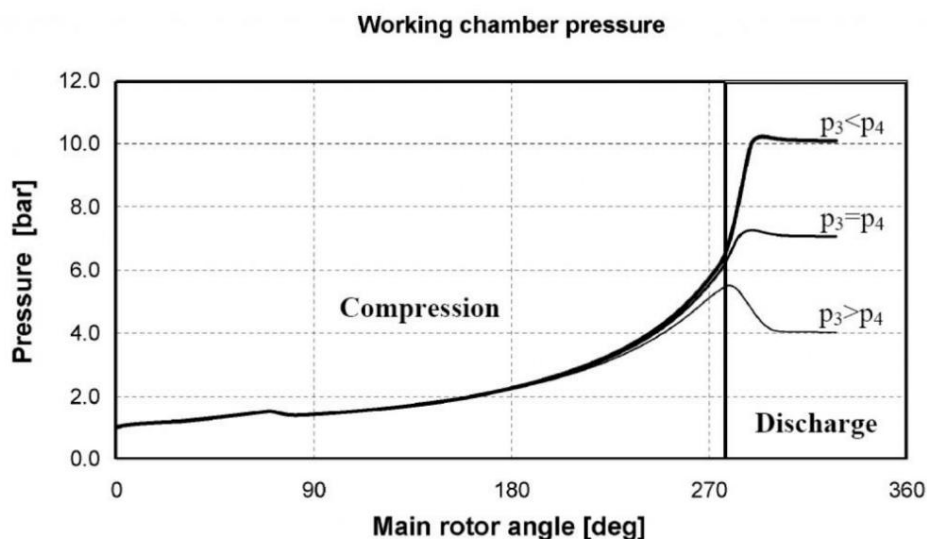


Рисунок 5. Диаграмма угла давления двухвинтовых компрессоров

Если «внешнее», или системное, давление выше, чем достигнутое внутри давление ( $p_3 < p_4$ ), это состояние называется недостаточным сжатием и требует дополнительной работы по вытеснению жидкости из компрессора, в результате чего его давление будет увеличено до внешнего давления нагнетания. Если внешнее давление ниже, чем внутреннее давление ( $p_3 > p_4$ ), это состояние называется чрезмерным сжатием и указывает на то, что в компрессоре была затрачена ненужная работа для сжатия.

ИОП конф. Серия: Материаловедение и инженерия 90 (2015) 012055 doi: 10.1088/1757-899X/90/1/012055  
 газа до более высокого уровня давления, чем требуется. Оба случая нежелательны, так как оба вызывают более высокое энергопотребление, чем необходимо.

Если объемное отношение  $[V_i]$  является постоянным, увеличение давления в процессе сжатия (так называемое внутреннее сжатие) будет более или менее постоянным и независимым от внешнего или системного отношения давлений. Его можно рассчитать как:

$$p_3 = p_2 V_i^\gamma \quad (3)$$

где  $\gamma$  — показатель изотропии газа.

Как показано на рис. 5, если внутреннее давление  $p_3$  соответствует внешнему давлению  $p_4$ , процесс сжатия является оптимальным и дополнительных потерь не возникает.

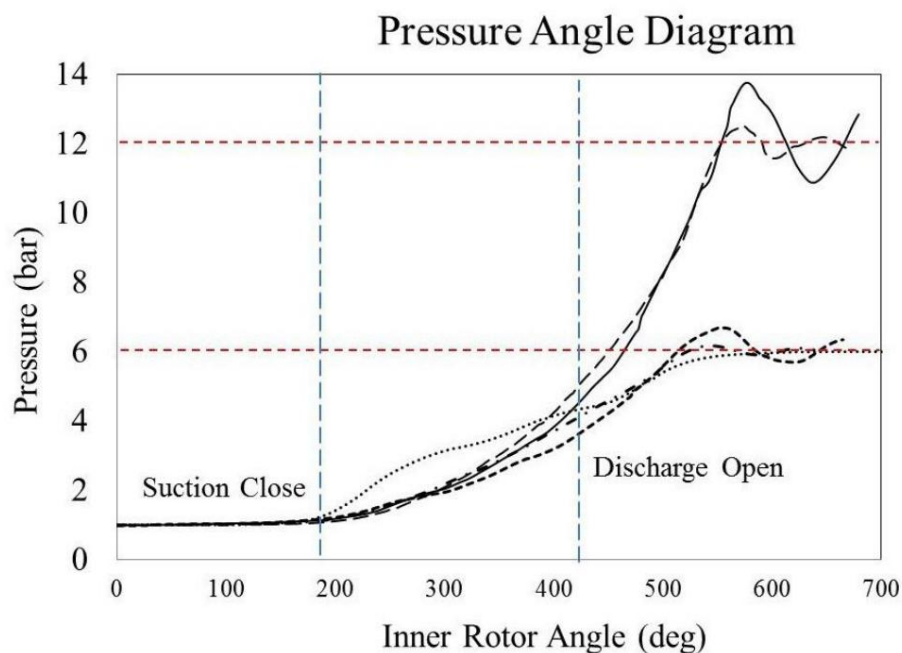


Рисунок 6. Диаграмма угла давления CRC

На рис. 6 показана рассчитанная индикаторная диаграмма для CRC. Как видно на диаграмме, эта машина во всех расчетных случаях достигает соответствия внутреннего и внешнего (системного) давления независимо от скорости или степени сжатия. Таким образом, видно, что CRC имеет «саморегулирующийся» коэффициент внутреннего давления.

Рабочая камера, соединенная с выпускным отверстием, имеет очень длинную юбку форму, а площадь, через которую она соединяется с выпускным патрубком, мала. Это благоприятная особенность, поскольку она заставляет «внутреннее» давление компрессора постепенно соответствовать «внешнему» или давлению системы со скоростью с которой это происходит во время внутреннего сжатия.

В типичном двухвинтовом компрессоре дело обстоит по-другому, поскольку в этих машинах нагнетательный порт обычно открывается намного шире, что приводит к гораздо более быстрому выравниванию внутреннего и внешнего давления, что, хотя и снижает динамические потери потока, все же увеличивает требуемую мощность.

Относительно не большого размера выпускного отверстия в КРК и его постепенное изменение дополнительно способствует уменьшению колебаний давления в выпускном отверстии. Поэтому, как видно на рисунке 6, пульсации давления существуют, но не велики при любом давлении. В типичном двухвинтовом компрессоре эти колебания будут очень малы, когда внутреннее и внешнее давление нагнетания совпадают, но могут быть значительными, если они сильно различаются.

Внутреннее, расположение осевого нагнетания также повышает энергоэффективность. Вот что Центральное объемное компрессорное устройство: «Коническая конструкция компрессора и осевое расположение нагнетания... являются уникальным преимуществом этого компрессора». касательные оси винта. Это создает дополнительное сопротивление и приводит к потерям энергии.



ИОП конф. Серия: Материаловедение и инженерия 90 (2015) 012055 doi: 10.1088/1757-899X/90/1/012055  
В CRC всасывание и нагнетание лежат на одной оси с корпусом, что обеспечивает оптимальный поток газа без сопротивления.

2.4 Самая компактная ротационная машина, сжимающая воздух под давлением 11 бар (изб.) в одну ступень Экспериментальные исследования, проведенные нашей командой в Эдинбурге, показали, что МК03 сжимает воздух под давлением 11 бар (изб.) в одну ступень при частоте вращения вала 6000 об/мин. скорость. Это подтверждает, что даже очень маленькие CRC могут обеспечивать высокие степени сжатия при стандартных скоростях вала благодаря постепенному сжатию газа внутри внешнего ротора, когда он движется от всасывающей стороны к нагнетательной. По сути, CRC представляет собой на сегодняшний день на рынке самую маленькую ювентовую конструкцию способную обеспечить такую степень сжатия. Современные винтовые компрессоры представляют собой большие промышленные машины с нижним пределом рабочего объема, составляющим примерно 20 м<sup>3</sup>/ч при 3000 об/мин [10], но обычно 80 м<sup>3</sup>/ч [11].

В системах с впрыском масла МК03 может использоваться для сжатия воздуха до 8-10 бар (изб.), в то время как в во избежание перегрева разумеется давление нагнетания должно быть ограничено до 3 бар (изб.).

## 2.5 Термодинамическая модель

Для настройки производительности CRC была разработана численная модель охлаждения CubeSat с платами RF, генерирующими 20-30 Вт тепла (все 80 Вт тепла, включая вклад солнечного излучения и самого компрессора).

CubeSat охлаждается от лобовой температуры до которой он был нагрет радиочастотными панелями и оптикой, и сходится и стабилизируется при равновесной температуре.

### 2.5.1. Дропшн

Газообразный хладагент:

гелий Расход хладагента: Расход = 3 л/мин

Степень сжатия 1:3 Размер чирный

радиационных панелей для CubeSat составляет 0,12 м<sup>2</sup> (две «карты» 300 мм x 100 мм x 100 мм).

на противоположной стороне CubeSat).

Коэффициент излучения черных панелей  $\epsilon = 0,96$

2.5.2. Модель. Газ, выходящий из компрессора, необходимо нагреть до температуры достаточной для излучения 80 Вт тепла через черные панели конденсатора. Требуемая температура определяется по закону Стефана-Больцмана, формула (2) выше.

Требуемый расход хладагента = 8,923x10<sup>-6</sup> кг/с Температуры

газа на выходе из компрессора: T<sub>1</sub> = 368K Энергия, излучаемая

черными панелями от нагретого хладагента, рассчитывается по формуле (2), в данном случае она равна 119,4 Вт

После выхода газа из конденсатора «черная панель» его температура падает до T<sub>2</sub> = 239K Давление

в конденсаторе снижается до p<sub>2</sub> = 1,9 бар (а)

Когда газ проходит через расширительный клапан, его давление падает до 1 бар (а).

В испарителе газ расширяется и его температура снижается до T<sub>3</sub> = 183K. Хладагент охлаждает

полезную нагрузку. Его температура повышается до T<sub>0</sub> = 237K, что будет

равновесная температура CubeSat.

## 3. Производство и экспериментальная проверка

Для проверки концепции было построено несколько рабочих прототипов CRC. Опытный образец установки «МК3» с коническими роторами длиной 167 мм с объемным соотношением 1:10 обеспечивал степень сжатия воздуха 1:22 в одноступенчатом режиме в безмасляном режиме при частоте вращения 830 об/мин. Другая машина под кодовым названием «МК7» с коническими роторами длиной 220 мм и объемным соотношением 1:2 прошла все сторонние испытания на сжатие воздуха с впрыском масла в течение 3 месяцев. Он производил 130 л/мин (7,8 м<sup>3</sup>/ч) при нагрузке 8 бар (изб.) и частоте 52,5 Гц. МК7 имеет удивительно низкий уровень шума даже без акустического кожуха, что позволяет двум людям вести беседу, стоя рядом с работающим компрессором. Эти прототипы подтвердили концепцию конических роторов.

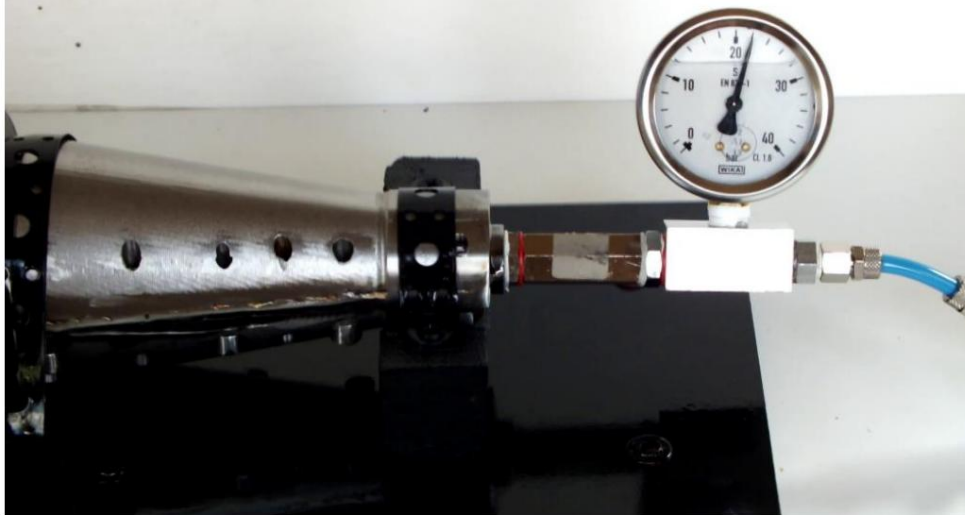


Рис. 7. Испытание машины МКЗ, показывающее давление 22 бар (изб.) на одной ступени

На основе наземных работ, проведенных с более крупными машинами, был построен и испытан рабочий прототип «МК03» с коническими роторами длиной 40 мм и соотношением объемов 1:4. воздуха до 10 бар (изб.) в одну ступень.



Рисунок 8. Прототип МК03

Результаты испытаний показывают, что CRC является самым маленьким операционным ротационным компрессором, работающим с соотношением сторон 1:10. коэффициент давления.

#### 4. Следующие шаги: разработка комплекта нано-криоохлаждения

На следующем этапе авторы планируют построить и испытать ультракомпактный охлаждающий комплект с низким уровнем вибрации на базе компрессора МК03. Конечным результатом будет полностью работающая экспериментальная модель 1:1, установленная на печатной плате 100 мм x 100 мм, подходящая для установки в CubeSat (см. рис. 9 ниже).



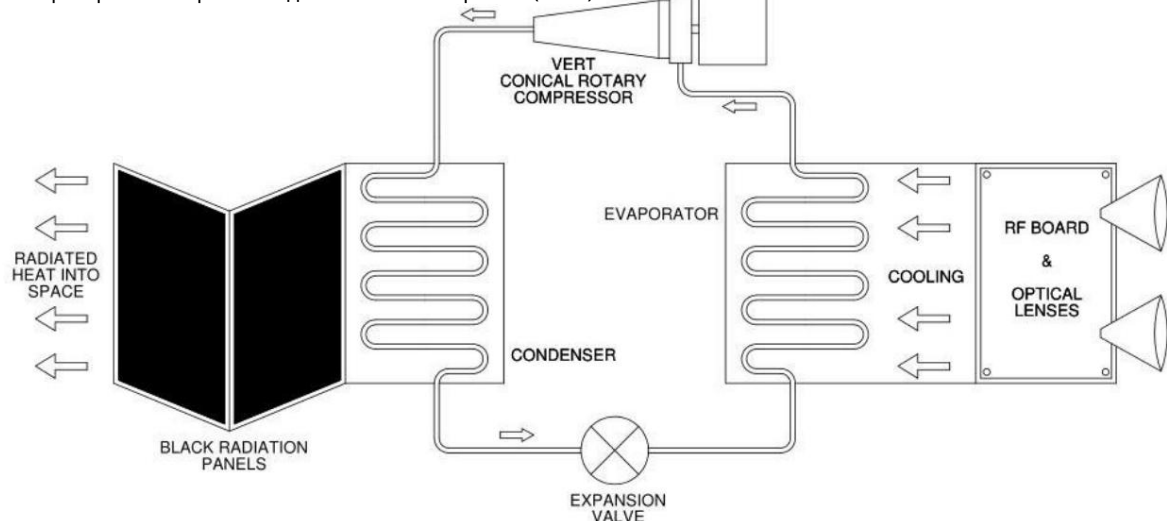


Рисунок 9. Схема охладителя на базе компрессора МК03

## Ссылки [1]

Обзор и оценка возможностей спутников Cubesat для наблюдения Земли, Д. Селъва, Д. Крейчи, Acta Astronautica 74 (2012) 50-68 [2] Оценка рынка нано/микроспутников, 2014 г., SpaceWorks Enterprises Inc.

[3] Миссии малых спутников, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, www.nasa.gov [4] Г. Х. Рике, Обнаружение света: от ультрафиолета до субмиллиметров, Издательство Кембриджского университета, Кембридж, Великобритания, 2003.

[5] Закон Стефана-Больцмана, Encyclopaedia Britannica, [www.brittanica.com](http://www.brittanica.com)

[6] Микрокриокулер для тактического и космического применения. Дж. Р. , П. Шампань, Э. Рот, Т. Олсон-Наст, Э. Сайто, В. Лунг, А. С. Кентон и К. Л. Дроббинс. Материалы конференции AIP, 2014 г.

[7] Ковачевич, А., Ране, С. (2103), CFD-анализ винтового роторного компрессора VERT Labs HRC 1, Городской университет Лондона, Великобритания [8] Конструкция и применение ротационных двухваловых компрессоров во фригазовой отрасли и Обрабатывающая промышленность, EurIng Ян М. Арбон CEng, FIMechE, Публикации по машиностроению 1994.

[9] Бакни Д., Ковачевич А., Стосич Н. (2011 г.), Учет зазоров в конструкции роторов винтовых компрессоров, 7-я Международная конференция по компрессорам и их системам, Городской университет Лондона [10] <http://www.atlascopco.co.uk>

[11] Кевин Гласс, Компрессоры малые и ответки, Bitzer UK <http://www.acr-news.com/compressors-small-screw-drivers>