

УДК 621.454.2.043

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

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ШНЕКА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И АНТИКАВИТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ШНЕКОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

В современной ракетной технике широкое распространение получили жидкостные ракетные двигатели с насосной системой подачи. Как правило, насосы, применяемые в жидкостных ракетных двигателях, – шнекоцентробежные. Шнек служит для повышения давления перед центробежным колесом, тем самым обеспечивая его бескавитационную работу. Шнеки, применяемые в шнекоцентробежных насосах жидкостных ракетных двигателей, бывают двух видов: с постоянным и переменным шагом. Шнеки с постоянным шагом более просты в расчете, профилировании и изготовлении по сравнению со шнеком переменного шага. Как известно из литературы, применение шнека переменного шага повышает энергетические характеристики шнекоцентробежного насоса. Целью исследования является проведение сравнительного анализа кавитационных и энергетических характеристик следующих высокооборотных малорасходных шнекоцентробежных насосов жидкостных ракетных двигателей с составными шнеками, шнеками переменного и постоянного шага:

- насосов окислителя и горючего двигателя РД868;
- насосов горючего двигателя РД859;
- насосов горючего двигателя РД861К.

Также проведен анализ влияния конструктивных особенностей и геометрических размеров шнеков с переменным и постоянным шагом на энергетические характеристики шнекоцентробежных высокооборотных малорасходных насосов жидкостных ракетных двигателей. Особое внимание уделялось анализу антикавитационных качеств насосов со шнеками переменного шага и насосам с составными шнеками. По результатам исследования установлено, что при применении в высокооборотных малорасходных шнекоцентробежных насосах жидкостных ракетных двигателей составных шнеков и шнеков с переменным шагом вместо шнеков с постоянным шагом напор насоса увеличивается от 0,65 до 3,83%; КПД увеличивается до 1,7%. Применение составного шнека и шнека с переменным шагом по сравнению со шнеком постоянного шага не оказывает влияния на кавитационные свойства малорасходных шнекоцентробежных насосов жидкостных ракетных двигателей.

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

У сучасній ракетній техніці широко застосовуються рідинні ракетні двигуни з насосною системою подачі. Як правило, насоси, що застосовують у рідинних ракетних двигунах, – шнековідцентрові. Шнек використовують для підвищення тиску перед відцентровим колесом, у такий спосіб забезпечуючи його безкавітаційну роботу. Шнеки, що застосовують у шнековідцентрових насосах рідинних ракетних двигунів, бувають двох видів: з постійним і змінним кроком. Шнеки з постійним кроком простіші в розрахунку, профілюванні та виготовленні у порівнянні зі шнеком змінного кроку. Як відомо з літератури, застосування шнека зі змінним кроком підвищує енергетичні характеристики шнековідцентрового насоса. Метою дослідження є проведення порівняльного аналізу кавітаційних і енергетичних характеристик таких високооборотних маловитратних шнековідцентрових насосів рідинних ракетних двигунів зі складовими шнеками, шнеками зі змінним і постійним кроком:

- насосів окиснювача і пального двигуна РД868;
- насосів пального двигуна РД859;
- насосів пального двигуна РД861К.

Також проаналізовано вплив конструктивних особливостей і геометричних розмірів шнеків зі змінним і постійним кроком на енергетичні характеристики шнековідцентрових високооборотних маловитратних насосів рідинних ракетних двигунів. Особливу увагу було приділено аналізу антикавітаційних якостей насосів зі шнеками змінного кроку і насосів зі складовими шнеками. За результатами дослідження встановлено, що під час застосування у високооборотних маловитратних шнековідцентрових насосах рідинних ракетних двигунів складових шнеків і шнеків зі змінним кроком замість шнеків з постійним кроком напір насоса збільшується від 0,65 до 3,83%; ККД збільшується до

1,7%. Застосування складового шнека та шнека зі змінним кроком у порівнянні зі шнеком з постійним кроком не впливає на кавітаційні властивості маловитратних шнековідцентрових насосів рідинних ракетних двигунів.

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

In the present-day rocket engineering, the liquid rocket engines with pump feed system have gained wide acceptance. As a rule, the pumps used in liquid rocket engines are screw-axifugal. The screw serves to increase pressure upstream of the axifugal wheel, thus ensuring its cavitation-free operation. The screws used in the screw-axifugal pumps of liquid rocket engines may be of two types: with constant and variable step. The screws with constant step are easier to calculate, profile and manufacture as compared to the screws with variable step. As known from the literature, the use of the screw with variable step increases power characteristics of the screw-axifugal pump. The purpose of investigation is comparative analysis of cavitation and power characteristics of the following high-speed low-consumption screw-axifugal pumps of liquid rocket engines with jointed screws, screws of constant and variable step:

- RD868 engine oxidizer and fuel pumps;
- RD859 engine fuel pumps;
- RD861K engine fuel pumps.

Besides, the analysis has been made of the impact of design features and geometrical dimensions of the screws with variable and constant step on power characteristics of the screw-axifugal high-speed low-consumption pumps of liquid rocket engines. Special attention has been given to the analysis of anti-cavitation properties of the pumps with screws of variable step and pumps with jointed screws. Based on the results of investigation, it has been ascertained that when using the joint screws and screws with variable step instead of the screws with constant step in the high-speed low-consumption screw-axifugal pumps of liquid rocket engines, the pump delivery head increases from 0.65 to 3.83%, the efficiency increases up to 1.7%. The use of jointed screw and screw of variable step as compared with the screw of constant step does not have any impact on cavitation properties of low-consumption screw-axifugal pumps of liquid rocket engines.

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

Введение

В современной ракетной технике широкое распространение получили жидкостные ракетные двигатели (ЖРД) с насосной системой подачи [1, 2]. Насосы, применяемые в ЖРД, – шнекоцентробежные. Шнек служит для повышения давления перед центробежным колесом, тем самым обеспечивая его бескавитационную работу. Шнеки, применяемые в шнекоцентробежных насосах ЖРД, бывают двух видов: с постоянным и переменным шагом [3, 4]. Шнек с постоянным шагом более прост в расчете, профилировании и изготовлении по сравнению со шнеком переменного шага [5, 6].

Постановка задачи

Как известно из литературных источников [5, 6], применение шнека переменного шага повышает энергетические характеристики шнекоцентробежного насоса. Поэтому целью проводимого исследования является определение величин повышения энергетических характеристик шнекоцен-

тробежных высокооборотных малорасходных насосов ЖРД при использовании шнека переменного шага вместо шнека постоянного шага. Также проводится анализ влияния конструктивных особенностей и геометрических размеров шнеков с переменным и постоянным шагом (если такие имеются) на энергетические характеристики шнекоцентробежных высокооборотных малорасходных насосов ЖРД.

Отдельного внимания заслуживает анализ антикавитационных качеств насосов со шнеками переменного шага.

Результаты исследования

В рамках исследования проведен анализ энергетических и кавитационных характеристик следующих высокооборотных малорасходных шнекоцентробежных насосов ЖРД:

- насосов окислителя и горючего двигателя РД868;
- насосов горючего двигателя РД859;
- насосов горючего двигателя РД861К.

Сравнительный анализ энергетических характеристик шнекоцентробежных насосов ЖРД при применении 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. Все гидравлические испытания насосов горючего и окислителя были проведены по штатной конструкторской документации. Единственным отличием от штатной конструкторской документации для насосов окислителя и горючего двигателя РД868 является увеличенный диапазон изменения расхода, проходящего через насос.

Энергетические характеристики (напорная и КПД) насосов окислителя и горючего двигателя РД868 представлены на рис. 1 – 4. Напорные характеристики и характеристики КПД приведены в относительных величинах.

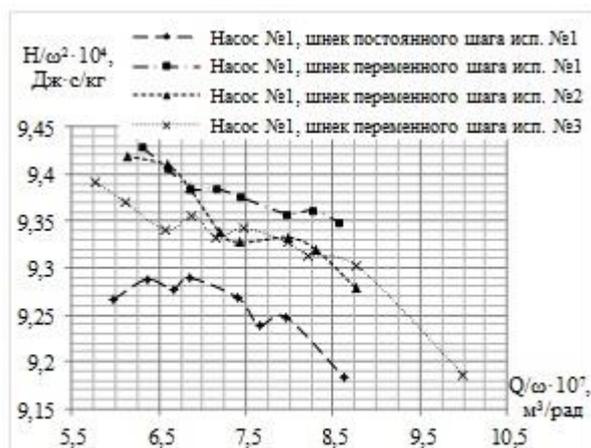


Рис. 1. Зависимость напора, приведенного к квадрату частоты вращения ротора насоса, от объемного расхода, приведенного к частоте вращения ротора для насоса горючего двигателя РД868

Как видно из рис. 1, 2, напоры насосов со шнеками переменного шага выше, чем напоры насосов со шнеками постоянного шага. Если сравнивать контрольные точки для насосов окислителя и горючего по расходу, то увеличение напора по сравнению с насосами, укомплектованными шнеками постоянного шага, следующее:

- насос окислителя от 2,29 до 3,83%;
- насос горючего от 0,65 до 1,15%.

Это объясняется тем, что с увеличением шага шнека на выходе растет его напор, а следовательно, и напор насоса.

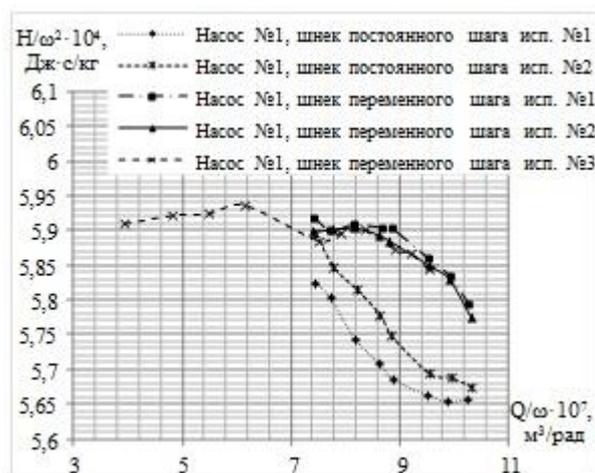


Рис. 2. Зависимость напора, приведенного к квадрату частоты вращения ротора насоса, от объемного расхода, приведенного к частоте вращения ротора для насоса окислителя двигателя РД868

На рис. 3 и 4 приведены характеристики КПД насосов горючего и окислителя двигателя РД868.

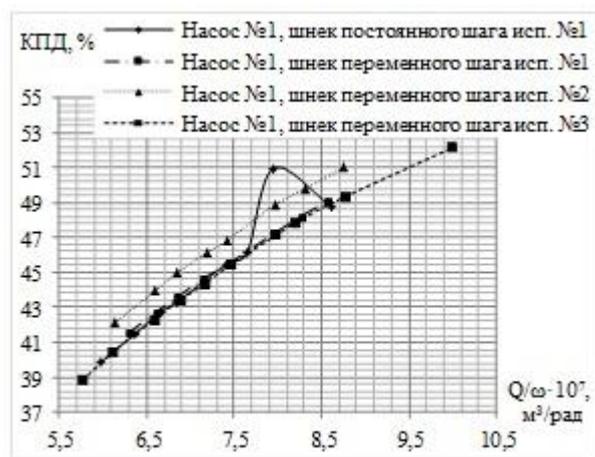


Рис. 3. Зависимость КПД насоса от объемного расхода, приведенного к частоте вращения ротора для насоса горючего двигателя РД868

По представленным характеристикам видно, что КПД насоса горючего в контрольной точке по расходу находится в диапазоне от 44,6 до 46,3%. Для насоса со шнеком постоянного шага КПД составляет 44,6% (нижний предел диапазона).

Проанализировав данные, представленные на рис. 4, можно констатировать, что КПД насоса окислителя лежит в диапазоне от 51,1 до 52,2%. Для насоса, испытанного со шнеками постоянного шага, КПД составляет 51,1% (нижний предел диапазона).

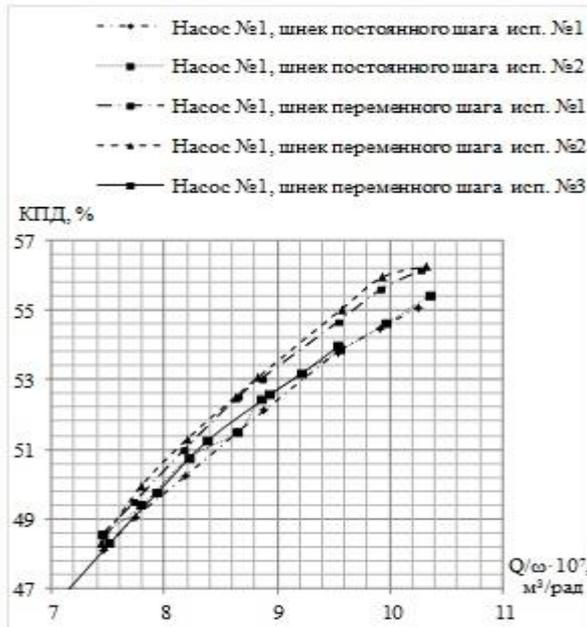


Рис. 4. Зависимость КПД насоса от объемного расхода, приведенного к частоте вращения ротора для насоса окислителя двигателя РД868

Проведя анализ КПД насосов окислителя и горючего, можно сделать вывод, что шнек переменного шага способствует некоторому увеличению КПД:

- ~ 1,7% для насоса горючего;
- 1,1% для насоса окислителя.

Энергетические характеристики (напорная и КПД) насоса горючего двигателя РД859 представлены на рис. 5 и 6.

На рис. 5 приведены напорные характеристики двух экземпляров насоса горючего двигателя РД859. Один экземпляр насоса комплектовался составным шнеком. Составной шнек – это шнек, винтовая линия которого выполняется с различным шагом. Фактически, составной шнек можно считать шнеком с переменным шагом, у которого имеются два участка с различными шагами, а изменение шага происходит ступенчато. При изготовлении такого шнека винтовая линия выполняется с одним шагом до определенной длины, а затем шаг выполнения винтовой линии изменяется. Место перехода винтовой линии от одного

шага к другому зачищается для обеспечения плавности течения рабочего тела в межлопаточном канале шнека.

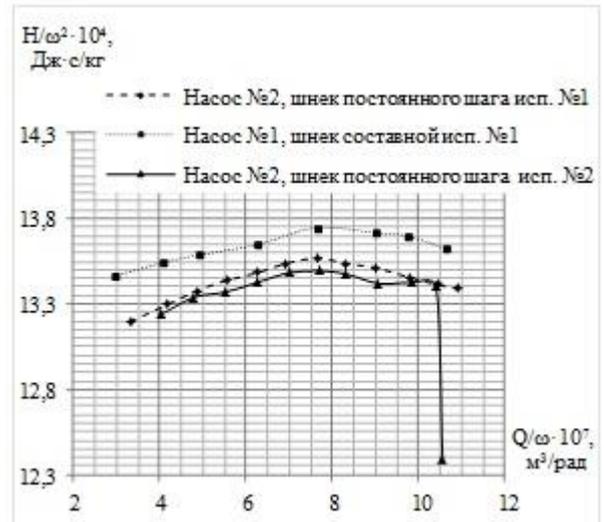


Рис. 5. Зависимость напора, приведенного к квадрату частоты вращения ротора насоса, от объемного расхода, приведенного к частоте вращения ротора для насосов горючего двигателя РД859

Как видно из рис. 5, напор насоса с составным шнеком выше, чем напор насоса со шнеком постоянного шага. Если сравнивать контрольную точку насоса горючего по расходу, то увеличение напора составляет от 1,55 до 2%.

На рис. 6 приведены характеристики КПД насосов горючего двигателя РД859.

Представленные характеристики демонстрируют, что КПД насосов горючего в контрольной точке по расходу лежит в диапазоне от 45 до 46%. Для насоса с составным шнеком КПД составляет 45,3% (примерно середина диапазона).

Энергетические характеристики (напорная и КПД) насоса горючего двигателя РД861К представлены на рис. 7 и 8.

В насосе горючего двигателя РД861К использовался составной шнек, который был выполнен из двух половин. На выходную часть составного шнека напайвался бандаж. Еще одним конструктивным отличием является коэффициент диаметра шнека на выходе:

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

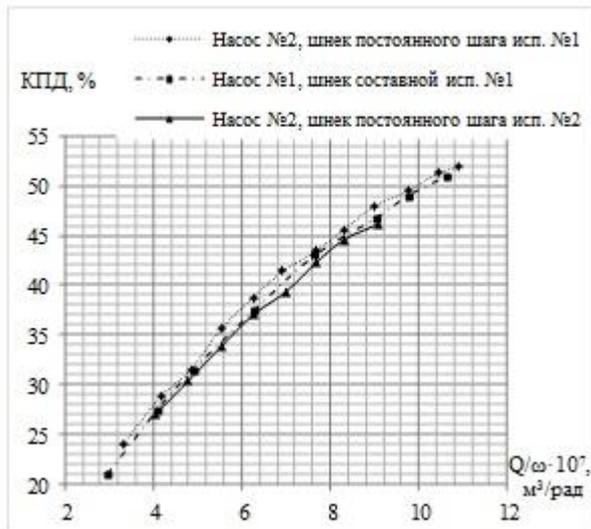


Рис. 6. Зависимость КПД насоса от объемного расхода, приведенного к частоте вращения ротора для насосов окислителя двигателя РД859

В насосе №2 использовали центробежное колесо, полученное способом 3D-печати, а в насосе №1 – центробежное колесо, изготовленное с помощью фрезерования. Данные технологии изготовления центробежных колес обладают достаточно высокой точностью и позволяют свести к минимуму погрешности при их изготовлении, которые, в свою очередь, могут дать весомую разницу по полученному напору.

На рис. 7 приведены напорные характеристики двух экземпляров насоса горючего двигателя РД861К.

Как видно из рис. 7, напор насоса со шнеком постоянного шага выше, чем напор насосов с составным шнеком и шнеком переменного шага. Если сравнивать контрольную точку насоса горючего по расходу, то увеличение напора составляет:

- 1,35% по сравнению со шнеком переменного шага;
- от 0,47 до 0,86% по сравнению с составным шнеком.

Данная особенность объясняется тем, что шнек с постоянным шагом имеет больший диаметр на выходе, а следовательно, и больший напор. Расхождение с насосом №2, который комплектовался шнеком переменного шага, по-видимому, связано с различными технологиями изготовления центробежного колеса.

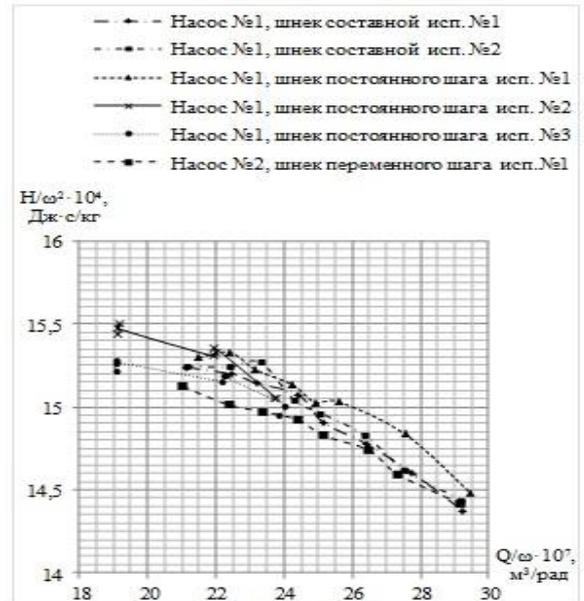


Рис. 7. Зависимость напора, приведенного к квадрату частоты вращения ротора насоса, от объемного расхода, приведенного к частоте вращения ротора для насоса горючего двигателя РД861К

На рис. 8 приведены характеристики КПД насосов горючего двигателя РД861К.

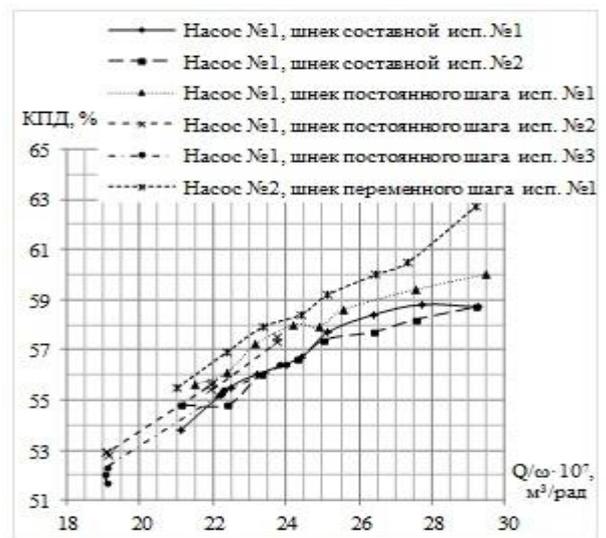


Рис. 8. Зависимость КПД насоса от объемного расхода, приведенного к частоте вращения ротора для насоса горючего двигателя РД861К

Представленные характеристики КПД насосов горючего в контрольной точке по расходу лежат в диапазоне от 57,45 до 59,23%. Для насосов с различными вариантами шнеков КПД следующие:

- 58,3% – для шнека с постоянным шагом;
- от 57,45 до 57,8% – для составного шнека;
- 59,23% – для шнека с переменным шагом.

Сравнительный анализ кавитационных характеристик шнекоцентробежных насосов ЖРД при применении шнеков переменного и постоянного шага

Кавитационные характеристики насосов окислителя и горючего двигателей РД868, РД859, РД861К были получены по результатам гидравлических испытаний, которые представлены в графическом виде. Графики представляют собой зависимость изменения приведенного напора 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 двигателя РД868 приведены на рис. 9 и 10.

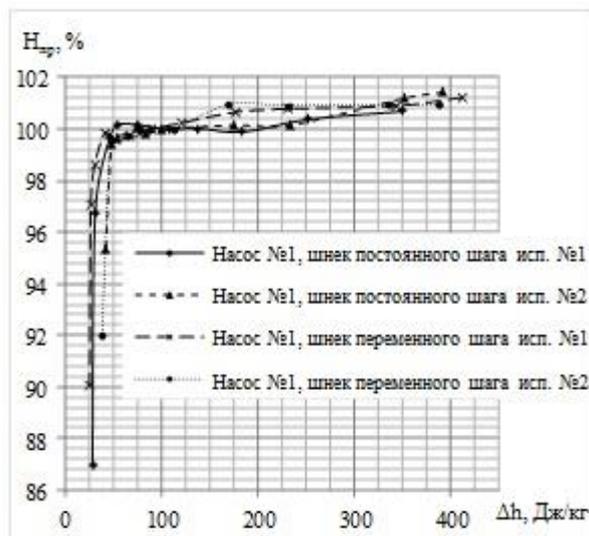


Рис. 9. Кавитационные характеристики насоса горючего двигателя РД868

Представленные характеристики демонстрируют, что применение шнека переменного шага не оказывает влияния на кавитационные свойства насосов окислителя и горючего двигателя РД868.

Кавитационные характеристики насосов горючего двигателя РД859 приведены на рис. 11.

Представленные характеристики демонстрируют, что применение составного шнека не оказывает влияния на кавитационные свойства насоса горючего двигателя РД859.

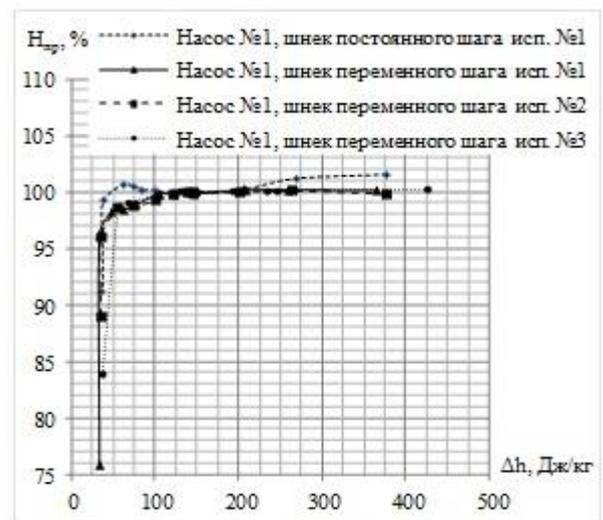


Рис. 10. Кавитационные характеристики насоса окислителя двигателя РД868

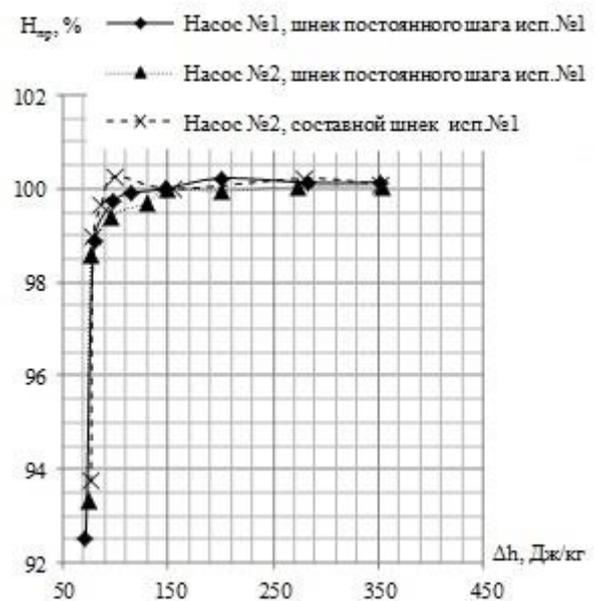


Рис. 11. Кавитационные характеристики насоса горючего двигателя РД859

Кавитационные характеристики насосов горючего двигателя РД861К приведены на рис. 12.

Конструктивно насос горючего двигателя РД861К со шнеком постоянного шага отличается от насоса горючего двигателя РД861К с составным шнеком и шнеком переменного шага. Отличия заключаются в конструкции центробежного колеса:

1) шесть лопаток двойкой 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 припайванием покрывного диска).

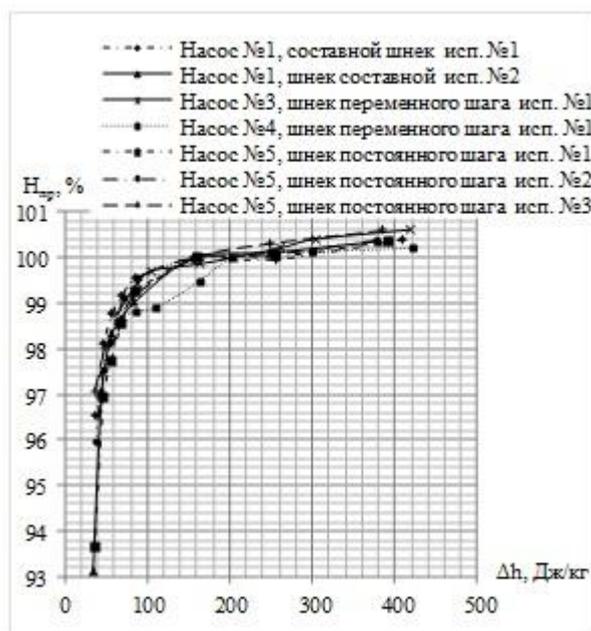


Рис. 12. Кавитационные характеристики насоса горючего двигателя РД861К

Первое и второе отличия насоса горючего двигателя РД861К со шнеком постоянного шага положительно влияют на антикавитационные качества насоса.

Представленные характеристики демонстрируют, что все вышеприведенные конструктивные различия насоса горючего двигателя РД861К не оказывают влияния на его кавитационные свойства.

Выводы

При применении в высокооборотных малорасходных шнекоцентробежных насосах ЖРД составных шнеков и шнеков с переменным шагом вместо шнеков с постоянным шагом были получены следующие результаты.

1. По напорной характеристике:

– при неизменных параметрах прочной части насоса кроме шага шнека напор насоса увеличивается от 0,65 до 3,83%;

– при уменьшении коэффициента диаметра шнека на выходе $K_{\text{ДШ2}}$ с 6,47 до 5,27 напор насоса несколько уменьшается от 0,47 до 1,35%. Уменьшение напора может быть скомпенсировано увеличением угла лопатки шнека на выходе.

2. По характеристике КПД наблюдается незначительный прирост до 1,7%.

3. Применение составного шнека и шнека переменного шага по сравнению со шнеком постоянного шага не оказывает влияния на антикавитационные свойства малорасходных шнекоцентробежных насосов ЖРД.

Список использованной литературы

1. Пат. 6505463 США, МПК F02K9/48. Pre-burner operating method for rocket turbopump] / William D. Kruse, Thomas J. Mueller, John J. Weede (США); Northrop Grumman Corporation. – № 20020148215; заявл. 17.01.2001; опубл. 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 / Korey R. Kline, Kevin W. Smith, Eric E. Schmidt, Thomas O. Bales; Hy 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 шнекоцентробежных насосов / В. Ф. Чебаевский, В. И. Петров. – М.: Машиностроение, 1973. – 152 с.

4. Петров В. И. Кавитация в высокооборотных лопастных насосах / В. И. Петров, В. Ф. Чебаевский. – М.: Машиностроение, 1982. – 192 с.

5. Овсяников В. Б. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей / В. Б. Овсяников, Б. И. Боровский. – М.: Машиностроение, 1986. – 376 с.

6. Боровский Б. И. Энергетические параметры и характеристики высокооборотных лопастных насосов / Б. И. Боровский. – М.: Машиностроение, 1989. – 181 с.

Статья поступила 13.08.2018