

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук руководителя программы аэрокосмических исследований ФГУП «ЦАГИ» А.С. Филатьева о диссертации Иванюхина Алексея Викторовича «Методы проектирования траекторий КА с электроракетными двигателями на основе анализа области существования решений и исследования задачи о минимальной тяге», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов»

Рецензируемая диссертация посвящена разработке регулярного метода проектирования оптимальных межпланетных траекторий космических аппаратов (КА) с электроракетными двигательными установками (ЭРДУ). Большое внимание разработчиков КА к ЭРДУ определяется, в первую очередь, их удельным импульсом, который на порядок выше, чем у ракетных двигателей современных ракет-носителей. Однако, малая тяга ЭРДУ по сравнению с гравитационными силами притягивающих центров, около которых должен проходить полет межпланетных КА, предъявляет высокие требования к расчету оптимальных траекторий из-за их неустойчивости с одной стороны и малости располагаемых управляющих воздействий с другой. Для оптимизации траекторий автор применяет принцип максимума Понтрягина, который становится мощным эффективным инструментом объективного синтеза и анализа оптимальных решений в руках только тех исследователей, кто хорошо владеет соответствующим математическим аппаратом и понимает все тонкости и особенности приложения принципа максимума к задачам механики полета. Таким образом, тема диссертационной работы, несомненно, **актуальна**, так как направлена на решение **важной практической задачи** повышения эффективности космических полетов и сопутствующей ей **сложной теоретической проблемы** регуляризации численных процедур оптимизации траекторий полета КА с малой тягой.

В широком ряду исследований, посвященных оптимизации межпланетных траекторий с ЭРДУ на основе принципа максимума, подход диссертанта выделяется стремлением не только самостоятельно решать сложные задачи траекторной оптимизации, но предложить понятный широкому кругу исследователей общий метод, регуляризирующий на основе метода гомотопии непростую процедуру решения

многоточечных нелинейных краевых задач, к которым принцип максимума редуцирует проблему оптимизации траекторий КА с ЭРДУ.

В рамках этого подхода диссертант предлагает начинать с построения границы области существования оптимального (локального) решения в пространстве параметров задачи. Конечно, эта задача намного сложнее оптимизации конкретной траектории и поэтому такое начало может показаться не рациональным. Однако, если вопрос стоит о проектировании КА для новых миссий, когда нет возможности опереться на известное решение близкой задачи, то с учетом указанных выше особенностей траекторий КА с малой тягой предлагаемый подход является правильным, так как позволяет сразу отсеять области значений проектных параметров, в которых решение не существует. Такой подход свидетельствует об обстоятельности диссертанта.

Для построения области существования решений автор ставит и решает **новую задачу** о минимуме начального реактивного ускорения КА с ЭРДУ, обеспечивающего заданный перелет с фиксированным временем и ограничением на массу на правом конце траектории. Взаимность такой задачи с более традиционной задачей на быстроедействие не снижает интереса к предложенной диссертантом постановке и развиваемому на этой основе новому подходу, поскольку оперирует одним из важнейших проектных параметров КА – тяговооруженностью. Разработанный диссертантом **новый метод исследования оптимальных траекторий** межпланетного перелета КА с ЭРДУ будет полезен баллистикам при анализе будущих космических транспортных систем.

Диссертация, объемом 101 стр., состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Последний содержит 74 работы, которые достаточно полно отражают область исследований диссертанта.

Во **введении** сформулированы цели и задачи исследования, обоснован в целом подход автора к их решению, правильно обозначено место диссертационной работы среди известных работ других авторов.

В **первой главе** рассматриваются математические модели, описывающие оптимальное движение КА с ЭРДУ для рассматриваемых схем межпланетного переле-

та при использовании принципа максимума Понтрягина. Уравнения модели, включая внешние силы и граничные условия, представляются в достаточно общем виде, что, с одной стороны, расширяет рамки применимости, но с другой, к сожалению, не дает полного представления о том, какие же соотношения использованы автором в его конкретных расчетах. Формулируются два типа рассматриваемых оптимизационных задач: с идеально-регулируемым двигателем ограниченной мощности («ОМ-задача» в обозначениях автора) и с ограниченной тягой («ОТ-задача»). Важным «идеологическим» местом для всей диссертации в этой главе является описание применения метода непрерывного продолжения по параметру двухточечных краевых задач для систем обыкновенных дифференциальных уравнений, к которым принцип максимума Понтрягина редуцирует исходную задачу нахождения оптимального управления в функциональном пространстве. Материал раздела показывает высокую квалификацию автора в анализируемой проблеме.

Во второй главе обсуждается проблема существования решения задачи оптимизации траекторий КА с ЭРДУ. Формулируется ключевая в решении этой проблемы задача о минимуме начального реактивного ускорения (тяги). Опираясь на физический смысл и экстремальные свойства решения задачи об оптимальной тяге, обосновывается метод построения границы области существования решения рассматриваемого класса оптимизационных задач межпланетного перелета КА в пространстве проектных параметров ЭРДУ. В этом смысле вторая глава является центральной в обосновании нового подхода к проектированию таких траекторий, предложенного диссертантом.

В третьей главе широко демонстрируется работоспособность и эффективность разработанного автором метода. В частности, проанализированы прямые перелеты к Марсу и Меркурию с двигателем постоянной мощности (ядерной ЭРДУ). Исследованы замкнутые перелеты на Марс и к трем астероидам. В плоскости «скорость истечения - начальное реактивное ускорение» построены границы областей существования решения задач прямых перелетов при фиксированном времени и ограниченной конечной массе КА. Приводятся оптимальные траектории и законы управления. Составленные автором детальные портреты линий уровня характеристической скорости в плоскости «дата старта – время перелета» имеют «овраж-

ную» структуру, представляющую известную трудность для численного решения краевых задач оптимального управления. Сложность построения таких изолиний свидетельствуют о высокой эффективности и точности разработанных автором численных процедур, а большой объем выполненных расчетов оптимальных траекторий подтверждает регулярный характер получения численных решений на основе разработанного автором подхода.

На основе анализа работы можно сделать вывод, что в диссертации автор:

- Развивает новый подход к оптимизации траекторий межпланетных перелетов КА с ЭРДУ на основе принципа максимума Понтрягина и анализа области существования решения в пространстве параметров задачи.
- Демонстрирует высокую эффективность предлагаемого метода на примерах широких параметрических исследований различных межпланетных перелетов КА с ЭРДУ как односторонних, так и с возвращением на Землю.

Достоверность результатов диссертации следует из обоснованности постановок задач, использования современных методов их решения с помощью принципа максимума Понтрягина и непрерывного продолжения решения по параметру, корректности большого объема численных параметрических исследований по разработанной автором методике.

Вместе с тем, к рецензируемой работе можно сделать следующие **замечания**:

- 1) При обзоре примеров практического использования ЭРДУ автор ссылается только на недавние зарубежные проекты, забывая, например, таких основоположников практических ЭРДУ для космических полетов и методов оптимизации траекторий КА с малой тягой на основе принципа максимума как Г.Л. Гродзовский и его научная школа в ЦАГИ.
- 2) Для обеспечения сходимости процедуры решения краевых задач автор придает большое значение предложенной им процедуре «сглаживания» тяги при переключениях между минимальным и максимальным значениями (стр. 6, 31). Однако, трудно согласиться как с теоретическим обоснованием необходимости этой операции, так и с фактом зависимости практического улучшения сходимости за счет введения такого сглаживания. Дело в том, что для хорошей сходи-

мости метода гомотопии желательно иметь гладкую (в идеале квазилинейную) зависимость функции невязок от варьируемых параметров. На гладкость функции невязок не могут повлиять разрывы первого рода управляющей функции в правых частях интегрируемых уравнений движения, которых напрасно пытается избежать автор, вводя искусственное сглаживание функции тяги. Более того, избыточные требования приводят автора к сомнительной идее «исправления» условия оптимальности тяги, а не физической модели. Тем самым, фактически нарушаются условия принципа максимума и получаемые решения уже нельзя строго назвать оптимальными. В избыточности процедуры сглаживания диссертант мог бы убедиться на примере собственных расчетов в главе 3, где он исследовал зависимость оптимальных решений от параметра сглаживания, устремляя его в пределе к нулю.

- 3) Запись массы КА в форме (1.17) содержит явно управление – тягу. Если бы автор попытался использовать это выражение при оптимизации, это сделало бы постановку задачи некорректной. Хорошо, что далее в диссертации формулы (1.17), (1.18) в действительности не используются.
- 4) При постановке ОМ-задачи (стр. 16 и стр. 17) в диссертации допущены опечатки: напечатано «...максимизировать функционал (1.21)...», в то время как по замыслу автора (см. пояснение к (1.21) на стр. 15) следовало написать «...минимизировать функционал (1.21)...».
- 5) В формуле (1.43) функции $\eta(x,t)$ и $w(x,t)$ задают изменение не тяги и скорости истечения, как написано на стр. 21, а их максимальных значений.
- 6) В общей записи оптимального управления в (1.46), (1.55) предусмотрена возможность существования особого управления, но в дальнейшем изложении эта возможность не исследуется.

Приведенные замечания не могут снизить высокой научной и практической ценности диссертационной работы.

Диссертация имеет теоретическую новизну и может быть полезна при баллистическом обеспечении проектов космических транспортных средств для межпла-

нетных перелетов.

Основные результаты работы опубликованы, в том числе в изданиях перечня ВАК (4 статьи), и доложены на конференциях различного уровня.

Содержание диссертации соответствует специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

На основе вышеизложенного считаю, что диссертация Алексея Викторовича Иванюхина «Методы проектирования траекторий КА с электроракетными двигателями на основе анализа области существования решений и исследования задачи о минимальной тяге» является законченной научно-квалификационной работой, содержащей новую постановку и решение актуальной проблемы проектирования оптимальных траекторий межпланетных перелетов с электроракетными двигательными установками. Разработанный диссертантом новый метод исследования оптимальных траекторий межпланетного перелета КА с ЭРДУ будет полезен при баллистическом анализе будущих космических транспортных систем. Диссертация соответствует требованиям ВАК России, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Алексей Викторович Иванюхин, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

Руководитель программы аэрокосмических исследований ФГУП «ЦАГИ»
доктор технических наук



А.С. Филатьев

06.10.2015