

**УДК 729.7.064.54****Развитие космических газотурбинных установок в  
работах в.л. самсонова**

А.Н. Арбеков, А.И. Леонтьев

**Аннотация:**

В статье изложены основные вехи создания отечественной космической замкнутой газотурбинной установки коллективом сотрудников Московского высшего технического училища имени Н.Э. Баумана, возглавляемым В.Л. Самсоновым. Сформулированы решаемые при этом проблемы. Описаны основные достижения в разработке установок и их критических узлов. Представлены направления дальнейших исследований.

**Ключевые слова:**

замкнутая газотурбинная установка; космический аппарат; рекуператор; холодильник-излучатель; солнечный концентратор; тепловой приемник-аккумулятор; центробежный компрессор, центростремительная турбина, синхронный генератор.

**Введение**

Все возрастающие требования к энергообеспечению космических аппаратов приводят к необходимости перехода к машинным преобразователям, среди которых выделяются замкнутые газотурбинные установки (ЗГТУ), способные обеспечить приемлемую экономичность при длительном ресурсе работы и могущие стать основой для перспективных многоцелевых энергодвигательных и энергохолодильных установок.

В течение более сорока лет в МГТУ имени Н.Э. Баумана ведутся работы по созданию замкнутых газотурбинных энергетических установок (ЗГТЭУ). Инициатором и руководителем этих работ, фактически пионером отечественного космического

газотурбостроения является выпускник кафедры «Турбостроение», а с 1965 года – ее постоянный сотрудник – Владимир Леонидович Самсонов.

Ученик Владимира Васильевича Уварова, пронесший через всю жизнь любовь и преданность газотурбинным установкам. После возвращения из реутовского НПО «Машиностроения», где он участвовал в запуске первого «Протона», В.Л. Самсонов начал работу в МВТУ. Научным руководителем работ по разработке космических ЗГТЭУ был заслуженный деятель науки и техники, заведующий кафедрой «Турбостроение» Вл. В. Уваров.

Создание космических ЗГТЭУ потребовало решения целого комплекса задач:

- Выбор источника теплоты.
- Выбор цикла и схемы газотурбинной установки.
- Выбор рабочего тела.
- Определение теплофизических характеристик рабочих тел.
- Создание и отработка критических узлов.
- Разработка конструкции и компоновки установки.
- Отработка технологии изготовления критических узлов.

В качестве источника высокопотенциальной теплоты в зависимости от уровня мощности и условий применения были рассмотрены солнечные приемники-концентраторы, радиоизотопные таблетки и ядерные реакторы.

Циклы газотурбинных установок отличаются большим разнообразием, их теория была разработана в работах Вл.В. Уварова и Г.И. Зотикова и их учеников.

Особенностью космических ЗГТЭУ является узкий температурный диапазон, который обусловлен термостойкими свойствами конструкционных материалов и возможностью отвода теплоты радиацией. Поэтому для получения приемлемого уровня экономичности приходится идти на усложнение цикла. Наиболее простым способом повышения КПД является применение регенерации теплоты, позволяющее поднять его практически вдвое.

## **1. Рекуператор – ключевой элемент ЗГТЭУ**

Использование рекуператора в цикле позволяет значительно снизить оптимальную степень повышения давления в компрессоре установки и, как следствие, окружную скорость на колесах турбины и компрессора, а это уменьшает инерционные нагрузки.

Так как рекуператор является наиболее громоздким и тяжелым узлом ЗГТЭУ, то его использование потребовало исследований компактных теплообменных поверхностей,

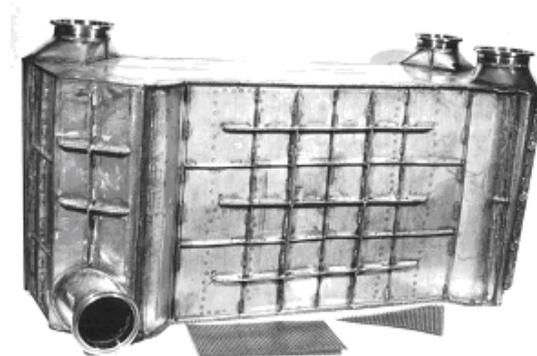
известных по работам Кейса и Лондона своими высокими теплогидравлическими характеристиками [1]. Научным руководителем работ по их исследованию был Николай Дмитриевич Грязнов, впоследствии доктор технических наук, профессор. В развитие этого направления были исследованы поверхности, получившие впоследствии наименования МВТУ № 1,...11, а также пластинчатые поверхности типа диффузор-конфузор [2]. В результате этих работ был создан рекуператор ЗГТЭУ, представленный на рис. 1.



а) МВТУ № 10



б) диффузор-конфузор



в) рекуператор

Рисунок 1 - теплообменные поверхности и рекуператор с пластинчато-ребристой матрицей

Наиболее сложными проблемами при создании матриц теплообменных аппаратов являлись: штамповка поверхностей (разработана на кафедре АМ-6) и высокотемпературная пайка (кафедра М-8). Впоследствии технология отработывалась в промышленности (ОАО «НПО Наука», СКБ «Турбина», ОАО «НПО Энергомаш имени В.П. Глушко»).

## 2. Выбор рабочего тела

Но замкнутый контур это не только новые проблемы, но и преимущества, и прежде всего в возможности выбора рабочего тела. Из инертных газов наиболее дешев аргон. Однако, выбор рабочего тела определяется не только его ценой, а всем комплексом теплофизических свойств рабочего тела и единичной мощностью ЗГТЭУ.

Исследования, проведенные В.Л. Самсоновым, показали, что для ЗГТЭУ с электрической мощностью от 1 до 20 кВт необходимо использовать рабочее тело с молярной массой около 80 кг/кмоль, а это криптон – один из самых дорогих инертных газов. Появившееся незадолго до этого американские публикации о преимуществах смеси

гелия и ксенона как теплоносителя, дали новое направление исследованиям. И вновь исследования рекуператора, но уже на смесях, результаты, полученные в США, подтверждаются - переход на смеси сулит выигрыш в массе теплообменного оборудования до одной трети при молярных массах смеси от 30 до 90 кг/кмоль. И Владимир Леонидович на всех конференциях и совещаниях начинает доказывать: необходимость перехода на гелиексеноновую смесь – это сделает установку не только конкурентоспособной, но и реализуемой уже в 70<sup>х</sup> годах XX века. Борьба за использование смеси продолжается, и по сей день.

### **3. Первые установки**

Создание ЗГТЭУ мощностью 10 кВт с радиоизотопным источником теплоты для космического аппарата потребовало решения целого ряда новых проблем, исследования совершенно неизвестных областей теплообмена, газовой динамики, термодинамики и электромагнетизма. Привлекаются новые организации, новые люди... За эти годы в работах приняли участие сотни людей с десятков предприятий различных отраслей науки и промышленности.

Основным элементом любой газотурбинной энергетической установки является блок турбогенератора-компрессора (ТГК). Создаются и отрабатываются его критические узлы: центробежный компрессор, центростремительная турбина, газодинамические лепестковые подшипники, быстроходный высокочастотный генератор с когтеобразным ротором и обмоткой возбуждения на статоре, представленные на рисунке 2. Для этого потребовалось проектирование, монтаж и отладка целого ряда уникальных стендов, которые используются до сих пор. Отрабатывается изготовление торцевых муфт с круговым зубом на специально спроектированном в ЭНИМСе станке. Электрической частью занимается кафедра электротехники и ВНИИЭМ. После отработки критических узлов проходит испытания теплодинамический имитатор блока ТГК, а уж затем появляется и сам блок.



Рисунок 2 - Основные узлы блока ТГК: корпус газодинамического лепесткового подшипника, отливка колеса турбины, статор генератора, ротор блока ТГК, упорный лепестковый подшипник, образец муфты с круговым зубом

Накопив опыт работы на создании установки мощностью 10 кВт и ее узлах коллектив, возглавляемый В.Л. Самсоновым, приступает к созданию трехкиловаттной замкнутой газотурбинной установки, использующей солнечную теплоту [3]. Новая ЗГТЭУ, как и предыдущая, реализует высокорекуперативный цикл, позволяющей использовать одновальные блоки турбогенератора-компрессора, представленные на рисунке 3.

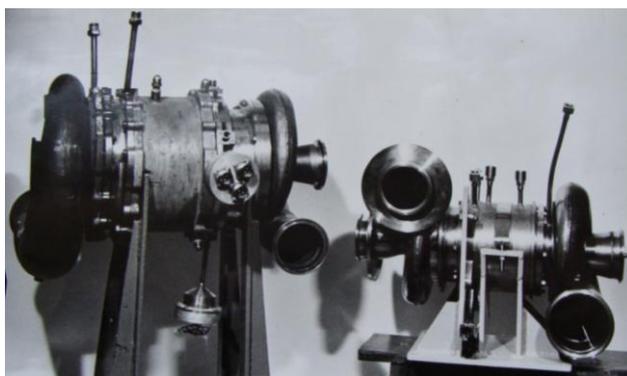


Рисунок 3 - Блоки турбогенератора-компрессора ЗГТЭУ мощностью 10 и 3 кВт

Наиболее важным узлом малоразмерных ЗГТЭУ является компрессорная ступень, колесо которой представлено на рисунке 4. Основные параметры ступени: рабочее тело - геликсеноновая смесь с молярной массой 83,8 кг/кмоль; степень повышения давления - 1,75; расход 0,190 кг/с; частота вращения 40 000 об/мин



Рисунок 4 – рабочее колесо компрессора

Использование солнечной радиации потребовало аккумулирования теплоты для прохождения теневой части орбиты. Тепловой аккумулятор, работающий на фториде лития, позволил отказаться от электрохимических аккумуляторов и обеспечить непрерывную работу установки на номинальном режиме в течение всего времени существования спутника [3]. Но нужны новые исследования – появляется стенд тепловых аккумуляторов, где изучается процесс плавления-затвердевания фторида лития, заключенного в ниобиевую капсулу, представленную на рисунке 56. Эти работы проводились совместно с РКК «Энергия» [4].



Рисунок 5 - Ниобиевая капсула и трубчатый элемент теплового аккумулятора

В восьмидесятые годы создан наземный прототип солнечной ЗГТЭУ для десятого полета МКК «Буран», который представлен на рисунке 6. Он отработал на стенде в МВТУ имени Н.Э. Баумана свыше 2000 часов, выдержав более 250 циклов «пуск-останов» [3]. Во время одного из запусков установка проработала непрерывно 200 часов. Электрическая мощность установки достигала 3 кВт, а кпд - 24 %.

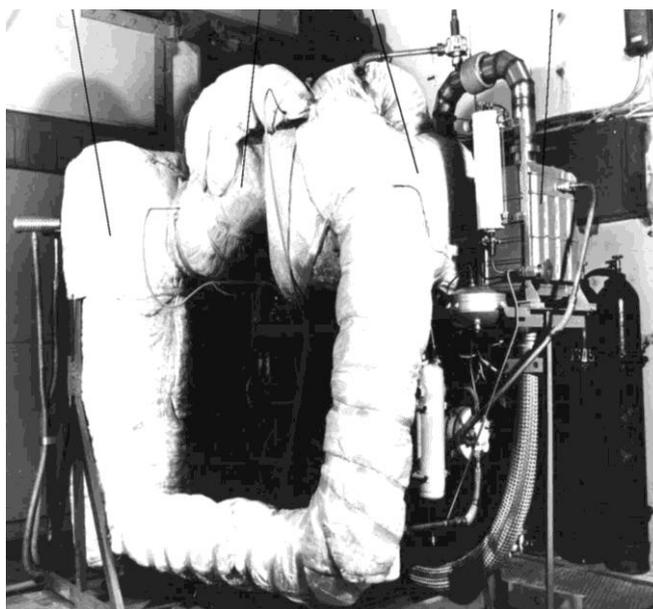


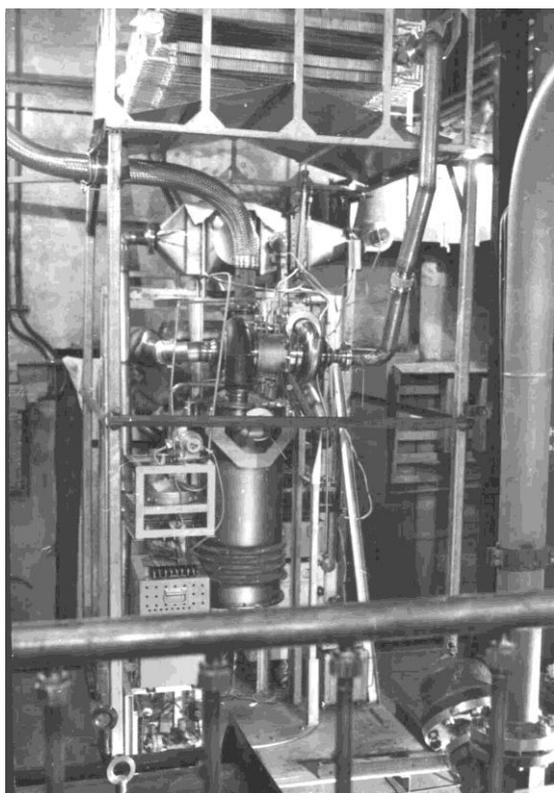
Рисунок 6 - Наземный прототип солнечной орбитальной ЗГТЭУ мощностью 3 кВт в испытательном боксе МВТУ им. Н.Э. Баумана

Но создание этой установки пришлось на переломный момент в жизни нашей страны – МКК «Буран» слетал только один раз.

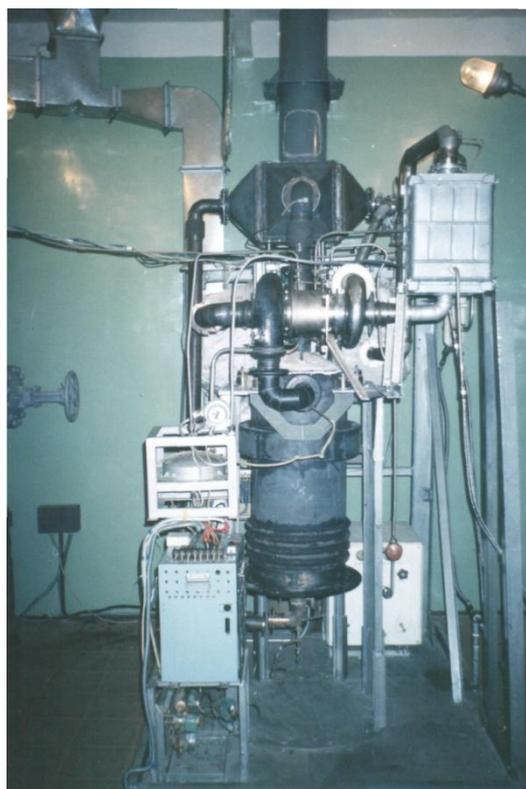
#### 4. Из космоса на Землю

Дальнейшее развитие работ связано с созданием конверсионной установки, предназначенной для автономного энергоснабжения отдаленных потребителей, к которым относятся прежде всего приемопередающие станции радиорелейной связи ОАО «Газпром» и ОАО «Ростелеком», а также системы катодной защиты газо- и нефтепроводов. Опытный образец этой установки [5] был создан при непосредственном участии специалистов НПО «Наука», ОАО «Аэроэлектромаш», НПО «Энергомаш имени В.П. Глушко» и смонтирован в боксе НПО Энергомаш (рис. 7а), где прошел цикл испытаний, набрав свыше 600 часов ресурса при более, чем 200 циклах «запуск-останов».

В 2005 году после перевоза установки в испытательное помещение ФГУП «ММПП «Салют» (рис. 7б) она набрала еще более 50 часов ресурса, при 14 «запусках-остановах».



а) испытательном боксе ОАО «НПО  
«Энергомаш»



б) в испытательном помещении ФГУП  
«ММПП «Салют»

Рисунок 7 - Опытный образец конверсионной ЗГТЭУ мощностью 1...3 кВт, работающей на природном газе

В это же время создается концептуальный проект перспективной энергетической установки, работающей на органическом топливе, в котором реализованы последние достижения в области газотурбостроения и генераторостроения [6].

## **5. Развитие работ по космическим ЗГТЭУ с середины 90х годов**

В последнее десятилетие XX века отделом Владимира Леонидовича совместно с ИАЭ имени И.В. Курчатова, НИКИЭТ имени Н.А. Доллежала и ОАО «НПО Энергомаш имени В.П. Глушко» велись работы по созданию ядерной замкнутой газотурбинной энергодвигательной установке электрической мощностью 46 кВт [7]. Используя форсированный режим работы реактора и ЗГТЭУ, такая установка обеспечивает электроэнергией ракетные двигатели при перелете с опорной орбиты на рабочую, что позволяет отказаться от разгонного блока и более полно использовать грузоподъемность ракеты-носителя и объем его грузового отсека.

В конце 90<sup>х</sup> годов отдел, возглавляемый В.Л. Самсоновым, при участии специалистов кафедры Э-4 начинает заниматься солнечной замкнутой газотурбинной криоэнергетической установкой (ЗГТКЭУ) для перспективного космического аппарата [8]. Высокая экономичность ЗГТКЭУ позволяла вдвое уменьшить мидель космического аппарата и снизить аэродинамическое торможение в верхних слоях атмосферы. Другим неоспоримым достоинством установки является устойчивость к воздействию потока заряженных частиц в магнитном поле Земли, что позволяет обеспечить ресурс 5 – 7 лет. Однако, реализация криогенных температур потребовала перехода на неон, а он плохо сжимаем. И вот появляется ступень компрессора с частотой вращения 60000 оборотов в минуту, представленная на рис. 8. Новая проблема – все тот же рекуператор, расход неона мал - в пять раз меньше, чем геликсеноновой смеси, а значит, малы числа Рейнольдса и начинаются новые исследования. И существование этого направления пришлось отстаивать Владимиру Леонидовичу.



Рисунок 8 -. Ступень неоновых центробежного компрессора

В это же время ведутся работы по исследованию возможности использования ЗГТЭУ мощностью 15 МВт для пилотируемого перелета Земля-Мартс и мощностью 160 кВт для марсианской базы [9, 10]. В качестве источника теплоты рассмотрены газоохлаждаемый ядерный реактор и солнечный концентратор. Оба варианта представлены на рис. 9 и 10. Газотурбинная энергоустановка напланетной базы должна использовать энергию лазерного луча, созданного на борту корабля газовым лазером, встроенным в контур ЗГТЭУ корабля, это предложение стало продолжением ранних работ по созданию космической электростанции с передачей энергии на Землю лазерным лучом.

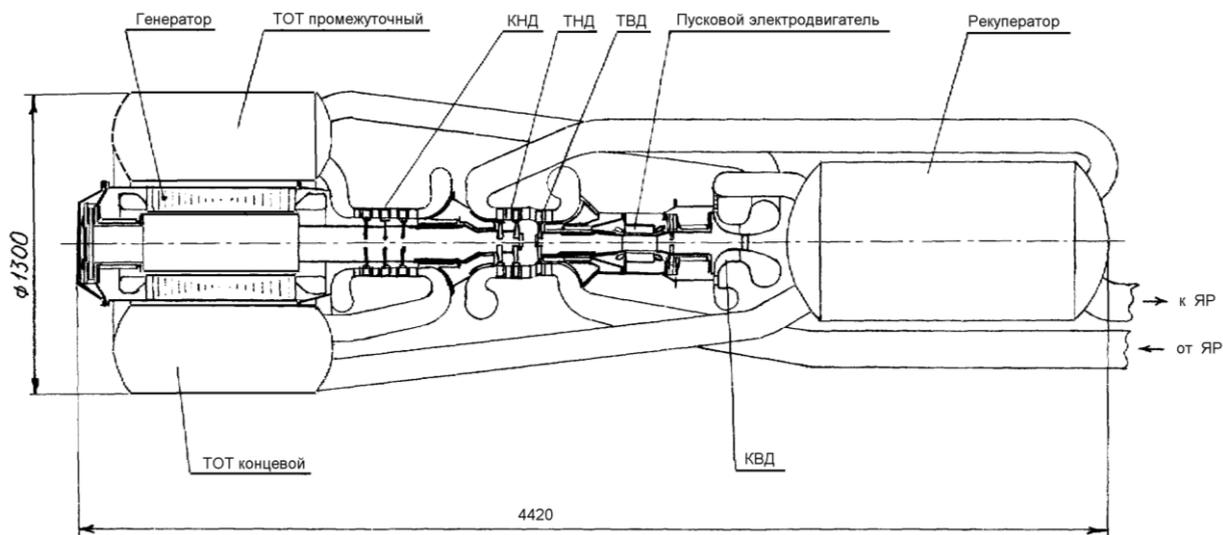


Рисунок 9 - ядерная двухвальная ЗГТЭУ с промежуточным охлаждением для межпланетного космического корабля.

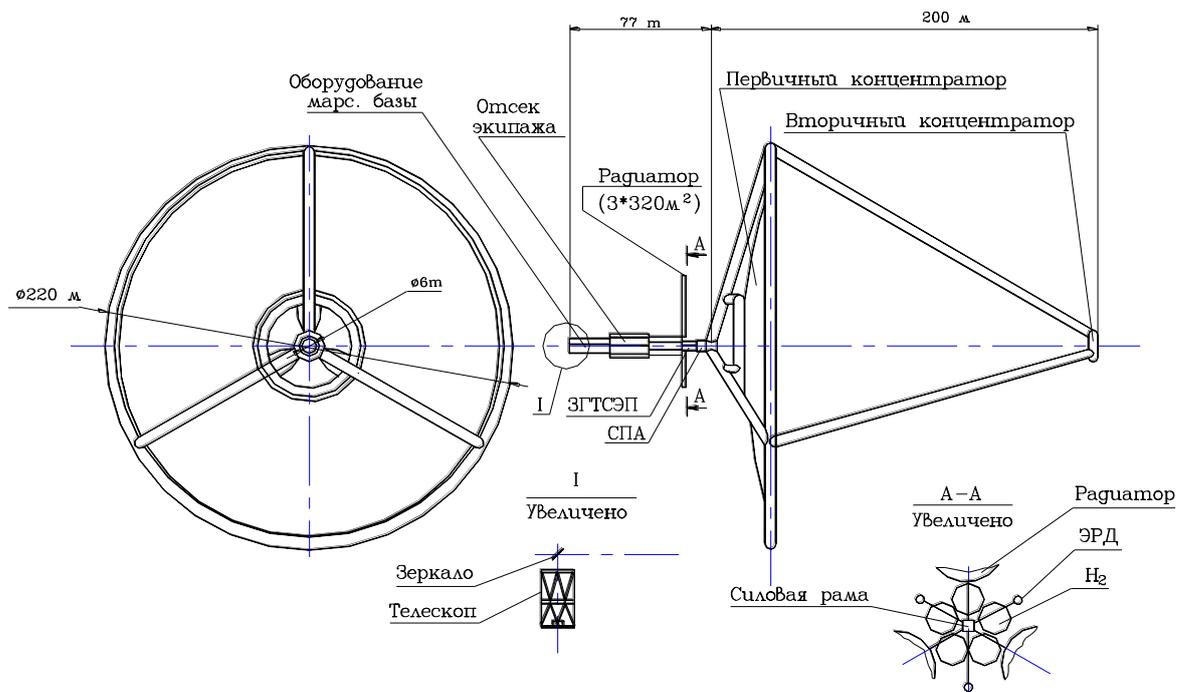


Рисунок 10 - межпланетный космический корабль с солнечной ЗГТЭУ

Дальнейшим развитием работ стала разработка ядерной замкнутой газотурбинной энергохолодильной установки электрической мощностью 50 кВт для высокоэнергетического геостационарного информационного спутника оригинальным двухконсольным одновальным блоком турбокомпрессора-генератора-детандера [11]. Впервые работа по этой установке была обнародована на конференции «Ядерная энергетика в космосе -2005».

С 2007 года в инициативном порядке ведутся работы по разработке ядерной замкнутой газотурбинной криоэнергетической установки для Лунной базы [12]. Ее особенностью является относительно низкий уровень температуры при входе в турбину (1023 К) при высоком уровне электрического КПД – 22 %. Установка способна обеспечивать Лунную базу электроэнергией, теплотой и холодом криогенного уровня (рис. 11).

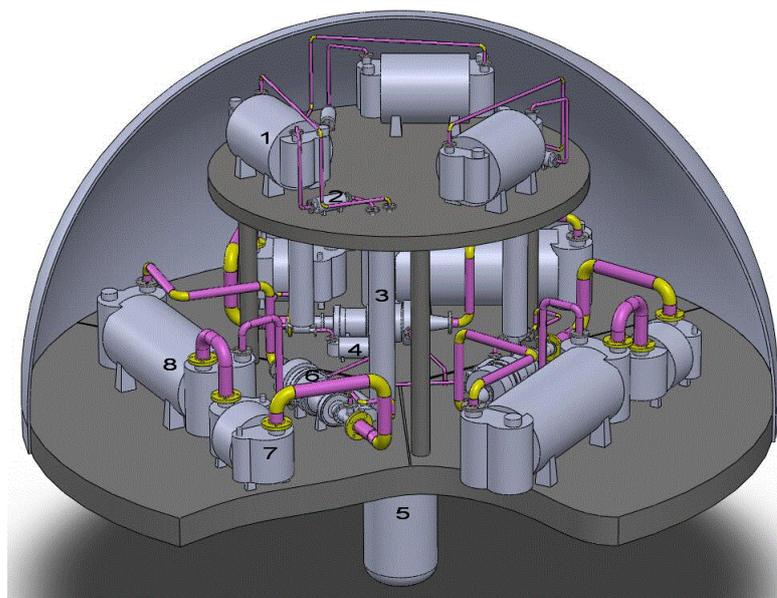


Рисунок 11 - Ядерная замкнутая криоэнергетическая установка мощностью 50 кВт  
для Лунной базы

1 – криогенный теплообменник, 2 - турбодетандер, 3,8 – рекуператоры, 4, 7 – концевые  
холодильники, 5 – ядерный реактор

Развитие этой работы происходило уже без Владимира Леонидовича, а ее промежуточные результаты были представлены на XIII Всероссийской межвузовской конференции по газотурбинным и комбинированным установкам. Как и в предыдущие годы на конференции работала секция замкнутых газотурбинных установок, в которой приняли участие ведущие отечественные специалисты из Росавиакосмоса, Росатома, авиадвигателестроительных предприятий и вузов.

Успешная работа секции еще раз подтвердила, что не зря Владимир Леонидович пропагандировал замкнутые газотурбинные установки на всех уровнях от университета до Совета безопасности, стучался во все двери от генеральных конструкторов до министров, созданная и развитая им тематика работ по-прежнему остается актуальной и перспективной.

### **Заключение**

Несмотря на практически отсутствующее финансирование в МГТУ имени Н.Э. Баумана продолжают работы по модернизации стендового оборудования для отработки критических узлов ЗГТУ следующего поколения, к которым относятся генератор с ротором на постоянных магнитах, работающий от статического частотного

преобразователя в моторном режиме при запуске блока ТКК, новые теплообменные поверхности, ступени турбомашин...

И хотя мы серьезно отстаем от США, сделавших с самого начала упор на газотурбинное преобразование энергии, для перспективных космических аппаратов, у нас еще есть шанс сократить отставание, используя потребности в наземных автономных источниках энергии.

Авторы приносят благодарность: коллективам всех организаций, принимавших участие в работах В.Л. Самсонова, руководству МГТУ имени Н.Э. Баумана и НИИ Энергомашиностроения, сотрудникам кафедры Э-3 и отдела ЭМ 2.3 за поддержку.

### **Библиографический список**

1. В.М. Кейс, А.Л. Лондон. Компактные теплообменники, пер. с англ. М.: Энергия, 1967, 224 с.
2. Голубев С.В., Самсонов В.Л.. Экспериментальные характеристики поверхностей теплообмена с короткими прямыми смещенными ребрами /Сборник тез. докл. VIII Всесоюзной научной. конф. «ГТ и КУ», М.: МВТУ, 1987. С.76.
3. Леонтьев А.И., Самсонов В.Л., Арбеков А.Н. и др. Еще раз об эксперименте на МКС с маломощной солнечной ЗГТЭУ /Сборник тез. докл. XII Всеросс. Межвуз. Научно-техн. конф. «ГТ и КУ», М.: 2004. С.167 – 169.
4. Болдаков А.В., Голубев С.В., Самсонов В.Л. и др. Стенд для натуральных испытаний элементов трубчатого теплового аккумулятора солнечной орбитальной ЗГТЭУ /Сборник тез. докл. X Всеросс. Межвуз. Научно-техн. конф. «ГТ и КУ», М.: МГТУ, 1996. С.162.
5. Леонтьев А.И., Голубев С.В., Самсонов В.Л. и др. Проектирование, изготовление и испытания 1-го опытного образца ЗГТЭУ  $N_e = 1...3$  кВт, работающей на органическом топливе /Сборник тез. докл. XII Всеросс. Межвуз. Научно-техн. конф. «ГТ и КУ», М.: МГТУ, 2004. С.186 – 187.
6. Арбеков А.Н., Суровцев И.Г., Щеголев Н.Л. Перспективная ЗГТЭУ  $N_e=1...4$  кВт, работающая на органическом топливе/Сборник тез. докл. XII Всеросс. Межвуз. Научно-техн. конф. «ГТ и КУ», М.: МГТУ, 2004. С.17 – 18.
7. Arkhangelsky V.I., Chvanov V.K., Pavlov K.A. et al. Space closed Brayton power system technique// Proc. Of the 14<sup>th</sup> European Space Power Conf. 1995. Poitiers France. p.p. .159-161.
8. Леонтьев А.И., Арбеков А.Н., Блинцов А.В. и др. Концептуальный проект солнечной замкнутой газотурбинной криоэнергетической установки КА «Кристалл вд»

/Сборник тез. докл. XII Всеросс. Межвуз. Научно-техн. конф. «ГТ и КУ», М.: МГТУ, 2004. С.165 – 167.

9. Арбеков А.Н., Леонтьев А.И., Самсонов В.Л. и др. Безъядерная энергетика пилотируемой экспедиции на Марс. Известия АН РФ, сер. «Энергетика», №4, 2002 г, стр. 3...12.

10. Леонтьев А.И., Самсонов В.Л., Арбеков А.Н. и др. Ядерная замкнутая газотурбинная энергодвигательная установка пилотируемого марсианского космического аппарата /Сборник тез. докл. XII Всеросс. Межвуз. Научно-техн. конф. «ГТ и КУ», М.: МГТУ, 2004. С.161 – 163.

11. Леонтьев А.И., Самсонов В.Л., Суровцев И.Г. и др. Ядерная замкнутая газотурбинная энергоустановка геостационарного информационного спутника / Сборник докладов, в 3-х томах, Я-129 «Ядерная энергетика в космосе –2005», т.1// Материалы научной конференции 1-3 марта 2005 г //ФГУП НИКИЭТ, М.-Подольск, 2005, стр. 111...120.

12. Самсонов В.Л., Арбеков А.Н., Голубев С.В. Ядерная замкнутая газотурбинная энергохолодильная установка мощностью 50 кВт для лунной базы / Сборник тез. докл. XIII Всеросс. Межвуз. Научно-техн. конф. «ГТ и КУ», М.: МГТУ, 2008. С.144 – 145.

### **Сведения об авторах:**

Арбеков Александр Николаевич, доцент Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, к.т.н., 105005, г. Москва, ул. 2 Бауманская, д. 5, 8(499)263-6664, arbekov@power.bmstu.ru.

Леонтьев Александр Иванович, профессор Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, советник ректората, д.т.н., , академик РАН, 105005, г. Москва, ул. 2 Бауманская, д. 5, 8(499)263-6664, leontiev@power.bmstu.ru.