

## ПЕРСПЕКТИВЫ УЛУЧШЕНИЯ МАССОГАБАРИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АБЛЯЦИОННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А.В. Богатый, Г.А. Дьяконов, И.Л. Нечаев, Г.А. Попов  
(НИИ ПМЭ МАИ)

А.Ю. Марьяшин, К.Г. Халапян  
(ООО «Ньюкон»)

*Исследуются перспективы улучшения массогабаритных характеристик абляционных импульсных плазменных двигателей (АИПД), предназначенных для малых космических аппаратов (МКА) массой до 500 кг. Рассмотрены возможности снижения массы основных составных частей АИПД, таких как блок накопителя энергии, система хранения и подачи рабочего тела, блоки электроники и другие конструкционные элементы. Показано, что наиболее перспективным путём улучшения массогабаритных характеристик АИПД является облегчение блока накопителя энергии за счёт оптимизации его энергоосдержания и применения силовых конденсаторов с повышенной удельной энергоёмкостью. В ближайшей перспективе возможно снижение полной массы АИПД приблизительно на 20%.*

**Ключевые слова:** малые космические аппараты, абляционный импульсный плазменный двигатель, улучшение массогабаритных характеристик.

В настоящее время в связи с развитием малых космических аппаратов (МКА) массой до 500 кг возникает потребность в высокоэффективных электроракетных двигательных установках (ЭРДУ) малой тяги, сочетающих малую массу и потребляемую мощность с большим ресурсом и суммарным импульсом тяги. Одним из перспективных направлений является создание ЭРДУ на основе абляционных импульсных плазменных двигателей (АИПД). Основными преимуществами АИПД, существенными для применения в двигательных установках МКА малой мощности, являются простота конструкции, низкая стоимость, отсутствие зависимости удельных характеристик от потребляемой мощности [1, 2]. Цель данной работы – определение возможностей дальнейшего повышения конкурентоспособности АИПД путём улучшения их массогабаритных характеристик.

В НИИ ПМЭ МАИ совместно с ОАО НИИЭМ на основе АИПД был создан ряд ЭРДУ для МКА, которые приведены в табл. 1 [2]. В настоящее время большинство из представленных в таблице двигательных установок доведены до стадии лётных образцов. Там же для сравнения приведены характеристики наиболее близкой по потребляемой мощности и выполняемым задачам ЭРДУ на основе стационарного плазменного двигателя СПД-50, установленной на МКА «Канопус-В» [3, 4]. Наиболее важными для практического применения ЭРДУ являются такие её характеристики, как суммарный импульс тяги  $P_{\Sigma}$ , определяющий характеристическую скорость МКА, потребляемая мощность  $N$  и полная масса ЭРДУ  $M_{\text{ЭРДУ}}$ , включая массу системы питания и управления (СПУ).

Для сравнения ЭРДУ различных типов наиболее

Таблица 1

**Характеристики ЭРДУ на основе АИПД и ЭРДУ СПД-50**

Характеристика	АИПД-8	АИПД-45-2	АИПД-155	АИПД-95	СПД-50
Энергия разряда, Дж	8	55	88	155	–
Потребляемая мощность, Вт	10 – 20	75 – 150	70 – 140	170	316
Ресурс по запасу рабочего тела, ч	1530	3860	5950	3970	830
Удельный импульс тяги, м/с	5200	11000	13200	16000	9000
Средняя тяга, мН	0,11 – 0,22	1,44 – 2,9	1,4 – 2,8	3,5	14,0
Суммарный импульс тяги, кН·с	0,6	20	30	50	42
Масса рабочего тела, кг	0,12	1,8	2,4	3,15	5,2
Полная масса ЭРДУ, кг	2,0	10,5	14	20	30
Цена тяги, Вт/мН	91	52	52	49	23
Отношение тяги к массе ЭРДУ, мкН/кг	110	274	200	175	467
Эффективный удельный импульс тяги, м/с	300	1900	2140	2600	1400

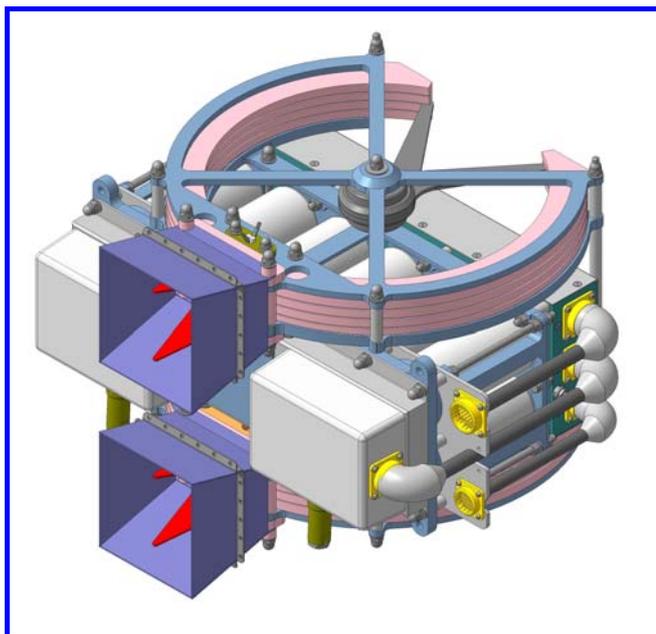


Рис. 1. Внешний вид ЭРДУ АИПД-45-2

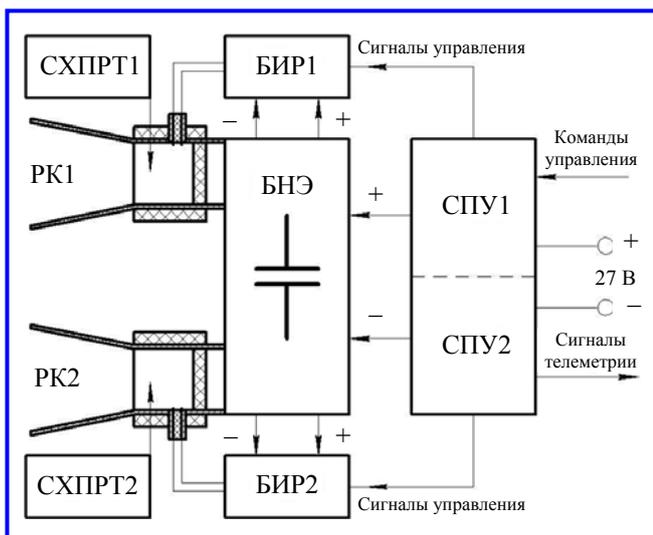


Рис. 2. Структурная схема ЭРДУ АИПД-45-2

показательны их удельные характеристики, такие как:

- цена тяги  $C_T$  равная отношению средней потребляемой мощности ЭРДУ к её средней тяге;
- отношение средней тяги ЭРДУ к её полной массе;
- эффективный удельный импульс тяги  $J_{эф}$  равный отношению суммарного импульса тяги ЭРДУ к её полной массе.

Из данных, приведенных в табл. 1, следует, что импульсные плазменные двигатели, уступая стационарным в тяговых показателях, имеют меньшие массогабаритные показатели, что численно отражается в повышенном эффективном удельном импульсе тяги. При уменьшении размерности двига-

тельной установки это превосходство растёт, так как удельные характеристики стационарных двигателей, в отличие от импульсных, существенно снижаются при уменьшении потребляемой мощности [5]. Однако для повышения конкурентоспособности ЭРДУ на основе АИПД для МКА необходимо дальнейшее улучшение их массогабаритных характеристик.

**Структура полной массы ЭРДУ на основе АИПД.** В настоящее время в НИИ ПМЭ МАИ ведутся работы по созданию более эффективных и при этом более лёгких образцов импульсных плазменных двигателей. Соотношение массы каждого из элементов конструкции оценивается на примере наиболее отработанной ЭРДУ АИПД-45-2 полной массой 10,5 кг, рассчитанной на суммарный импульс тяги  $P_{\Sigma} = 20$  кН·с, среднюю тягу  $P_{ср} = 2,9$  мН и потребляемую мощность  $N$  до 150 Вт. Внешний вид и структурная схема ЭРДУ АИПД-45-2, предназначенной для МКА-ФКИ (ПН2) [6], представлены на рис. 1, 2.

В состав ЭРДУ входят:

- рабочее тело (РТ) и система хранения и подачи рабочего тела (СХПРТ);
- блок накопителя энергии (БНЭ) с одним или несколькими разрядными каналами (РК);
- блок иницирования разряда (БИР);
- блок системы питания и управления (СПУ);
- конструкционные элементы.

При этом с целью повышения надёжности двигательной установки перечисленные элементы могут резервироваться, как показано на рис. 2. Двигательная установка выполнена в виде моноблока, поставляемого и устанавливаемого на КА в сборе. Это позволяет:

- максимально уменьшить массу и габаритные размеры ЭРДУ;
- упростить монтаж и проведение испытаний ЭРДУ;
- исключить из состава ЭРДУ высоковольтные кабели и разъёмы.

Полная масса ЭРДУ АИПД-45-2  $M_{ЭРДУ} = 10,5$  кг, в том числе:

- масса запаса рабочего тела  $M_{рт} = 1,8$  кг;
- масса системы хранения и подачи рабочего тела  $M_{СХПРТ} = 1,8$  кг;
- масса блока накопителя энергии с двумя разрядными каналами  $M_{БНЭ} = 4,0$  кг;
- масса блоков иницирования разряда (два БИР, работающие на два разрядных канала)  $M_{БИР} = 0,6$  кг;
- масса блока системы питания и управления  $M_{СПУ} = 1,5$  кг.

Оставшаяся  $M_{доп} = 0,8$  кг приходится на силовые узлы

крепления АИПД, экраны разрядных каналов, плату разъемов, кабели межблочного соединения и другие, не входящие в основные блоки, элементы конструкции.

**Основные составляющие полной массы АИПД.** Основными составляющими полной массы АИПД являются масса БНЭ и масса рабочего тела с системой его хранения и подачи. Вместе они составляют 70 – 75 % его полной массы.

**Масса БНЭ.** Масса БНЭ определяется удельной энергоёмкостью накопительных конденсаторов, а также массой разрядных шин, изоляторов, силовых элементов конструкции и плотностью компаунда, используемого для заливки высоковольтных цепей. Удельная энергоёмкость лучших современных высококачественных импульсных конденсаторов составляет  $\omega_C = 25 - 30$  Дж/кг.

Из опыта конструирования АИПД следует, что масса остальных элементов конструкции БНЭ приблизительно пропорциональна суммарной массе конденсаторов  $M_C$ :

- масса разрядных шин, электродов разрядных каналов и других медных элементов разрядной цепи – 20 – 30 % массы конденсаторов  $M_C$ ;
- масса изоляторов, наибольший вклад в которую вносит масса заливочного компаунда – 20 – 30 %  $M_C$ ;
- масса силовых элементов конструкции (БНЭ, как правило, является основным силовым элементом АИПД в целом) – 40 – 50 %  $M_C$ .

Масса БНЭ в целом приблизительно равна удвоенной массе конденсаторов и пропорциональна энергии разряда:

$$M_{\text{БНЭ}} \approx (1,0 + 0,3 + 0,2 + 0,5)W/\omega_C = 2W/\omega_C.$$

Таким образом, основными направлениями снижения массы БНЭ следует считать уменьшение (оптимизацию) энергосодержания конденсаторной батареи и применение конденсаторов повышенной энергоёмкости.

**Масса рабочего тела и системы хранения и подачи рабочего тела.** Масса запасаемого рабочего тела  $M_{\text{рт}}$  определяется заданным суммарным импульсом тяги  $P_{\Sigma}$  и характерным для данного двигателя удельным импульсом тяги  $J_{\text{уд}}$  в соответствии с соотношением:

$$M_{\text{рт}} = P_{\Sigma}/J_{\text{уд}}. \quad (1)$$

Наибольшую неопределенность в соотношении (1) вносит зависимость удельного импульса от энергии разряда. В настоящее время получить такую зависимость расчётным путём не представляется возможным. Имеющиеся аналитические и численные модели ускорения плазмы в импульсных плазменных ускорителях, например [7], включают

варьируемые эмпирические коэффициенты, позволяющие подогнать расчётные осциллограммы тока и напряжения под экспериментально измеренные.

Однако имеющийся в НИИ ПМЭ МАИ большой опыт разработки и испытаний импульсных плазменных двигателей позволяет выявить простые эмпирические закономерности, общие для всего ряда лётных АИПД и их прототипов (см. табл. 1). В частности экспериментально полученная зависимость удельного импульса тяги от энергии разряда показана на рис. 3.

Из рис. 3 следует, что зависимость величины удельного импульса тяги АИПД от энергии разряда вполне удовлетворительно интерполируется эмпирической формулой:

$$J_{\text{уд}} [\text{м/с}] = 3000\sqrt[3]{W[\text{Дж}]}.$$

На рис. 3 показана также зависимость удельного импульса от энергии разряда для созданных в НИИ ПМЭ МАИ лабораторных образцов АИПД, интерполируемая аналогичной эмпирической формулой

$$J_{\text{уд}} [\text{м/с}] = 3600\sqrt[3]{W[\text{Дж}]}.$$

В отличие от лабораторных образцов, рассчитанных на получение максимально возможных удельных характеристик, таких как тяговая эффективность и удельный импульс тяги, лётные образцы АИПД, при проектировании, как правило, оптимизируются на достижение наибольшего суммарного импульса тяги. Это приводит к некоторой переразмерности поперечного сечения шашек рабочего тела и, соответственно, к

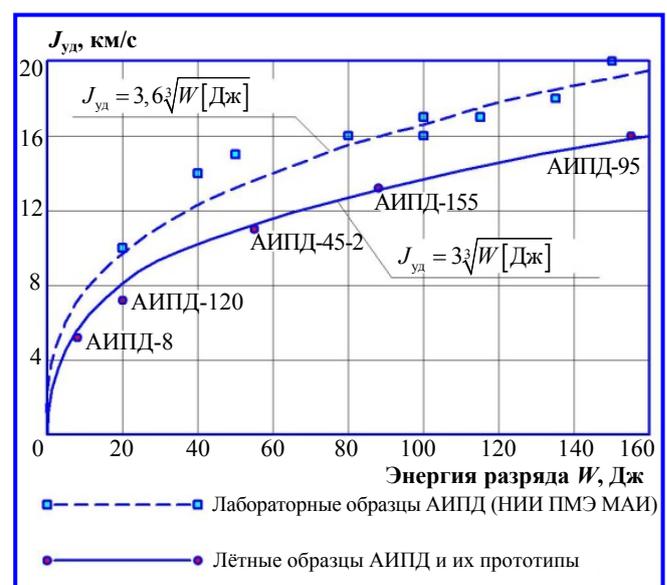


Рис. 3. Зависимость удельного импульса АИПД от энергии разряда

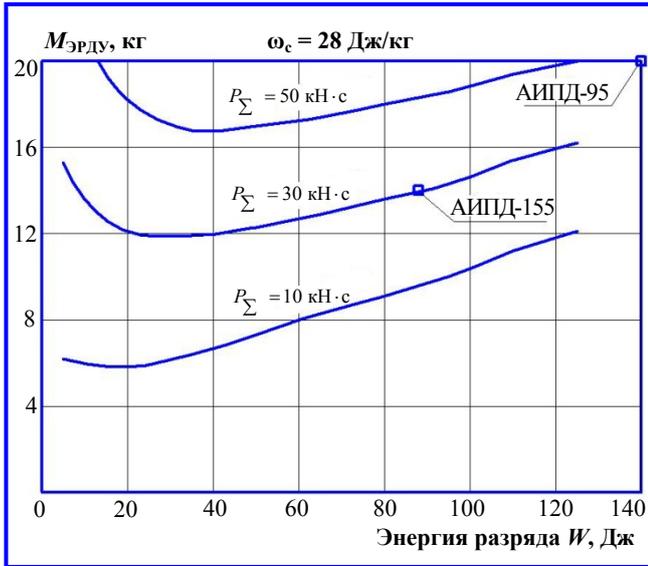


Рис. 4. Расчётная зависимость полной массы ЭРДУ с АИПД от энергии разряда

снижению удельного импульса тяги примерно на 20%. Как показывает опыт конструирования АИПД, сухая масса СХПРТ, включающая массу направляющих для подачи шашек, рычажно-пружинных механизмов и т. п., получается приблизительно равной массе запасаемого РТ:

$$M_{\text{СХПРТ}} \approx M_{\text{РТ}}. \quad (2)$$

Таким образом,

$$M_{\text{РТ}} + M_{\text{СХПРТ}} \approx 2P_{\Sigma}/J_{\text{уд}}. \quad (3)$$

Основными резервами снижения массы РТ и СХПРТ является, как следует из соотношений (1) и (2), повышение удельного импульса тяги и снижение массы конструктивных элементов СХПРТ.

**Возможности снижения массы ЭРДУ с АИПД путём оптимизации энергосодержания БНЭ.** Так как масса БНЭ пропорциональна энергии разряда, следует рассмотреть возможности снижения запасаемой энергии, естественно, при сохранении средней тяги и суммарного импульса тяги ДУ. Сохранение заданной средней тяги при уменьшении пропорционального запасаемой энергии единичного импульса тяги достигается простым увеличением частоты импульсов. Сложнее сохранить суммарный импульс тяги  $P_{\Sigma}$ , так как он пропорционален удельному импульсу  $J_{\text{уд}}$  в свою очередь зависящему от энергии разряда. Снижение удельного импульса  $J_{\text{уд}}$  влечёт за собой пропорциональное увеличение массы запасаемого РТ в соответствии с соотношением (3).

Соответственно

$$M_{\text{ЭРДУ}} \approx M_{\text{констр}} + 2W/\omega_c + 2P_{\Sigma}/J_{\text{уд}}, \quad (4)$$

где  $M_{\text{констр}} \approx 0,25M_{\text{ЭРДУ}}$ ,  $J_{\text{уд}} [\text{м/с}] = 3000\sqrt{W [\text{Дж}]}$ .

На рис. 4 представлены результаты оценочных расчётов по формуле (4) полной массы ЭРДУ в зависимости от энергии разряда при заданных суммарном импульсе тяги  $P_{\Sigma} = 10, 30, 50$  кН·с и удельной энергоёмкости конденсаторов  $\omega_c = 28$  Дж/кг, что соответствует наиболее лёгким из применяемых в настоящее время конденсаторам типа MSR25 фирмы ICAR (Италия) и отечественным импульсным конденсаторам фирмы «Ньюкон».

Из формулы (4), если найти и приравнять к нулю её производную, и рис. 4 следует, что энергия конденсаторного накопителя имеет оптимум по полной массе ЭРДУ, определяемый простым соотношением

$$W_{\text{опт}} [\text{Дж}] = (\omega_c [\text{Дж/кг}] \cdot P_{\Sigma} [\text{Н·с}] / 9000)^{3/4}.$$

Очевидно, что энергия разряда существующих образцов АИПД (на рисунке показаны точки, соответствующие АИПД-155 и АИПД-95) существенно выше оптимальной с точки зрения получения минимальной массы ЭРДУ. Однако опыт разработки и испытаний АИПД в НИИ ПМЭ МАИ показывает, что снижение энергии разряда сопровождается увеличением цены тяги. Экспериментально полученная зависимость цены тяги  $C_T$  лётных образцов ЭРДУ на основе АИПД от энергии разряда представлена на рис. 5.

Видно, что снижение энергии разряда ниже 40 – 50 Дж нежелательно, так как сопровождается существенным ростом цены тяги. Кроме того, снижение энергии разряда и соответствующее увеличение массы запасаемого РТ вызывает трудности с его размещением. Данная проблема решается путём применения многоканальных схем АИПД, когда один БНЭ работает на несколько разрядных каналов, каждый с собственным запасом РТ. В частности, использование двухканальной схемы в ЭРДУ АИПД-45-2, АИПД-155 и АИПД-95 позволило снизить их полную массу приблизительно на 15%.

На рис. 6 приведены зависимости полной массы ЭРДУ с АИПД от суммарного импульса тяги:

- экспериментальные кривые для существующих лётных образцов АИПД и их прототипов;
- расчётные кривые для образцов АИПД с оптимизированной по массе конденсаторной батареей и существующими конденсаторами с удельной энергоёмкостью  $\omega_c = 28$  Дж/кг;
- расчётные кривые для образцов АИПД с перспективными конденсаторами с удельной энергоёмкостью  $\omega_c = 35$  Дж/кг.

Из рис. 6 следует, что оптимизация энергосодержания

конденсаторной батареи позволяет уменьшить полную массу ЭРДУ на 10 – 15 % при существующих конденсаторах и на 15 – 20 % при перспективных конденсаторах с повышенной до 35 Дж/кг удельной энергоёмкостью.

**Перспективы повышения удельной энергоёмкости силовых конденсаторов БНЭ.** Удельная энергоёмкость силового конденсатора  $\omega_c$  определяется отношением запасаемой энергии  $W_c$  к массе конденсатора  $m_c$ . В связи с этим для увеличения  $\omega_c$  существует два пути – увеличение  $W_c$  и снижение  $m_c$ . Рассмотрим обе возможности.

Для получения конденсатора с наименьшей массой требуется при проектировании конденсаторов использовать материалы и компоненты с минимально возможной плотностью. Конденсаторы производства ООО «Нюкон» изготавливаются по сухой технологии с использованием металлизированной полипропиленовой плёнки и обладают эффектом самовосстановления. Металлизация плёнки, которая выполняет роль проводящих обкладок конденсатора, производится путём термовакуумного напыления и имеет толщину порядка 30 – 40 нм.

Полипропиленовая плёнка, которая в конденсаторе играет роль диэлектрика, имеет наименьшую плотность 0,91 г/см<sup>3</sup> из всех плёнок, применяемых в конденсаторостроении. Таким образом, основной элемент конденсатора, который запасает энергию, имеет минимально возможную массу.

Токопроводящие части конденсатора выполнены из меди. На сегодняшний день этому материалу нет массовой альтернативы по проводимости.

Следующим важным с точки зрения снижения массы конденсатора является компаунд, используемый для герметизации конденсатора. На сегодняшний день в качестве компаунда используется полиуретановая смола с плотностью 1,5 г/см<sup>3</sup>.

Столь высокая плотность компаунда объясняется наличием в его составе специальных наполнителей, которые обеспечивают стабильность компаунда, необходимую твёрдость, высокое сопротивление проникновению влаги внутрь конденсатора, негорючесть компаунда. Производители компаундов также ищут пути улучшения свойств своего продукта и снижения плотности. На рынке стали появляться компаунды, которые отвечают всем высоким требованиям конденсаторостроения и имеют плотность 1,3 г/см<sup>3</sup>.

В дальнейшем, с учётом условия работы конденсатора в вакууме, возможно снижение количества наполнителей в составе компаунда, что теоретически позволяет применять компаунд с плотностью 1,15 г/см<sup>3</sup>.

Остальные компоненты конденсатора, такие как

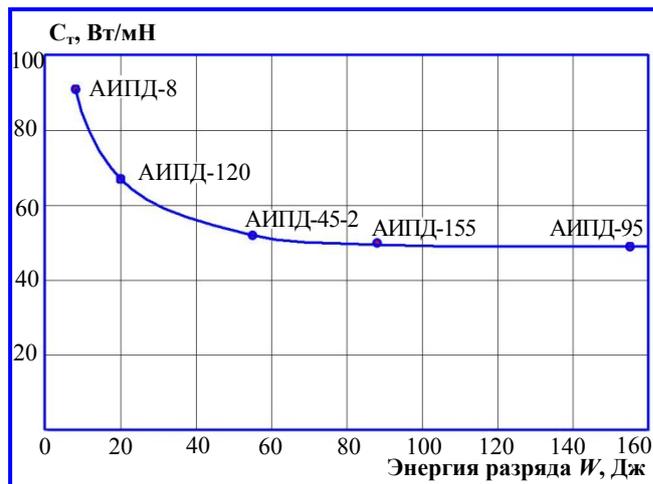


Рис. 5. Зависимость цены тяги лётных образцов и прототипов ЭРДУ с АИПД от энергии разряда

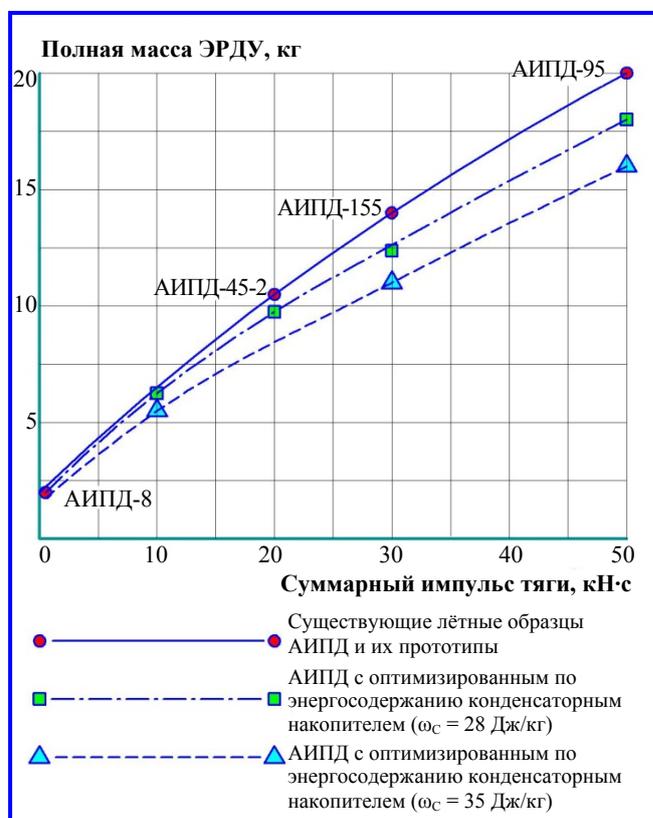


Рис. 6. Зависимость полной массы ЭРДУ с АИПД от суммарного импульса тяги при различных конденсаторных накопителях

корпус, сердечник, припой для пайки имеют очень малый вклад в полную массу конденсатора.

Энергия, которую может запасти конденсатор, определяется электрической ёмкостью конденсатора и квадратом рабочего напряжения, в данном случае напряжением заряда БНЭ.

Увеличение электрической ёмкости конденсатора при сохранении неизменной массы конденсатора и

его размеров требует использования более тонкого диэлектрика. В то же время более тонкий диэлектрик не позволит увеличить напряжение заряда конденсатора, от которого количество запасённой конденсатором энергии зависит гораздо сильнее, чем от ёмкости конденсатора. В связи с этим более выгодным путём увеличения запасённой в конденсаторе энергии является повышение напряжения заряда, и повышенное напряжение заряда может быть достигнуто без увеличения толщины диэлектрика. Технология изготовления конденсаторов из металлизированной пластиковой плёнки позволяет увеличивать рабочее напряжение диэлектрика путём напыления слоя металлизации со специальным профилем за счёт использования эффекта управляемого самовосстановления. По теоретическим оценкам возможно увеличение зарядного напряжения на 25% без увеличения толщины диэлектрика, а только за счёт напыления на диэлектрик слоя металлизации со специальным профилем. Это позволит увеличить энергию, запасённую каждым конденсатором, приблизительно на 55%. Дальнейшее повышение зарядного напряжения нецелесообразно, так как приводит к существенному снижению удельных характеристик двигателя, как это показано в работах [1, 2].

Совокупность всех вышеупомянутых мер по повышению энергосодержания и снижению массы импульсных конденсаторов позволит в ближайшей перспективе увеличить их удельную энергоёмкость с 28 до 35 Дж/кг.

Как следует из рис. 4 и 6, повышение энергоёмкости силовых конденсаторов с 25 – 30 до 35 Дж/кг позволяет существенно (на 15 – 20 %) снизить полную массу ЭРДУ не только за счёт прямого снижения массы накопителя энергии  $M_{\text{БНЭ}}$ , но и за счёт смещения его энергосодержания  $W$  в сторону оптимальных значений.

**Возможности снижения массы ЭРДУ с АИПД за счёт увеличения удельного импульса тяги.** Увеличение удельного импульса тяги позволяет снизить массу запасаемого рабочего тела и, соответственно, полную массу ЭРДУ. Представленные на рис. 3 результаты исследования лабораторных образцов АИПД, оптимизированных по удельному импульсу тяги, показывают, что при энергии разряда  $W \sim 50 - 100$  Дж существуют принципиальные возможности увеличения удельного импульса тяги на 15 – 20 % до  $J_{\text{уд}} \sim 2 \cdot 10^4$  м/с. При этом потребуются уменьшение размерности разрядного канала, что возможно в случае использования многоканальных схем АИПД.

Дальнейшее увеличение удельного импульса тяги возможно только при применении принципиально новых схем ускорения плазмы. Причиной является

двойная функция разряда в ускорительном канале – одновременное и самосогласованное дозирование и ускорение РТ. На рис. 7 представлены зависимости от времени ввода в разрядный канал мощности (пропорциональной квадрату разрядного тока  $J^2$ ) и массы  $m$  плазмообразующего вещества, полученные в НИИ ПМЭ МАИ в результате пьезозондовых измерений на одном из лабораторных образцов АИПД [2].

Как видно по зависимостям  $J^2(t)$  и  $m(t)$ , наблюдается существенное временное рассогласование ввода энергии и массы в ускорительный канал. Значительная часть массы плазмообразующего вещества поступает в канал уже после того, как разряд практически завершился. Эта часть плазменного потока ускоряется только до тепловых скоростей, что приводит к снижению удельного импульса тяги. Для дальнейшего повышения удельных характеристик АИПД необходимо переходить к новым схемам ускорительного канала. В частности, целесообразно разделить функции дозирования и ускорения плазмы. Различные схемы таких двухступенчатых плазменных ускорителей были предложены ещё в 1960-х годах [8]. В настоящее время в НИИ ПМЭ МАИ начаты экспериментальные исследования ряда принципиально новых лабораторных образцов АИПД двухступенчатой схемы [9, 10].

В табл. 2 приведены характеристики, полученные в ходе отработки и оптимизации лабораторного образца АИПД с двухступенчатой схемой ускорения плазмы [10].

Из данных, приведённых в табл. 2, следует, что применение двухступенчатой схемы ускорения плазмы позволяет увеличить удельный импульс тяги приблизительно вдвое по сравнению с одноступенчатыми АИПД с той же энергией разряда.

На рис. 8 приведены расчётные зависимости полной массы ЭРДУ с АИПД от суммарного импульса тяги для:

- существующих лётных образцов АИПД;
- образцов АИПД с удельным импульсом тяги, увеличенным на 20% (максимальное значение для существующих схем ускорения плазмы);
- образцов АИПД с удельным импульсом тяги, увеличенным на 100% (значение для перспективных схем ускорения плазмы).

Из рис. 8 следует, что оптимизация существующих схем ускорения плазмы по удельным характеристикам двигателя не приводит к существенному снижению полной массы ЭРДУ из-за сравнительно небольшой доли массы РТ.

**Возможности снижения массы блоков электроники КДУ с АИПД.** Масса блока СПУ пропорциональна его потребляемой мощности. В настоящее время удельная масса наиболее со-

временных блоков СПУ с двукратным резервированием типа СПУ-50-2 (АИПД-45-2) и СПУ-70-2 (АИПД-155) составляет  $m_{СПУ} \approx 0,01$  кг/Вт. Возможно некоторое снижение массы за счёт совершенствования схемных решений, пересмотра некоторых принципов резервирования и применения заливочных компаундов меньшей плотности.

**Возможности снижения массы АИПД за счёт применения конструкционных материалов меньшей плотности.** Особенностью ЭРДУ малой тяги является то, что в их конструкции, как и в конструкции других относительно лёгких радиоэлектронных приборов, не испытывающих значительных статических силовых нагрузок, сечения деталей в большей степени определяются не прочностью, а жёсткостью, стойкостью к вибрационным, а также тепловым и радиационным нагрузкам. В связи с этим при расчёте возможностей снижения массы за счёт применения новых конструкционных материалов следует принимать во внимание, главным образом, не удельную прочность, а плотность материалов.

Основным конструкционным материалом для силовых узлов и корпусных деталей ЭРДУ на основе АИПД являются алюминиевые сплавы с плотностью  $\rho_{Al} \approx 2,7$  г/см<sup>3</sup>. Возможно снижение массы двигательной установки за счёт более широкого применения высокопрочных неметаллических материалов, таких как конструкционный стеклотекстолит ( $\rho_{ст} \approx 1,8$  г/см<sup>3</sup>) и углепластики ( $\rho_{уп} \approx 1,5$  г/см<sup>3</sup>).

На рис. 9 приведены расчётные зависимости полной массы ЭРДУ с АИПД от суммарного импульса тяги для:

- существующих лётных образцов АИПД;
- образцов АИПД с максимально возможной заменой деталей из алюминиевых сплавов облегчёнными деталями из условного материала с плотностью  $\rho = 1,8$  г/см<sup>3</sup>.

Из рис. 9 следует, что снижение полной массы ЭРДУ в данном случае незначительно.

### Выводы

1. Наиболее перспективным путём улучшения массогабаритных характеристик ЭРДУ на основе АИПД является облегчение конденсаторного накопителя энергии за счёт оптимизации его энергосодержания и применения силовых конденсаторов

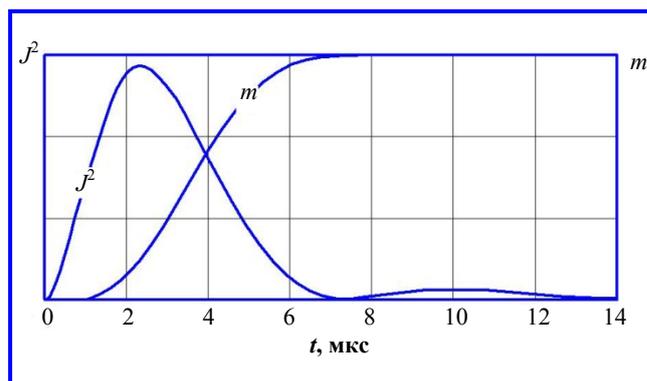


Рис. 7. Динамика ввода мощности разряда  $J^2$  и массы  $m$  плазмообразующего вещества в разрядный канал АИПД

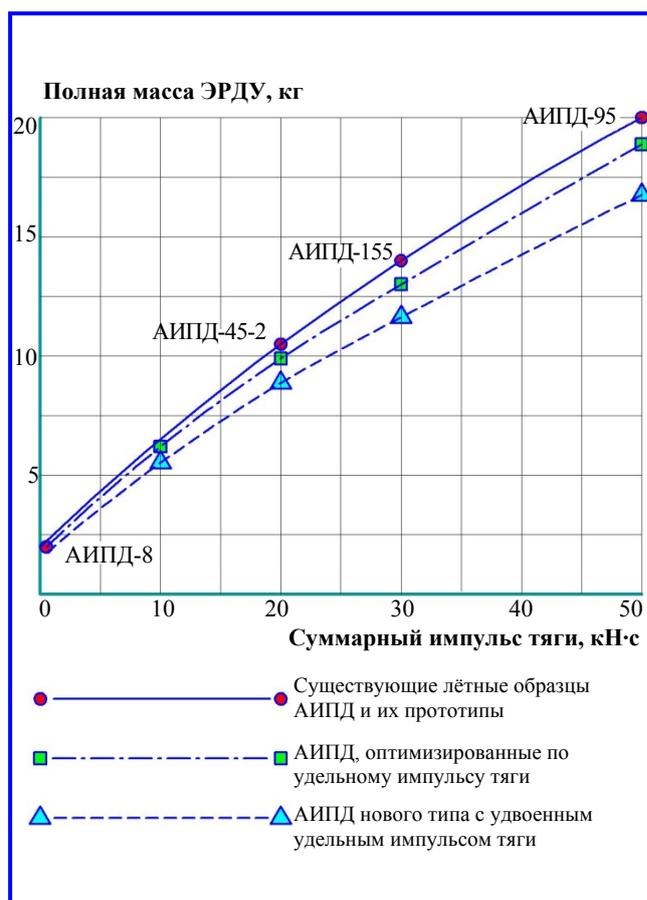
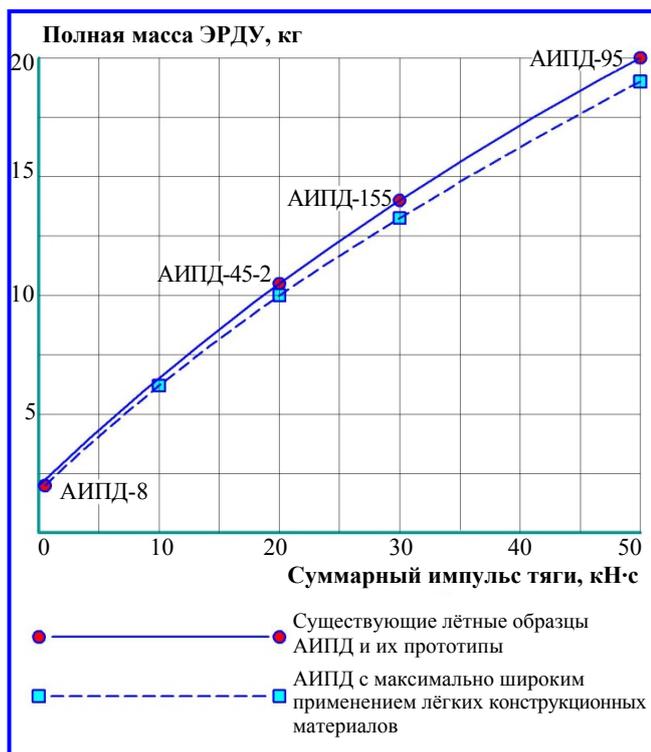


Рис. 8. Зависимость полной массы ЭРДУ с АИПД от суммарного импульса тяги при различных удельных импульсах

Таблица 2

Характеристики лабораторных образцов двухступенчатых АИПД

Образец АИПД	Энергия разряда I ступени, Дж	Суммарная энергия разряда, Дж	Удельный импульс тяги, м/с	Цена тяги, Вт/мН
1	20	62,7	7100	209
2	10	52,7	13300	188
3	8	50,7	22000	137



**Рис. 9. Зависимость полной массы ЭРДУ с АИПД от суммарного импульса тяги при использовании алюминиевых сплавов и более лёгких конструкционных материалов**

с повышенной удельной энергоёмкостью. Оптимизация энергосодержания конденсаторной батареи позволяет уменьшить полную массу ЭРДУ на 10 – 15 % при существующих конденсаторах и на 15 – 20 % при перспективных конденсаторах с повышенной до 35 Дж/кг удельной энергоёмкостью.

2. Существенное уменьшение доли запаса рабочего тела в полной массе ЭРДУ за счёт повышения удельного импульса тяги возможно только при использовании принципиально новых схем ускорения плазмы, таких как двухступенчатое ускорение и др.

3. Замена в двигательной установке алюминиевых сплавов более лёгкими конструкционными материалами позволяет снизить её полную массу незначительно (не более 5 – 7 %) при существенном усложнении технологии производства и значительном росте стоимости.

Поступила в редакцию 14.03.2013

Таким образом, в ближайшей перспективе возможно снижение полной массы ЭРДУ на основе АИПД приблизительно на 20%.

### Литература

1. Разработка абляционных импульсных плазменных двигателей в НИИ прикладной механики и электродинамики / Н. Н. Антропов, А. В. Богатый, Г. А. Дьяконов [и др.]. // Космонавтика и ракетостроение. – М. : ЦНИИМАШ, 2008. – № 3(52). – С. 28 – 34.
2. Новый этап развития абляционных импульсных плазменных двигателей в НИИ ПМЭ / Н. Н. Антропов, А. В. Богатый, Г. А. Дьяконов [и др.] // Вестник ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». – М. : ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», 2011. – № 5. – С. 30 – 40.
3. Ходненко В. П., Хромов А. В. Математическая модель энергодвигательной системы малого космического аппарата / В. П. Ходненко, А. В. Хромов // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2011. – Т. 125. – № 6. – С. 17 – 24.
4. Корректирующие двигательные установки для перспективных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / В. П. Ходненко, М. В. Колосова // Актуальные проблемы российской космонавтики. Труды XXXVII академических чтений по космонавтике. – 2013. – С. 98 – 100.
5. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов / О. А. Горшков, В. А. Муравлёв, А. А. Шагайда. – М. : «Машиностроение», 2008. – 279 с.
6. Хартов В. В. Новый этап создания автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований // Вестник ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». 2011, № 3. – с.3-10.
7. Квазиодномерная физико-математическая модель ускорения плазмы в АИПД малой тяги / М. М. Хрусталев, Н. В. Любинская // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 10.
8. Плазменные ускорители / С. Д. Гришин, Л. В. Лесков, Н. П. Козлов. – М. : «Машиностроение», 1983. – 231 с.
9. Разработка абляционного импульсного плазменного двигателя с двухступенчатой схемой ускорения плазмы / А. В. Богатый, Г. А. Дьяконов, И. Л. Нечаев // XXXV Академические чтения по космонавтике. – М., 2011.
10. Абляционный импульсный плазменный двигатель с разделённым механизмом ионизации и ускорения рабочего тела: [Электронный ресурс] / А. В. Богатый, Г. А. Дьяконов, И. Л. Нечаев // Электронный журнал «Труды МАИ». – № 52. – Режим доступа: [www.mai.ru/science/trudy](http://www.mai.ru/science/trudy).

*Александр Владимирович Богатый, научн. сотрудник.  
Григорий Александрович Дьяконов, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник.  
Иван Леонидович Нечаев, инженер.  
E-mail: [riame3@sokol.ru](mailto:riame3@sokol.ru), т. (499) 158-37-11.  
Гарри Алексеевич Попов, д-р техн. наук, директор.  
Александр Юрьевич Марьяшин, инженер-технолог.  
Карен Грантович Халапян, генеральный директор.  
E-mail: [mail@nicon.ru](mailto:mail@nicon.ru), т. (495) 730-73-62.*