

УДК 621.454.2.043

Г. В. Назаренко, П. П. Филиппенко, А. Ю. Стрельченко, С. А. Дешевых

*Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное»
им. М.К. Янгеля»*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ШАГА ШНЕКА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И АНТИКАВИТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ШНЕКОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

За результатами дослідження встановлено, що застосування у насосах РРД складальних шнеків змінного кроку і шнеків змінного кроку замість шнеків постійного кроку збільшує напір і ККД насосу. Застосування складального шнеку і шнеку змінного кроку в порівнянні зі шнеком постійного кроку не впливають на кавітаційні характеристики шнековідцентрових насосів РРД.

Ключові слова: напірна характеристика, кавітаційна характеристика, шнек змінного кроку, шнек постійного кроку, ККД насосу.

По результатам исследования установлено, что применение в насосах ЖРД составных шнеков и шнеков переменного шага вместо шнеков с постоянным шагом повышается их КПД и напор. Применение составного шнека и шнека переменного шага по сравнению со шнеком постоянного шага не оказывают влияния на кавитационные свойства насосов ЖРД.

Ключевые слова: напорная характеристика, кавитационная характеристика, шнек переменного шага, шнек постоянного шага, КПД насоса.

Application of the compound inducers and variable-pitch inducers in the pumps in the LPRE instead of the continuous-pitch inducers allows increasing the pump head and efficiency. The use of the composite inducers and inducers of the variable-pitch does not influence the cavitation characteristics of the centrifugal LPRE pumps in comparison with the constant-pitch inducers.

Key words: pressure characteristic, cavitation characteristic, inducers of the variable-pitch, continuous-pitch inducers, pump efficiency

Введение. ЖРД с насосной системой подачи получили широкое распространение в современной ракетной технике [1, 2]. Насосы, которые применяются в современных ЖРД, как правило шнекоцентробежные. Шнек повышает давление перед центробежным колесом, тем самым обеспечивает его бескавитационную работу. Шнеки, применяемые в шнекоцентробежных насосах ЖРД, бывают двух видов: с постоянным и переменным шагом [3, 4]. Иногда в насосах ЖРД применяют составной шнек (шнек состоит из двух частей с разным шагом). Шнеки с постоянным шагом более просты в расчете и профилировании по сравнению со шнеком переменного шага [5, 6].

Постановка задачі. Как известно из литературных источников [5, 6] применение шнека переменного шага, повышает энергетические характеристики шнекоцентробежного насоса.

Целью проводимого исследования является сравнение энергетических характеристик шнекоцентробежных высокооборотных малорасходных насосов ЖРД при использовании шнеков переменного и постоянного шага. Так же особое внимание было уделено анализу антикавитационных качеств насосов со шнеками переменного шага.

Результаты исследования. В рамках проводимого исследования выполнен анализ энергетических и кавитационных характеристик высокооборотных малорасходных шнекоцентробежных насосов, следующих ЖРД: насосы окислителя и горючего двигателя №1, насосы окислителя и горючего двигателя №2, насосы горючего двигателя №3.

Сравнительный анализ энергетических характеристик шнекоцентробежных насосов ЖРД при использовании шнеков переменного и постоянного шага. Анализ энергетических характеристик высокооборотных малорасходных шнекоцентробежных насосов ЖРД был проведен по результатам гидравлических испытаний насосов окислителя и горючего вышеприведенных двигателей. Величины частоты вращения ротора этих насосов лежат в диапазоне от 3560,5 до 4398 1/с. Величины номинального расхода через вышеупомянутые насосы не превышают 0,009 м³/с.

Величины коэффициента напора насосов окислителя и горючего двигателя №1 приведены в таблицах №1 и №2. Они были определены расчетным путем. Исходными данными для расчета послужили результаты гидравлических испытаний.

Таблица 1

Величины коэффициента напора насосов окислителя при их испытании с различными вариантами шнека (двигатель №1)

| Номер насоса и номер испытания | Величина коэф. напора насоса со шнеком постоянного шага | Величина коэф. напора насоса со шнеком переменного шага |
|--------------------------------|---|---|
| Насос №1, исп. №1 | 0,59592 | 0,6177 |
| Насос №1, исп. №2 | – | 0,61656 |
| Насос №1, исп. №3 | – | 0,61499 |
| Насос №2, исп. №1 | 0,59273 | – |
| Насос №2, исп. №2 | 0,60167 | – |

Таблиця 2

Величини коефіцієнта напора насосов горючего при их испытании с различными вариантами шнека (двигатель №1)

| Номер насоса и номер испытания | Величина коэф. напора насоса со шнеком постоянного шага | Величина коэф. напора насоса со шнеком переменного шага |
|--------------------------------|---|---|
| Насос №1, исп. №1 | 0,64597 | 0,65274 |
| Насос №1, исп. №2 | – | 0,6502 |
| Насос №1, исп. №3 | – | 0,65 |
| Насос №2, исп. №1 | 0,6422 | – |

По данным приведенным в таблицах №1 и №2 можно констатировать, что величины коэффициента напора насосов со шнеками переменного шага выше, чем те же величины для насосов со шнеками постоянного шага. Увеличение коэффициента напора насосов, укомплектованных шнеками переменного шага по сравнению с насосами укомплектованными шнеками постоянного шага составляет:

- для насосов окислителя от 0,01332 до 0,02497 (от 2,21 до 4,21 %);
- для насосов горючего от 0,0043 до 0,01054 (от 0,62 до 1,64 %).

Это объясняется тем, что с увеличением шага шнека на выходе увеличивается угол установки лопатки шнека на выходе, а следовательно, и его напор, что приводит к некоторому повышению напора насоса.

На рис.1 и 2 приведены характеристики КПД насосов горючего и окислителя двигателя №1.

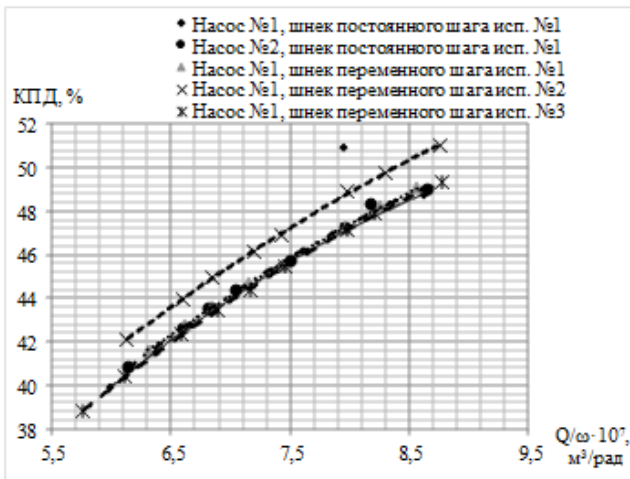


Рис. 1. Зависимость КПД от объемного расхода, приведенного к частоте вращения ротора насоса горючего двигателя №1

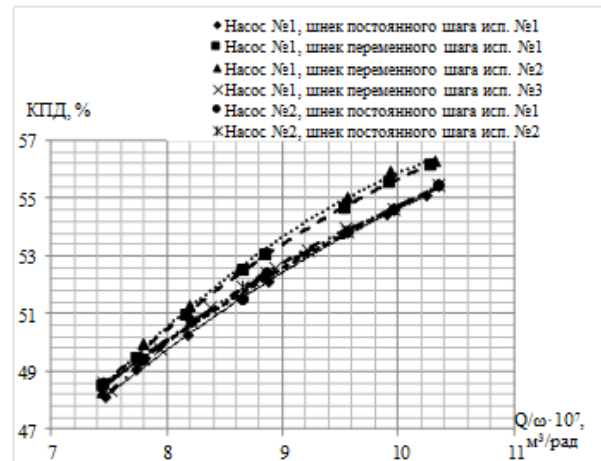


Рис. 2. Зависимость КПД от объемного расхода, приведенного к частоте вращения ротора для насоса окислителя двигателя №1

Проанализировав представленные на рис.1 и 2 характеристики можно констатировать следующие:

1. Величины КПД насосов горючего в контрольной точке, укомплектованных шнеками переменного шага находятся в диапазоне от 44,39 до 46,38 %;

2. Величины КПД насосов горючего в контрольной точке, укомплектованных шнеками постоянного шага находятся в диапазоне от 44,82 до 45,04 % (нижний предел диапазона);

3. Величины КПД насосов окислителя в контрольной точке, укомплектованных шнеками переменного шага, находятся в диапазоне от 52,39 до 53,28 %;

4. Величины КПД насосов окислителя в контрольной точке, укомплектованных шнеками постоянного шага, находятся в диапазоне от 52,1 до 52,94 %.

Проведя анализ величин КПД насосов окислителя и горючего, можно сделать вывод, что шнек переменного шага способствует незначительному увеличению КПД: $\sim 1,34$ % для насоса горючего и $\sim 0,34$ % для насоса окислителя. Величины коэффициента напора насосов окислителя и горючего двигателя №2 приведены в таблицах №3 и №4. Они были определены расчетным путем. Исходными данными для расчета послужили результаты гидравлических испытаний.

Таблица 3

Величины коэффициента напора насосов окислителя при их испытаниях с различными вариантами шнека (двигатель №2)

| Номер насоса и номер испытания | Величина коэф. напора насоса со шнеком постоянного шага | Величина коэф. напора насоса со шнеком переменного шага |
|--------------------------------|---|---|
| Насос №1, исп. №1 | 0,63813 | – |
| Насос №2, исп. №1 | 0,63036 | 0,63863 |
| Насос №2, исп. №2 | 0,63379 | – |
| Насос №2, исп. №3 | 0,63454 | – |
| Насос №2, исп. №4 | 0,63454 | – |

По данным приведенным в таблицах №3 и №4 можно констатировать, что величины коэффициента напора насосов со шнеками переменного шага выше, чем величины коэффициента напора насосов со шнеками постоянного шага. Увеличение коэффициента напора насосов, укомплектованных шнеками переменного шага, по сравнению с насосами укомплектованными шнеками постоянного шага составляет:

- для насоса окислителя от 0,0005 до 0,00827 (от 0,08 до 1,31 %);
- для насосов горючего от 0,00627 до 0,01727 (от 0,92 до 2,56 %).

Таблиця 4

Величини коефіцієнта напора насосов горючого при их испытании с различными вариантами шнека (двигатель №2)

| Номер насоса и номер испытания | Величина коэф. напора насоса со шнеком постоянного шага | Величина коэф. напора насоса со шнеком переменного шага |
|--------------------------------|---|---|
| Насос №1, исп. №1 | 0,67444 | 0,68855 |
| Насос №1, исп. №2 | 0,6765 | 0,69171 |
| Насос №2, исп. №1 | 0,68228 | – |
| Насос №2, исп. №2 | 0,67923 | – |

В таблицах №5 и №6 приведены величины КПД для контрольных точек насосов окислителя и горючего двигателя №2 определенные по результатам гидравлических испытаний.

Проанализировав данные представленные в таблицах №5 и №6 можно констатировать следующие:

1. Величины КПД насосов горючего в контрольной точке, укомплектованных шнеками переменного шага находятся в диапазоне от 39,98 до 41,23 %;

2. Величины КПД насосов горючего в контрольной точке, укомплектованных шнеками постоянного шага находятся в диапазоне от 39,41 до 40,49 %;

3. Величина КПД насоса окислителя в контрольной точке, укомплектованного шнеком переменного шага, составляет 48,3 %;

4. Величины КПД насосов окислителя в контрольной точке, укомплектованных шнеками постоянного шага, находятся в диапазоне от 47,6 до 54,5 %.

Таблиця 5

Величины КПД насосов окислителя при их испытании с различными вариантами шнека (двигатель №2)

| Номер насоса и номер испытания | Величина КПД насоса со шнеком постоянного шага, % | Величина КПД насоса со шнеком переменного шага, % |
|--------------------------------|---|---|
| Насос №1, исп. №1 | 50,7 | – |
| Насос №2, исп. №1 | 49,37 | 48,3 |
| Насос №2, исп. №2 | 54,5 | – |
| Насос №2, исп. №3 | 47,6 | – |
| Насос №2, исп. №4 | 48,2 | – |

Таблиця 6

Величины КПД насосов горючего при их испытании с различными вариантами шнека (двигатель №2)

| Номер насоса и номер испытания | Величина КПД насоса со шнеком постоянного шага, % | Величина КПД насоса со шнеком переменного шага, % |
|--------------------------------|---|---|
| Насос №1, исп. №1 | 40,02 | 39,98 |
| Насос №1, исп. №2 | 40,49 | 41,23 |
| Насос №2, исп. №1 | 40,16 | – |
| Насос №2, исп. №2 | 39,41 | – |

Проведя анализ величин КПД насосов окислителя и горючего, можно сделать следующие выводы:

1. Применение шнека переменного шага для насоса горючего несколько повышает его КПД до 0,74 %.

2. Применение шнека переменного шага для насоса окислителя не привело к повышению его КПД. Величина КПД насоса окислителя, укомплектованного шнеком переменного шага составляет 48,3 % – примерно середина диапазона набранной статистики.

Данный факт можно объяснить тем, что был выбран не оптимальный шаг шнека на выходе. Из-за чего величина КПД насоса не увеличилась и диапазон величин прироста напора имеет самые малые величины среди всех исследуемых насосов.

Далее рассматривается насос горючего двигателя №3. В насосе горючего двигателя №3 использовались: составной шнек, который был выполнен из двух частей разного шага, шнек постоянного шага, шнек переменного шага.

На наружный диаметр выходной части шнеков напайвался бандаж (кроме шнека постоянного шага). Еще одним конструктивным отличием является коэффициент диаметра шнека на выходе, который составляет:

- для шнека постоянного шага 6,47;
- для составного шнека 5,27;
- для шнека переменного шага 5,27.

В насосе №2 двигателя №3 использовано центробежное колесо, полученное способом 3D-печати, а в насосе №1 центробежное колесо, изготовленное с помощью фрезерования. Данные технологии изготовления центробежного колеса обладают достаточно высокой точностью и позволяют свести к минимуму погрешности при изготовлении, которые, в свою очередь, могут дать весомую разницу по величине полученного напора и КПД.

Энергетические характеристики (напорная и характеристика КПД) насоса горючего двигателя №3 представлены на рис.3 и 4.

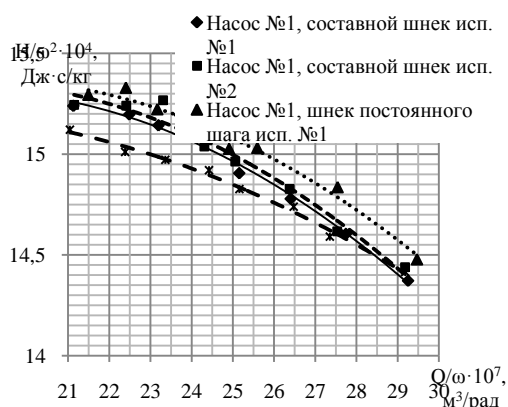


Рис. 3. Зависимость напора, приведенного к квадрату частоты вращения ротора от объемного расхода, приведенного к частоте вращения ротора для насоса горючего двигателя №3

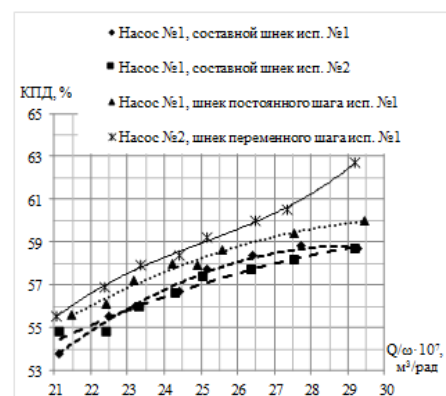


Рис. 4. Зависимость КПД от объемного расхода, приведенного к частоте вращения ротора для насоса горючего двигателя №3

Как видно из рис.3, величина напора насоса в контрольной точке со шнеком постоянного шага выше величин напора насосов с составным шнеком и шнеком переменного шага. Если сравнивать величины напора в контрольной точке насоса горючего, то увеличение напора составляет:

- 1,35% по сравнению со шнеком переменного шага;
- до 0,86% по сравнению с составным шнеком.

Данная особенность объясняется тем, что шнек с постоянным шагом имеет больший наружный диаметр на выходе. По вышеприведенным данным можно сделать вывод, что на напор шнека наибольшее влияние оказывает его наружный диаметр.

Разница между напорами насосов укомплектованных составными шнеками и насоса, укомплектованного шнеком переменного шага, объясняется различными технологиями изготовления центробежного колеса.

Величины КПД насосов горючего в контрольной точке, которые были определены из представленных на рис. 4 характеристик лежат в диапазоне от 57,45 до 59,23 %. Величины КПД для насосов с различными вариантами шнеков следующие: 58,3% – шнек постоянного шага; от 57,45 до 57,8% – составной шнек; 59,23% – шнек переменного шага.

Применение шнека переменного шага несколько повышает КПД насоса горючего двигателя №3 до 0,93 %, по сравнению с насосом где применен шнек постоянного шага. Снижение КПД насоса, укомплектованного составным шнеком по сравнению с насосами укомплектованными шнеками переменного и постоянного шага, связано с его конструктивными особенностями. Конструктивно составной шнек состоит из двух шнеков разного шага. В месте их стыковки происходит резкое изменение шага шнека, так же витки шнеков невозможно идеально состыковать. В результате этого в месте стыковки возникают вихри, которые и приводят к снижению КПД насоса.

Сравнительный анализ кавитационных характеристик шнекоцентробежных насосов ЖРД при применении шнеков переменного и постоянного шага. Кавитационные характеристики насосов окислителя и горючего двигателей №1, №2 и №3 были получены по результатам гидравлических испытаний, которые представлены в графическом виде. Графики представляют собой зависимость изменения приведенного напора $H_{пр}$ от изменения кавитационного запаса Δh на входе в насос. Приведенный напор определяется по формуле.

$$H_{пр} = \frac{H_{изм}}{H_{изм.ном}} \cdot 100\%$$

где $H_{изм}$ – напор для каждой точки кавитационной характеристики; $H_{изм.ном}$ – напор в контрольной точке.

Кавитационные характеристики насосов горючего и окислителя двигателей №1 и №2 приведены на рис. 5, 6, 7 и 8.

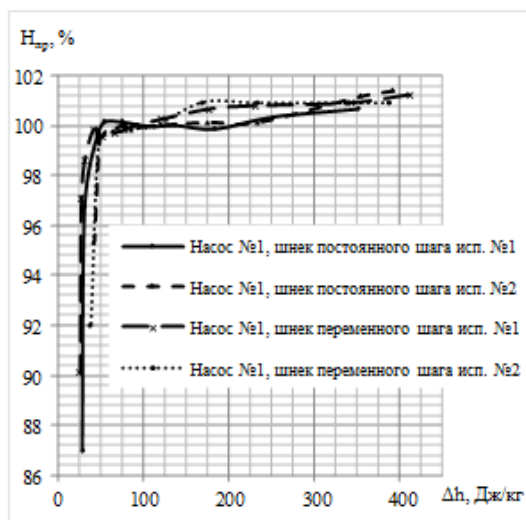


Рис. 5. Кавитационные характеристики насоса горючего двигателя №1

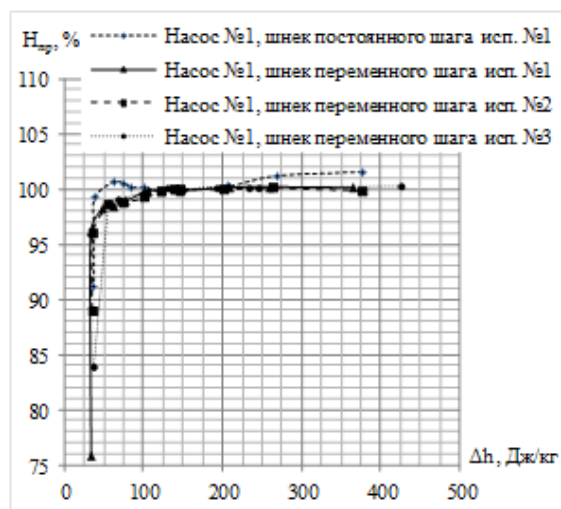


Рис. 6. Кавитационные характеристики насоса окислителя двигателя №1

Представленные характеристики демонстрируют, что применение шнека переменного шага не оказывает влияния на кавитационные свойства насосов горючего и окислителя двигателей №1 и №2.

Кавитационные характеристики насосов горючего двигателя №3 представлены на рис. 9.

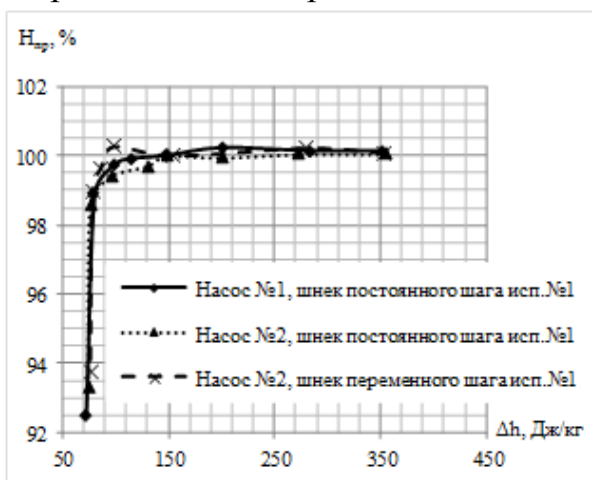


Рис. 7. Кавитационные характеристики насоса горючего двигателя №2

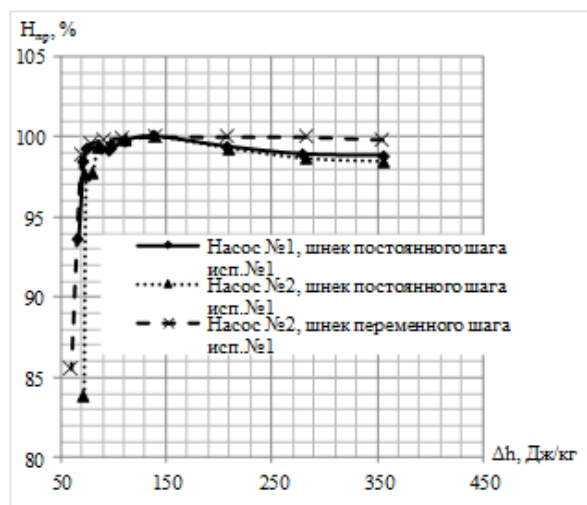


Рис. 8. Кавитационные характеристики насоса окислителя двигателя №2

Конструктивно насос горючего двигателя №3 со шнеком постоянного шага отличается от насоса горючего двигателя №3 с составным шнеком и шнеком переменного шага. Отличия заключаются в конструкции центробежного колеса:

1. шесть лопаток двойной кривизны (вместо девяти цилиндрических);
2. коэффициент уширения входного участка равен 6,45 (вместо 5,35);
3. центробежное колесо изготовлено литьем (вместо фрезерованного центробежного колеса с последующим припаиванием покрывного диска).

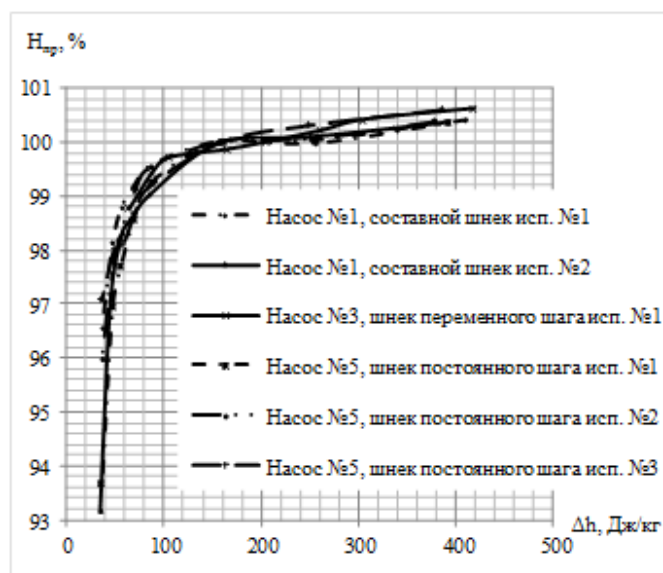


Рис. 9. Кавітаційні характеристики насоса горючого двигателя №3

Первое и второе отличие насоса горючего двигателя №3 со шнеком постоянного шага положительно влияют на антикавитационные качества насоса. Третье отличие практически не влияет на антикавитационные качества насоса.

Представленные характеристики демонстрируют, что все вышеприведенные конструктивные различия насоса горючего двигателя №3 не оказывают влияния на его кавитационные свойства [7].

Выводы. Применение в высокооборотных малорасходных шнекоцентробежных насосов ЖРД шнеков переменного шага вместо шнеков постоянного шага дает следующие результаты:

1. Увеличение величины коэффициента напора насоса от 0,0005 до 0,02497 (что составляет от 0,08 до 4,2 % величины коэффициента напора насоса) при неизменных параметрах проточной части насоса кроме шага шнека:

2. Так же незначительно увеличивается КПД насоса до 1,34%. Что в свою очередь позволяет повысить удельный импульс тяги для схем без дожигания, а также уменьшить температуру генераторного газа (увеличение запаса по форсированию двигателя) или уменьшить перепад давления на турбине (уменьшение напора насоса) для схемы с дожиганием.

3. Применение составного шнека и шнека переменного шага по сравнению со шнеком постоянного шага не оказывает влияния на антикавитационные свойства малорасходных шнекоцентробежных насосов ЖРД. Данное утверждение было сделано без учета полетных перегрузок ракетносителя, величины собственных колебаний конструкции и топлива ракетносителя.

Так же необходимо отметить, что основным конструктивным параметром, влияющим на напор шнека, является величина его наружного диаметра.

Библиографические ссылки

1. Пат. 6505463 США МПК F02K9/48. Pre-burner operating method for rocket turbopump [Текст]/ William D. Kruse, Thomas J. Mueller, John J. Weede (США), правообладатель Northrop Grumman Corporation. – № 20020148215; заявл. 17.01.2001; опубл. 1. 14.01.2003, Бюл № 09/761,957. – 5 с.
2. Пат. 6640536 США МПК F02K9/50, F02K9/48, F02K9/46, F02K9/72, F02K9/56. Hybrid rocket motor using a turbopump to pressurize a liquid propellant constituent [Текст] / Corey R. Kline, Kevin W. Smith, Eric E. Schmidt, Thomas O. Bales, правообладатель Nu Pat Corporation (Miami, FL) – № 20030136111 заявл. 22.01.2002; опубл. 04.11.2003, Бюл. № 10/054,646. – 11 с.
3. Чебаевский В. Ф. Кавитационные характеристики высокооборотных шнеко-центробежных насосов [Текст] / В. Ф. Чебаевский, В. И. Петров. – М.: Машиностроение, 1973. – 152 с.
4. Петров В. И. Кавитация в высокооборотных лопастных насосах [Текст] / В. И. Петров, В. Ф. Чебаевский.– М.: Машиностроение, 1982. – 192 с.
5. Овсяников В. Б. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей [Текст] / В. Б. Овсяников, Б. И. Боровский. – М.: Машиностроение, 1986. – 376 с.
6. Боровский Б.И. Энергетические параметры и характеристики высокооборотных лопастных насосов [Текст] / Б. И. Боровский. – М.: Машиностроение, 1989. – 181 с.
7. Назаренко Г.В., Филиппенко П.П., Стрельченко А.Ю., Дешевых С.А. Влияние конструкции шнека на энергетические и антикавитационные свойства шнекоцентробежных насосов. Научно-технический сборник Космическая техника. Ракетное вооружение. 2(116)/2018. С. 76-82.

Надійшла до редколегії 28.09.2019