

Научная статья
УДК 629.7.036.54
URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185000>
EDN: <https://www.elibrary.ru/ODTMEM>



Оптимизация напорных характеристик осевых насосов низкой быстроходности в системах питания двигателей летательных аппаратов с применением входных и надроторных устройств

Сергей Валерьевич Шоронов

ГМС Процессинг Текнолоджис, Москва, Российская Федерация
shoronov-97@yandex.ru, orcid 0009-0003-0341-4807

Аннотация. Представлены два перспективных метода, которые могут быть использованы для улучшения формы и управления напорной характеристикой осевого насоса с низкой быстроходностью.

Осевые высокооборотные насосы часто применяются в авиационных гидравлических системах и системах питания жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Современные двигатели летательных аппаратов характеризуются широким диапазоном регулирования тяги, что позволяет адаптироваться к различным условиям полета и требованиям маневрирования. Осевые насосы часто используются в качестве бустерных насосов для повышения входного давления и обеспечения бескавитационной работы основного двигательного насоса летательного аппарата, поэтому к этим насосам предъявляется важное требование — многорежимность. Однако форма энергетических характеристики насосов низкой быстроходности с осевыми колесами в большинстве случаев немонотонная (с западающим участком), что создает определенные трудности для системы управления двигателем летательного аппарата.

В работе представлены рекомендации по применению входных лопаточных и надроторных устройств, которые позволяют исправить форму напорной характеристики на монотонно падающую, а также в локальной зоне западания увеличить напор осевого насоса.

Ключевые слова: осевой насос, надроторное устройство, осевые канавки (проточки), лопаточное входное устройство, закрутка потока на входе

Для цитирования: Шоронов С.В. Оптимизация напорных характеристик осевых насосов низкой быстроходности в системах питания двигателей летательных аппаратов с применением входных и надроторных устройств // Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 2. С. 147–154. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185000>

Original article

Pressure Characteristics Optimization of Low-Speed Axial Pumps in the Aircraft Engine Power Systems with the Inlet Guide Vanes and J-Grooves Devices

Sergey V. Shoronov

HMS Group, Moscow, Russian Federation
shoronov-97@yandex.ru, orcid 0009-0003-0341-4807

© Шоронов С.В., 2025

Abstract

The article presents the two prospective methods that may be applied for the shape improving and pressure characteristics controlling of a low-velocity axial pump, namely the J-Grooves or inlet guide vanes installing.

Modern aircraft engines are being characterized by a wide range of thrust control that allows adapting to various flight conditions and maneuvering requirements. Axial pumps are often applied as booster pumps for the inlet pressure increasing and ensuring cavitation-free operation of the main engine pump of an aircraft. Thus, an important requirement, namely the multi-mode operation, is placed on these pumps. For the most part, the shape of energy characteristics of the low-speed pumps with axial impellers is non-monotonic (with the fall-in section). Ensuring a monotonically decreasing pressure characteristic of an axial flow pump is one of the main goals of pump design optimization.

The article presents practical recommendations on the J-Grooves with axial and inclined grooves design, based on the experimental data, which allows adjusting the shape of the pressure characteristic of a low-speed axial pump to the monotonously falling one. The results of studies of the of the inlet flow peripheral part pre-swirling at the inlet to the axial pump by the inlet guide vanes with various density are presented as well.

It was found that with various devices installing in the pump inlet line, the anti-cavitation qualities of the pump degrade in the area of the pressure characteristic non-monotonicity, which correlates with the pump pressure increase. The article gives recommendations on application of the studied j-Grooves and inlet guide vanes. For the pumps fastidious to the multi-mode operation, application of the J-Grooves devices with axial or inclined grooves for the non-monotonicity correction of the pressure characteristic is preferable. The inlet guide vanes application is possible, if necessary, to increase the head of the axial pump in the local area, if the required cavitation reserve allows this. Varying such design parameter as density (the number of blades of the inlet guide device) allows shifting the local zone of the pump pressure increase, which allows controlling the pressure characteristic. The studied inlet guide vanes and J-Grooves may be employed not only in the aviation and space industries, but in the other fields as well.

Keywords: axial pump, inlet guide vanes (IGV), J-Grooves, inlet vane device, flow swirling at the inlet

For citation: Shoronov S.V. Pressure Characteristics Optimization of Low-Speed Axial Pumps in the Aircraft Engine Power Systems with the Inlet Guide Vanes and J-Grooves Devices. *Aerospace MAI Journal*. 2025;32(2):147-154. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185000>

List of Figures

Fig. 1. The shape of characteristics of the low-speed axial pumps

Fig. 2. The researched object sketch

Fig. 3. The sketch of the J-Grooves under study [11]

Fig. 4. The shape of the axial pump characteristics with optimal J-Grooves installed [11, 12]

Fig. 5. The reverse and active flow zones relative areas dependence on the q_1 parameter [21]

Fig. 6. Backflow volume at the pump inlet line with axial velocity field at $Q/n = 8.54 (l/h)/(rpm)$

Fig. 7. The IGV sketch and layout

Fig. 8. Pressure and efficiency characteristics of the axial pump with IGV at various densities [14]

Fig. 9. Cavitation characteristics of the pump with optimal J-Grooves and various IGVs at $p_{in} = \text{const}$

Введение

Осевые высокооборотные насосы часто находят применение в авиационных гидравлических системах и системах питания жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) [1–4]. Современные двигатели летательных аппаратов характеризуются широким диапазоном регулирования тяги [5], что позволяет адаптироваться к различным условиям полета и требованиям маневрирования. Так как осевые насосы часто используются в качестве бустерных насосов для повышения входного давления и обеспечения бескавитационной работы основного двигательного насоса летательного аппарата, к этим насосам предъявляется важное требование —

многорежимность. Однако форма энергетических характеристики насосов низкой быстроходности с осевыми колесами в большинстве случаев немонотонная (с западающим участком) [6]. Этот фактор усложняет процесс их регулирования и создает определенные трудности для системы управления двигателем летательного аппарата. Область западания может распространяться вплоть до значений расходов, равных 0,6–0,8 от расчетного режима работы. Наличие зоны западания напорной характеристики может оказывать негативное влияние на кавитационную характеристику основного двигательного насоса. Обеспечение монотонно падающей напорной характеристики осевого насоса

является одной из важнейших целей проектирования и оптимизации конструкции насоса.

Увеличение напора в зоне западания напорной характеристики также имеет важное значение при работе насоса в условиях высоких температур. В воздушно-реактивных двигателях (ВРД) при дросселировании происходит нагрев рабочего тела, что негативно сказывается на антикавитационных свойствах основного двигательного насоса и приводит к снижению его напора. Нагрев рабочего тела может происходить и в ракетных двигателях разгонных блоков многократного включения. Во время полета на орбите компонент может нагреваться на солнце до 70°C .

Формы характеристик осевых насосов с западающими энергетическими характеристиками представлены на рис. 1, где на напорной (H , м) и мощностной (N , Вт) характеристике находится «завал» на левой части КПД характеристики (показано красным), начало «завала» напорной характеристики показано зеленым, а окончание синим. Начало «завала» — уменьшение величины перепада давления (напора) при уменьшении расхода насоса (Q , л/ч). Окончание «завала» — увеличение величины перепада давления (напора) при увеличении расхода насоса.

Эксплуатация насосов на нерасчетных режимах может приводить к возникновению различных нестабильностей, таких как падение напора (западание напорной характеристики, описанное выше), образование обратных токов, кавитации и так далее. Это часто вызывает вибрацию и шум, а иногда приводит к повреждению турбомашин из-за образования кавитационной эрозии. Чтобы уменьшить влияние этих явлений, к настоящему времени разработаны различные надроторные и входные устройства, а также осевыхревые ступени (ОВС) [7]. Известно, что периферийные сечения межлопастного канала осевых рабочих колес насосов являются наиболее напорными и играют важную роль в образовании зоны западания. Методы борьбы с немонотонностью в литературе недостаточно изучены и в основном сосредоточены

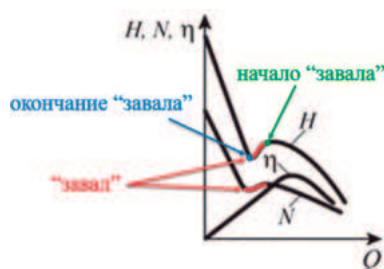


Рис. 1. Форма характеристик осевых насосов с низкой быстроходностью

на изменении геометрических параметров рабочего колеса и оптимизации проточной части насоса [8–10]. Одними из методов для увеличения напора в зоне западания являются установка надроторных устройств (НрУ) с осевыми или наклонными проточками [11, 12] и входных лопаточных устройств (ВЛУ) с различной их густотой [13, 14].

В работах [15–17] авторы показали, что длина проточек НрУ имеет важное значение и оказывает большое влияние на напорную характеристику, но они не приводят рекомендаций по их проектированию. Предварительная закрутка потока на входе в центробежный насос, выполняемая при помощи ВЛУ, может влиять на напорные и кавитационные характеристики, что проверили китайские и американские ученые в эксперименте и при помощи численного компьютерного моделирования в работах [18–20], но исследований на осевых насосах проведено крайне мало. Поэтому в данной работе приведены практические рекомендации, основанные на экспериментальных данных по проектированию и использованию НрУ и ВЛУ для увеличения напора осевого насоса в зоне западания энергетических характеристик.

Целью работы является увеличение напора в зоне западания энергетических характеристик осевого насоса низкой быстроходности при помощи установки надроторных или входных лопаточных устройств.

Задачей является исправление формы напорной характеристики осевого насоса на монотонно падающую и выработка рекомендаций по использованию НрУ и ВЛУ.

Объект исследования и методы проведения исследования

Объектом исследования является гидротурбонасос, представляющий собой осевое рабочее колесо насоса с лопаточным осевым отводом, рабочей жидкостью которого является керосин. Приводом рабочего колеса насоса является гидравлическая турбина, установленная на бандаже. Насос предназначен для подкачки топлива из расходного бака к двигательному насосу самолета, аналогичные конструкции насосов используется в БТНА ЖРД. На рис. 2 показан эскиз объекта исследования, где 1 — ротор; 2 — осевое рабочее колесо насоса; 3 — гидравлическая турбина; 4 — сопловой аппарат; 5 — спрямляющий аппарат; А — вход в насос; Б — выход из насоса; В — подвод активной рабочей жидкости к рабочим лопаткам ротора; Г — отвод активной рабочей жидкости от рабочих лопаток ротора. На входе в насос радиальный зазор между ротором и корпусом (до густоты решетки на периферии $\tau \approx 0,5$), а далее зазор равен 0 из-за установ-

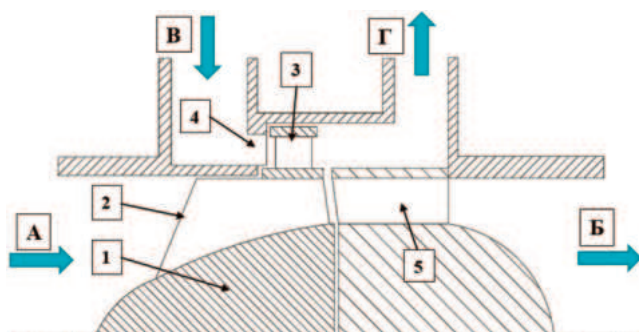


Рис. 2. Эскиз объекта исследования

ленного бандажа. Коэффициент быстроходности насоса $ns = 540$.

Исследование ВЛУ и НрУ проводилось экспериментальным методом, а выявления причин их влияния на энергетические характеристики осевого насоса при помощи численного компьютерного моделирования путем решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса в нестационарной постановке в программном обеспечении ANSYS CFX.

Результаты исследования применения надроторных устройств

Исследованные надроторные устройства представляют собой осевые или наклонные проточки, которые размещаются над частью ротора и во входной магистрали насоса. Внешний вид исследованных НрУ (в иностранной литературе — J-Grooves) представлен на рис. 3.

На рис. 4 представлены экспериментальные напорные и полного КПД характеристики объекта исследования без доработок и с установленным

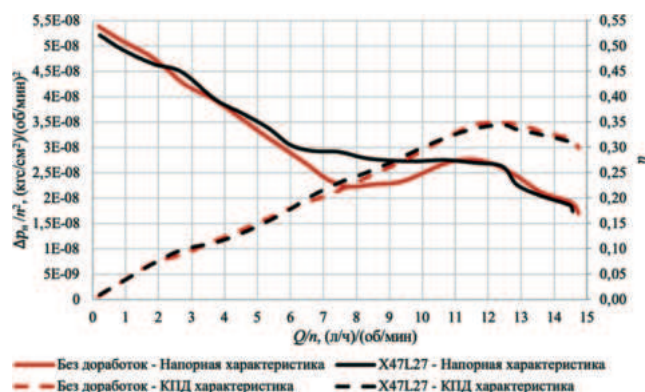


Рис. 4. Форма характеристик осевого насоса с установленным оптимальным НрУ [11, 12]

оптимальным НрУ из которых видно, что установка оптимального надроторного устройства (для исследуемого насоса X47L27, где L — осевая длина проточки, мм, а X — их количество, шт.) позволяет исправить западающую форму напорной характеристики осевого насоса на монотонно падающую [11, 12].

Функция проточек НрУ заключается в уменьшении вихревой составляющей и уменьшении величины обратного потока, выходящего из ротора, что было исследовано методом численного моделирования и подробно показано в работе [21]. На рис. 5 приведена зависимость относительных площадей зон обратных токов и активного потока от параметра q_1 в сравнении (где $S_{o,r}$ — площадь обратного течения, а $S_{вх}$ — площадь входа в насос), из которой видно, что при установке НрУ значительно уменьшается величина обратных токов на входе. На рис. 6 представлен объем обратного течения во

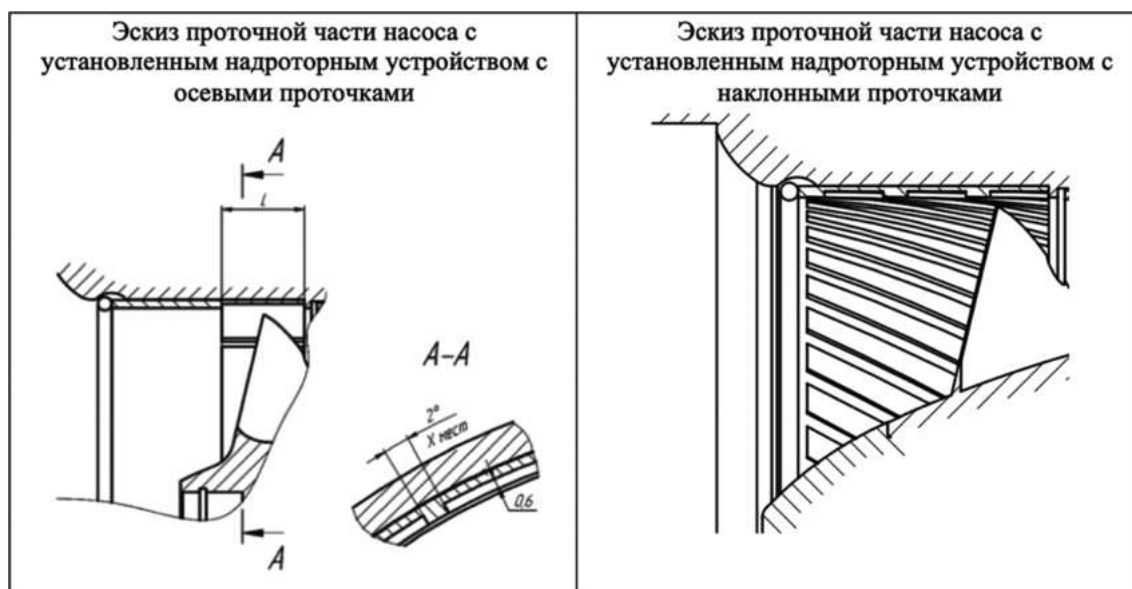


Рис. 3. Эскиз надроторных устройств [11]

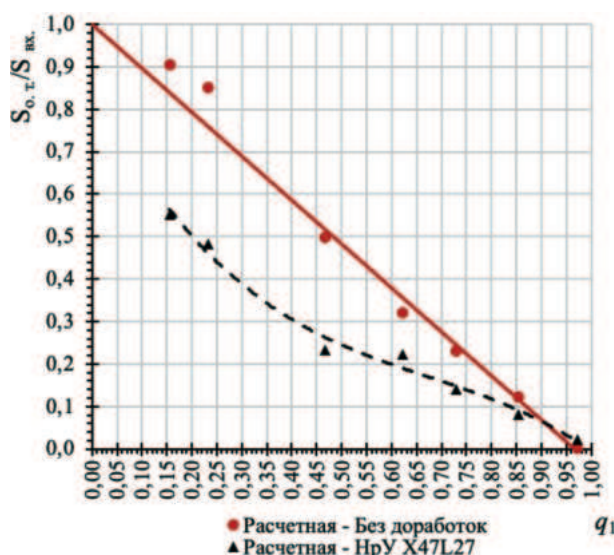


Рис. 5. Зависимость относительных площадей зон обратных токов и активного потока от параметра q_1 в сравнении [21]

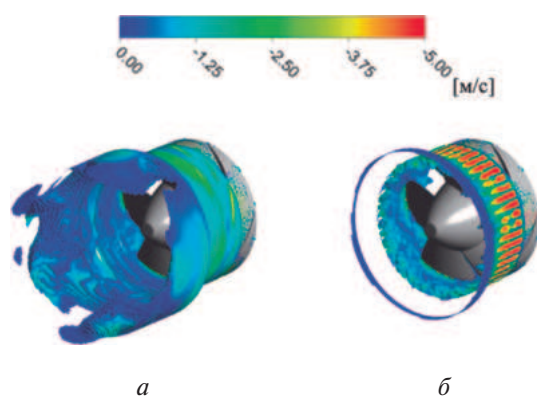


Рис. 6. Объем обратного течения во входной магистрали насоса с полем осевой скорости при $Q/n = 8,54$ (л/ч)/(об/мин):
а – без доработок;
б – с надроторным устройством с осевыми проточками

входной магистрали насоса, где наглядно видно его уменьшение.

Для исправления формы напорной характеристики осевых насосов на основе экспериментальных данных были разработаны следующие практические рекомендации:

- относительная осевая длина проточек $L/d_{\text{вх}} > 0,25$;
- густота осевых проточек $\tau > 3,74$, а наклонных проточек в пределах $\tau = 5,5 \dots 5,8$.

Данные практические рекомендации коррелируют с результатами исследований зарубежных авторов [15, 16], где увеличение длины осевой проточки способствует увеличению напора насоса в зоне западания напорной характеристики осевого насоса.

Стоит отметить, что несмотря на некоторое ухудшение кавитационных характеристик [12], установка оптимального надроторного устройства делает насос более стабильным и многорежимным.

Основное преимущество осевых проточек относительно наклонных заключается в том, что они выполняются по прямой линии вдоль оси, что упрощает процесс их изготовления. Такие проточки могут быть легко выполнены с помощью стандартных фрез или резцов, и их обработка требует значительно меньше времени. Использование НрУ позволяет без значительных изменений конструкции насоса достигнуть требуемых значений напора. Такие надроторные устройства можно применять как в БТНА ЖРД, так и в самолетных топливных системах подачи при необходимости для исправления напорных характеристик. НрУ могут устанавливаться не только на отдельно стоящих осевых насосах и шнеках, но и над предвключенными ступенями в шнекоцентробежных насосах [22].

Результаты исследования применения входных лопаточных устройств

Входное лопаточное устройство (в иностранной литературе – IGV) представляет собой лопаточную решетку, установленную во входной магистрали насоса, которая создает предварительную закрутку потока. Закрутка потока на входе является широко используемым методом регулирования энергетических характеристик в промышленных центробежных компрессорах. Однако по сравнению с центробежными компрессорами, в насосах ВЛУ используется крайне редко, и основная причина заключается в ухудшении кавитационных характеристик. При установке ВЛУ на входе в насос неизбежна потеря давления из-за потерь трения на поверхностях ВЛУ и падение давления на входных кромках лопаток, но, когда ВЛУ регулируются на отрицательный угол, лопатки создают отрицательную окружную скорость и увеличивают напор насоса.

Так как осевые насосы часто используются в качестве подпорных или бустерных насосов и имеют высокую величину кавитационного коэффициента быстроходности $C_{\text{кр}}$, незначительное ухудшение антикавитационных качеств (если это позволяет требуемый кавитационный запас) не повлияет на напор основного двигательного насоса. Известно, что у осевых насосов периферийные сечения рабочего колеса являются наиболее напорными, исходя из этого возможна установка входной лопаточной решетки только на периферийных сечениях, внешний вид такого ВЛУ представлен на рис. 7. Поэтому в работах [14, 21] проведено экспериментальное ис-

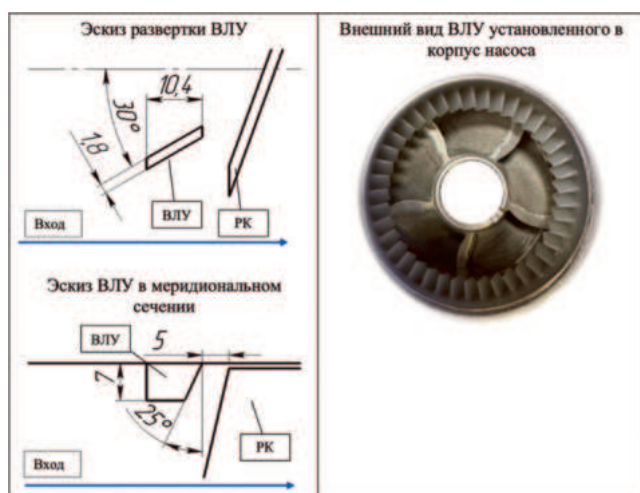


Рис. 7. Эскиз и схема расположения ВЛУ

следование ВЛУ с различной густотой лопаточной решетки.

На рис. 8 представлены полученные экспериментальные напорные и полного КПД характеристики из которых видно, что при установке ВЛУ в зоне западания на локальном участке значительно увеличивается напор насоса, но напорная характеристика приобретает дополнительную неравномерность в виде двух участков снижения напора. Эти участки начинаются при разной величине Q/n в зависимости от количества лопаток (густоты) ВЛУ.

Дополнительная неравномерность напорной характеристики приводит к увеличению нерабочего участка, что накладывает дополнительные ограничения при многорежимном использовании насоса. Увеличение количества лопаток (густоты) ВЛУ смещает локальную зону увеличения напора насоса вправо по характеристике, на большие расходы. Кавитационные исследования в работе [14] показывают, что установка ВЛУ и увеличение количества его лопаток ведет к существенному ухудшению антикавитационных качеств насо-

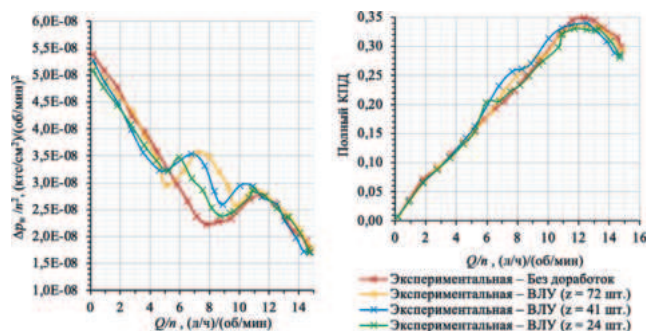


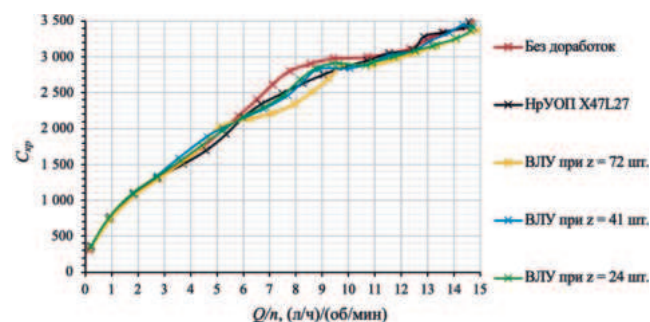
Рис. 8. Напорные и КПД характеристики осевого насоса с ВЛУ при различной густоте [14]

са. На рис. 9 представлены экспериментальные зависимости величины $C_{кр}$ от Q/n при $p_{вх} = \text{const}$ в сравнении. Стоит отметить, что ухудшение антикавитационных качеств насоса в зоне западания напорной характеристики коррелирует с увеличением напора насоса при установке различных ВЛУ и оптимального НрУ (с увеличением напора в зоне западания характеристики ухудшаются антикавитационные качества насоса).

Установка ВЛУ аналогично НрУ уменьшает величину обратных токов на входе, что при помощи численного моделирования показано в работе [21]. Рост величины перепада в зоне западания напорной характеристики сопровождается увеличением мощности насоса, изменение которой, в свою очередь, происходит из-за влияния НрУ и ВЛУ на величину и интенсивность обратных токов, а также за счет увеличения момента сил трения обратных токов $M_{тр}$, при установке различных НрУ или ВЛУ во входном патрубке [21]. Уменьшение величины закрутки обратных токов на входе приводит к уменьшению их интенсивности и увеличению напора осевого колеса, а возникновение кавитации в обратных токах также уменьшает их интенсивность и, следовательно, кавитационные явления должны приводить к повышению напора [23].

Выводы

В статье приведены рекомендации о возможности применения входных лопаточных и надроторных устройств для увеличения напора осевого насоса в зоне западания напорной характеристики. Исходя из проведенного исследования можно сделать вывод, что для многорежимного использования насосов предпочтительнее использовать надроторные устройства с осевыми или наклонными проточками. Они позволяют полностью ликвидировать западание напорной характеристики осевого насоса, что в свою очередь упрощает систему управления двигателя летательного аппарата. Так

Рис. 9. Кавитационные характеристики насоса с оптимальным НрУ и различными ВЛУ при $p_{вх} = \text{const}$

же в отличие от входных лопаточных устройств, надроторные устройства более просты в изготовлении и позволяют без кардинальных изменений конструкции насоса достигнуть требуемых значений напора.

Применение входных лопаточных устройств возможно при необходимости увеличить напор осевого насоса в локальной зоне, если это позволяет требуемый кавитационный запас. Варьирование такого конструктивного параметра, как густота (количество лопаток ВЛУ) позволяет смещать локальную зону увеличения напора насоса, что дает возможность управлять напорной характеристикой.

Приведенные в статье практические рекомендации по проектированию надроторных устройств, коррелируют с результатами исследований зарубежных авторов [15, 16], где увеличение длины осевой проточки способствует увеличению напора насоса в зоне западания напорной характеристики осевого насоса.

Стоит отметить, что ВЛУ и НРУ могут быть использованы не только в авиационной и космической промышленности, но и в других областях.

Список источников

- Овсянников Б.В., Боровский Б.И. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986. 376 с.
- Иванов А.В., Белоусов А.И., Дмитренко А.И. Турбонасосные агрегаты кислородно-водородных ЖРД. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2011. 284 с.
- Аринушкин Л.С., Абрамович Р.Б., Полиновский А.Ю. и др. Авиационные центробежные насосные агрегаты. М.: Машиностроение, 1967. 255 с.
- Епифанов С.Ф., Рыженко А.И., Цуканов Р.Ю. Авиационные топливные системы. Харьков: Изд-во ХАИ, 2018. 558 с.
- Бруев В.Н., Козловский Л.Н. Принцип дросселирования в отечественных жидкостных ракетных двигателях // Аллея науки. 2023. № 1(76).
- Кивченко Г.И. Насосы и гидротурбины. М.: Энергия, 1970. 447 с.
- Анкудинов А.А., Ващенко А.В. Перспективы применения осевых ступеней в турбонасосах жидкостных ракетных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 3. С. 17–23. DOI: 10.34759/vst-2021-3-17-23
- Свобода Д.Г., Жарковский А.А. Проектирование осевых насосов с незападающей напорной характеристикой. СПб.: Политех-Пресс, 2021. 182 с.
- Свобода Д.Г., Жарковский А.А. Влияние расчетных параметров на прогнозные интегральные характеристики осевого насоса с быстроходностью $n_s = 570$ // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. № 4–1(183). С. 111–119.
- Иванов Е.А. Разработка методики проектирования и оптимизации проточных частей осевых насосов на основе метамоделей: Дисс. ... канд. техн. наук. СПб., 2023. 122 с.
- Шоронов С.В., Казеннов И.С., Истомин Е.А. Влияние надроторного устройства на напорные характеристики осевого насоса // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2024. № 5. С. 78–89.
- Шоронов С.В., Казеннов И.С., Истомин Е.А. Влияние надроторного устройства с осевыми и наклонными проточками на кавитационные характеристики осевого насоса // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2024. № 10(775). С. 85–95.
- Guo Z.W., Pan J.Y., Qian Z.D. The effects of the inlet guide vanes on an axial pump under off design points // ASME 5th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting (15–20 July 2018; Montreal, Quebec, Canada). DOI: 10.1115/FEDSM2018-83071
- Шоронов С.В., Казеннов И.С., Истомин Е.А. Влияние входного лопаточного устройства на напорные характеристики осевого насоса с учетом влияния на антикавитационные качества // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2024. № 12(777). С. 70–79.
- Goltz I., Kosyna G., Wulff D. et al. Structure of the rotor tip flow in a highly loaded single-stage axial-flow pump approaching stall: Part II — Stall inception — understanding the mechanism and overcoming its negative impacts // ASME 2004 Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference (11–15 July 2004; Charlotte, North Carolina, USA), pp. 301–306. DOI: 10.1115/HT-FED2004-56770
- Kosyna G., Goltz I., Stark U. Flow structure of an axial-flow pump from stable operation to deep stall // ASME 2005 Fluids Engineering Division Summer Meeting (19–23 June 2005; Houston, Texas, USA), pp. 1389–1396. DOI: 10.1115/FEDSM2005-77350
- Mu T., Zhang R., Xu H. et al. Study on improvement of hydraulic performance and internal flow pattern of the axial flow pump by groove flow control technology // Renew. Energy. 2020. Vol. 160, pp. 756–769. DOI: 10.1016/j.renene.2020.06.145
- Hou H., Zhang Y., Li Z. et al. Hydraulic design of inlet guide vane and its full flow passage numerical simulation on centrifugal pump // ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (14–20 November 2014; Montreal, Quebec, Canada). DOI: 10.1115/IMECE2014-36209
- Tan L., Cao S., Gui S. Hydraulic design and pre-whirl regulation law of inlet guide vane for centrifugal pump // Science China Technological Sciences. 2010. Vol. 53. No. 8, pp. 2142–2151. DOI: 10.1007/s11431-010-4005-5
- Tan L., Zhu B., Cao S., et al. Influence of prewhirl regulation by inlet guide vanes on cavitation performance of a centrifugal

pump // *Energies*. 2014. Vol. 7. No. 2, pp. 1050–1065. DOI: 10.3390/en7021050

21. Шоронов С.В., Тимушев С.Ф. Сравнительный анализ методов увеличения напора осевых насосов низкой быстроходности систем питания двигателей летательных аппаратов // *Сибирский аэрокосмический журнал*. 2025. Т. 26. № 1. С. 126–137. DOI: 10.31772/2712-8970-2025-26-1-126-137

References

1. Ovsyannikov BV, Borovskii BI. *Theory and calculation of power units for liquid rocket engines*. 3rd ed. Moscow: Mashinostroenie; 1986. 376 p. (In Russ.).
2. Ivanov AV, Belousov AI, Dmitrenko AI. *Turbopump units of oxygen-hydrogen rocket engines*. Voronezh: VGTU; 2011. 284 p. (In Russ.).
3. Arinushkin LS, Abramovich RB, Polinovskii AYU, et al. *Aviation centrifugal pumping units*. Moscow: Mashinostroenie; 1967. 255 p. (In Russ.).
4. Epifanov SF, Ryzhenko AI, Tsukanov RYu. *Aviation fuel systems*. Kharkiv: KhAI; 2018. 558 p. (In Russ.).
5. Bruev VN, Kozlovskii LN. *Principle of throttling in domestic liquid rocket engines*. *Alleya nauki*. 2023(1). (In Russ.).
6. Kivchenko GI. *Pumps and hydro turbines*. Moscow: Energiya; 1970. 447 p. (In Russ.).
7. Ankudinov AA, Vashchenko AV. Axial-vortex stage application prospects in turbo-pumps of liquid propellant rocket engines. *Aerospace MAI Journal*. 2021;28(3):17–23. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2021-3-17-23
8. Svoboda DG, Zharkovskii AA. *Design of axial pumps with non-sinking pressure characteristics*. St. Petersburg: Politekh-Press; 2021. 182 p. (In Russ.).
9. Svoboda DG, Zharkovsky AA. Influence of parameters on the prognostic characteristics of the axial pump with specific speed $ns = 570$. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Cankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2013(4-1):111–119. (In Russ.).
10. Ivanov EA. *Development of a methodology for designing and optimizing flow parts of axial pumps based on meta-models*. PhD thesis. St. Petersburg. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 2023. 122 p. PhD thesis. (In Russ.).
11. Shoronov SV, Kazennov IS, Istomin EA. Influence of the upper-rotor device on the axial flow pump head characteristics. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2024(5):78–89. (In Russ.).
12. Shoronov SV, Kazennov IS, Istomin EA. Influence of the upper-rotor device with axial and inclined grooves on the axial-flow pump cavitation characteristics. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2024(10):85–95. (In Russ.).
13. Guo ZW, Pan JY, Qian ZD. The effects of the inlet guide vanes on an axial pump under off design points. *ASME 5th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting (July 15–20, 2018; Montreal, Quebec, Canada)*. DOI: 10.1115/FEDSM2018-83071
22. Ткач П.Ю. Вплив надроторних елементів шнеку на кавітаційноерозійні якості шнеководцентрового ступеня насоса: Дисс. ... канд. техн. наук. Сумы, 2018. 134 с.
23. Боровский Б.И., Ершов Н.С., Овсянников Б.В. и др. *Высокооборотные лопаточные насосы*. М.: Машиностроение, 1975. 336 с.
14. Shoronov SV, Kazennov IS, Istomin EA. Influence of the inlet vane mechanism on the axial pump pressure characteristics taking into account the anti-cavitation qualities. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2024(12):70–79. (In Russ.).
15. Goltz I, Kosyna G, Wulff D, et al. Structure of the rotor tip flow in a highly loaded single-stage axial-flow pump approaching stall: Part II — Stall inception — understanding the mechanism and overcoming its negative impacts. *ASME 2004 Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference (July 11–15, 2004; Charlotte, North Carolina, USA)*. p. 301–306. DOI: 10.1115/HT-FED2004-56770
16. Kosyna G, Goltz I, Stark U. Flow structure of an axial-flow pump from stable operation to deep stall. *ASME 2005 Fluids Engineering Division Summer Meeting (June 19–23, 2005; Houston, Texas, USA)*. p. 1389–1396. DOI: 10.1115/FEDSM2005-77350
17. Mu T., Zhang R., Xu H, et al. Study on improvement of hydraulic performance and internal flow pattern of the axial flow pump by groove flow control technology. *Renew. Energy*. 2020;160:756–769. DOI: 10.1016/j.renene.2020.06.145
18. Hou H, Zhang Y, Li Z, et al. Hydraulic design of inlet guide vane and its full flow passage numerical simulation on centrifugal pump. *ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (November 14–20, 2014; Montreal, Quebec, Canada)*. DOI: 10.1115/IMECE2014-36209
19. Tan L, Cao S, Gui S. Hydraulic design and pre-whirl regulation law of inlet guide vane for centrifugal pump. *Science China Technological Sciences*. 2010;53(8):2142–2151. DOI: 10.1007/s11431-010-4005-5
20. Tan L, Zhu B, Cao S, et al. Influence of prewhirl regulation by inlet guide vanes on cavitation performance of a centrifugal pump. *Energies*. 2014;7(2):1050–1065. DOI: 10.3390/en7021050
21. Shoronov SV, Timushev SF. Comparative analysis of methods for increasing the pressure of low-speed axial pumps in power supply systems for aircraft engines. *Siberian Aerospace Journal*. 2025;26(1):126–137. (In Russ.). DOI: 10.31772/2712-8970-2025-26-1-126-137
22. Tkach PYu. *Influence of Super rotor elements of the screw on the cavitation erosion qualities of the screw-centrifugal stage of the pump*. PhD thesis. Sumy: Sumy State University; 2018. 134 p. (In Russ.).
23. Borovskii BI, Ershov NS, Ovsyannikov BV, et al. *High-speed paddle pumps*. Moscow: Mashinostroenie; 1975. 336 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию / Received 13.04.2025
Одобрена после рецензирования / Revised 24.04.2025
Принята к публикации / Accepted 29.04.2025