

Ядерная наука в авиадвигателях будущего

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ LENR С АНАЛИЗОМ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ К ПЕРСПЕКТИВНЫМ СИЛОВЫМ УСТАНОВКАМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Михаил Яковлевич Иванов, д. ф.-м. н., главный научный сотрудник, ГНЦ ФГУП "ЦИАМ им. П.И. Баранова",
Владимир Петрович Кокорев, к.в.н., начальник сектора ОНТИ ГНЦ ФГУП "ЦИАМ им. П.И. Баранова"

Изложены элементы теории низкоэнергетических ядерных реакций (Low Energy Nuclear Reactions – LENR). Предложена интегральная полуэмпирическая модель LENR, основанная на анализе дефекта массы исходных и конечных продуктов сгорания. Система LENR – разновидность ядерной энергии, выделяемой при изменении изотопного состава топлив, потенциально в 4000 раз превосходит энергетическую плотность химических источников энергии при отсутствии эмиссии вредных веществ и радиоактивного излучения. Представлено мнение американских экспертов по возможности применения LENR в аэрокосмических силовых установках, возможность революционных изменений с внедрением LENR технологий для перспективных силовых установок, кардинальное улучшение характеристик ЛА. При конструировании авиационной системы используют безразмерную массу ЛА (Non-Dimensional Aircraft Mass – NAM).

Presents an overview of several missions that exploit the capabilities of a Low Energy Nuclear Reaction (LENR) aircraft propulsion system. LENR is a form of nuclear energy and potentially has over 4,000 times the energy density of chemical energy sources. It does not have any harmful emissions or radiation which makes it extremely appealing. The global reliance on crude oil for aircraft energy creates the opportunity for a revolutionary change with LENR. LENR will impact aircraft performance capabilities, military capabilities, the environment, the economy, and society. Although there is a lot of interest in LENR, there is no proven theory that explains it. Some of the technical challenges are thermal runaway and start-up time. A non-dimensional aircraft mass (NAM) ratio diagram is used to explore the aircraft system design space.

Ключевые слова: низкоэнергетические ядерные реакции, дефект массы, аэрокосмические силовые установки, безразмерная масса ЛА.

Keywords: Low Energy Nuclear Reactions – LENR, aircraft performance, aircraft powerplant, non-dimensional aircraft mass (NAM)

Введение

Аббревиатура LENR в настоящее время считается общепринятой и обозначает в прямом переводе с английского низкоэнергетические ядерные реакции. Процессы LENR существенно отличаются от традиционного ядерного синтеза элементов, так как происходят при достаточно низких значениях температуры и энергии протекающих ядерных реакций. Насколько нам известно, возможность таких низкоэнергетических реакций экспериментально была продемонстрирована И.С. Филимоновым в 50-х годах прошлого столетия. На созданной под его руководством опытной термоэмиссионной гидролизной установке происходил электролиз тяжелой воды при использовании металлического катода, содержащего палладий. Установка генерировала избыточное тепло, причем было подтверждено отсутствие при ее работе вредного радиоактивного излучения.

Достаточно полный обзор (с 1989 г.) работ по тематике LENR, называемой также в отечественной литературе холодной трансмутацией ядер, можно найти в статье А.Г. Пархомова [1] и на сайте <http://lenr.seplm.ru>. Здесь мы только отметим выдающиеся последние достижения в этом направлении - экспериментальный теплогенератор А. Росси [2,3] и его аналог, созданный А.Г. Пархомовым [4]. Два последних теплогенератора LENR используют в качестве топлива порошок никеля Ni (порядка 1 г), смешанный с порошком алюминогидрида лития LiAlH₄ (порядка 0,1 г). Следует особо подчеркнуть, что работоспособность теплогенератора А. Росси была подтверждена в 2014 г. специальной комиссией, подготовившей и опубликовавшей в октябре прошлого года соответствующий отчет [5,6]. В плане теоретических объяснений мы считаем полезным упомянуть физическую модель процесса, предложенную в статье Н.Д. Кука и А. Росси [3]. Суть данной модели состоит в захвате изотопом лития ⁷Li протона (т.е. в синтезе бериллия ⁸Be) и последующим распадом синтезированного бериллия на две альфа-частицы с высокой кинетической энергией (без наличия гамма-радиации). Однако реализация такого процесса должна

быть существенно затруднена необходимостью преодоления кулоновского барьера протоном.

В настоящей работе предложена физическая интегральная модель процесса LENR, основанная на экспериментально зарегистрированном изменении изотопного состава исходных и конечных продуктов протекающей реакции. Наша модель в целом опирается на основы классической ядерной физики. Важной особенностью предложенной модели является возможность выполнить оценку количества выделяемой в протекающем процессе энергии и дать рекомендации по возможным составам других топлив.

Принципиальными вопросами при обосновании нашей физической модели являются ещё два замечательных экспериментальных факта: замеренная величина температуры свободного космического пространства и обнаружение тёмной материи во Вселенной. Конечное значение температуры свободного пространства $T_0=2,73$ К было впервые определено А. Ренгером [7] (см. также интересный обзор [8]). Общеизвестным также и весьма надежно обоснованным считается факт наличия в природе темной материи, составляющей подавляющие 96 % от общего количества вещества нашей Вселенной. На данные два экспериментальных факта опирается рассмотренная в статье полуэмпирическая интегральная модель LENR [9]. В нашей статье также подробно представлено мнение американских экспертов по возможности применения LENR в аэрокосмических силовых установках [10].

Элементы интегральной модели LENR

Рассматриваемая в настоящей работе физическая модель LENR следует непосредственно из анализа изотопного состава исходных и конечных компонент протекающей реакции. Продемонстрируем её основные особенности, исходя из аккуратно замеренного состава изотопов лития и никеля, использованного в качестве топлива в экспериментах Росси - Пархомова [2-5]. При этом анализируем таблицу 1, цитируемую из публикаций [5,6].

В конечном составе отработавшего топлива имеем изотоп ⁶Li

в количестве 92,1% (либо 57,5% при измерении другим методом) при исходном содержании 8,6% (в природе 7,5%). Изотоп никеля ^{62}Ni в отработавшем топливе составляет около 99% (в природе 3,6%). Отмеченный состав изменения компонент показывает "выгорание" изотопа ^7Li и преобразование изотопов никеля ^{58}Ni , ^{59}Ni , ^{60}Ni и ^{61}Ni в изотоп ^{62}Ni . Изотоп лития ^7Li , освобождаясь от одного нейтрона, фактически "передает" его никелю.

ТАБЛИЦА 1

Изотопный состав лития и никеля в исходном и отработавшем топливе (%), измеренный методами ToF-SIMS и ICP-MS, а также природное соотношение изотопов в этих элементах.

	Исходное топливо		Отработавшее топливо		Природа
	ToF-SIMS	ICP-MS	ToF-SIMS	ICP-MS	
^6Li	8,6	5,9	92,1	57,5	7,5
^7Li	91,4	94,1	7,9	42,5	92,5
^{58}Ni	67	65,9	0,8	0,3	68,1
^{60}Ni	26,3	27,6	0,5	0,3	26,2
^{61}Ni	1,9	1,3	0,0	0,0	1,8
^{62}Ni	3,9	4,2	98,7	99,3	3,6
^{64}Ni	1		0		0,9

Подсчитаем изменение величины массы (в атомных единицах массы - а.е.м.) одного нейтрона, "переходящего" от ^7Li никелю [9]. Разница атомных масс у ^6Li и ^7Li есть масса освобождающегося нейтрона m_n^0 :

$$m_n^0 = 7,0161 - 6,0151 = 1,001 \text{ а.е.м.},$$

которая имеет величину, большую 1. Подсчитаем массу связанного нейтрона m_n^k в изотопе никеля ^{62}Ni , масса которого на 4 связанных нейтрона больше массы изотопа ^{58}Ni . Имеем $m_n^k = (61,92834 - 57,93534) : 4 = 0,9982 \text{ а.е.м.} < 1$.

В этом процессе получаем величину "дефекта массы" на один нейтрон перехода

$$\Delta m = m_n^0 - m_n^k = 1,001 - 0,998 = 0,0028 \text{ а.е.м.}$$

и высвобождающуюся "энергию связи" (в Мегаэлектронвольтах-МэВ) $\Delta E = \Delta m c^2 = 0,0028 \cdot 931 = 2,6068 \text{ МэВ}$.

Выполненный элементарный интегральный расчет дефекта массы показывает, что при "переходе" одного нейтрона от ^7Li к ^{62}Ni может выделиться энергия связи в количестве 2,6068 МэВ.

Представим также проведенную оценку выделяемой энергии в несколько иной форме - с использованием представлений "капельных" моделей участвующих в процессе ядер. Запишем процесс в виде суммы масс ядер исходных и конечных продуктов протекающей реакции $4^7\text{Li} + ^{58}\text{Ni} = 4^6\text{Li} + ^{62}\text{Ni} + 0,0112 \text{ а.е.м.}$

Выделяемая при этом энергия составляет 10,4272 МэВ.

Проанализируем теперь, исходя из тех же соображений, работу теплогенераторов LENR типа Филимоненко - Флешмана - Понса, реализующих гидролиз тяжелой воды при использовании металлического катода, содержащего палладий. Определим изменение величины массы одного нейтрона, "отрывающегося" от дейтерия. Разница атомных масс дейтерия ^2H и протия ^1H составляет

$$m_n^0 = 2,14102 - 1,00782 = 1,00623 \text{ а.е.м.} > 1.$$

Разность атомных масс соседних изотопов палладия ^{106}Pd и ^{105}Pd составляет

$$m_n^k = 105,90348 - 104,9508 = 0,9984 \text{ а.е.м.} < 1.$$

В данном случае величина "дефекта массы" на один нейтрон перехода равна

$$\Delta m = m_n^0 - m_n^k = 1,00623 - 0,9984 = 0,0079 \text{ а.е.м.}$$

и высвобождающаяся "энергия связи"

$$\Delta E = \Delta m c^2 = 0,0079 \cdot 931 = 7,355 \text{ МэВ}.$$

Суммарный процесс изменения масс участвующих ядер в этом случае может быть представлен также в виде

$$^2\text{H} + ^{105}\text{Pd} = ^1\text{H} + ^{106}\text{Pd} + 0,0079 \text{ а.е.м.}$$

с выделением энергии в объеме 7,355 МэВ.

Легко заключить из таблицы атомных масс других стабильных изотопов палладия, что реакция "захвата" нейтрона с атомной массой < 1 в других случаях не реализуется (исключение составляет изотоп палладия ^{103}Pd , имеющий период полураспада 17 су-

ток). Этим фактом можно объяснить многие неудачи с повторением опытов Флешмана - Понса после 1989 г. в реализации гидролиза тяжелой воды при использовании металлического катода, содержащего палладий.

Вышеизложенные два примера наглядно демонстрируют возможность объяснения эффекта тепловыделения в генераторах типа Филимоненко - Флешмана - Понса и типа Росси - Пархомова, рассматривая только изменение атомной массы нейтронов (или участвующих ядер). Освобождающиеся нейтроны с эффективной атомной массой > 1 и захваченные нейтроны с эффективной атомной массой < 1 в принципе объясняют процесс выделения тепла в традиционных терминах высвобождающейся энергии связи. При этом следует допустить возможность уменьшения массы у свободного нейтрона и построить соответствующую модель структуры нейтрона [9]. Изложим теперь с тех же позиций "дефекта массы" возможность применения других составов топлив для теплогенераторов типа Росси - Пархомова.

Рекомендации по возможным другим составам топлив

Приведем два примера возможной замены порошка никеля в теплогенераторах типа Росси - Пархомова. Анализируя атомные массы изотопов других элементов, можно сделать заключение о возможности применения вместо никеля, в частности, железа, а именно изотопов ^{56}Fe с атомной массой 55,93493 и ^{54}Fe с атомной массой 53,93961. Здесь легко получаем при применении того же лития величину "дефекта массы" на один нейтрон перехода $\Delta m = 1,001 - 0,9976 = 0,0037 \text{ а.е.м.}$

Энергия связи и, следовательно, выделившаяся энергия должна получиться на примерно 20% выше, чем в случае лития и никеля у Росси - Пархомова.

Аналогично, при применении в паре с литием изотопов кремния ^{30}Si с атомной массой 29,9737 и ^{29}Si с атомной массой 28,9764 величина "дефекта массы" на один нейтрон перехода составит $\Delta m = 1,001 - 0,9973 = 0,0037 \text{ а.е.м.}$

Величина выделяемой энергии примерно на 30% превысит величину в экспериментах Росси - Пархомова.

Приведем примеры возможной замены изотопов лития на изотопы бериллия и магния. Для ^9Be и ^8Be имеем атомные массы 9,012182 и 8,005305 соответственно. Здесь стабильный изотоп ^9Be переходит в нестабильный изотоп ^8Be с величиной массы освобождающегося нейтрона $m_n^0 = 1,0069$. Далее следует учитывать нестабильность изотопа ^8Be и почти мгновенное его деление на два ядра ^4He .

На наш взгляд наиболее перспективным "чистым" топливом (при справедливости используемой модели) будет магний, присутствующий на Земле в количестве примерно 2%. Магний имеет три подходящих стабильных изотопа ^{24}Mg , ^{25}Mg и ^{26}Mg с соответствующими атомными массами 23,98504; 24,98587 и 25,98259. Теоретически возможно выгорание изотопа ^{25}Mg с образованием одновременно изотопов ^{24}Mg и ^{26}Mg . Рассчитываемый при этом "дефект массы" на один нейтрон $\Delta m = 1,0008 - 0,9968 = 0,0040 \text{ а.е.м.}$

Изменение суммарной массы исходных и конечных продуктов запишем также в форме реакции $^{25}\text{Mg} = ^{24}\text{Mg} + ^{26}\text{Mg} + 0,004 \text{ а.е.м.} (3,724 \text{ МэВ})$.

Процентный состав указанных изотопов магния на Земле известен и составляет соответственно примерно 79%, 10% и 11%. Таким образом, запас изотопа магния ^{25}Mg на Земле (около 0,2%) делает его использование весьма перспективным топливом. Весьма перспективным "чистым" топливом (при справедливости используемой модели) будет также титан, присутствующий на Земле в количестве примерно 0,57%. Его применимость для реализации процессов LENR следует из аналогичного анализа пяти стабильных изотопов титана [9]. Естественно, что последние рекомендации по применению магния и титана в качестве наиболее подходящих топлив для теплогенераторов типа Росси - Пархомова требуют тщательного подтверждения путем испытаний, аналогичных [2-5].

**Возможности применения LENR
в аэрокосмических силовых установках**

Американские эксперты представляют обзор нескольких миссий, которые используют авиационную силовую систему на базе LENR (AIAA Paper 2014-3009). Система LENR представляет разновидность ядерной энергии и потенциально в 4000 раз превосходит энергетическую плотность химических источников энергии. Она не выделяет вредных эмиссий или излучения, что делает её исключительно многообещающей. Глобальная зависимость от сырой нефти для энергии ЛА создаёт условия для революционных изменений с внедрением LENR технологий. Последняя окажет влияние на возможности характеристик ЛА, военные возможности, экологию, экономику и общество. Хотя есть большой интерес к LENR, нет достаточно надежно проверенной теории, которая её объясняет. В отличие от нашей работы американцы не исследуют вопроса научно-технической осуществимости LENR технологий и предполагают, что система доступна. В качестве инструментария конструирования авиационной системы используется безразмерная масса ЛА (Non-Dimensional Aircraft Mass - NAM).

Эксперты НАСА изучают вопрос, когда произойдёт следующее революционное изменение в авиации? В течение десятилетий конструкция самолётов и силовых установок, созданных полвека назад, практически менялась весьма слабо. Авиационные НИОКР сосредоточивались на получении долей процента в улучшении эффективности характеристик. Большинство усовершенствований происходило от улучшенного понимания и совместного использования различных дисциплин или прогресса новых технологий. Относительная дороговизна топлива вместе с повышением спроса на энергетические ресурсы усложняет проблему. Если не будет изменений, потенциально может возникнуть ситуация с ужесточением мандатных правил, которые, в свою очередь, вызовут ограничение транспортного роста. Кроме того, самолётостроители также пытаются снизить шум и вредные эмиссии для выполнения экологических требований, которые прогрессивно становятся всё более жёсткими.

Все эти конфликтующие требования создают крупные вызовы для проектировщиков будущих самолётов. В то же время новые источники энергии имеют определенный потенциал и возможность для решения этих вызовов. Одними из наиболее перспективных технологий, как уже отмечалось, являются низкоэнергетические ядерные реакции (LENR). Это разновидность ядерной энергии, которая потенциально в 4000 раз превосходит плотность химической энергии с нулевым парниковым газом или эмиссиями углекислого газа.

Американцы представляют мотивацию для рассмотрения LENR как наиболее перспективной концепции для использования в авиационных силовых системах, которая обеспечивает новые и существенно более высокие возможности миссий. Впервые LENR появилась как холодный синтез с намерением выделить её от методов традиционного синтеза, который относился к экстремально высоким температурам для инициирования ядерных реакций. Например, термоядерная бомба требует атомной бомбы для генерирования высоких температур, которые создают реакцию синтеза. В отличие от упомянутого факта, LENR требует сравнительно низких температур или энергий для инициирования реакций. С момента возникновения LENR многие ученые сомневались в их существовании. Сегодня отсутствует общепризнанная физическая теория, описывающая LENR реакцию, однако последние эксперименты показали обнадеживающие результаты. LENR на первый взгляд противоречива, поскольку пока было трудно с достоверностью воспроизвести экспериментальные результаты. Более того, продолжают дебаты о достоверности положительных результатов и факта, что экспериментальные реакторы можно предварительно загружать энергией. Американские исследователи предполагают, что заявления о LENR достоверны и рабочая система существует. В данном случае они идентифицируют и формулируют авиационные миссии, которые они либо эксплуатируют уни-

кальные возможности LENR или обеспечиваются LENR силовой системой. Преимущества LENR сравниваются и противопоставляются с другими альтернативными источниками энергии. Приводится анализ высокого уровня для исследования проектного пространства LENR самолёта в различных потенциальных сценариях миссии большой продолжительности.

Плотность энергии процессов LENR

Низкоэнергетические ядерные реакции теоретически до восьми миллионов раз превосходят энергетическую плотность химических источников.

Таблица 2
Сравнение ядерной энергии

	LENR	Деление	Синтез
Теоретическая максимальная плотность энергии	8 000 000 раз > химической	7 300 000 раз > химической	1 900 000 раз > химической
Фундаментальная сила	Слабая	Сильная	Сильная

Таблица 2 показывает теоретическую максимальную плотность энергии для LENR, деления и синтеза. LENR имеет аналогичные характеристики для деления и синтеза, но без вредной радиации или отходов. Излучение нейтронов или гамма радиация от экспериментальных реакторов незначительна. Защиты от радиации не ожидается. Историю начала развития LENR американцы относят к исследованиям холодного синтеза Флешмана и Понса 1989 года [4]. С тех пор проведена значительная работа по уточнению теории и созданию рабочего реактора. Обещающая теория Widom-Larsen опубликована в 2006 году. Она основана на стандартной модели и использует обычную физику. LENR масштабируется, портативна и имеет потенциал заменить энергию всего ископаемого топлива. Недавние сообщения в мае 2013 года показывают результаты двух экспериментов с реакторами LENR в декабре 2012 и марте 2013 года. Реакторы были цилиндрической формы длиной около 33 см и диаметром 9 см. Внутренний цилиндр сделан из стали марки 310 steel американского НИИ (American Iron and Steel Institute - AISI), внешний кожух из нитрид кремниевой керамики, а две торцевые заглушки из стали марки AISI 316 steel. Реакционные материалы состояли из никелевого порошка, пропитанного водородом.

Таблица 3
Результаты испытаний LENR реактора

	Декабрь 2012	Март 2013
Нетто-энергия (Вт.ч)	160 000	62 000
Плотность энергии (Вт/кг)	7 x 10 ⁵	5.3 x 10 ³
Плотность тепловой энергии (Вт.ч/кг)	6,8 x 10 ⁷	6,1 x 10 ⁵
Входная энергия (Вт.ч)	35 000	33 000
Реакционная масса (кг)	0,001	0,001
Время запуска (ч)	Нет данных	2
Общее время теста (ч)	96	116
Максимальная температура (°C)	496	308

Среди самых значительных мотиваций применения LENR укажем постоянно растущий спрос на генерирование чистой энергии для удовлетворения потребности промышленности и теплового обеспечения жизнедеятельности.

Для иллюстрации сказанного на Рис.1 приводится общее производство и потребление сырой нефти в Соединённых Штатах



с 1980 года и прогнозируемая выработка к 2040 году. Два основных вывода из рисунка сводятся к следующему:

- потребление сырой нефти в США увеличится к 2040 году и
- выработка не будет удовлетворять спроса.

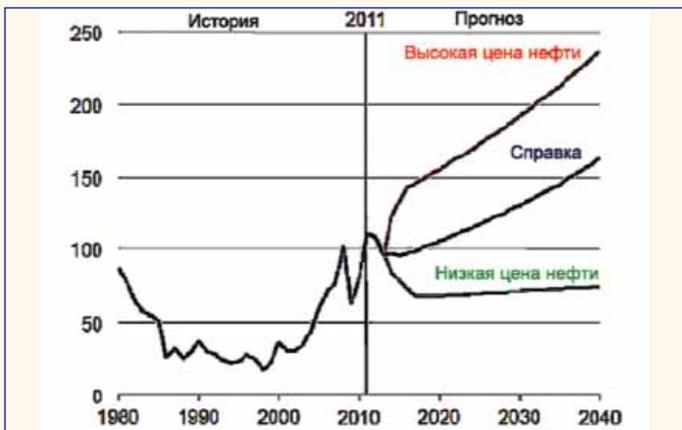


Рис. 1. Средняя годовая стоимость сырой нефти марки Brent в трёх случаях, 1980-2040 (2011 USD за баррель)

Рис. 2 показывает прогноз цен на сырую нефть Информационно-го агентства энергетики США с 1980 по 2040 год. Один вывод можно сделать из рисунка, что в справочном случае цены, как ожидают, повысятся к 2040 году. Из двух рисунков вместе следует, что сырая нефть будет дорогим источником энергии и в большом спросе.



Рис. 2. Общее производство и потребление энергии в США, 1980-2040 (квадрильоны Btu)

Методы LENR имеют потенциал изменить стоимость энергии в будущем, причём это будет революционное изменение. Как принципиально другой вид энергии по сравнению с текущими источниками он может дать большой выигрыш. Этот новый источник энергии стимулирует переоценку миссий и архитектур, во многом из-за того, что изменения потребуются на фюзеляжах, использующих ГТД.

Самолёты с первыми ГТД выглядели как прежние поршневые машины, но оснащались реактивными двигателями и выполняли те же виды миссий с маргинальными улучшениями характеристик. В ходе исследований и испытаний более мощные реактивные двигатели подтвердили хорошую интеграцию с авиационными фюзеляжами и практичность для эксплуатации на больших высотах и с высокими скоростями. Такой же сценарий будет справедлив для самолёта с установкой LENR. LENR революционная технология, чей потенциал не может быть реализован за счёт эволюционной интеграции в существующих фюзеляжах. Весьма перспективно проектировать остальную часть самолёта вокруг технологии LENR, которая обладает такими радикально отличными характеристиками.

Влияние

Ожидается, что характеристики самолётов будут другими для LENR. Самолёт будет иметь практически неограниченную дальность и продолжительность полета. Эта особенность повлияет на конструирование самолёта. Дальность и продолжительность больше не будут активными ограничителями пространства проектирования. Реакторы LENR работают на малых количествах топлива в течение недель или месяцев, что приведёт к практически ничтожным запасам топлива и миссиям с постоянным весом. LENR повлияет на возможности миссии, которая может быть релейной связью, слежением за ураганами, наблюдением за полярным льдом.

LENR будет иметь широкое военное применение. Американские военные сейчас тратят много средств на топливо, от которого при применении LENR можно будет отказаться. Энергетическая независимость станет сильной стороной будущего, а вооружённые силы смогут инвестировать сэкономленные на энергии в разработку новых возможностей (например, таких как ультра длинные продолжительные миссии) и приобретение активов.

Использование LENR окажет также заметное экологическое влияние. LENR не сжигает ископаемого топлива, тем самым снижая любые эмиссии. Реактор LENR может работать на количестве реагентов порядка граммов от многих месяцев до лет, если сравнить с ГТД, требующем тысячи килограмм топлива для работы в течение нескольких часов. Важность уменьшения эмиссий и расхода топлива очевидна исходя из технологических целей НАСА для будущих дозвуковых аппаратов снижения расхода топлива, эмиссий и уровня шума. LENR прямо рассматривает две из этих целей и может использовать дополнительную энергию от системы для активного снижения авиационного шума или ввода дополнительных технологий снижения шума.

Вызовы

LENR как технология, применяемая в авиации, столкнётся с обычными и уникальными вызовами. Сейчас ни одна из предлагаемых теорий LENR в целом не принята. Достоверная LENR теория будет особенно полезной для понимания характеристик процесса. До сих пор построены только экспериментальные реакторы. Большинство экспериментальных систем очень отличается от серийных систем в смысле надёжности и безопасности. Изготовителям LENR реакторов потребуются рассмотреть много проблем на пути продвижения к коммерциализации. Другим вызовом LENR должно быть преодоление термального выброса, происходящего, когда температура реактора достигает критической точки, при которой начинает играть роль термостойкости. Тепловой разрыв приводит к плавлению материалов реактора.

Наиболее вероятной другой проблемой безопасности станет высокая энергетическая плотность LENR реакторов. Хранение большого количества энергии всегда потенциально опасно. Принятие общественностью LENR технологий будет ещё одним вызовом, поскольку общественность должна чувствовать себя комфортно при наличии LENR процессов и обеспечить себя мерами безопасности, которые предусматривает техническая операция. Слово "nuclear" (ядерный) в названии "LENR" может насторожить потенциальных заказчиков, поэтому изготовители могут рассмотреть другое имя для целей маркетинга.

LENR не является зрелой технологией, она не готова для интеграции в авиацию сегодня. Нет тепловых двигателей или систем управления, готовых для интеграции с LENR реактором. Необходимы исследования для определения оптимального пути использования тепла, генерируемого реактором и преобразования его в механическую энергию для использования в качестве силовой системы. Система управления будет критической вследствие проблемы теплового убегания. Система должна быть тщательно спроектирована, чтобы избежать точки критической температуры. Ряд миссий потребует ускорения времени оборота авиации, и время запуска LENR может стать проблемой. Другой вызов - ави-

ационный шум. LENR напрямую не создаёт авиационного шума. Однако, избыток энергии и мощности может затруднить реализацию традиционных технологий по снижению шума.

Авиационные источники энергии

Boeing по контракту с NASA исследовал несколько альтернативных источников энергии для использования в будущих пассажирских транспортных самолётах для достижения экологических целей NASA. Некоторые альтернативные источники энергии (например, водород) имеют долгую историю исследований в авионавтике. NASA оценивала жидкий природный газ и обычные топливные/гибридные электрические источники. LENR идентифицирована как источник энергии с большими преимуществами. Чтобы избежать повторных исследований ниже приводится краткое описание энергетических источников из доклада NASA для авиации будущего.

А. Обычное топливо. Самолёты традиционно заправляются обычным топливом, которое рафинируется из нефти и является промышленным стандартом для гражданской эксплуатации. Реак-

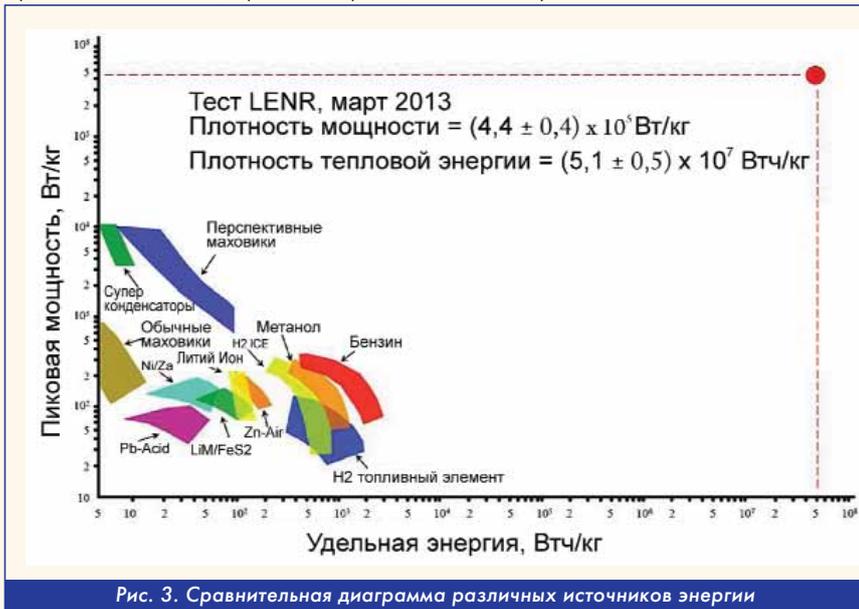


Рис. 3. Сравнительная диаграмма различных источников энергии

тивное топливо представляет собой весьма эффективный источник энергии, что обеспечивает ему широкое применение в течение длительного периода времени. Оно обладает высокой энергетической плотностью и высокой удельной энергией 12000 Вт/кг в широком диапазоне обычных рабочих температур и давлений. При этом NASA и другие заинтересованные организации продвигают пути снижения количества реактивного топлива, необходимого для авиационных миссий.

В. Электричество. Быстро растёт популярность электрической энергии в результате интенсификации исследований, направленных на расширение ее использования на борту авиации. Простая электрическая силовая система состоит из батарей или солнечных элементов и электромотора. Батареи хранят химическую энергию и преобразуют её в электрическую энергию, а электромоторы преобразуют электрическую энергию в механическую. Лишь несколько самолётов сейчас используют электричество для движения. Рис. 3 иллюстрирует энергию ряда видов батарей, включая ионно-литиевые и воздушно-цинковые.

С. Обычное топливо / гибридное электричество. Это комбинация двух предыдущих источников и широкий диапазон применения в пропорции. Гибридные системы представляют интерес, поскольку позволяют оптимизировать преимущества обоих источников. Однако, оба источника имеют экологическое влияние (например, эмиссию).

Д. Водород и сжиженный природный газ (Liquid Natural Gas - LNG). В течение нескольких десятилетий эти топлива были опционами для авиационных СУ. Lockheed изучала CL-400 Sunfan в 1950-х гг., ко-

торый использовал заправленную водородом силовую установку. Водородная или LNG система состоит из баков хранения, систем питания и распределения и интерфейса для топлива. LNG и водород обладают более высокой удельной энергией, чем реактивное топливо: 13889 Вт.ч/кг и 33333 Вт.ч/кг соответственно. Этот вид топлива в СУ требует сгорания и сопровождается эмиссией вредных веществ.

Е. Топливные элементы. Преобразуют топливо непосредственно в электричество через химические реакции. СУ из топливных элементов может поддерживать гибридную систему или снабжать мощностью электромотор. Рис. 3 также показывает энергию для водородного (H2) топливного элемента. СУ с топливными элементами, снабжающая электромотор, потребляет топливо, однако в водородном топливном элементе вода является побочным продуктом и может не оказывать влияния на экологию.

Ф. LENR. Низкоэнергетические ядерные реакции являются источником тепловой энергии. Это в настоящее время незрелая технология, которая требует дальнейшего изучения для определения оптимальной интеграции СУ на платформе летательного аппарата. LENR обладает наивысшей удельной энергией из альтернативных источников, составляющей около 51000000 Вт.ч/кг. Эта консервативная оценка следует из недавних тестов LENR реактора в марте 2013 года. Из диаграммы Ragone на Рис. 3 видно, что LENR имеет огромный потенциал как источник энергии. Силовая установка LENR потребляет очень небольшое количество топлива, поскольку требует малой реакционной массы. Химикаты в воздух во время работы не попадают, поэтому отсутствуют химическая эмиссия. Озабоченность может вызывать шум, так как тепловая энергия должна преобразовываться в тягу. Однако избыток энергии можно использовать, чтобы задействовать технологии снижения шума. Малая реакционная масса позволяет самолёту выполнять полётные миссии с постоянным весом в сочетании с отсутствием вредной эмиссии и с исключительно высокой энергетической плотностью, что делает реактор LENR привлекательным для авиационных силовых систем.

Проектное пространство системы LENR

Проектное пространство для выявления характеристик при использовании LENR в качестве силовой системы в самолётах предложено д-ром Taewoo Nam под названием безразмерной авиационной массы (Non-dimensional Aircraft Mass - NAM). Методика NAM предназначена в помощь конструкторам для выбора оптимальной СУ для заданной миссии. На начальном этапе исследования она использована для сравнения LENR системы с современными

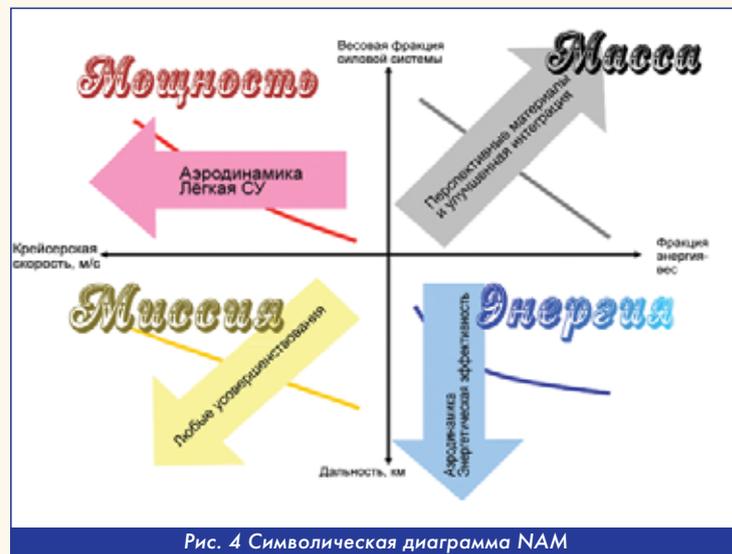


Рис. 4 Символическая диаграмма NAM



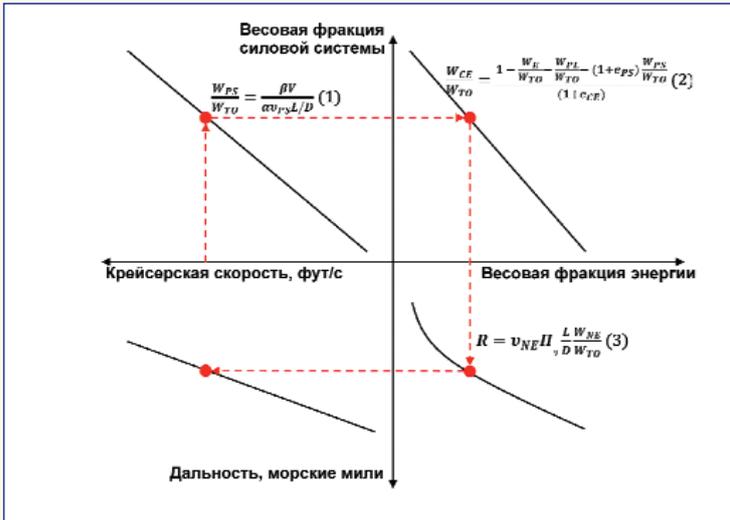


Рис. 5 Процесс построения диаграммы NAM

гии протоколирует весовую долю энергии с дальностью миссии. Наконец, квадрант миссии отображает дальность миссии и крейсерскую скорость.

Рис. 5 представляет процедуру отображения самолёта на символической диаграмме NAM. Во-первых, выбирается крейсерская скорость. Затем рассчитывается весовая доля СУ с помощью уравнения (1),

$$W_{PS}/W_{TO} = \beta V / \alpha v_{PS} L/D, \quad (1)$$

где: W_{PS}/W_{TO} - весовая доля СУ, β - весовая доля самолёта, V - крейсерская скорость, α - допуск тяги, v_{PS} - удельная мощность СУ и L/D - отношение крейсерской подъёмной силы к сопротивлению (аэродинамическое качество). Этот шаг отображает отношение крейсерской скорости к весовой доле СУ в силовом пространстве. Наиболее эффективный самолёт имеет СУ высокой удельной мощности и потому малую весовую долю СУ. Следующий шаг состоит в расчёте весовой доли волной энергии с помощью уравнения (2),

$$W_{TE}/W_{TO} = (1 - W_E/W_{TO} - W_{PL}/W_{TO} - (1 + e_{PS}) W_{PS}/W_{TO}) / (1 - e_{TE}), \quad (2)$$

где: W_{TE}/W_{TO} - весовая доля полной энергии, W_E/W_{TO} - весовая доля пустого самолёта, W_{PL}/W_{TO} - весовая доля полезной нагрузки самолёта, e_{PS} представляет влияние на пустой вес интеграции необычной СУ, а e_{TE} - влияние на пустой вес интеграции источника полной энергии. Переменная полной энергии включает как расходимые, так и нерасходимые источники энергии. Этот шаг картографирует весовую долю СУ к весовой доле энергии в массовом пространстве. Самолёт из самых лёгких материалов наиболее эффективен в квадранте массы. Лёгкие материалы снижают долю пустого веса самолёта и весовую долю СУ, увеличивая доступный вес для топлива. Следующий шаг состоит в расчёте дальности с помощью уравнения (3),

$$R = v_{NE} \Pi_{\eta} L/D \frac{W_{NE}}{W_{TO}} \quad (3)$$

где: R - дальность миссии, Π_{η} - эффективность СУ и W_{NE}/W_{TO} - весовая доля источника нерасходуемой энергии. Этот шаг отображает весовую долю энергии к дальности миссии в квадранте энергии. Наиболее эффективный самолёт в энергетическом отношении обладает СУ высокой эффективности и удельной мощности и потому большой дальностью. Последний шаг - отображение дальности и скорости в квадранте миссии. Оптимальный самолёт для заданной миссии будет иметь высокую крейсерскую скорость и крейсерскую дальность.

Конкретная архитектура на Рис. 7 имеет двойной режим и также содержит камеру сгорания на химическом топливе. Характеристики двигателя приведены в Табл. 3. Двигатель рассчитан на 0,75 М, крейсерскую высоту около 9300 м (31000 футов). Самолёт оснащён четырьмя двигателями, имеет начальную массу около 0,675 млн кг (свыше 1,5 млн фунтов) и обладает практически неограниченной дальностью.

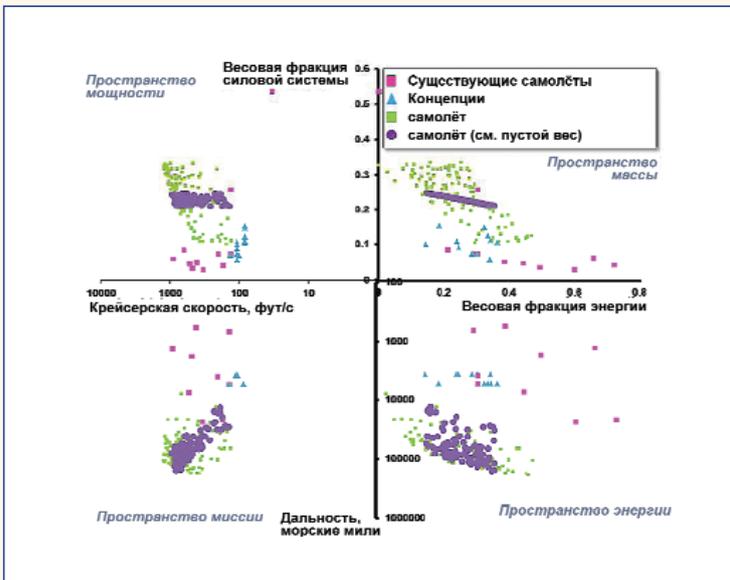


Рис. 6 Диаграмма NAM существующих высотных и длительных аппаратов, солнечного регенеративного самолёта проекта NASA и символического самолёта LENS

системами при выполнении высотных длительных (High Altitude Long Endurance - HALE) или аналогичных миссий.

На Рис. 4 представлена символическая диаграмма NAM. Она состоит из четырёх квадрантов: силовой, описывает аэродинамику и вес СУ; массового - перспективные материалы и интегрирование, энергетического - аэродинамика и энергетическая эффективность и целевого - характеристики аппарата. Силовой квадрант картографирует крейсерскую скорость и весовую фракцию СУ. Квадрант массы отображает весовые доли СУ и энергии. Пространство энер-

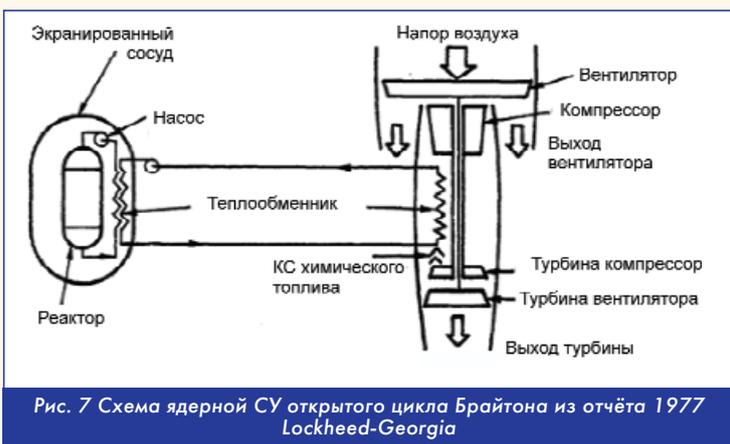


Рис. 7 Схема ядерной СУ открытого цикла Брайтона из отчёта 1977 Lockheed-Georgia

Таблица 4

Расчётные характеристики базового ядерного двигателя Lockheed-Georgia

Аналогичная архитектура предложена для самолёта LENS.

Тяга, (кН / фунты)	377 / 84 800
Степень сжатия вентилятора	1,3
Общая степень сжатия	12
Температура входа турбины, крейсерский (°C / °F)	870 / 1600
Ресурс газогенератора, (ч)	10 000
Топливо, (кг/ фунты)	1000 / 2200
Охладитель	Литий

Реактор LENR на рисунке заменён ядерным реактором и не содержит КС на химическом топливе. Архитектура силовой системы должна стать целью для будущих исследований. Как считают американские эксперты, изучение ядерного авиадвигателя прошлого является хорошим началом работ, но могут быть лучшие варианты с современной технологией и созданием самолёта с электрической СУ.

Диаграмма NAM подтверждает свою эффективность как инструмента исследования проектного пространства. Силовое пространство на Рис. 6 отображает общий тренд того, что весовая доля авиационной СУ LENR HALE увеличивается с крейсерской скоростью. Общий тренд приводит к интуитивному выводу, что чем больше силовая система, тем выше крейсерская скорость. Однако эта выборка данных содержит ограниченное число точек и не имеет некоторых особенностей. Выборка данных по самолёту LENR HALE (см. пустой вес) не показывает такого же тренда и свидетельствует, что весовая доля СУ не зависит от крейсерской скорости. Эти графики авиационной архитектуры с аналогичными параметрами геометрии и веса объясняют, почему точки данных так близко располагаются. Пространство массы показывает, что самолёт LENR способен одновременно обладать повышенными весовыми долями СУ и энергии. Пространство энергии показывает, что самолёт LENR может иметь экстремальную дальность с малыми весовыми долями энергии. Эта способность - результат высокой энергетической плотности LENR технологии. Пространство миссии показывает, что самолёт LENR способен к высокой крейсерской скорости и большой дальности. Аппарат LENR HALE (см. пустой вес) по выборке данных на Рис. 6 показывает, что крейсерская скорость и дальность имеют растущую линейную зависимость. Благодаря узкому диапазону входных данных пустого веса для этой выборки точки данных располагаются близко в пространстве миссии, а крейсерская скорость и дальность являются прямой функцией аэродинамического качества.

Три вывода следуют из анализа пространства проектирования: (1) самолёт LENR позволяет выполнять исключительно дальние миссии, (2) высокую плотность мощности можно использовать для получения высокой крейсерской скорости и (3) LENR развязывает габариты СУ и способность мощности. Избыток энергии реактора LENR можно использовать применительно к таким традиционным ограничениям при конструировании самолёта, как дальность (длительность полёта) и скорость.

Проектное пространство системы LENR

При определении миссий, которые реализуют уникальные способности силовой системы LENR, американские эксперты выделяют HALE, высокую скорость и дальность. Миссии HALE вероятней всего будут беспилотными, поскольку это подтверждается мировой практикой полётов большой продолжительности и ограничениями человека пилота/оператора. Связь, слежение за ураганами, патрулирование границ, наблюдение в портах, спасательные операции при катастрофах, слежение за животными и высотные атмосферные исследования - примеры гражданских HALE миссий. Военные миссии включают разведку, наблюдение и рекогносцировку (Intelligence, Surveillance, Reconnaissance - ISR), постоянное наблюдение и восприятие воздушного пространства. Ниже приводится краткое описание этих миссий.

А. Миссия связи

Миссия ретрансляции требует самолёта, который несёт полезную нагрузку для передачи сообщений. Это имеет гражданское и военное предназначение. По мнению американских экспертов, беспилотники HALE UAV имеют потенциал служить как эффективные недорогие ретрансляционные станции благодаря их большой длительности, большому наземному следу (по сравнению с башнями мобильных телефонов), гибкости и сравнительно низкой стоимости приобретения и эксплуатации (в сравнении со спутниками).

На Рис. 8 показан профиль миссии ретрансляции. Аппарат

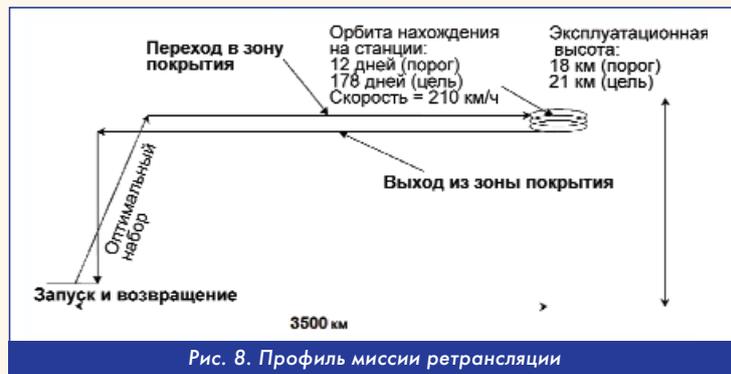


Рис. 8. Профиль миссии ретрансляции

должен оставаться на станции в течение 99,9% времени, что означает нахождение в положении цилиндра радиусом 4000 м и высотой 3000 м на операционной высоте. Требования к полезной нагрузке: масса 200 кг, объём 0,1 м³ и мощность 1,5 кВт.

В. Миссия слежения за ураганами

Миссия слежения за ураганами требует аппарата для перехвата и затем сопровождения урагана и выполнения манёвров для сброса полезной нагрузки.

На Рис. 9 показан профиль миссии слежения за ураганами.



Рис. 9. Профиль миссии слежения за ураганом

Аппарату необходимо сопровождать или лететь вместе с ураганом по крайней мере 14 дней. Полезная нагрузка для этой миссии состоит из радара и сенсоров. Требования к полезной нагрузке: 500 кг, 3 м³ объём и 2,5 кВт мощность. Миссия также требует сбрасываемых сенсоров и/или беспилотных ЛА. Требования к сбрасываемой полезной нагрузке: 850 кг и 11 м³ объём

С. Разведка, наблюдение и рекогносцировка (ISR)

Миссия ISR поддерживает важную военную способность. Некоторые ISR системы собирают базовую информацию в поддержку различных аналитических продуктов, а другие приобретают данные для конкретных систем оружия. Беспилотник NorthropGrumman's RQ-4 GlobalHawk (Unmanned Aircraft System - UAS) один из примеров авиационных средств, которые выполняют эту задачу. Возможности большой дальности и длительности LENR также позволяют заменить некоторые спутниковые возможности. GlobalHawk способен вести наблюдение за большими зонами с высокой точностью, которая может дать принимающим решения военным критическую информацию о нахождении противника и ресурсов в реальном времени.

Таблица 5

Характеристики NorthropGrumman RQ-4 Global Hawk

Global Hawk несёт оптико-электронные, ИК и радиолокационные датчики с синтетической апертурой, линию передачи спут-

Полезная нагрузка (кг/lbs)	1350 кг (3,000)
Перегоночная дальность (км/n.mi)	22800 (12,300)
Максимальная высота (feet)	19500 м (65,000)
Скорость барражирования (км/ч / knots)	580 (310)
Максимальная длительность (ч)	35, 24 - на станции

никовой связи Ku диапазона, общую линию передачи визуальных данных, УКВ спутниковую связь/линию визирования, Inmarsat спутниковую связь, голосовое УВД и защищённую голосовую связь.

D. Миссия патрулирования воздушного пространства

ВВС США выдвинули предложение в 1959 году о патрульном самолёте с ядерным двигателем. Предложенный аппарат назывался постоянным действия системой низкого уровня для запуска крылатых ракет (Continuously Air borne Missile-Launcher and Low-Level-CAMAL). Идея была создать самолёт с ядерным двигателем, который патрулирует вне зоны действия РЛС противника, оставаясь в воздухе неделями или месяцами и неся баллистические ракеты. Предполагалось, что этот самолёт будет снижаться и лететь с большой скоростью ниже РЛС противника для выполнения обычного бомбометания. Та же идея относилась к самолёту большой длительности, действующему над противником или вне его зоны РЛС. Самолёт мог нести ракеты, датчики и/или беспилотники и патрулировать на станции и запускать оружие или датчики, препятствуя доступу противника в воздушное пространство или географические зоны.

E. Миссии высокой скорости

Существует много миссий высокой скорости, особенно для военных. Гражданские сверхзвуковые полёты ограничены полётами на океаном из-за шума звукового удара. Допускается, что LENR может обеспечить высокоскоростную силовую систему. Если LENR реактор проектируется на избыток энергии сверх необходимой для СУ, то энергию можно использовать для снижения авиационного шума и уровней звукового удара. Boeing изучал будущий сверхзвуковой транспорт по контракту НАСА в 2012 году.

Табл. 6 приводит инженерные проектные нормативы сверхзвукового транспорта на базе маркетингового исследования, проведенного по контракту НАСА. Для достижения сверхзвуковых скоростей с желаемым числом пассажиров самолёту необходимы большие двигатели и много топлива. LENR может обеспечить требуемую мощность с незначительным топливом. Это означает, что самолёт может быть значительно легче для той же миссии. На Рис. 8 показана минимальная дальность 7500 км (4,000 морских миль). LENR может обеспечить большую дальность сверхзвуковых миссий, возможно с достижением любой точки на земном шаре.

F. Международная грузовая миссия

Сейчас на международных магистральных грузовых перевозках доминируют контейнерные суда. Два преимущества, которые обеспечивает авиация для этой миссии, это высокие скорости и производительность. Boeing сконструировал для этой миссии самолёт Pelican 20. Он может нести до 1400 т груза и рассчитан летать на большую дальность над океаном на высоте над водой около 20 футов (6 м). Летая так близко к воде он может использовать преимущества влияния поверхности. Этот эффект увеличивает подъёмную силу и уменьшает сопротивление в результате полёта самолёта вблизи неподвижной поверхности. Океан может служить как неподвижная поверхность для миссии Pelican. Самолёт Pelican рассчитан нести аналогичный груз контейнерных судов с десятикратной скоростью.

Выводы

Цена на топливо и тенденции её спроса создают общественную потребность в новом источнике энергии. Авиационные силовые системы LENR обеспечивают новые способности миссий, которые могут привести к революционным изменениям в авиационной промышленности. Существует много альтернативных источников энергии, которые можно использовать в авиации. Они имеют свои преимущества и добавляют сложности в конструировании самолёта. Дополнительные системы и резервуары для хранения, которые требуются для ряда альтернативных источников энергии, увеличивают общий вес самолёта. Некоторые источники создают энергию, сжигая топливо, что требует его пополнения. Вредные выбросы выделяются некоторыми источниками, которые сжигают топливо. Силовые установки LENR сулят небольшие до-

Таблица 6

Проектные нормативы сверхзвукового транспорта Boeing на основании маркетингового анализа

Выводы маркетинга	Инженерные нормативы
100-150 пассажиров (компоновка из двух классов) базовый интерьер, цель ~ 130 мест	100 пассажиров, 130+ с опционными местами
1,6-1,8 М крейсерская скорость и необходимость альтернативного плана эксплуатации, включая утилизацию (дозвук, гибридная собственность ...)	1,8 М расчётный предел
Крейсерская высота ограничена 16500 м (55,000 ft) - эмиссии	<= 16500 м (55,000 ft)
7500 км (4,000 n.mi.) минимальная сверхзвуковая дальность (транс-Атлантика +) 20000 км (6,000 n.mi.) цель для открытия азиатских маршрутов	7500 км (4,000 n.mi) минимальная дальность
Крейсерское M <= 0,95 ниже 12000 м (39Kft) для УВД (АТС) запасов. Нет сверхзвуковых скоростей ниже 12300 м (41 Kft) для АТС норм	Совместимость с АТС и трафиком Вся SS (сверхзвуковая) миссия
Сверхзвуковой расход топлива меньше 0,26 lb/seat/nmi (3.8 seat-nmi/lb), установлена приемлемая экономическая и экологическая цель (1% / год после N+2)	Цель исследования для минимального топлива самолёта и справочная точка для метрических расчётов
Звуковой удар практически как можно ниже (<Concorde над водой), учитывая "пороговый Мах" над землёй и "смягчение удара" для операций в прибрежных районах и выбранных коридорах над землёй	Сбалансированная конфигурация 100 мест в классе 80 PLdB, "Малый удар" метрического самолёта в классе 70 PLdB (конечная цель 65-70 PLdB)
Эксплуатационное решение необходимо над землёй и в низком диапазоне	Технологические цели; низкий звуковой удар и хорошая топливная эффективность vs число Маха, возможен "Пороговый Мах" крейсерский

полнительные изменения существующих систем, незначительное потребление топлива и отсутствие вредной эмиссии.

Высокий уровень исследования пространства проектирования показал, что самолёт с СУ LENR будет иметь исключительно большую дальность и выносливость. Высокая плотность мощности также обеспечивает высокие крейсерские скорости. Эта технология позволит использовать избыток недорогой энергии для снятия активных ограничений конструирования вроде дальности и скорости, приведя к новым авиационным конструкциям и миссиям с незначительным расходом топлива, малым шумом и отсутствием эмиссий.

Самолёт LENR хорошо подходит для HALE миссий. Миссия ретрансляции выгодна и для гражданских, и для военных. Научные миссии для слежения за ураганами и другими погодными явлениями будут недорогими альтернативами спутников. Могут значительно расширяться способности военной разведки ISR и воспрепятствования воздушного пространства. LENR может обеспечить доступные конструкции для сверхзвуковых пассажирских самолётов и скоростного международного грузового транспорта.

Будущие исследования должны рассмотреть вопросы интеграции

LENR в самолётную силовую систему. Ядерные СУ могут стать хорошим стартом. Новые технологии, вроде электрических силовых установок, могут привести к уникальным архитектурам СУ и системам передачи энергии. Такое исследование является ключевым для эффективной интеграции LENR в самолёте.

Американские эксперты считают, что достигнув уровня зрелой системы для реализации на самолёте и выполнения всех расчётных оценок, LENR вызовет революционные изменения в авиационной промышленности и мире. Она может обеспечить исключительно высокие возможности миссий и тактические преимущества военным. Но, как отмечают американцы, это лишь результаты поисковых исследований, которые только дают идею применения LENR для возможных перспективных миссий. **А**

Литература

- 1 А.Г. Пархомов. Холодная трансмутация ядер: странные результаты и попытки их объяснения. ЖФНН, 1(1):71-77, 2013.
- 2 S. Focardi; A. Rossi. A new energy source from nuclear fusion. J. of Nuclear Physics. com, 28 Feb. 2010.
- 3 N. D. Cook, A. Rossi. On the Nuclear Mechanisms Underlying the Heat Production by the "E-Cat". Journal of Nuclear Physics.com, 04 Apr 2015.
- 4 А.Г. Пархомов. Исследование аналога высокотемпературного теплогенератора России. ЖФНН, 7 (3):68-72, 2015.
- 5 G. Levi, E. Foschi, B. Hoistad, R. Pettersson, L. Tegner, H. Essen. Observation of abundant heat production from a reactor device and of isotopic changes in the fuel. <http://www.sifferkoll.se/sifferkoll/wpcontent/uploads/2014/10/LuganoReportSubmit.pdf>.
- 6 А.Г. Пархомов. Отчет международной комиссии об испытании высокотемпературного теплогенератора России. ЖФНН, 6 (2): 57-63, 2014.
- 7 E. Regener. Der Energiestrom der Ultrastrahlung, Zeitschrift für Physik, V.l. 80, p. 666-669. (1933); E. Regener. The energy flux of cosmic rays, Apeiron. Vol. 2, pp. 85-86 (1995).
- 8 A. K. Assis and M. C. Neves. History of the 2.7 K temperature prior to Penzias and Wilson, Apeiron, Vol. 2, pp. 79-84 (1995).
- 9 M. Ja. Ivanov, V. K. Mamaev, 2015. Heat Creation Process Modeling in the I. Filimonenko- Rossi - Parhomov Generators. 14th International Workshop on Magneto-Plasma-Aerodyn, JIHT RAS, Moscow, Russia.
- 10 AIAA Paper 2014-3009
11. Zawodny, J. M., "Low Energy Nuclear Reactions: Is there a better way to do nuclear power?," NASA Glenn Research Center LENR Workshop, Sep. 2011.
12. Harris, W., Freudenrich, C. and Fuller, J., "How Nuclear Bombs Work," Oct. 2000, HowStuffWorks.com [online database], URL: <http://science.howstuffworks.com/nuclear-bomb.htm> [cited Apr. 2014].
13. Levi, G., et al., "Indication of Anomalous Heat Energy Production in a Reactor Device Containing Hydrogen Loaded Nickel 65 Powder", May 2013, (unpublished).
14. Fleischmann, M. and Pons, S., "Electrochemically Induced Nuclear Fusion of Deuterium," Journal of Electroanalytical Chemistry, Vol. 261, Issue 2, Part 1, pp. 301-308, Apr. 1989 and errata with Marvin Hawkins in Vol. 263, pp. 187-188, 1989.
15. Widom, A. and Larsen, L., "Ultra low momentum neutron catalyzed nuclear reactions on metallic hydride surfaces," European Physical Journal C - Particles and Fields, Vol. 46 No. 1, Apr. 2006, pp. 107-111.
16. "Annual Energy Outlook 2013 Early Release Overview", U.S. Energy Information Administration, May 2013.
17. "More Fight-Less Fuel," Report of the Defense Science Board Task Force on DoD Energy Strategy, Feb. 2008.
18. Hendricks, E. S., Berton, J. J., Haller, W. J., Tong, M. T., Guynn, M. D., "Updated Assessments of an Open Rotor Airplane using Advanced Blade Designs", AIAA 2013-3628, 2013.
19. Bradley, M. K., Droney, C. K., "Subsonic Ultra Green Aircraft Research Phase II: N+4 Advanced Concept Development", NASA

- CR-2012-217556, May 2012.
20. Brewer, G. D., "The Case for Hydrogen Fueled Transport Aircraft", AIAA 73-1323, 1973.
21. Muehlbauer, J. C., "Very Large Aircraft with Alternative Fuels - LH2 Most Promising", AIAA 82-0813, 1982.
22. Sloop, J. L., "Liquid Hydrogen as a Propulsion Fuel, 1945-1959", NASA SP-4404, 1978.
23. "Alternative Jet Fuels: A supplement to Chevron's Aviation Fuels Technical Review", Addendum 1 to Aviation Fuels Technical Review (FTR-3/A1), Chevron Corporation, 2006.
24. Nam, T., "A Generalized Sizing Method for Revolutionary Concepts Under Probabilistic Design Constraints", Ph.D. dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, May 2007.
25. Nickol, C. L., Guynn, M. D., Kohout, L. L., and Ozoroski, T. A., "High Altitude Long Endurance UAV Analysis of Alternatives and Technology Requirements Development", NASA TP-2007-214861, Mar. 2007.
26. Muehlbauer, J. C., et al., "Innovative Aircraft Design Study, Task II: Nuclear Aircraft Concepts", ADB017795, Lockheed-Georgia Company, Marietta, GA, Apr. 1977.
27. "RQ-4 Global Hawk", Northrop Grumman Corporation Factsheet, May 2008.
28. Cortright, V., "Dream of Atomic Powered Flight", Aviation History Magazine, Mar. 1995.
29. Welge, H. R., et al., "N+3 Advanced Concept Studies for Supersonic Commercial Transport Aircraft Entering Service in the 2030-2035 Period", NASA CR-2011-217084, Apr. 2011.
30. Cole, W., "The Pelican: A big bird for the long haul," Boeing Frontiers online, Vol. 1, No. 5, Sep. 2002.
31. The Application of LENR to Synergistic Mission Capabilities. Douglas P. Wells NASA Langley Research Center, Hampton, VA 23602 Dimitri N. Mavris Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia 30332-0150. American Institute of Aeronautics and Astronautics

Связь с автором: ravichaf@mail.ru

