

УДК: 629.7.03

ЛИНЕЙНЫЕ СВОБОДНОПОРШНЕВЫЕ АГРЕГАТЫ И НОВЫЕ КРИТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Ю.В.Локтионов, Л.Л.Мягков, И.В.Оболонный, А.В.Сячинов

Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана

105005, Москва, ул. 2-я Бауманская д. 5, стр. 1

Linear Free-Piston Units and New Critically Technologies for Piston Engines

Y.V.Loktionov, L.L.Myagkov, I.V.Obolonny, A.V.Syachinov

Bauman Moscow State Technical University

Рассмотрены конкурентные преимущества и особенности применения новых критических технологий поршневых двигателей будущего по видам энерготехники линейных агрегатов и свободнопоршневых двигателей, пути повышения эффективности использования линейных стирлинг-агрегатов, возможностей интеграции в распределенных структурах. Дан прогноз внедрения по видам энерготехники с учетом опыта отечественных и зарубежных разработок, дан анализ вклада кафедры поршневых двигателей МГТУ им. Н.Э.Баумана в развитие двигателей с внешним подводом тепла и возможностей дальнейшего развития. Показаны преимущества применения этой технологии для решения проблем развития децентрализованных или распределенных систем энергоснабжения и для специфических условий техники космического назначения.

Ключевые слова: критическая технология, свободно-поршневой двигатель, двигатель Стирлинга, линейный стирлинг-агрегат, линейный генератор, децентрализованные системы энергоснабжения, когенерация

Competitive advantages and peculiarities discussed of application of new critically technologies for future piston engines by types of engineering linear units and free-piston engines, ways of increase of efficiency of use of linear Stirling converters, integration in distributed structures. The forecast implementation presented of the types of power engineering based on the experience of domestic and foreign developments, also the analysis of the contribution of the Chair of piston engines, Bauman Moscow state technical University in the development of engines with external supply of heat and opportunities for further development. There shown the advantages of application of this technology to solve problems of the development of decentralized or distributed power supply systems and for specific equipment for space applications.

Keywords: critically technology, free-piston engine, Stirling engine, linear Stirling converter, linear alternator, decentralized energy supply system, cogeneration.

Введение

Приоритетные направления развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечень критических технологий Российской Федерации утверждены Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899. «Комплексным планом реализации Климатической доктрины Российской Федерации на период до 2020 года» предусмотрены меры по ограничению выбросов парниковых газов. Для снижения вредного воздействия на окружающую среду, здоровье человека «Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года» предусматривает стимулирование разработок по использованию альтернативных источников энергии.

Линейные агрегаты со свободнопоршневыми двигателями (СПД) снова выходят в перечень ключевых или критических технологий с мощным потенциалом изменения качества и образа жизни людей, создания видов гражданской и специальной продукции с новыми качествами, недоступными для других технологий. С отработкой современной технологической базы новое воплощение поршневых тепловых машин, работающих по циклу Стирлинга (или двигателей с внешним подводом теплоты - ДВПТ) обретает потенциал развития, способный существенно изменить структуру мирового рынка энерготехники уже в ближайшие годы. Разработки для исследования дальнего космоса используют как метафору удаленности от земных нужд и цен. Однако, созданные для этих целей критические технологии, помогают решить проблемы повышения уровня и качества жизни.

Уровень развития технологии

Современный уровень технологии линейных агрегатов (ЛЭА) на базе СПД работающих по циклу Стирлинга (СПДС) сформирован разработками для нового поколения систем питания аппаратуры исследования дальнего космоса. Комплекс наземных испытаний образцов новой техники (более миллиона часов общей наработки, более 120 тыс.ч на образец) выполнен центрами NASA (GRC и MFC). Выпуск СПДС подготовлен кооперацией фирм Lockheed Martin,

Sunpower Inc., Infinia Inc. [1, 2, 3]. Основная элементная база ЛЭА имеет практический опыт использования на спутнике RHESSI до 10 лет и марсоходе.

ЛЭА обеспечивают многолетний срок службы (до 20 лет и более), рекордно высокую эффективность (более 40% абсолютно и относительно цикла Карно более 50%), простоту эксплуатации и интеграции в бортовые энергосистемы. Родоначальником технологии линейных стирлинг-агрегатов является американская фирма Sunpower Inc. (создана для коммерциализации патентов изобретателя В.Била в 1974 году). За 40-летнюю историю развития создано технологическое ядро свободнопоршневых модулей для широкого спектра приложений (от оборонных до конверсионных, от космических до наземных, от мобильных до стационарных) и широкого спектра мощностей (от десятков Вт до десятков кВт). Семейство свободнопоршневых агрегатов по технологии включает: СПДС, криогенные и холодильные машины и линейные компрессоры, выпускаемые серийно фирмами-производителями (Ricor, Infinia Inc., LG Electronics) [4, 5, 6]. На рисунке 1 дана продукция фирмы Sunpower Inc. Базовые модули ЛЭА (35 и 80Вт) для радиоизотопных источников питания аппаратуры исследования дальнего космоса (со сроком службы более 14 лет и ресурсом безотказной и необслуживаемой работы более 120 тыс.ч., цикл наземных испытаний завершен NASA в 2004 г). Базовый модуль ЛЭА EG-1000 создан в начале 2000 годов для программы микро-когенерационных установок (с КПД около 20% и 90% эффективностью использования топлива).



Рисунок 1 - Продукция фирмы Sunpower Inc. (EG-1000, EE-80 и EE-35)

На рисунке 2 дан модуль радиоизотопной системы электрической мощностью 200 Вт ASRG-1 (выпускается кооперацией фирм Lockheed Martin, Sunpower Inc., Infinia Inc.). На рисунке 3 показан полевой многотопливный источник питания мощностью 260 Вт, создан по программе DARPA Palm Power в 2006 году [7]. На рисунке 4 показан выпускаемый серийно в США ЛЭА QSNP7500 наземного применения, вес 105 кг при номинальной мощности на клеммах генератора 7,5 кВт, ресурс необслуживаемой работы 60 000 ч, с 2016 года предлагается для микро- ТЭЦ с СПДС по лицензии фирм Sunpower и MTI.

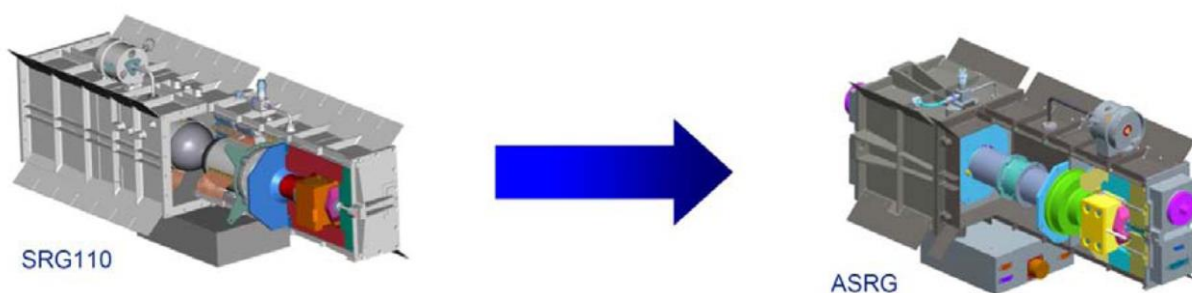


Рисунок 2 - Усовершенствованный модуль радиоизотопной системы ASRG

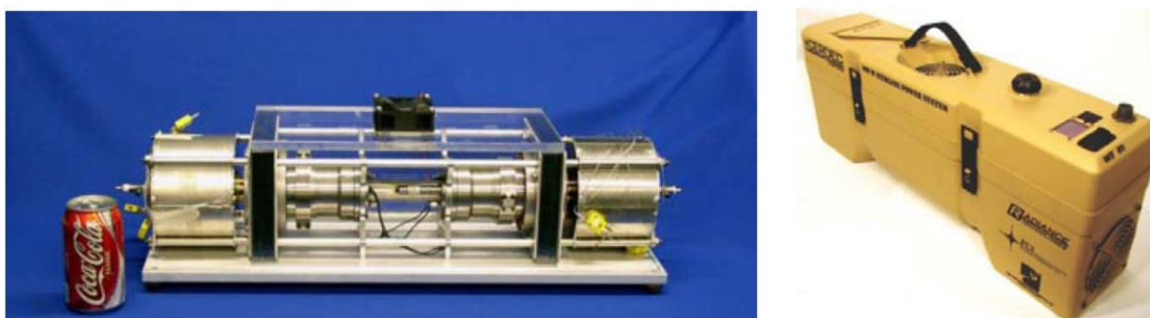


Рисунок 3 - Полевой многотопливный модуль источника питания 260 Вт

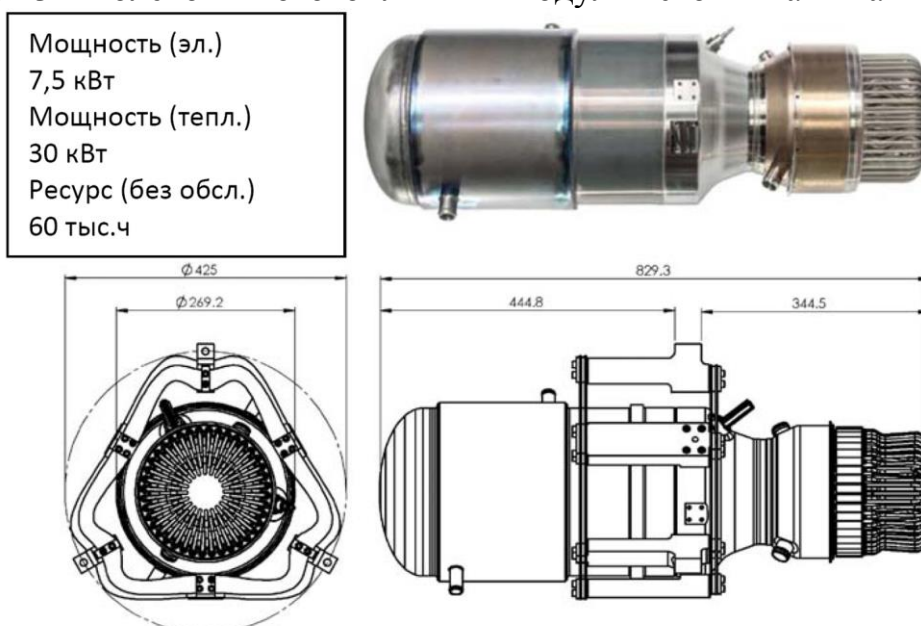


Рисунок 4 - Серийный линейный стирлинг-агрегат мощностью 7,5 кВт

Отечественный задел по технологиям

Кафедра «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э.Баумана в начале 70-х годов открыла специализацию по ДВПТ и подготовила более 200 инженеров и 12 аспирантов, составивших костяк отечественных научных коллективов по этому направлению. Первый проект линейного стирлинг-агрегата был разработан в начале 80-х годов с линейным генератором мощностью 1 кВт для космического и наземного применения. За 40 лет на кафедре было создано несколько исследовательских стендов и подготовлено восемь диссертаций. МГТУ им. Н.Э. Баумана обладает необходимым научным потенциалом и занимается разработкой и совершенствованием поршневых двигателей с 1907 года. Сотрудники кафедры имеют опыт использования передовых методов расчета с помощью известных коммерческих программ (ANSYS, FLUENT, STAR-CD, FIRE, BOOST), а также создали и продолжают развивать собственные программы, которые используют современные математические модели рабочего процесса, топливоподачи, теплового и напряженно-деформированного состояния деталей двигателя.

На рисунке 5 показаны разработанный на кафедре образец двигателя и стенд для тепловых испытаний ДВПТ. Разработки по линейным генераторам (ЛГ) велись выпускниками кафедры в Минобщемаше СССР (импульсные источники питания) и по ЛЭА и СПДС в Минсредмаше СССР в ГНЦ РФ ФЭИ (г. Обнинск) - отраслевые программы по солнечной и космической энерготехнике [8-14]. На рисунке 6 показаны макетные образцы ЛГ и ЛЭА.

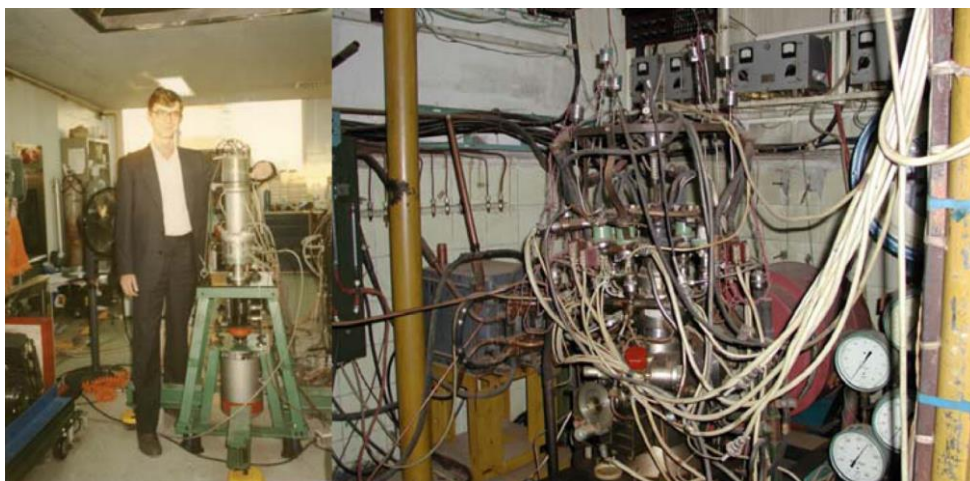


Рисунок 5 – Разработки по ДВПТ кафедры поршневых двигателей

Возможность воссоздания опыта и потенциала технологий, состояния технической и кооперационной базы, научной школы и экспериментальной базы линейных агрегатов и масштабируемого ряда установок СПЭ различного назначения (включая ЯЭУ) пока имеется. Кафедра поршневых двигателей МГТУ им. Н.Э.Баумана сегодня - единственная инженерная школа России, способная быстро воссоздать на новом технологическом уровне задел на базе опыта прошлых работ и подготовить вместе с ведущими отраслевыми вузами МФТИ, МАИ, ОИАТЭ НУЯИ-МИФИ, требуемое число уникальных инженеров нужной специализации.

МГТУ им. Н.Э.Баумана и ФГУП «ЦАГИ» выступают с инициативой воссоздания научно-технического задела по технологиям ЛЭА, ЛГ, СПДС и СПД. С учетом анализа отечественного и мирового опыта развития направления ЛЭА, ЛГ, СПД и СПДС создание новой производственной кооперации предполагается с использованием форм индустриального партнерства вузов и предприятий, а также принципов частно-государственного партнёрства. Наличие накопленного за 50 лет в отраслевых НИИ (Минобщемаша и Минсредмаша СССР), академических (по линии ГКНТ и СПП АН СССР) и ведущих вузах (МГТУ им. Н.Э.Баумана, МАИ, ОИАТЭ НУЯИ-МИФИ, ВНИИТФА и др.) научно-технического задела, а также наличие современной экспериментальной базы НИЦ им. Жуковского (ЦАГИ, ЦИАМ) определяют возможность создания СПЭ с использованием технологии ЛЭА с вариантами привода от СПДС, СПД (ДВС), гидро- и пневмо- привода.

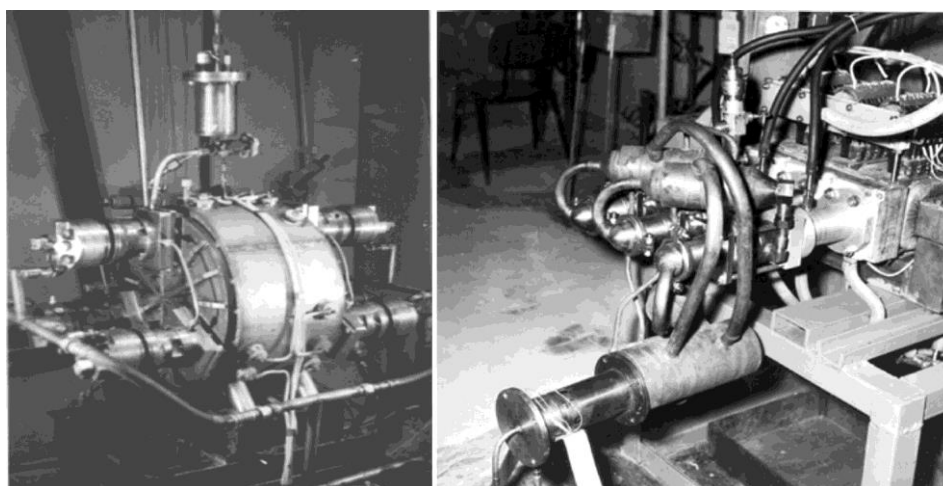


Рисунок 6 - Макетные образцы ЛГ и ЛЭА отечественной разработки

Ключевые элементы технологии

Ключевыми элементами технологий ЛЭА являются: бесконтактные газовые уплотнения; высоко эффективные и компактные линейные машины/ЛГ на постоянных магнитах; резонансные пружины поршней / газовые пружины с унификацией ряда диаметров цилиндров для семейства моделей. Принцип действия СПДС - циклический нагрев и охлаждение заключенного в замкнутом внутреннем контуре рабочего тела. Перетекание рабочего тела между теплообменниками и полостями двигателя, создаёт волнообразное изменение давления и колебания рабочего поршня, соединенного с линейным генератором, вырабатывающим переменный электрический ток. Колебания поршня-вытеснителя генерирует система газовых пружин, которую могут дополнять планарные или спиральные пружины.

Применение технологии тепловых труб сложной пространственной геометрии передачей обеспечивает максимальную компактность и надежность оборудования, корректировку характеристик переходных процессов. Использование особых динамических свойств ЛЭА «следования» за режимами потребления мощности бортовыми нагрузками позволяют получить дополнительную экономию массы и габаритных размеров у систем бортового электроснабжения за счет системной оптимизации. КПД ЛЭА почти не зависит от уровня внешней нагрузки, что обеспечивает высокую эффективность работы на всех режимах. При резком сбросе внешней нагрузки с полной мощности до минимальной не нужна «балластная нагрузка», применяемая обычно для защиты ротационных машин от аварийного «разноса».

Технология ЛЭА с СПДС относится к критически важным направлениям, другие решения не дают комплекса конкурентных преимуществ по показателям долговечности, надежности, эффективности, простоты использования.

Перспективы внедрения линейных стирлинг-агрегатов

Технология линейных стирлинг-агрегатов находится на завершающей стадии отработки и практически готова к широкому внедрению в ближайшие годы в мульти-модульных распределенных системах локальных сетей.

Элементная база ЛЭА имеет опыт космического применения (налёт) уже более 10 лет. Линейные стирлинг-агрегаты легко масштабируются по мощности модуля (от 100 Вт до 100 кВт) и как объекты управления обладают комплексом уникальных свойств, которые позволяют создавать устойчивые распределенные системы мульти-модульной структуры. Более 20 лет разрабатывались и конверсионные приложения, прежде всего задач гелиоэнергетики, микрогенерации, технические проблемы решены. Одновременно шли разработки когенерационных установок со стирлинг-агрегатом, общая доля которых на рынке ожидается максимальной во всех топливных вариациях. С 2016 года на рынке появляется ряд (7,5 - 3,5 - 1 кВт) серийных модулей конверсионных линейных стирлинг-агрегатов, на основе ряда уже заявлены поставки бытовых и промышленных установок на основных видах топлива (газ, пеллеты и др.). Развитие мульти-модульных распределенных систем в ближайшие годы существенно изменит стандарты потребления в сетях.

Сегмент рынка микро-ТЭЦ для децентрализованных и распределенных сетей формируется более 15 лет с применением законодательных мер государственной поддержки в ряде стран. Потребительские свойства ЛЭА позволяют им практически полностью занять сегмент рынка более 50% ввода новых строений и обеспечить количество продаж более миллиона модулей в год. Сегмент рынка гибридных солнечно-топливных установок для сельских территорий также формируется более 15 лет, меры государственной поддержки на первом этапе получили системы прямого преобразования (солнечные панели), это обеспечило рекордные темпы роста мирового рынка.

Заключение

Слухи о прекращении финансирования направления технологии были ложными, по годовым бюджетам NASA на развитие технологии ЛЭА с СПДС выделялось не менее 15 миллионов долларов ежегодно, а всего более 300 миллионов за 15 лет. Для восстановления задела по технологиям ЛЭА для перспективных авиационно-космических аппаратов нужна современная экспериментальная и производственная базы с координацией работ партнёров

по ключевым технологиям тепломассообмена и теплофизики (тепловые трубы, жидкометаллические теплоносители, безфакельное горение). Наибольшие затраты на восстановление задела будут по испытаниям элементной базы на надежность и ресурс.

Первоочередные мероприятия для восстановления отечественного потенциала этого научного направления включают:

- организацию направления по исследованию распределенных систем ЭУ с ЛЭА, для перспективных авиационно-космических аппаратов;

- создание современной экспериментальной и производственной базы для ключевых технологий (тепловые трубы, жидкометаллические теплоносители, безфакельное и детонационное горение);

- изготовление модулей-демонстраторов ЛЭА и проведение комплексной отработки основных решений по модулю и системам;

- развитие межотраслевой и межвузовской кооперации по исследованиям в области ЛЭА и подготовки специалистов нужного уровня квалификации.

Список литературы

[1] Lewandowski E. *Testing of the Advanced Stirling Radioisotope Generator Engineering Unit at NASA Glenn Research Center* / E.J. Lewandowski // NASA-TM-217854, 2013. - 22 p.

[2] Schreiber J. *GRC Supporting Technology for NASA's Advanced Stirling Radioisotope Generator (ASRG)* / J.G. Schreiber // NASA-TM-215196, 2008. -18 p.

[3] Oriti S. *Performance Measurement of Advanced Stirling Convertors (ASC-E3)* / Salvatore M. Oriti // NASA-TM-216564, 2013. - 10 p.

[4] Surampudi S. *Overview of the Space Power Conversion and Energy Storage Technologies*, NASA-Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, 2011. - 45 p.

[5] Brandhorst H.W. *Future NASA Multi-kilowatt Free Piston Stirling Applications* /H.W.Brandhorst //4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC), 26 - 29 June 2006, AIAA 2006-4086, San Diego, CA, 2007.

[6] *Performance Characterization of Sunpower Free-Piston Stirling Engines* // 3rd International Energy Conversion Engineering Conference (IECEC), 15-18 August 2005, San Francisco, CA, 2005. – 6 p.

[7] Huth J. *Diesel Fuel-to-Electric Energy Conversion Using Compact, Portable, Stirling Engine-Based Systems* / J.Huth, J.Collins // 13th International Stirling Engine Conference, - Tokyo :Waseda University, JP, 2007. – 4 p.

[8] Локтионов Ю.В. *Конверсионный потенциал аэрокосмических технологий энерготехники для инновационного развития инженерной и транспортной инфраструктуры в Арктике* / Ю.В.Локтионов, Л.Л.Мягков // ТРАНСПОРТ И ЛОГИСТИКА В АРКТИКЕ: Сборник трудов №19, -М.: Международная академия транспорта, 2016. с. 126 - 130.

[9] *Теплообменники с жидкометаллическим теплоносителем в двигателях Стирлинга. Аналитический обзор. ФЭИ-О235* /И.В.Гоннов, Н.И.Логинов, Ю.В.Локтионов, С.П. Столяров, Б.А.Чулков. – Москва :ЦНИИАтоминформ, 1989. - 46 с.

[10] *Концепция программы создания солнечных стирлинг-электроагрегатов: Отчет о НИР (заключительный)* / ФЭИ, инв. № 7801. Обнинск, 1990. - 90 с.

[11] Gromov B. *IPPE's Stirling Engine Activities and Efforts* / B.Gromov, M.Ivanovsky, Y.Loktionov // 7th International Stirling Engine Conference, November 5-10, 1995. -Tokyo:Waseda University, JP, 1995. - 4 p.

[12] Loktionov Y. *Stirling Engine Application Program in Russia* / Y.V.Loktionov // 7th International Stirling Engine Conference, November 5-10, 1995. - Tokyo:Waseda University, JP, 1995. - 5 p.

[13] Loktionov Y. *Designs of Terrestrial Solar Electric Generating Sets* / Yu.V.Loktionov, A.I.Trofimov, et.al. // 28th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (IECEC), August 8-13, 1993, Atlanta, GE. #93023. - Proc. 28th IECEC, Vol. 2, P.2.547-550.

[14] Stein W. *A Compendium of Solar Dish/Stirling Technology* / W.B.Stein, R.B.Diver // SAND 93-7026 UC-236, January 1994. - 114 p.