

УДК 621.45.02

Применение комбинированного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя в качестве двигательной установки для малоразмерных беспилотных летательных аппаратов

Минин Н.В.

*Компания «Межрегионэнергосбыт»,
проспект Вернадского, 101, к. 3, Москва, 119526, Россия*

e-mail: m_nikolai@list.ru

Аннотация

В статье рассматриваются особенности термодинамических процессов и проработка конструкции нового типа реактивного малоразмерного двигателя с мембранным свободнопоршневым нагнетателем топливной смеси, в котором ее часть используется для внутреннего охлаждения теплонапряженных подвижных узлов двигателя и получения работы сжатия компрессора мембранного типа.

Разработана схема новой энергоустановки с двойным осевым выхлопом с эжекторным усилителем тяги, проведены тепловой и термодинамический расчеты по расчетной методике автора, а также вычислены основные конструктивные размеры двигателя.

Решен вопрос охлаждения поршневого узла всем расходом топливной смеси двигателя, что привело к частичной регенерации тепла в цикле, снижению удельного расхода топлива и увеличению высотности.

Ключевые слова: тепловые процессы, пульсирующий воздушно-реактивный двигатель, свободнопоршневой нагнетатель.

Многие задачи военного и гражданского назначения решаются с использованием авиационной техники. При этом часто применение пилотируемых летательных аппаратов (ЛА) является дорогим и не целесообразным, а в ряде случаев несет угрозу жизни и здоровью пилота. В этих условиях использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) позволяет значительно снизить затраты, обезопасить пилота, обеспечить скрытность и повысить эффективность выполнения поставленных задач. А также такие ЛА оказывают значительно меньшее негативное воздействие на окружающую среду.

Важно отметить, что беспилотные ЛА не несут биологический объект на своем борту и систему его жизнеобеспечения. Конструктивная компоновка таких аппаратов является более эффективной по сравнению с самолетами. Современные БПЛА обладают возможностями полностью автоматического полета, могут вести комплексный мониторинг, передавая данные в реальном масштабе времени наземному оператору, так и автономно, записывая данные мониторинга на носитель информации. В некоторых особых ситуациях БПЛА могут быть не возвращаемыми, например, при мониторинге ядерных катастроф и других чрезвычайных ситуациях. Применение пилотируемых ЛА в подобных ситуациях зачастую невозможно без исключения риска для жизни пилота и снижения массы полезной нагрузки за счет необходимости установки дополнительного оборудования в системах защиты и жизнеобеспечения. Очевидны преимущества и экономическая эффективность применения БПЛА:

- в несколько десятков раз более низкая стоимость создания по сравнению с пилотируемым ЛА;
- стоимость и время подготовки оператора дистанционно пилотирующего аппарат на несколько порядков ниже, чем высококлассного пилота;
- БПЛА позволяет сохранить жизнь пилота при выполнении заданий, связанных с высоким риском, в том числе боевых;
- в случае потери аппарата, ущерб не столь высок как при выходе из строя полноразмерного пилотируемого ЛА и в короткие сроки, потерянный аппарат, можно заменить другим;
- БПЛА могут работать длительное время в автоматическом режиме по заданному маршруту.

Сегодня применение современных материалов, в том числе композиционных, позволяет создать планер аппарата практически любой аэродинамической формы. Развитие электроники позволяет снабдить аппарат самой совершенной системой управления и разнообразной полезной нагрузкой. Но в тоже время актуальной проблемой при создании БПЛА является отсутствие эффективных малоразмерных силовых установок. Существующие поршневые двигатели не обеспечивают экономичность, ограничены 2-3 часами полета и высотой полета до 2000 метров, причем на этой высоте тяга двигателя падает в 2 раза. Невозможен так же наддув двухтактных двигателей, используемых схем, без применения клапанного распределения или потери части продувочной топливной смеси. Создание же альтернативных малоразмерных газотурбинных двигателей (ГТД) классических

схем невозможно по причине больших потерь при перетекании газа на лопатках турбокомпрессорного агрегата и низкой лобовой тяги при использовании центробежных компрессоров и центростремительных турбин в них.

Решить эту проблему позволяет переход к разработке новой схемы пульсирующего воздушно-реактивного двигателя (ВРД) с мембранным свободнопоршневым нагнетателем (СПН) топливной смеси в качестве источника рабочего тела для эжекторного усилителя тяги (ЭУТ) в движителе.

Условием для создания пульсирующего ВРД с мембранным СПН является максимальное использование уже созданных методик расчета, технологических приемов и деталей поршневых кривошипных двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Идеологической основой пульсирующего ВРД с мембранным СПН является возможность использования свободнопоршневой системой подачи топливной смеси.

Такой комбинированный ВРД позволяет решить задачи, поставленные перед современными малоразмерными БПЛА:

1. Отказаться от нерегулируемого винта с малым коэффициентом полезного действия (КПД) на переходных режимах и различных высотах полета.
2. Не обеспечивать принудительного наддува двигателя для увеличения высотности его использования так, как осуществляется естественный наддув, входящий в конструкцию двигателя.
3. Повысить экономичность, время полета и уменьшить массу двигателя.
4. Исключить механические колебания и вибрации, вызываемые в ДВС силовым кривошипно-шатунным механизмом.

Реализация термодинамического цикла работы мембранного СПН заключается в том, что он работает на увеличение коэффициента продувки топливной смеси, избыточный расход которой внутренне охлаждает теплонапряженные узлы и сжигается в камере сгорания пульсирующего ВРД вместе с продуктами выхлопа поступает в ЭУТ для создания реактивной тяги с коэффициентом эжекции до 1,4 (рис. 1). Были получены значения тяги до 70 Н. Особое внимание при термодинамическом расчете уделялось проходным сечениям по тракту силовой установки. Условием для ее нормального функционирования является дозвуковое течение рабочего тела по тракту и отсутствие скачков уплотнения на продувочных и выхлопных окнах.



Рис. 1. Агрегатное членение силовой установки

Конструктивная схема пульсирующего ВРД показана на рис. 2, 3 и 4. На рис.2 изображен общий вид пульсирующего воздушно-реактивного свободнопоршневого двигателя с мембранным нагнетателем, на рис. 3 показан вид сверху, на рис.4 представлен трехмерный вид.

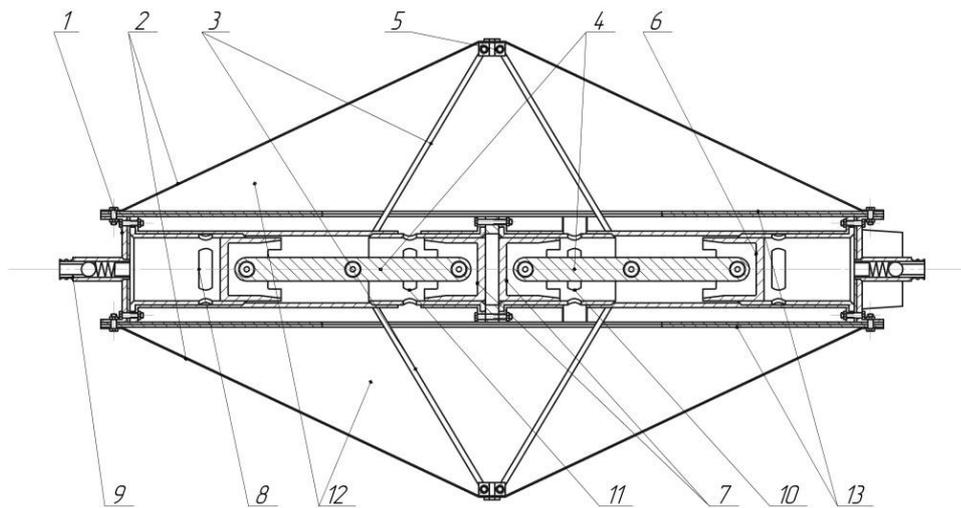


Рис. 2. Малоразмерный ВРД с мембранным свободнопоршневым газогенератором топливной смеси

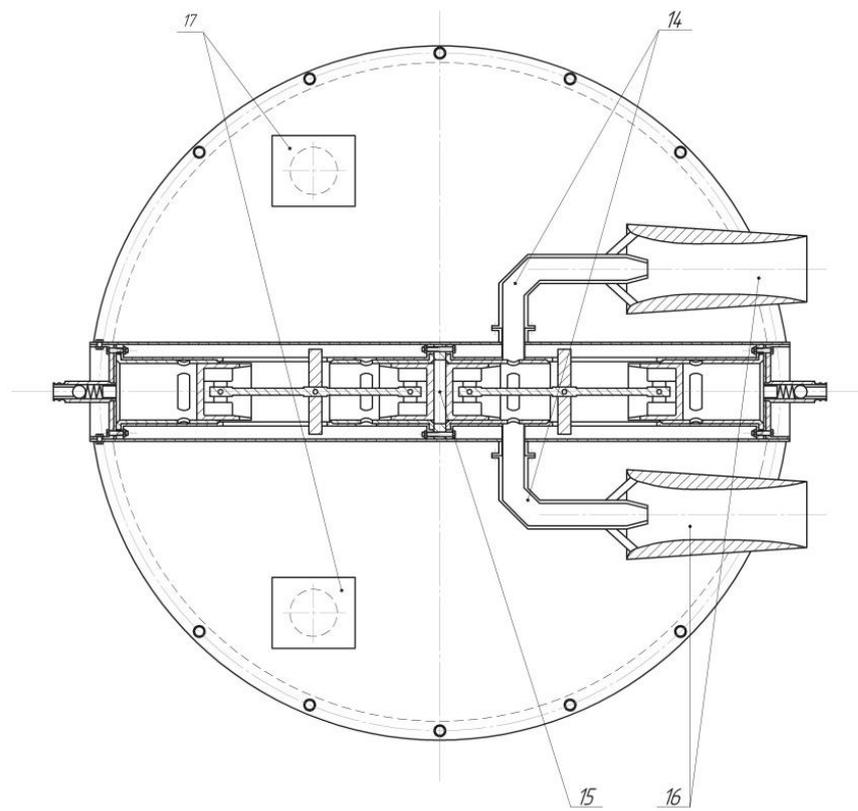


Рис. 3. Малоразмерный ВРД с мембранным свободнопоршневым газогенератором топливной смеси (вид сверху)

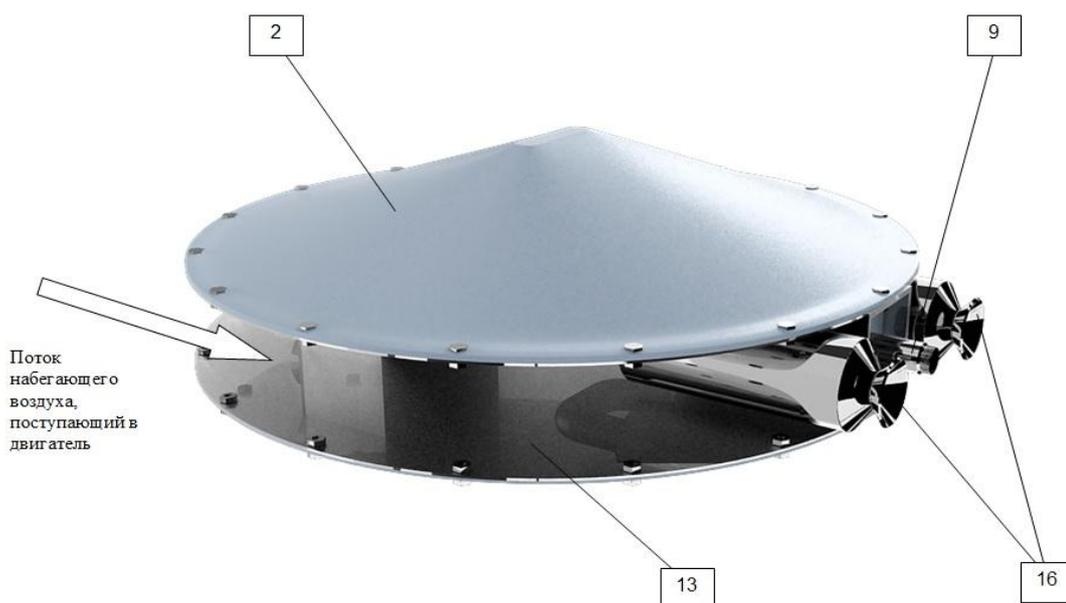


Рис. 4. Малоразмерный ВРД с мембранным свободнопоршневым газогенератором топливной смеси (трехмерный вид)

Пульсирующий ВРД (см. рис. 2) содержит корпус свободнопоршневого привода 1, две тонкостенные мембраны 2, каждая мембрана снабжена механизмом синхронизации 3, соединенным с поршневыми группами 4, и крепежными элементами 5, расположенными на вершине каждой из мембран. Двигатель содержит буферные поршни 6, соединенные с рабочими поршнями 7, таким образом, образуя поршневые группы 4 и буферные цилиндры 8, а также пусковые клапана 9, размещенные в торцах корпуса, впускные окна 10, расположенные по окружности рабочего цилиндра, выпускные окна 11, подмембранное пространство 12, образованное подвижной мембраной 2 и её основанием 13.

Двигатель так же содержит (см. рис. 3) два патрубка 14, по которым продукты сгорания (ПС) с избыточным окислителем из камеры сгорания СПН 15 подводятся к

двум реактивным пульсирующим ЭУТ 16 ВРД, впускные клапаны 17, обеспечивающие доступ рабочего тела в подмембранное пространство 12.

На кинематической схеме (рис. 5) представлены крайние положения поршневых групп 7 и мембран 2 свободнопоршневого нагнетателя.

Левая часть рисунка соответствует положению поршневой группы в верхней мертвой точке (ВМТ), при котором наблюдается максимальное сближение рабочих поршней 7, максимальный объем подмембранного пространства, при этом продувочные окна закрыты. На правой части изображено положение, соответствующее нижней мертвой точке (НМТ), соответствующее максимальному расхождению рабочих поршней 7, минимальному объему подмембранного пространства, при этом продувочные окна полностью открыты.

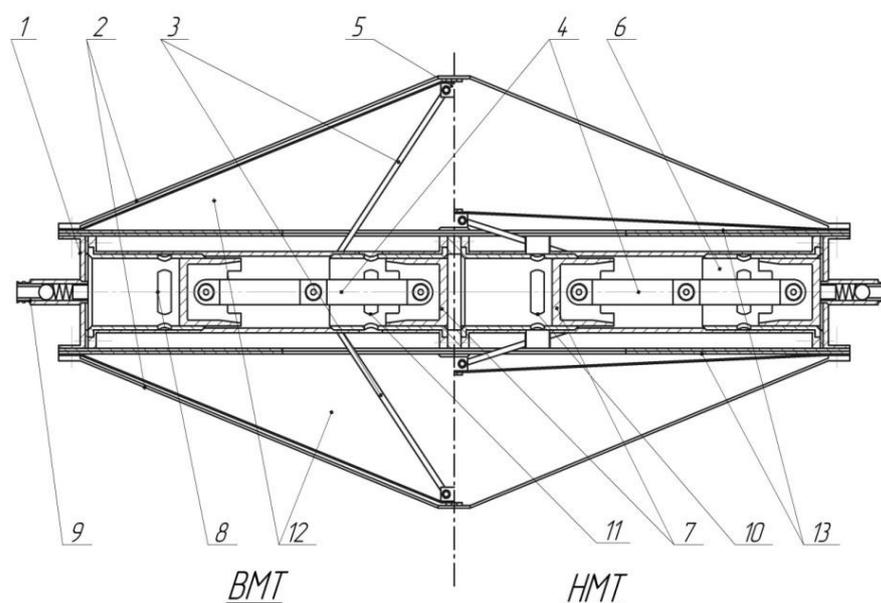


Рис. 5. Кинематическая схема работы малоразмерного комбинированного ПуВРД (положение поршневой группы в ВМТ и НМТ)

Предлагаемый комбинированный пульсирующий ВРД со СПН работает следующим образом. Сжатый воздух от внешнего источника, например из баллона,

подаётся через пусковые клапана 9 в буферные цилиндры 8 и перемещает поршневые группы 4 навстречу друг другу. При максимальном сближении рабочих поршней 7 происходит самовоспламенение топливной смеси в камере сгорания свободнопоршневого привода компрессора за счет повышения температуры при сжатии (принцип Дизеля), коэффициент избытка окислителя принимается $\alpha = 1,3$. Далее поршни 7 совершают рабочий ход, при котором с помощью механизма синхронизации 3 происходит уменьшение объема под мембранами 2 и повышение давления топливоздушнoй смеси в подмембранном пространстве 12. Затем открываются впускные окна 10, через которые происходит заполнение камеры сгорания 15 свободнопоршневого привода нагнетателя сжатой топливной смесью. При максимальном расхождении поршней 7, давление в буферных цилиндрах 8 становится больше, чем давление в камере сгорания 15 и происходит обратный ход поршней 7. При обратном ходе поршней 7 (навстречу друг другу) мембраны 2 возвращаются в исходное положение, и одновременно открываются впускные клапаны 17. Подмембранное пространство 12 заполняется новой порцией топливоздушнoй смеси. При этом ПС с избыточным окислителем выходят из камеры сгорания 15 свободнопоршневого привода через выпускные окна 11 по патрубкам 14 в пульсирующие ЭУТ 16 ВРД, где создают реактивную тягу. Затем цикл повторяется вновь.

Предлагаемая схема ВРД с мембранным СПН топливной смеси является уравновешенной системой, поршни не испытывают боковых нагрузок, связанных с перекосом штока как в обычном ДВС.

Механизм синхронизации выполняет как функцию синхронизации поршневых групп, так и приводит в движение мембрану компрессора. Таким образом, отпадает необходимость в отдельном приводе компрессора, следовательно, масса системы не увеличивается.

Максимальное усилие в тяге механизма синхронизации имеет место при прямом ходе поршней, т.е. тяга работает на растяжение при сжатии воздуха. При обратном же ходе нагрузка на тягу намного меньше, следовательно, она может быть выполнена в виде тонкой спицы.

Для определения облика ДУ была разработана методика, с помощью которой были рассчитаны основные проектные параметры (представлены в таблице 1) пульсирующего ВРД со свободнопоршневым мембранным нагнетателем и полученные графические зависимости.

Таблица 1

Термодинамические параметры рабочего процесса

Наименование параметра 1	Размерность 2	Расчетная формула 3
Давление в компрессоре в конце всасывания	Па	$P_1 = P_0 - \Delta P_K$
Давление нагнетания в компрессоре	Па	$P_K = P_r + \Sigma \Delta P$
Степень повышения давления в компрессоре	–	$\Pi_K = \frac{P_K}{P_1}$
Давление в начале сжатия	Па	$P_a = P_r$
Температура воздуха за компрессором	К	$T_p = (T_0 + \Delta t) \Pi_K^{\frac{m_1-1}{m_2}}$
Относительный объем мертвого пространства компрессора	–	$a_K = \frac{C_K + \frac{S_B}{\varepsilon}}{S}$

Объёмный коэффициент наполнения компрессора	–	$\lambda = 1 - a_K \left(\Pi_K^{\frac{1}{m_1}} - 1 \right)$
Плотность воздуха в компрессоре в начале сжатия	кг/м ³	$\gamma_{0K} = \frac{P_1}{RT_1}$
Количество воздуха, подаваемого компрессором за цикл	кг/цикл	$g_K = 2\gamma_{0K} \lambda F_K S \eta_{ym}$
Работа компрессора за цикл	Дж/цикл	$L_K = \frac{m_1}{m_1 - 1} RT_1 \left(\Pi_K^{\frac{m_1 - 1}{m_1}} - 1 \right) \frac{g_K}{\eta_K}$
Работа компрессора за цикл	Дж/цикл	$L_K = \frac{m_1}{m_1 - 1} RT_1 \left(\Pi_K^{\frac{m_1 - 1}{m_1}} - 1 \right) \frac{g_K}{\eta_K}$
Работа дизеля за цикл	Дж/цикл	$L_i = \frac{L_K}{\eta_M}$
Доля потеряннного хода поршня	–	$\psi = 1 - \frac{S_B}{S} \frac{(\varepsilon - 1)}{\varepsilon}$
Среднее индикаторное давление дизеля	Па	$P_i = \frac{L_i}{2F_\delta S}$
Индикаторный КПД дизеля	–	$\eta_i = k_0 \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{m-1}} \right)$
Расход топлива на цикл	кг/цикл	$g_m = \frac{AL_i}{\eta_i H_u}$
Наименование параметра	Размерность	Расчетная формула
1	2	3
Секундный расход топлива	кг/с	$\dot{g}_m = \frac{g_m n}{60}$
Коэффициент избытка воздуха в дизеле	–	$\alpha = 47.6 \frac{P_a S_B F_\delta (1 - \gamma_2)}{g_m T_p \cdot 10^{-3}}$
Коэффициент продувки	–	$\varphi = \frac{g_K}{g_\delta}$
Суммарный коэффициент избытка воздуха	–	$\alpha_0 = \alpha \varphi$
Давление в дизеле в конце сжатия	Па	$P_c = P_a \varepsilon^{m_1}$
Давление сгорания	Па	$P_z = P_c \lambda$
Температура воздуха в дизеле в конце сжатия	К	$T_c = T_a \varepsilon^{m_1 - 1}$
Средняя теплоемкость газа за СПН	Дж*кг/К	$c_{pm} = \frac{6.876 + (\alpha_0 - 1)6.586}{\mu \alpha_0} + \frac{86 + (\alpha_0 - 1)6.586}{\mu \alpha_0}$

Температура газа за СПН	К	$t_{\Gamma} = \frac{H_u g_m (1 - q_n)}{c_{pm} (g_k + g_m) \cdot 1000} + t_0$
Подача газа в секунду	кг/с	$G_{\Gamma} = \frac{(g_k + g_m)n}{60}$
Удельная адиабатная работа расширения	Дж/кг	$l_m = \frac{k}{k-1} RT_{\Gamma} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P_{\Gamma}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$
Адиабатная мощность СПН	кВт	$N_s = \frac{G_{\Gamma} l_m}{75}$
Адиабатный КПД установки	–	$\eta_s = \frac{632.3 \cdot N_s}{3600 \cdot G_m H_u \cdot 10^{-3}}$
Удельный расход топлива на 1 кВт*ч.	кг/кВт*ч.	$g_s = \frac{632.3}{\eta_s H_u}$

Поскольку создание ДУ БПЛА предусматривает максимальное использование уже созданных методик расчета, технологических приемов и деталей поршневых кривошипных ДВС, в качестве прототипа был принят двигатель МДС218КУК, производства ОАО «МДС - микро». Двигатель имеет поршень диаметром 0,0365 м и мощность 3,4 л. с. Размер такой поршневой группы является оптимальным для использования в качестве поршневой группы в составе СПН комбинированного пульсирующего ВРД малоразмерного БПЛА массой до 50 кг. Как показали расчеты, используя детали указанного ДВС, в качестве деталей комбинированного пульсирующего ВРД, можно получить тягу около 50 Н и около 70 Н при использовании ЭУТ. При этом важно отметить, что поршневая группа работает в менее нагруженных условиях, так как в конструкции СПН отсутствует массивный кривошип, а, следовательно, отсутствуют нагрузки, связанные с его вращением.

Важно отметить, что, основываясь на концепции использования существующих серийных конструктивных элементов ДВС и используя метод

тепловых балансов, было определено, что частоту работы системы можно увеличить без ущерба и увеличения интенсивности износа деталей. Так как данная комбинированная ДУ является уравновешенной и в ней отсутствует кривошипно-шатунный узел, а, следовательно, нет бокового трения поршня о цилиндр, то повышение частоты работы положительно сказывается на эффективности системы. Использование тонких спиц, в качестве тяг, приводящих в движение мембрану, так же оказалось оправданным, так как в процессе работы тяг, основная нагрузка приходится в момент их растяжения, а незначительное усилие на момент сжатия. В классических СПН значительная доля массы приходится на механизм синхронизации, так как в нем применяются массивные рейки и шестерни. В предложенной конструкции использование тонких спиц в качестве штанг механизма синхронизации, позволило значительно снизить массу ДУ.

Учитывая вышесказанное и заменяя классический металлический поршень керамическим, было определено, что частоту работы установки можно увеличить еще больше. За счет повышения частоты, увеличивается количество рабочего тела, проходящего через ДУ в единицу времени. Необходимо отметить, что при этом размеры ДУ не изменяются, а, следовательно, масса остается неизменной при увеличении расхода рабочего тела. Это достигается благодаря удачным конструкторским решениям. Таким образом, тяга, создаваемая ДУ, увеличивается за счет повышения расхода рабочего тела, а неизменность габаритных размеров, приводит, к неизменности площади миделя, следовательно, лобовое сопротивление, так же остается неизменным (рис. 6.).

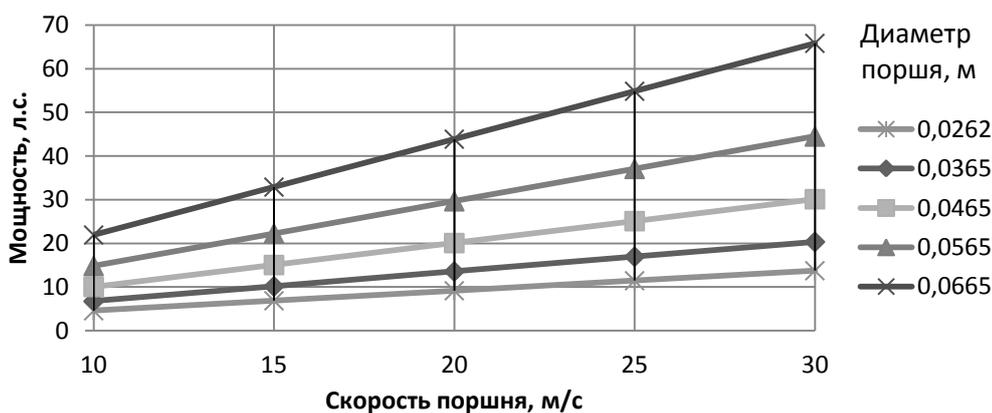


Рис. 6. Зависимость мощности комбинированного пульсирующего ВРД от скорости поршня для различных диаметров поршня СПН

Необходимо отметить, что дальнейшее повышение частоты работы комбинированного ПуВРД до значений 200-220 Гц приводит к увеличению износа мембраны и сокращает ресурс, а, следовательно, время работы ДУ до 1-2 часов. Если ДУ предназначена для невозвращаемого БПЛА ближнего радиуса действия, подобное сокращение ресурса не является критичным.

Однако исключение из конструкции мембраны как элемента наиболее чувствительного к износу все же позволяет произвести увеличение частоты работы СПН до значений, не превышающих верхний предел работоспособности поршневой группы по скорости поршня. На рис. 7 представлены значения тяги, получаемой комбинированным ПуВРД в вариантах с использованием мембраны и без использования мембраны.

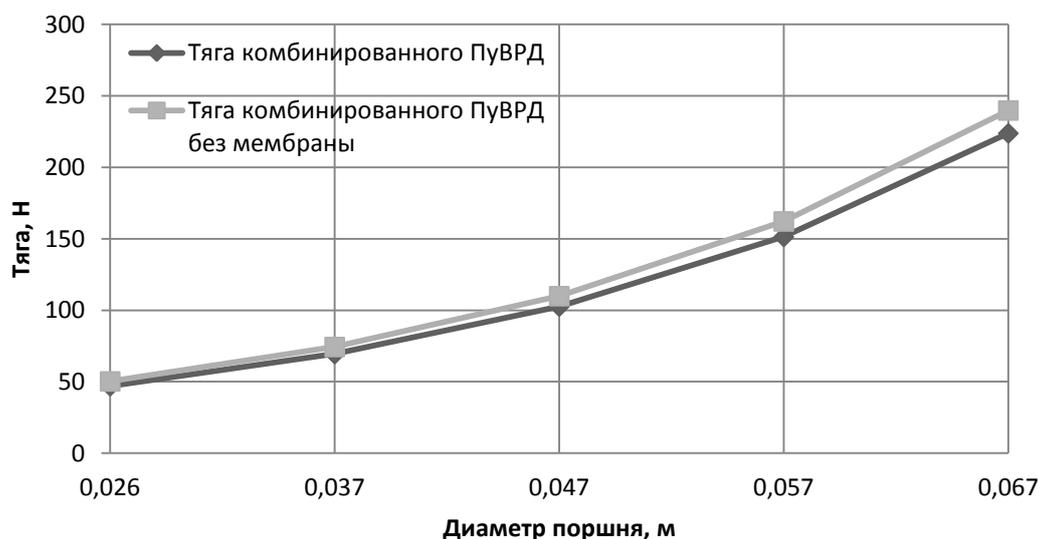


Рис. 7. Сравнение тяги комбинированного пульсирующего ВРД при отсутствии мембраны и увеличении частоты работы для различных диаметров поршня СПН

Достаточно близкие значения тяги объясняются тем, что при исключении из конструкции комбинированного ПуВРД мембраны, ДУ лишается дополнительного объема атмосферного воздуха (наддува), что приводит к уменьшению расхода рабочего тела в единицу времени, но при этом появляется возможность увеличения частоты работы ДУ. При повышении частоты работы до значений 200-220 Гц вновь происходит увеличение расхода рабочего тела в единицу времени, которое позволяет получить прирост тяги около 6-7 % относительно тяги комбинированного ПуВРД с мембраной, работающей на меньшей частоте (70-80 Гц). Данный эффект усиливается по мере уменьшения геометрических размеров поршневой группы, поскольку поршневые группы малого размера (диаметр поршня 2÷2,5 см.) работают на высоких частотах вращения порядка 200÷300 Гц. Таким образом, увеличение частоты работы ДУ свыше 200 Гц, в пределах, не превышающих прочностные ограничения поршневой группы, обладает положительным эффектом и заслуживает дополнительного исследования.

Как уже упоминалось выше, условием, ограничивающим скорость движения поршня, является скачок уплотнения, возникающий на продувочных и выхлопных окнах. Используя этот фактор и применяя метод тепловых балансов, с высокой точностью удастся вычислить предельно-допустимую скорость поршня, определить геометрические размеры установки и ее составляющих: поршня, цилиндра и камеры сгорания, а так же тягу, создаваемую ДУ на различных высотах полета.

В процессе работы с теплом происходят процессы, аналогичные процессам в поршневом ДВС, однако при том же количестве рабочего тела (тех же геометрических размерах поршневой группы) комбинированная ДУ не имеет массивных движущихся частей, а, следовательно, обладает меньшей массой.

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что использование существующих деталей, серийно выпускаемых ДВС, в сочетании с конструкторскими решениями, предложенными выше, а так же расчет с использованием метода тепловых балансов позволяет создать комбинированную ДУ с высоким КПД, значительно превышающим КПД существующих двигательных установок.

Коэффициент усиления тяги K_y эжекторного усилителя определяется выражением:

$$K_y = \frac{\sqrt{\eta_3(\bar{w}_1^2 + \mu V^2)(1 + \mu) - \mu V}}{w_1 - V},$$

где η_3 – КПД эжектора; μ – коэффициент эжекции; \bar{w}_1 – средняя энергетическая скорость истечения газа из активного сопла; V – скорость полета; w_1 – средняя по импульсу скорость истечения газа из активного сопла. Величина μ является

функцией скорости полета. Очевидно, что с увеличением скорости полета μ будет повышаться из-за возрастания напора набегающего потока воздуха. Количество энергии, переданной активным потоком присоединяемому, будет уменьшаться в соответствии с уменьшением разности скоростей встречи потоков, из-за уменьшения этой разности потери энергии, возникающие при взаимодействии струй – активной и присоединяемой, будут уменьшаться, η_v будет возрастать.

В результате расчетов по разработанным методикам наиболее характерные значения тяг для различных диаметров поршней представлены в таблице 2. На рис. 8 – 11 приведены графические зависимости наиболее интересных параметров. Необходимо отметить, что самым оптимальным конструктивным вариантом для малоразмерных БПЛА (массой до 50 кг) является вариант №2.

Таблица 2.

Параметры двигателей малоразмерных БПЛА

Наименование параметра	Расчетные данные по вариантам исполнения ДУ малоразмерных БПЛА														
	Вариант №1			Вариант №2			Вариант №3			Вариант №4			Вариант №5		
Диаметр поршня, м	0,0262			0,0365			0,0465			0,0565			0,0665		
Ход поршня, м	0,0240			0,0345			0,0440			0,0535			0,0630		
Диаметр мембраны, м	0,1405			0,1734			0,2122			0,2577			0,3119		
Объем цилиндра, см ³	12,9325			36,0807			74,6841			134,0665			218,7024		
Масса ДУ, кг	0,6850			1,4000			2,8600			8,5000			13,4000		
Масса винтомоторной ДУ, кг	0,8905			1,8200			3,7180			11,0500			17,4200		
Мидель ДУ, м ²	0,0072			0,0123			0,0192			0,0284			0,0404		
Мидель винтомоторной ДУ, м ²	0,0207			0,0394			0,0639			0,0945			0,1309		
Тяга винтомоторной ДУ, Н	22,9561			33,9649			50,2508			74,1911			109,7560		
Скорость поршня, м/с	Мощность, л.с.	Расход горючего, г/час	Тяга, Н	Мощность, л.с.	Расход горючего, г/час	Тяга, Н	Мощность, л.с.	Расход горючего, г/час	Тяга, Н	Мощность, л.с.	Расход горючего, г/час	Тяга, Н	Мощность, л.с.	Расход горючего, г/час	Тяга, Н
10	4,5903	315,76	46,950	6,7930	315,58	69,434	10,050	315,357	102,6	14,838	315,13	108,1	21,951	314,91	223,8
15	6,8855	355,23	70,426	10,189	355,04	104,15	15,075	354,77	153,9	22,257	354,52	162,2	32,926	354,28	335,8
20	9,1807	394,70	93,901	13,585	394,49	138,86	20,100	394,196	205,3	29,676	393,91	216,3	43,902	393,64	447,7
25	11,475	460,48	117,37	16,982	460,23	173,58	25,125	459,890	256,6	37,095	459,37	270,4	54,878	459,25	559,7
30	13,77	526,26	140,85	20,378	525,98	208,30	30,15	525,60	307,9	44,51	525,21	324,5	65,85	524,85	671,6

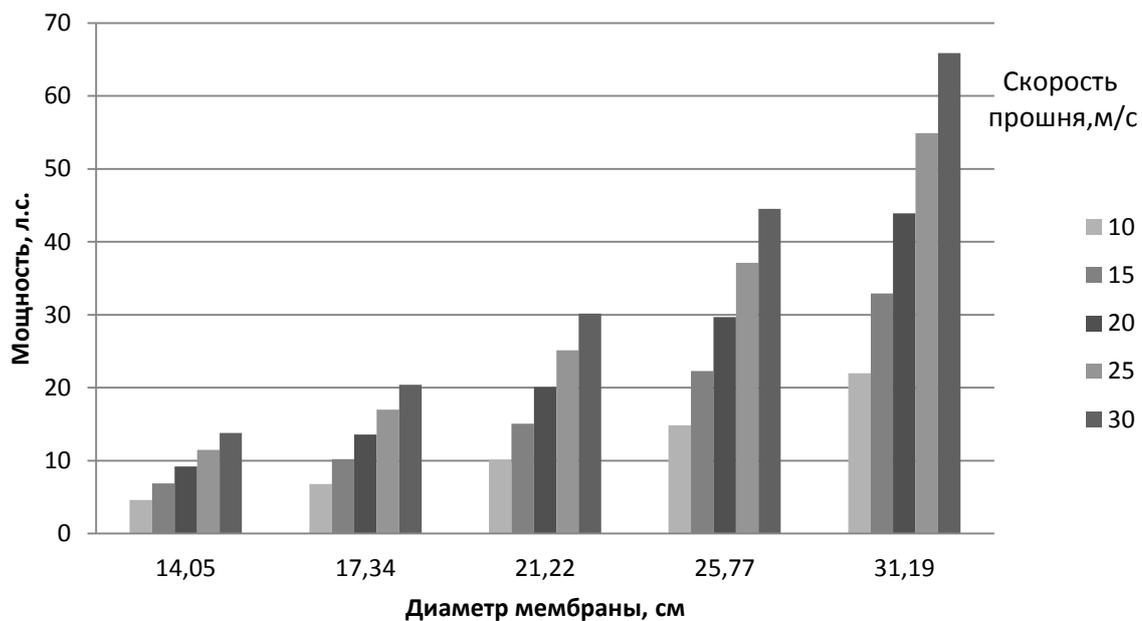


Рис. 8. Зависимость мощности СПН от диаметра используемой мембраны для скорости поршня ($c = 10 \dots 30$ м/с)

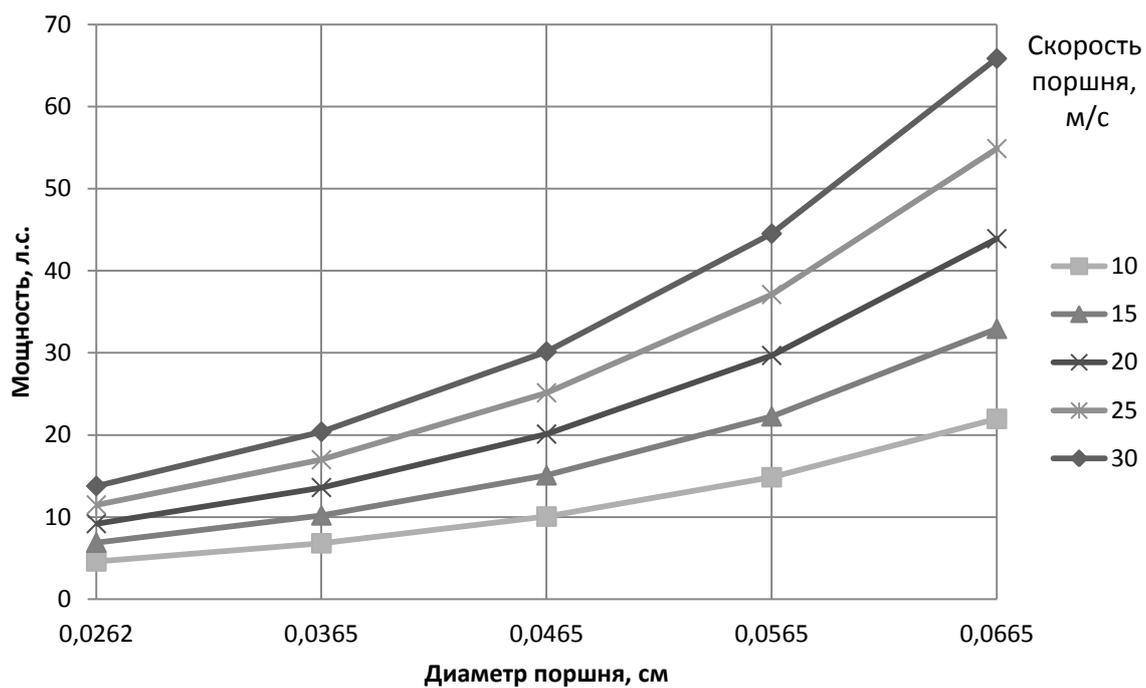


Рис. 9. Зависимость мощности СПН от моторамера прототипа для скорости поршня ($c = 10 \dots 30$ м/с)

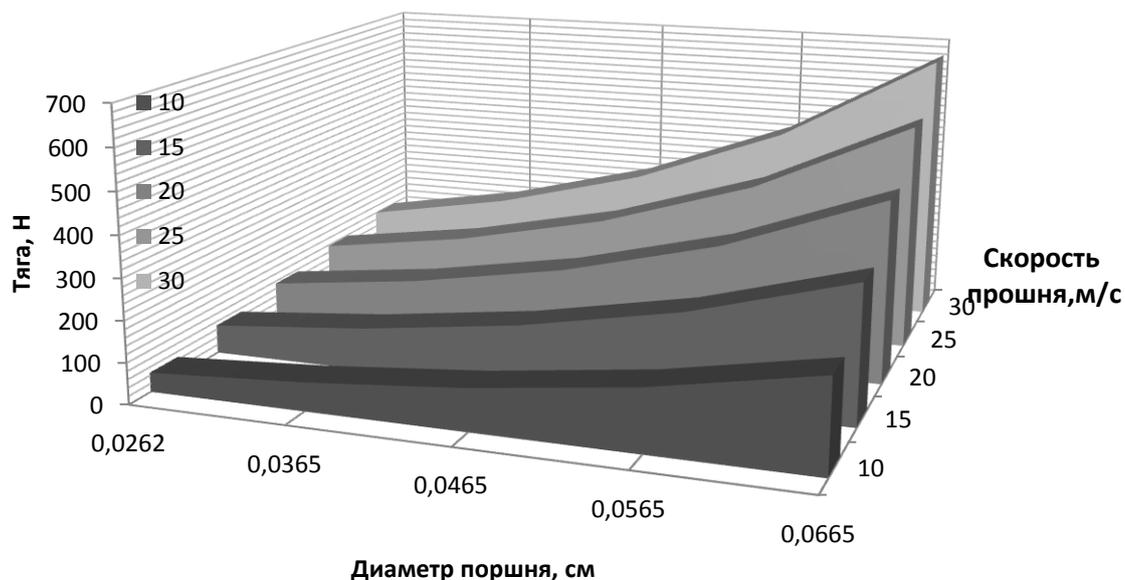


Рис. 10. Зависимость тяги комбинированного ПуВРД от мотора размера прототипа СПН для скорости поршня ($c = 10 \dots 30$ м/с)

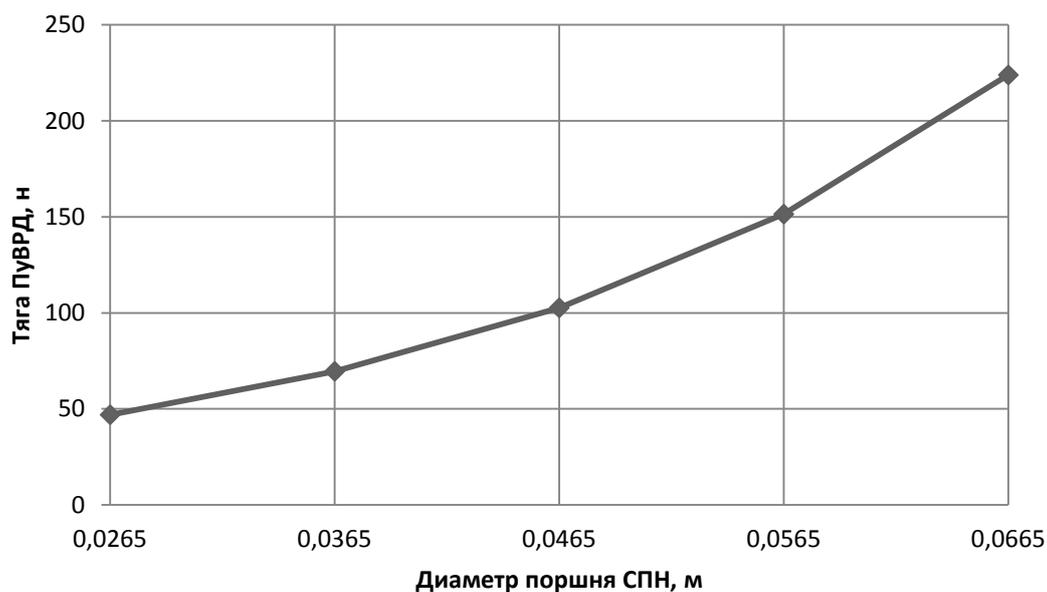


Рис. 11. Зависимость тяги комбинированного ПуВРД от диаметра поршня СПН

Как видно из графика (см. рис. 10) тяга, создаваемая малоразмерным пульсирующим ВРД со СПН, пропорциональна диаметру поршня СПН. Расчет выполнен для значений скоростей поршня, не превышающих стандартных значений двигателей прототипов. Учитывая, что предложенные выше конструктивные

решения позволяют увеличить скорость поршня до 20-30 м/с при использовании керамических поршней с уплотнением по газовому клину, то можно говорить о возможности получения дополнительного прироста тяги до 30 %, при той же массе ДУ. С ростом диаметра поршня увеличивается и его масса, а, следовательно, масса всей установки в целом, что негативно сказывается на удельной тяге ДУ. Так же негативным фактором при увеличении диаметра, является необходимость применения уплотнительных поршневых колец, которые резко сокращают ресурс двигателя и возможности регулирования скорости поршня.

Таким образом, можно сделать вывод, что использование малоразмерного пульсирующего ВРД со СПН топлива, в качестве двигателя малой тяги (например, тормозного двигателя), целесообразно для диапазона тяг до 200 – 250 Н. В этом диапазоне тяг двигатель показывает лучшие удельные характеристики по сравнению с существующими ЖРД малой тяги (ЖРДМТ). Также можно отметить, что применение поршней большого диаметра (свыше 60 мм) в качестве элементов поршневых групп СПН для получения тяг более 250 Н является не эффективным, ведет к увеличению массы ДУ и снижению надежности (см. рис. 11).

Важно отметить влияние скорости продувки камеры СПН на охлаждение его теплонагруженных элементов. Продувка должна осуществляться таким образом, чтобы обеспечивать, с одной стороны, достаточное охлаждение узлов, а, с другой стороны, не создавать запирающие продувочных окон. В процессе расчетов было установлено, что граничным условием процесса продувки является скорость звука, превышение которой влечет за собой появление скачка уплотнения на продувочных

окнах. Ниже представлена зависимость изменения температуры стенки от скорости продувки воздухом (рис. 12).

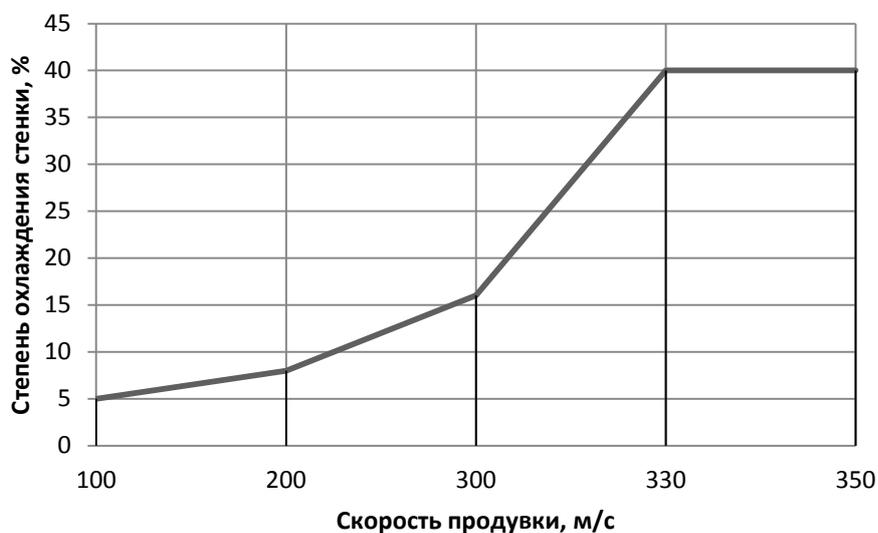


Рис. 12. Зависимость степени охлаждения стенки от скорости продувки

Важным фактором, определяющим характер продувки, являются так же геометрические размеры продуваемых элементов конструкции и, в первую очередь, размеры продувочных окон. В процессе конструктивной разработки необходимо решить задачу достижения некоего оптимума.

Проведенные расчётные исследования показали, что не имеет смысла увеличивать размеры ДУ в попытке увеличения размеров проходных сечений, т. к. разработка в этом направлении приводит к увеличению массы конструкции, росту теплонапряжённости узлов и агрегатов, а также к ухудшению общего теплового КПД. В то же время попытка уменьшения размеров ДУ с целью снижения её массы приводит к уменьшению размеров проходных сечений и в итоге делает не

возможным эффективным внутреннее охлаждение продувкой и так же приводит к уменьшению теплового КПД.

Верификацию предложенной методики расчета произведем путем сравнения параметров, полученных в результате расчета, с параметрами существующих ДУ. В качестве прототипов были выбраны малоразмерные поршневые двигатели, выпускаемые ОАО «МДС-микро».

Для сравнения были выбраны 5 наиболее мощных двигателей из представленного ряда, для которых на основе исходных параметров была рассчитана мощность. Результаты расчета представлены на рис. 13. На рис. 14 представлена точность расчета мощности в зависимости от модели двигателя.

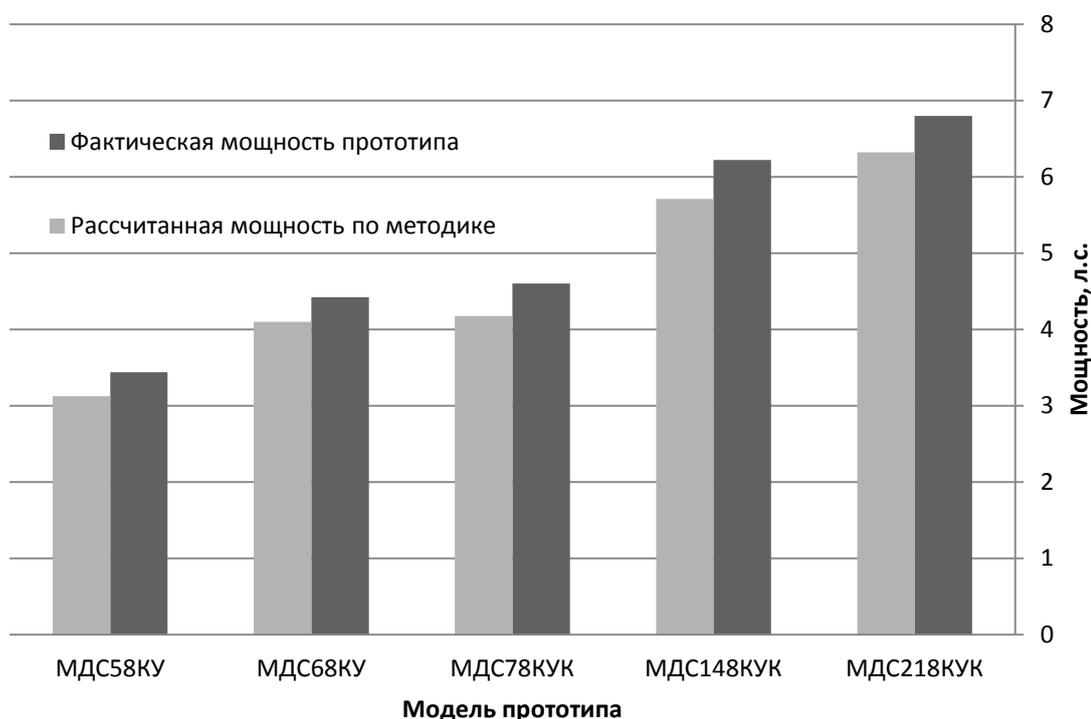


Рис. 13. Сравнение фактической и расчетной мощностей для каждого из прототипов

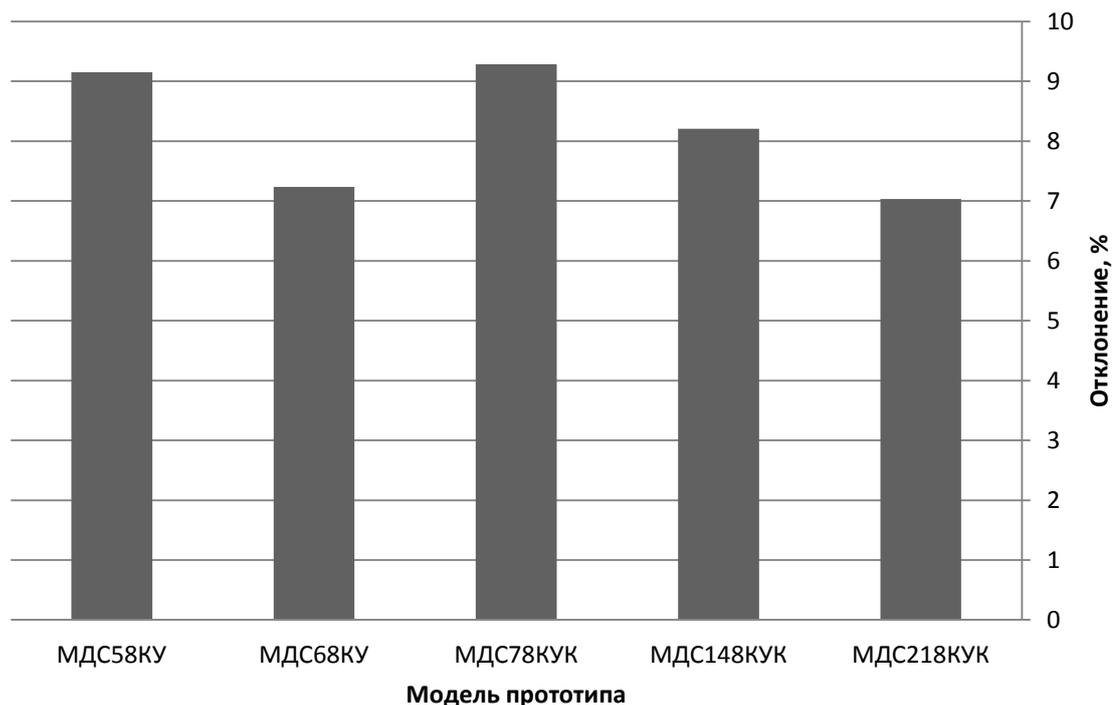


Рис. 14. Точность расчета мощности в зависимости от модели двигателя

Заключение

В процессе работы над исследованием возможности применения пульсирующего ВРД в качестве ДУ малоразмерных БПЛА и анализе его проектных параметров, автором так же были:

1. Определены основные параметры ДУ, и сделаны выводы о том, что условием, ограничивающим скорость движения поршня, является скачок уплотнения, возникающий на продувочных и выхлопных окнах. Используя этот фактор и применяя метод тепловых балансов, с высокой точностью удастся вычислить предельно-допустимую скорость поршня, определить геометрические размеры установки и ее составляющих: поршня, цилиндра и камеры сгорания, а также тягу, создаваемую ДУ на различных высотах полета.

2. Граничным условием процесса продувки является скорость звука, превышение которой влечет за собой появление скачка уплотнения на продувочных окнах. В то же время попытка уменьшения размеров ДУ с целью уменьшения её массы приводит к уменьшению размеров проходных сечений и в итоге делает невозможным эффективное внутреннее охлаждение продувкой и так же приводит к уменьшению теплового КПД.

3. Определен коэффициент усиления ЭУТ и проведено сравнение расчетных данных с экспериментальными данными.

4. Проведена верификация разработанной методики расчета на основе сравнения полученных результатов с параметрами существующих ДВС. Принимая в качестве начальных параметров геометрические размеры поршневой группы существующего ДВС (диаметр и ход поршня) была рассчитана мощность для модельного ряда двигателей. Отклонение составило порядка 7-9 %, что позволяет говорить о достаточной сходимости результатов.

5. На основании разработанной методики проведена оценка основных параметров ЛА со стартовой массой от 1 до 100 кг и показано, что предложенный новый вариант комбинированной ДУ, обладает массовой эффективностью, сравнимой с известными разработками, и заслуживает дальнейшего более полного исследования. На основании предварительного технико-экономического анализа БПЛА лёгкого класса показано, что предложенный вариант удовлетворяет всем основным требованиям современного этапа развития средств выведения.

Библиографический список

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1991. – 454 с.
2. Афинов В.Н. Стратегические разведывательные БПЛА и направления развития беспилотной авиации США // Зарубежное военное обозрение. 2000. № 6. С. 35-42.
3. Богданов В.И. Повышение эффективности пульсирующих реактивных двигателей: Дисс. ... докт. техн. наук. – М.: 2003. - 293 с.
4. Бодров А.В., Лапушкин В.Н. Теоретическое исследование возможности создания малоразмерной высотной реактивно-поршневой энергетической установки дистанционно-пилотируемого летательного аппарата // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 2. С. 73-77.
5. Васильев А.В., Григорьев Е.А. Математическое моделирование рабочих процессов ДВС. – Волгоград: Изд-во Волгоградского гос. технического университета. 2002. – 67 с.
6. Гаврилов А.А., Игнатов М.С., Эфрос В.В. Расчет циклов поршневых двигателей. – Владимир: Изд-во Владимирского гос. университета, 2003. - 124 с.
7. Гришин С.Д., Захаров Ю.А., Оделевский В.К. Проектирование космических аппаратов с двигателями малой тяги. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
8. Зуев В.С., Макарон В.С. Теория прямоточных и ракетно-прямоточных двигателей. – М.: Машиностроение, 1971. - 368 с.
9. Квасников А.В. Процессы и балансы в авиамоторных установках. – М.: Оборонгиз, 1948. – 256 с.

10. Кошкин В.К., Левин Б.Г. Двигатели со свободно движущимися поршнями. – М.: Машгиз, 1954. – 176 с.
11. Кошкин В.К., Майзель Л.М., Черномордик Б.М. Свободнорпоршневые генераторы газа для газотурбинных установок. – М.: Машгиз, 1963. – 292 с.
12. Побежимов В.Н. Моделирование рабочего процесса пульсирующего ВРД с аэродинамическим клапаном на основе анализа термодинамического цикла // Известия Вузов. Авиационная техника. 2007. № 1. С. 46-48.
13. Щипаков В.А. Проблемы создания газотурбинного пульсирующего детонационного двигателя // Труды МАИ. 2013. № 67. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=41601>