СТАТЬИ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

DOI: 10.32743/UniTech.2025.131.2.19277

НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ МЕЖПЛАНЕТНЫХ ПЕРЕЛЁТОВ. ЧАСТЬ 1.

Воронин Сергей Тимофеевич
канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник,
«Аника М» ООО,
РФ, г. Новосибирск,
E-mail: anika_m@mail.ru

A NEW CONCEPT FOR BUILDING A SPACECRAFT FOR INTERPLANETARY FLIGHTS. PART 1.

Sergey Voronin
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
"Anika M" LLC,
Russia, Novosibirsk

АННОТАЦИЯ

Приводятся результаты теоретических расчётов по предложенной концепции построения космического аппарата на основе малогабаритного, жидкостного, реактивного двигателя, включающего встроенный источник импульсного, ионизирующего излучения (ионизатор) в камере сгорания для предварительной ионизации газов. Последующий подогрев потока сверхзвуковых газов в предварительном коническом сопле плазмой, осуществляется посредством электромагнитного ВЧ поля высокой удельной мощности, как минимум, на участке между критическим и расчётным сечениями. Для создания расчётных концентраций ионов в зоне подогрева плазмой также служит вышеназванный ионизатор использующий эффект Комптона. Расчёты указывают, что расчётный удельный импульс космического аппарата значительно увеличится.

ABSTRACT

The results of theoretical calculations on the proposed concept of constructing a spacecraft based on a set of small-sized, liquid, jet engines, including a built-in source of pulsed, ionizing radiation (ionizer) in each combustion chamber for preliminary ionization of gases, are presented. Primary ionization in the combustion chamber promotes more complete combustion of the fuel due to the formation of free radicals and electrons, increasing the efficiency of a liquid jet engine. The subsequent heating of the flow of supersonic gases in a conical nozzle by plasma is carried out by means of a powerful electromagnetic RF field, at least in the area between the critical and calculated sections. To create the calculated concentrations of ions in the plasma heating zone, the above-mentioned ionizer also uses, using the Compton effect at the optimal value of the specific power of plasma heating. As a result of the proposed concept of construction and the new design of a small-sized, liquid-propellant, rocket engine, the calculated specific impulse of the spacecraft will increase significantly, which will make it possible in the future to use a single-stage rocket to deliver cargo to near-earth orbit.

Ключевые слова: ионизатор газов, низкотемпературная плазма, подогрев газов плазмой, электромагнитное поле, линейный ускоритель ионов.

Keywords: gas ionizer, low-temperature plasma, plasma heating of gases, electromagnetic high-frequency field, linear ion accelerator.

Введение. Концепция конструкции жидкостных реактивных двигателей (ЖРД), заложенная Вернером фон Брауном и Валентином Петровичем Глушко, почти не изменилась до сих пор, что доказывается широким использованием ЖРД изобретённых ещё в 50-60^{-x} годах прошлого века. Отличия в основных конструкциях определяются используемым горючим и окислителем. [1-3]. Основными продуктами сгорания являются перегретый водяной

Библиографическое описание: Воронин С.Т. НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ МЕЖПЛАНЕТНЫХ ПЕРЕЛЁТОВ. ЧАСТЬ 1 // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2025. 2(131). URL: *https://7universum.com/ru/tech/archive/item/19277*

пар, углекислый газ и азот, а при использовании жидких водорода и кислорода выделяется один водяной пар. Эффективность имеющихся двигателей по доставке тяжёлых грузов на околоземную орбиту является небольшой и все возможности их увеличения практически исчерпаны. Например, ракета «Протон М» выводит груз 23,7 *т* на орбиту 220 *км*, что составляет 3,4 % от стартового веса 705 *т*. При высоте 36000 *км* полезный груз для этой ракеты составляет 3,3 *т* или 0,5 % от стартового веса. В данной работе, состоящей из двух частей, предлагается широкое использование электрической энергии для увеличения УИ ракет стартующих с земной поверхности, поэтому концепция построения космических аппаратов полностью изменяется. Известно, что первой попыткой использования электричества для увеличения УИ была работа в 1929 г. будущего академика В.П.Глушко, с графитовым стержнем, размещённым непосредственно в КС для ЖРД. Учёным Франклином Чанг-Диазом в 1979 г. был предложен двигатель VASIMR с накачкой СВЧ энергии в аргоновую плазму при фокусировке её сверхпроводящими магнитами. Однако достигнутая тяга в несколько ньютонов при большой мощности энергопотребления и весе делает его малоперспективным. Известные конструкции высотных ракетных двигателей – плазменные, ионные, холловские, электротермические, магнитоплазмодинамические и другие, имеют небольшую единичную тягу, что ограничивает область их применения.

Здесь не рассматриваются особенности построения мощных электрогенераторов, в том числе на основе сверхпроводников и прочих. Однако, учитывая, что около 90 % от стартового веса космического аппарата (КА) составляет топливо, то увеличение УИ при старте с поверхности Земли хотя бы в 1,5 раза позволит уменьшить начальный вес ракеты в ~2,4 раза для достижения первой космической скорости и в ~3,5 раза для второй космической скорости. Следовательно, эффективность использования ракеты значительно увеличивается с ростом УИ, который ограничивается теперь весом, мощностью и к.п.д. современных или будущих электрогенераторов, а не одной теплотворной способностью топлива. Недавно были созданы перспективные, опытные образцы электрогенераторов серии МЭГ мощностью 6-15 *кВт* и весом 4,5-9 *кг* компании «НаукаСофт», позволяющие в будущем изготовить такой малогабаритный ЖРД. Следует заметить, что увеличение УИ в 1,5 раза выбрано для сравнения, а предел увеличения УИ определяется, в основном, величиной используемой электрической мощности в ЖРД нового типа и может возрасти многократно.

Построение одноступенчатого космического аппарата. Для достижения главной цели – увеличения УИ для ЖРД, были сделаны соответствующие расчёты и проведён ряд опытов и экспериментов, которые показали реальную возможность разработки новой конструкции ЖРД, используя модифицированные горючее и окислитель. Концепция построения малогабаритного одноступенчатого КА содержит следующие принципиальные положения:

1) ограничение диаметра камеры сгорания (КС) до 60-80 *мм*, при значительном уменьшении сечения в критической части и соответствующем увеличении приведённой длины пролёта $L_{пр}$ для газов в КС, равной отношению объёма КС к площади критического сечения S_{Cr};

2) увеличение рабочего давления до $P_{кс}$=40-50 *МПа* в КС из нового, жаростойкого сплава повышенной прочности и высокой теплопроводности;

3) повышение средней температуры $T_{кс}$ в КС и критическом сечении T_{Cr}, при использовании жаростойких покрытий;

4) внедрение модифицированных горючего и окислителя;

5) работа встроенных в КС импульсных ионизаторов газов на основе мощных потоков рентгеновского излучения с использованием эффекта Комптона;

6) отказ от сопла Лаваля и замена его на предварительное коническое сопло;

7) использование энергии электромагнитного ВЧ поля для основной ионизации и дополнительного ускорения сверхзвукового потока газов в предварительном, коническом сопле при его подогреве низкотемпературной плазмой (НТП);

8) построение двигателя большой тяги на основе множества малых, однотипных двигателей, то есть использование принципа по типу «пчелиных сот» из множества шестигранников;

9) регулирование полной мощности двигателя и вектора тяги, изменением объёма подаваемого горючего в боковые двигатели, то есть отказ от вспомогательных двигателей;

10) дополнительное ускорение потока газов электрическим полем в протяжённом, линейном ускорителе ионов (ЛУИ) с магнитной фокусировкой для электронов.

Все десять вышеназванных положений взаимосвязаны, вследствие использования определённых физических законов положенных в основу достижения главной цели – увеличения УИ и тяги ЖРД. Например, рост давления и температуры в КС ограничивается её диаметром, точнее – прочностью и теплопроводностью используемого материала, поэтому в настоящее время он составляет 350-480 *мм*, при огромном расходе не полностью сгорающего в КС топлива [4]. Также следует учитывать значительные потери энергии в габаритных КС из-за возникающих мощных, механических колебаний турбулентных потоков газов в КС, обусловленных большими градиентами температуры и скоростей не полностью сгорающего топлива и, особенно, компоненты идущей на тепловую завесу. Это хорошо проявляется при старте тяжёлых ракет в виде мощного низко- и среднечастотного рокота двигателей, приводившего ранее к разрушению самого двигателя и огромной длине шлейфа догорающего топлива извне сопла. Понятно, что чем больше давление в малогабаритной КС, тем выше получаемая в ней температура, полнее сгорание топлива

и больше УИ на выходе из сопла, этим объясняются три первых пункта. Далее, предлагается разделение высокоэффективного сгорания модифицированных горючего и окислителя при повышенном давлении в изобарной или скоростной КС, с последующим дополнительным подогревом сверхзвукового потока газов электромагнитным ВЧ полем в предварительном, коническом сопле. Отказ от профилированного сопла Лаваля обусловлен самой конструкцией нового ЖРД с использованием подогрева сверхзвукового потока газов плазмой в малогабаритном, коническом сопле. Максимальный коэффициент расширения предварительного, конического сопла не более ~200 по площади (>3000 по давлению). На рис.1 изображена упрощённая схема ЖРД, предлагаемая для построения по новой концепции, состоящая из основного блока и линейного ускорителя ионов/атомов, используемого на высотах более 50 *км* и в космосе. Охлаждаемая КС (1) малого диаметра сможет выдержать более высокое внутреннее давление газов (2), а металлокерамический охлаждаемый предварительный конус (4) позволит проникнуть мощному электромагнитному ВЧ полю от внешнего индуктора/индукторов (5) и дополнительно подогреть сверхзвуковой газовый поток плазмой. Встроенный ионизатор (8) предназначен для образования направленного потока рентгеновских квантов ионизующих плотный поток атомов и молекул в объёме КС и за критическим сечением (3).

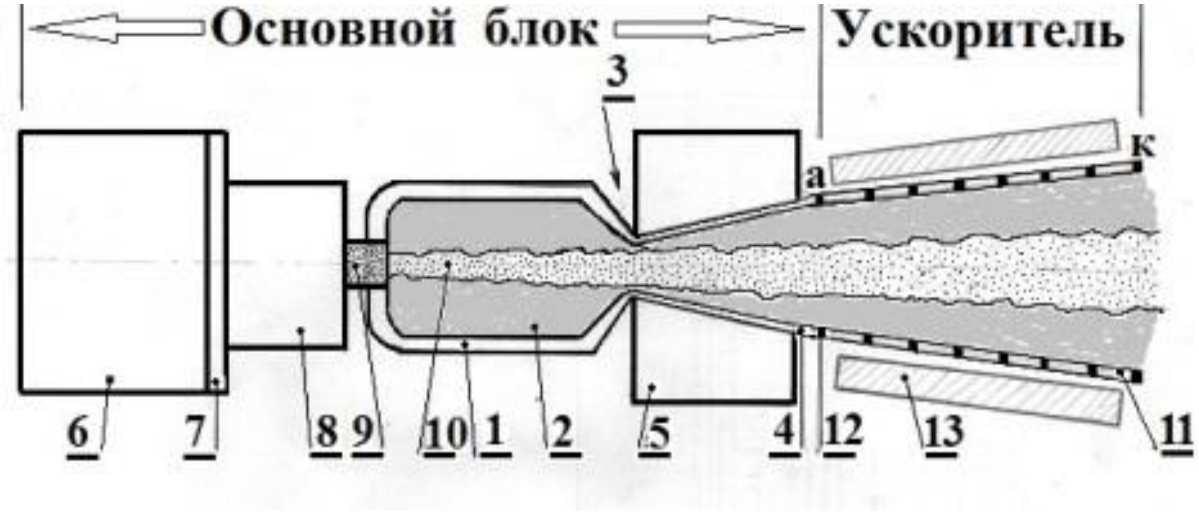


Рисунок 1. Корпус КС -1; объём КС -2; критическое сечение -3; предварительное коническое сопло -4; ВЧ индуктор -5; генератор электроэнергии -6; изолятор -7; ионизатор -8; анод -9; пучок рентгеновских квантов -10; линейный ускоритель ионов (ЛУИ) -11; металлические кольца -12; фокусирующие магниты -13.

Давно известно, что принудительная ионизация любой топливной смеси увеличивает количество свободных радикалов и электронов, являющихся химически более активными, что значительно повышает качество сгорания любого топлива [5]. Это приводит к снижению доли не сгоревшего топлива и повышению к.п.д. любого теплового процесса, в том числе для ЖРД, в частности. Поэтому импульсная мощность одного ионизатора (8) должна составлять ~1 *МВт*, при средней мощности около 0,50-0,75 *кВт,* что позволит работать при давлениях в КС до 15 *МПа*. В случае использования анода охлаждаемого жидким кислородом, средняя мощность ионизатора может быть увеличена более чем в 10 раз, что позволит увеличить эффективность работы всего ЖРД на больших высотах при использовании блока ЛУИ. Площадь заземлённого анода (9) ионизатора примерно равна площади S_{Cr}. Количество соединённых между собой двигателей (рис. 2) набирается из множества шестигранников, причём их количество может быть равно n = 1, 3, 7, 20, 38 … и более. Дополнительный блок ЛУИ (11) состоит из металлических колец (12) и керамических, охлаждаемых конусов, соединённых в монолитную конструкцию и подключаемую к аноду с низким потенциалом в точке «А» и катоду с высоким напряжением в точке «К». Металлические, тугоплавкие, охлаждаемые кольца (12) в форме тора служат для увеличения прочности и выравнивания потенциала вдоль продольной оси ЛУИ, а их количество N = 5-10. Вокруг блока ЛУИ (11) располагается система магнитов (13) для фокусировки электронов в центре ускорителя, с целью компенсации ОПЗ пролетающих с ускорением ионов (рис.3).

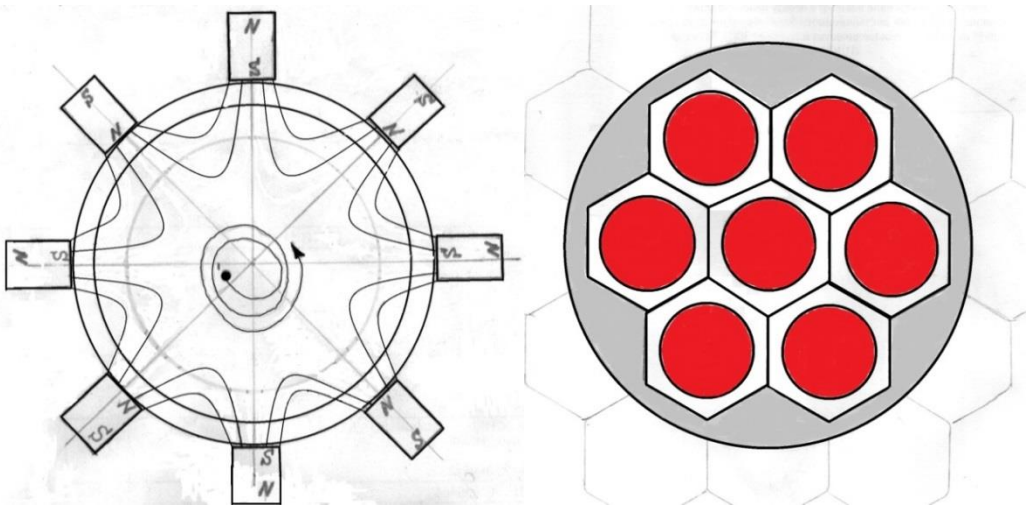


Рисунок 2. Форма связки множества

Рисунок 3. Вид линейного ускорителя. ЖРД для n=7 ионов со стороны катода

Каждое тугоплавкое, металлическое кольцо соединяется со ступенью электронного умножителя постоянного напряжения высоковольтного генератора Дж.Кокрофта-Э.Уолтона работающего на повышенной частоте. Собственно, предварительное коническое сопло в связке с ЛУИ будет являться своеобразным (ломаным) соплом Лаваля при полёте на высотах до 50 *км*. При включении ЛУИ на высотах более 50 *км* и в космосе, будет происходить дополнительное ускорение электростатическим полем ионов, увлекающих основной газовый поток, увеличивая максимальную тягу, соответственно.

Основной причиной уменьшения диаметра КС и конического сопла, являются закономерности образования НТП при воздействии электромагнитного ВЧ поля на движущиеся через предварительное коническое сопло плотные, сверхзвуковые, ламинарные потоки газов. Допустим далее для всех расчётов, что происходит горение керосина с азотной кислотой. Для индукторов простого типа, в виде облегающего всё предварительное коническое сопло соленоида, появляются прилегающие к внутренней поверхности потоки, так называемых, «горячих» электронов с электронной температурой T_e значительно превышающей температуру входящего газового потока. Движущиеся по кольцевым орбитам электроны со скоростями более тепловой $V_{et}=(8k_Б T_e/\pi m_e)^{1/2}$, (где $k_Б$ – постоянная Больцмана, m_e – масса электрона), разогреваются электромагнитным ВЧ полем, ускоряясь при движении за время одного полупериода ВЧ напряжения. Средняя скорость электронов V_{et}~380 *км/с* при T_e~3750 ^0K, движущихся поперёк газового потока. При $P_{кс}$=15 *МПа* скорость газов через критическое сечение S_{Cr} составляет около a_{Cr}≈1 *км/с*, а в расчётном сечении S_a скорость газов увеличивается до a_a>3 *км/с* из-за дополнительного подогрева плазмой. Ускоренные, «горячие» электроны будут отдавать свой импульс при ударах окружающим атомам и молекулам, ионизируя их и передавая им свою энергию, накопленную при ускорении, повышая их среднюю температуру и скорость, соответственно. Ионы, сталкиваясь с нейтральными молекулами, также повышают их скорость и температуру в соответствии с распределением Джеймса Максвелла. Величина повышения температуры подогрева и скорость сверхзвукового потока газа определяются удельной мощностью электромагнитного ВЧ поля, которая должна значительно превышать удельную мощность, затраченную на разогрев и ускорение газов в КС. Проникновение поля в образовавшуюся плазму определяется её проводимостью и концентрацией ионов газа, причём сложно зависит от частоты, поперечного сечения сопла, а также ряда других параметров молекул для газов, что показано в работе [6]. Очень важно, чтобы к моменту пересечения расчётного сечения S_a ионы и окружающие их нейтральные молекулы имели максимально возможную скорость, тогда УИ, определяемый средней скоростью газов a_a в сечении S_a, будет максимален. То есть сечение S_a должно совпасть с максимумом температуры $T_{макс}$. Так как тяга ЖРД определяется произведением массы пролетающих газов в единицу времени на их среднюю скорость a_a, то есть пропорциональна расходу топлива, то при её увеличении можно пропорционально уменьшить расход топлива. Это и означает увеличение эффективности теплового процесса для ЖРД при соответствующем увеличении УИ. Преимуществом предварительного, конического сопла с внешним подогревом сверхзвукового газового потока НТП является то, что газ уже ускорен до средней скорости около 1 *км/с* и разогрет свыше 2500 ^0K поэтому его дальнейший подогрев до $T_{макс}$=4000-6000 ^0K и соответствующее ускорение молекул/ионов будет значительно облегчено, что и явится основной причиной повышения эффективности работы ЖРД и всего КА.

Ионизатор горячих газовых потоков высокой плотности. Ионизаторы различных веществ, по типу рентгеновской трубки, широко использу-

ются в промышленности, медицине, науке и технике, но могут быть использованы и в ракетостроении для создания высокой степени ионизации атомов и молекул в КС перспективных, малогабаритных ЖРД. Данный ионизатор имеет свои особенности, которые необходимо учитывать при расчёте и конструировании. Предлагается металлокерамическая конструкция с пористым, оксидным катодом косвенного накала, обладающего высокой надёжностью и долговечностью, а также относительно толстым, охлаждаемым анодом, содержащего тонкий, поверхностный слой тугоплавкого металла. Особенностью данного ионизатора газового потока высокой плотности и давлений >10 *MPa*, является использование явления фотолюминесценции в аноде от первичных рентгеновских квантов высоких энергий. Это позволяет индуцированному вторичному излучению проходить через относительно толстый слой металла охлаждаемого анода в рабочий газовый объём. Расчёты проводились для трансмиссионного медного анода толщиной 2 *мм*, покрытого слоем молибдена или вольфрама, а их результаты приведены в работах [7, 8], где подробно описана теория разработанного ионизатора. В литературе отсутствует описание подобных ионизаторов, работающих на просвет с многослойным, трансмиссионным анодом, обладающим повышенной эффективностью, которые бы использовались для активации процессов горения топлива в ЖРД. Здесь приводятся некоторые результаты, описывающие конструкцию ионизатора, предназначенного для встраивания в малогабаритные ЖРД, а также основные положения теории для происходящих физических процессов. На рис.4 представлена упрощённая конструкция ионизатора, где 1 – керамический корпус; 2 – вольфрамовая спираль; 3 – пористый, оксидный, подогреваемый катод; 4 – поток электронов; 5 – фокусирующая катушка; 6 – анод; 7 – медная охлаждаемая основа. Многослойный, трансмиссионный анод имеет диаметр D_a~8-10 *мм*. Из ионизатора выходит пучок рентгеновских квантов с энергией E_{Cu}=8,04 *кэВ*, для которых распределение по углу в диапазоне ускоряющего напряжения U_a=100-400 *кВ*, имеет косинусный вид. Постоянный ток анода составляет типичное значение i_a=2,5 *А*, что соответствует величине импульсной мощности ионизатора P_{imp}=250-1000 *кВт* и скважности импульсов Q=500-2000, если среднюю мощность ионизатора принять равной P_i=0,50-0,75 *кВт*, чтобы избежать сильного разогрева охлаждаемого анода. Пучок электронов (4) в ионизаторе движется со скоростью 0,55-0,83 от скорости света и при ударе о поверхность анода проникает туда глубоко, частично отражаясь от поверхности и диффузно рассеиваясь на керамических стенках. При движении электронов через поверхностный слой молибдена или вольфрама электроны тормозятся с испусканием сплошного спектра тормозного излучения, а также линий характеристического излучения.

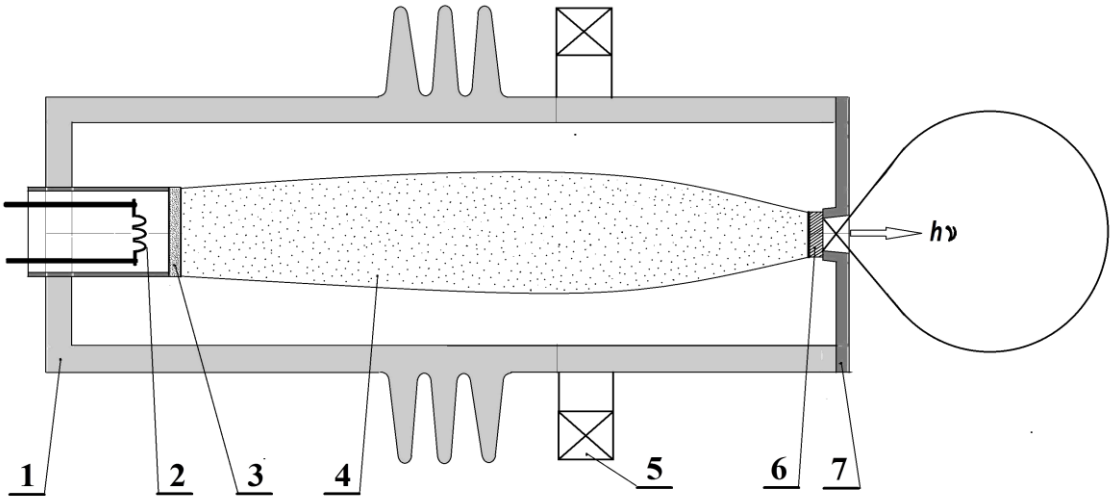


Рисунок 4. Упрощённая конструкция ионизатора для плотных потоков газов в КС малогабаритного ЖРД

Сплошной спектр тормозного излучения E_{hv} ограничен максимальной энергией падающих электронов E_o=100-400 *кэВ*. На него наложено множество узких пиков с полушириной от 7 до 57 *эВ* характеристического излучения большой интенсивности. Расчётная концентрация рентгеновских квантов значительно превышает концентрацию атомов/молекул для плотного потока газов, а учитывая, что один квант рентгеновского излучения обладает энергией намного превышающую тепловую энергию атомов/молекул в КС, то коэффициент ионизации будет близок к ~1. Расчётная зависимость интенсивности для полной суммы характеристического и тормозного рентгеновского излучения вольфрамового слоя анода толщиной 40 *мкм* при E_o=400 *кэВ* показана на рис.5.

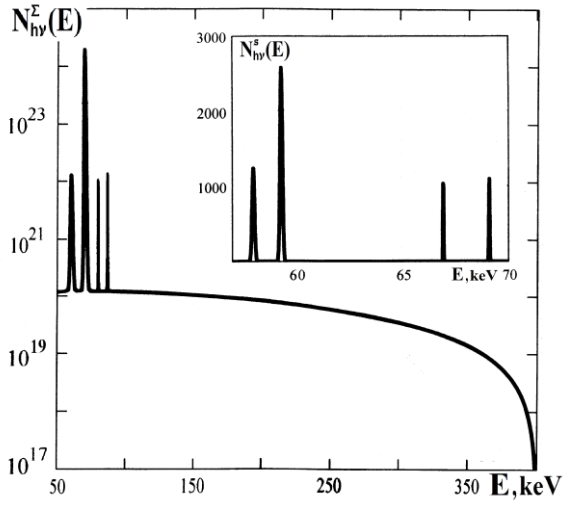


Рисунок 5. Расчётная зависимость функции интенсивности характеристического и тормозного рентгеновского излучения вольфрамового слоя анода толщиной 40 мкм при Ео=400 кэВ

На вставке рис.5 показана расчётная сумма в линейном масштабе всех составляющих характеристического рентгеновского излучения для интервала E=57-70 *кэВ* без учёта тормозного излучения для E_o=200 *кэВ*.

Была рассчитана интенсивность тормозного и характеристического излучения для вольфрама по предложенным автором формулам, которые качественно соответствуют экспериментальным результатам. Для принятой модели экстраполированного пробега электронов R_{ex} с максимальной энергией в интервале E_o=100-400 *кэВ* с учётом их рассеивания и рекомбинации, получается толщина слоёв: от 7,5 до 40 *мкм* для вольфрама и от 15 до 80 *мкм* для молибдена. Полученное аналитическое значение для функции интенсивности в виде суммы тормозного и характеристического излучения, в соответствии с аппроксимацией Гаусса, позволило решить определённый интеграл и получить численное значение концентрации рентгеновского излучения, возбуждаемого фотолюминесценцией в медном трансмиссионном аноде толщиной 2 *мм*. На основании вычисленной интегральной концентрации ~$2\cdot10^{27}$ $м^{-3}$ возбуждаемого характеристического рентгеновского излучения в меди с энергией квантов E_{Cu} = 8,04 *кэВ*, был определён коэффициент суммарного поглощения газов равный k_g=0,82 для рентгеновского излучения в плотном газовом потоке с давлением 15 *МПа* в КС для ЖРД длиной 100 *мм* по закону Бугера-Ламберта с атомами: C, N, O, H и молекулами CO_2, H_2O, N_2.

Подогрев потока газов плазмой с электромагнитным ВЧ полем. В наших расчётах потоки газов считались безвихревыми и ламинарными, а перенос тепла излучением НТП не учитывался вследствие низких расчётных температур для электронов T_e<7500 ^0K и для молекул, атомов, ионов T_a<6000 ^0K. Для эффективного подогрева потока сверхзвуковых газов в коническом сопле, автором предлагается использовать несколько коротких индукторов работающих на разных частотах. Допустим, что имеется три индуктора, работающие на частотах F_1=6,78 *МГц*, F_2=13,56 *МГц* и F_3=27,12 *МГц*. Основной генератор большой мощности работает на частоте F_1 и является задающим генератором для менее мощного генератора с частотой F_2, связанного индуктивно с генератором F_3. Расположение индукторов показано на рис. 6, где область, занятая плазмой, отделена от витков индукторов охлаждаемым, коническим, керамическим соплом специальной конструкции.

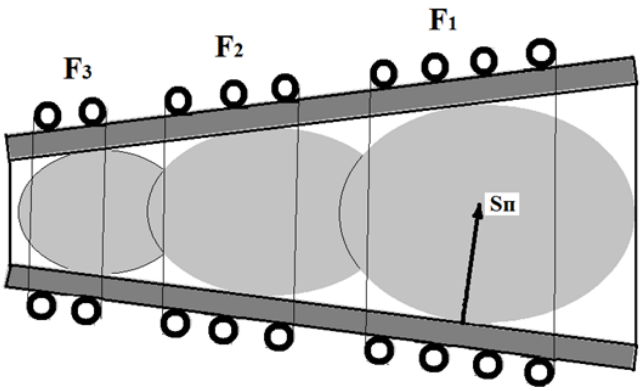


Рисунок 6. Схема предварительного конического сопла с тремя индукторами на рабочие частоты F_1, F_2=2·F_1 и F_3=2·F_2. Стрелка S_n – направление вектора Умова-Пойтинга для электромагнитной волны ВЧ поля.

Частоты F_1, F_2 и F_3 соответствуют тому, чтобы воздействие электромагнитного ВЧ поля, определяемое величиной скин-слоя Δ_P в нашей конструкции предварительного, конического сопла, происходило наиболее эффективно, а частоты находились в разрешённых диапазонах для промышленного использования по ГОСТ Р 51318.11-2006 «Совместимость технических средств электромагнитная. Промышленные, научные, медицинские и бытовые (ПНМБ) высокочастотные устройства». В противном случае, одновременная работа множества мощных генераторов может привести к сильным помехам радиосвязи на Земле, а эффективность подогрева газов плазмой резко снизится. Основной особенностью последовательности индукторов является то, что параметры образующейся НТП на входе первичного индуктора F_3 сильно зависят от проводимости втекающего газа, который обычно имеет небольшую проводимость σ_0<10 *Сим/м* для температур газов в критическом сечении T_{Cr}=3010-3086 ^0K, что соответствует расчётным давлениям в КС ~15-50 *МПа.* Этой величины σ_0 явно недостаточно для оптимального поглощения электромагнитного ВЧ поля и эффективного подогрева движущегося сверхзвукового потока газов в начале предварительного конического сопла даже при добавках различных металлов. В этом случае, короткий индуктор F_3 является основным, а подогреваемый газ является его нагрузкой и одновременно частью его магнитной системы. Электроны образуют короткозамкнутый виток виртуального трансформатора с вторичной обмоткой индуктора и очень большой плотностью тока, направленной навстречу первичному току. ЭДС индукции изменяется по закону электромагнитной индукции Фарадея. Если изменение магнитного потока равно Ф (*Вебер*), пронизывающего количество витков w_o с частотой F, изменяющейся по синусоиде, то мощность, излучаемой электромагнитной ВЧ энергии $P_и$ (*Вт*) индуктора, растёт с частотой и равна величине $P_и$=4,44·F·$I_и$·w_o·Ф·cos(φ), соответственно. Здесь $I_и$ – ток индуктора, *А*; φ – угол сдвига фазы между током и напряжением для индуктора. Когда электромагнитная ВЧ энергия проникает на глубину скин-слоя Δ_P, соизмеримого с входным радиусом $R_{вхс}$ для каждого индуктора, тогда на этой глубине поглощается около 87 % излучаемой энергии, разогревающей в таком случае движущийся газовый поток наиболее эффективно. В противном случае будет происходить поверхностный разогрев газовых потоков, а эффективность подогрева значительно снизится. Для случая подогрева плазмой сверхзвукового потока газов в предварительном, коническом сопле малогабаритного ЖРД, его размеры должны иметь оптимальные размеры индукторов из охлаждаемых трубок и быть согласованной нагрузкой для генераторов электромагнитной ВЧ энергии. В нашем расчётном случае ЖРД имел следующие габариты: для КС диаметр 60 *мм* и длину 100 *мм*, диаметр критического сечения D_{Cr}~10 *мм*, длина конического сопла 150 *мм*. В таком случае, оптимальный диаметр на выходе конического сопла составляет 60 *мм*. При давлении в КС ~50 *МПа,* длина конического сопла увеличивается до 215 *мм*, а диаметр на выходе конического сопла должен составлять 80 *мм*.

Значительно увеличить УИ простым увеличением теплотворной способности топлива невозможно, так как максимальная скорость газов в расчётном сечении V_{amax} пропорциональна корню квадратному из ограниченной теплотворной способности топлива $Q_т$. Поэтому для многократного увеличения УИ необходим значительный, дополнительный подогрев газов плазмой в предварительном, коническом сопле для увеличения локальной скорости газов и всего потока в целом. В известной работе Г.Н.Абрамовича [9, Т.1, С.212] рассматривалась задача такого дополнительного разогрева потока газов внешним источником, однако конечный отрицательный результат (для практического использования) выведен для прямой, цилиндрической трубы, что существенно для всего процесса расширения и ускорения газового потока. Рассмотрим значительно упрощённую теорию происходящих процессов для конического сопла ЖРД, основанную на расчёте величины максимума энергии подогрева плазмой сверхзвукового потока газов. Для процесса в расширяющемся коническом сопле и при отсутствии: теплообмена с внешней средой, технической работы и внутреннего трения, без учёта потенциальной энергии для газов, обобщённое уравнение Бернулли имеет следующий вид по вышеназванной работе [9, т.1]:

$$\frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + \int_1^2 \frac{dp}{\rho} + \int_1^2 \Delta i = 0 \qquad (1)$$

где: p – давление газа, *н/м*^{2}; ρ – плотность газа, *кг/м*^{3}; w – скорость газа, *м/с*; i=$C_P T$ – теплосодержание, *дж/кг*; C_P – удельная теплоёмкость, *дж/кг*^0K; T – температура, ^0K. Индексы 1 и 2 означают начальное и конечное состояние газа. Первое слагаемое связано с кинетической энергией, второе со статическим давлением, а третье слагаемое с теплосодержанием потока газа обусловленного внешним подогревом. Введём следующее соотношение: $(a_{Cr})^2$=k·p_1/ρ_1 – квадрат скорости газов, где a_{Cr} – скорость газов в критическом сечении S_{Cr}; k – показатель политропического процесса расширения и нагрева потока газа.

Примем, в первом приближении, что C_{P2}≈C_{P1}≈C_P, а подогрев плазмой равен разности T_2-T_1~ΔT. Решение для уравнения (1) находится при p/ρ^k=const, в виде полной суммы, включая оба решения для интегралов:

$$\frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + \frac{k}{k-1}\cdot\frac{p_1}{\rho_1}\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right] + \int_1^2 C_P \Delta T = 0 \quad (2)$$

Далее, преобразуем (2), с учётом соотношений: $p_1=p_{кр}$, $p_2=p_c$; $\mathcal{E}_C=p_{Cr}/p_c$, $\mathcal{E}_C$ – степень расширения потока газов в сопле по давлению. Также имеем: $w_1=a_{Cr}$, $\lambda_c=w_2/a_{Cr}$ - безразмерная скорость потока в критическом сечении. Получим уравнение в безразмерной форме:

$$\lambda_C^2 = 1 + \frac{2}{k-1}\left[1 - (\varepsilon_c)^{\frac{1-k}{k}}\right] + 2\frac{c_P}{a_{Cr}^2}\int_2^1 \Delta T \quad (3)$$

Для решения интеграла в уравнении (3), сделаем следующие упрощающие предположения – температура вдоль сопла растёт с T_{Cr} до максимума T_{max} и затем уменьшается до некоторой величины $T_{min}\geq T_{Cr}$, причём зависимость носит квадратичный или близкий к линейной вид. Введём следующие постоянные: $L_C=h/R_{Cr}$, где L_C – безразмерная приведённая длина сопла, h – длина нагреваемой части сопла, *м*; R_{Cr} – радиус критической части сопла, *м*; $f_C=S_c/S_{Cr}$ – степень расширения сопла по площади, где S_c – сечение в любой части сопла, $м^2$. Тогда после несложных преобразований, с учётом того, что определённый интеграл в уравнении (3) представляет собой некоторое число β, получим окончательный вид уравнения для плазменного подогрева, усреднённого по всей длине конического сопла:

$$\lambda_C^2 = 1 + \frac{2}{k-1}\left[1 - (\varepsilon_c)^{\frac{1-k}{k}}\right] + 2\frac{c_P}{a_{Cr}^2}\beta\left[1 + L_C\cdot tg(\alpha)\right](T_{max} - T_{Cr}) \quad (4)$$

где $tg(\alpha)$ – тангенс угла наклона направляющей конического сопла, β=2/3 для квадратичной зависимости $T=T(x)$ или β=1 для линейной. При отсутствии внешнего подогрева ЭМ поля $T_{max}=T_{Cr}$ и формула (4) совпадает с известной формулой Г.Н.Абрамовича [9, т.1, с.34]. Результаты расчётов по формуле (4) приведены на рис.7 для сопла без подогрева, то есть при $T_{max}=T_{Cr}$ для значений показателя процесса политропического расширения k в интервале от 1,10 до 1,30. Видно, что для значений $\varepsilon_C \geq 100$ величина относительной скорости стремится к насыщению, поэтому можно выбрать величину ε_C в интервале от 100 до 150 определяемом, в основном, конструктивными условиями. Значение k=1,10 соответствует одноатомным газам, а k=1,30 многоатомным газам.

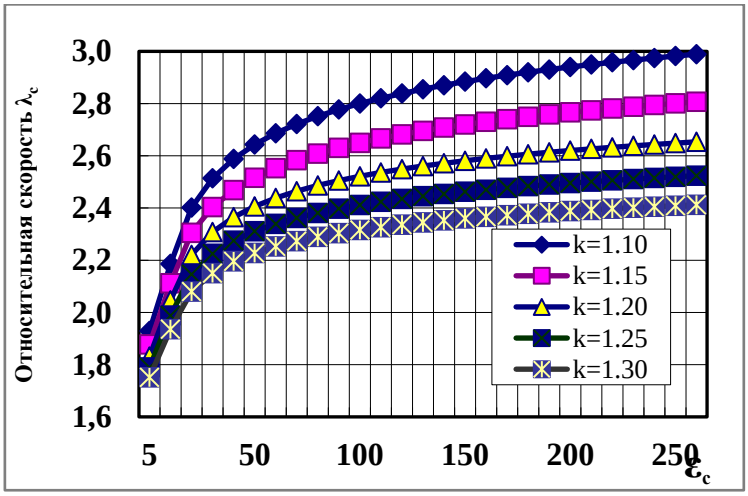
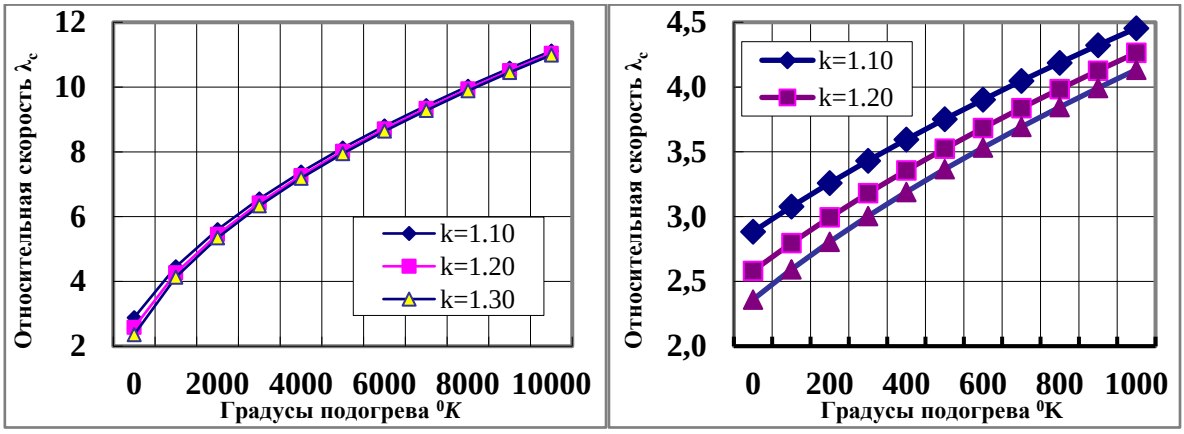


Рисунок 7. Зависимость относительной скорости газов λC в коническом сопле от коэффициента расширения сопла по давлению ЄС.

Дополнительный подогрев сверхзвукового потока газов плазмой приводит к диссоциации многоатомных молекул и увеличению доли одноатомных молекул, что уменьшает величину показателя k, повышая относительную скорость λ_C и к.п.д. теплового процесса расширения газов в сопле и всего ЖРД в целом. Из расчётов следует, что даже для относительно небольшого подогрева газов плазмой, около 1000 ^0K, относительная скорость газов λ_C существенно возрастает до величины 4,2-4,4, что соответствует УИ для топлива из жидкого водорода и кислорода. На рис.8.а приведены результаты расчётов по формуле (4) зависимости относительной скорости λ_C от величины подогрева газов по всей длине конического сопла. Параметры соответствовали топливной смеси керосина с азотной кислотой, в интервале до 1000 ^0K, при f_C=25; L_C=25 (для R_{Cr}=6 *мм*, h=0,15 *м*); ε_C=150; $\alpha=9^0$, a_{Cr}=1026 *м/с*; C_P=1,8 *кДж/кг^{0}К*. На рис.8.б приведены результаты расчётов для величины подогрева газов сопла до 10000 ^0K из которого следует, что относительная скорость газов увеличивается до величины λ_C=11, что соответствует УИ около ~10 *км/с*. Так как площадь сопла, прилегающая к сечению S_{Cr}, значительно уменьшена, то тепловой поток через стенки также уменьшается, что позволит увеличить температуру и скорость газового потока через охлаждаемое сопло.



а) б)

Рисунок 8. Зависимость относительной скорости λC от величины подогрева плазмой

При величине объёма КС равном $V_{кс}$=(2,5-2,7)·10^{-4} *м*^{3} и возможных сечениях S_{Cr}=(0,7854-0,5027)·10^{-4} *м*^{2}, значение приведённой длины $L_{пр}=V_{кс}/S_{Cr}$ для КС может достигать величины 3,4-5,2 *м*. Такой высокий показатель $L_{пр}$ будет также способствовать более полному сгоранию топлива в КС и повышению УИ, соответственно. Более строгий расчёт подогрева электромагнитным ВЧ полем плазмы сверхзвукового потока газов в коническом сопле при высоких температурах, должен проводиться с использованием теории, учитывающей процессы в химически активной плазме на основе уравнений Максвелла, что подробно рассмотрено в работе [10].

Заключение. Согласно проведённым расчётам и моделированию, при строго определённых геометрических размерах для КС и предварительного конического сопла, возможно значительное увеличение УИ для малогабаритного ЖРД с использованием импульсного ионизатора в КС и дополнительного подогрева сверхзвукового потока газов на всей длине предварительного конического сопла мощным, электромагнитным ВЧ полем. Предложенная новая концепция построения малогабаритного ЖРД включает десять взаимосвязанных принципов, выполнение которых позволит создать одноступенчатый космический аппарат для космических полётов при увеличении УИ и эффективности использования топлива.

Список литературы:

1. Володин В.А. Конструкция и проектирование ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1971, 336 стр.
2. Воробей В.В. Технология производства ЖРД.М.: МАИ, 2001, 496 стр.
3. Пономаренко В.К. Ракетные топлива. С-Пб.: ВИККА им. Можайского, 1995, 619 стр.
4. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Справочник в 10 томах под редакцией академика В.П.Глушко. М.: ВИНИТИ АН СССР, 1971-1979.
5. Степанов Е.М., Дьячков Б.Г. Ионизация в пламени и электрическое поле. М.: Металлургия, 1968, 312 стр.
6. Воронин С.Т. Численное моделирование сверхзвукового потока газов в коническом сопле с локальным подогревом плазмой и результаты экспериментов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023, т. 24, № 2, с. 309-324. DOI: 10.31772/2712-8970-2023-2-309-324.

7. Воронин С.Т. Ионизатор горячих газовых потоков высокой плотности рентгеновским, характеристическим излучением при фотолюминесценции комбинированного анода трансмиссионного типа. // Физические основы приборостроения. 2022, т.11, №3 (45), с.14-21. DOI: 10.25210/jfop-2203-014021
8. Воронин С.Т. Ионизация горячих газовых потоков высокой плотности рентгеновским излучением при фотолюминесценции анода трансмиссионного типа. // Проблемы физики, математики и техники. 2023, - № 1 (54), с. 13-19. DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2023_1_54_13. – EDN: EIPASY
9. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика, 2 тома. М.: Наука. 1991.
10. Voronin S.T. Numerical simulation of supersonic gas flow in a conical nozzle with local plasma heating.// Technical Physics Letters. 2022. Vol.48. №5. P.62-66. DOI: 10.21883/TPL.2022.05.53485.19175.