

новых параметров рассмотренных двигателей связаны с заданными разными конкретными характеристиками КНД для каждого двигателя.

Расчёт и сравнительный анализ высотно-скоростных характеристик проведён на следующих основных режимах работы двигателя: максимальный учебный (МУ); максимальный боевой (МБ); полный форсированный учебный (ПФ(У)); полный форсированный боевой (ПФ(Б)); особый форсированный режим (ОР).

Программа управления для вариантов компоновок 3-5 оптимизирована из условий получения максимальной тяги во всём диапазоне высот и скоростей на всех основных режимах работы двигателя с учётом ограничений по температуре газа, минимальному запасу газодинамической устойчивости КНД, физическим и приведённым оборотам обоих роторов.

Для вариантов компоновок 4-5 проведена оптимизация смесителя потоков обоих контуров, поскольку КНД-М2 и перспективный КНД отличаются от КНД двигателя 4+ повышенными КПД и степенью сжатия, то при неизменных проходных сечениях обоих контуров смесителя потоков возникают

большие потери полного давления при смешении, что приводит к потере тяги.

Таким образом, в работе проведены расчёты высотно-скоростных и дроссельных характеристик всех вариантов двигателей, анализ и оценка их параметров во всем диапазоне высот и скоростей полёта по сравнению с базовым двигателем. Результаты, полученные в ходе расчёта дроссельных и высотно-скоростных характеристик, показали целесообразность проведения ремоторизации данного парка самолётов.

#### Библиографический список

1. Гагаринские чтения – 2018: XLIV Международная молодежная научная конференция: Сборник тезисов докладов. Том 1: М.; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2018. С. 139.
2. Марчуков, Е.Ю. Опыт использования программы UNI\_MM для выполнения термодинамических расчётов турбореактивных двухконтурных двигателей / Е.Ю. Марчуков, И.А. Лещенко, М.Ю. Вовк, А.А. Инюкин. – Воронеж: НАСОСЫ. ТУРБИНЫ. СИСТЕМЫ, 2015. № 2 (15) – С. 45-53.

УДК 621.675

### ОПТИМИЗАЦИЯ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО НАСОСА РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

©2018 В.М. Зубанов, А.А. Волков, А.И. Корнеева, В.Н. Матвеев

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

### OPTIMIZATION OF TWO-STAGE CENTRIFUGAL PUMP OF ROCKET ENGINE

Zubanov V.M., Volkov A.A., Korneeva A.I., Matveev V.N. (Samara National Research University, Samara, Russian Federation)

*The article presents a refining method for a two-stage centrifugal pump. The article describes the process of simplifying the calculation model for the optimization. The optimization goal was the increase of the pump efficiency with preservation or slight increase in the pressure head. The efficiency was increased by 3%.*

Центробежные насосы используются повсеместно [1], например в системах водоснабжения и водоотведения. Особое место занимают шнекоцентробежные насосы как устройства для подачи жидких компонентов в камеру ракетного двигателя. В этом случае насос должен обеспечивать высокую производительность и высокую надёжность. Из-

вестно, что более 70% аварий с жидкостным ракетным двигателем произошло из-за поломки в агрегатах турбонасоса [2].

В настоящее время используемые турбонасосные агрегаты для жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) были разработаны в 1960-1970 годах. Геометрия насосов первоначально проектировалась по теоретическим

и эмпирическим зависимостям, после чего следовала дорогостоящая экспериментальная доводка насосов.

Современные программы CFD позволяют моделировать рабочий процесс насоса. После проверки результатов моделирования эти модели CFD могут быть использованы для изучения влияния параметров насоса на его производительность. Также можно оптимизировать насос, используя проверенную модель CFD, как «чёрный ящик».

Исследование рабочего процесса в предыдущих работах [3,4] показало наличие вихревых зон в высокопроизводительных насосах. Высокопроизводительный насос

горючего был принят в качестве предмета исследования. На рис. 1 показано меридиональное сечение насоса, в котором присутствуют вихревые зоны:

- периферия входной кромки шнека низкого давления и шнека высокого давления (области 1 и 4);
- периферия передней кромки рабочего колеса низкого давления (область 2);
- область ближе к выходному отверстию рабочего колеса низкого давления на ступице (область 3);
- зона застойного вихря вблизи рабочего колеса низкого давления (область 5).

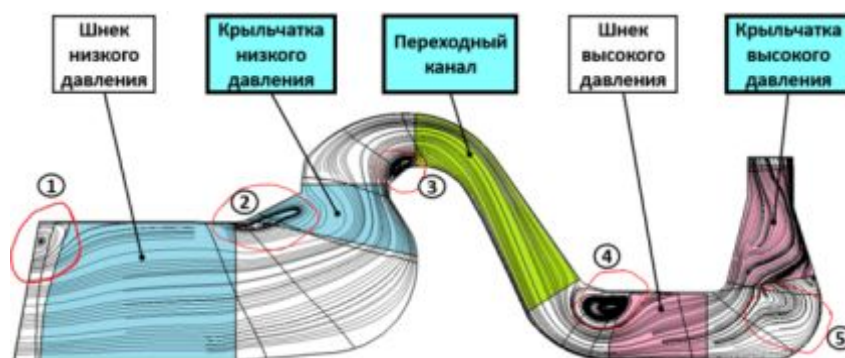


Рис. 1. Меридиональное сечение насоса с вихревыми областями

Вихри в областях 1 и 4 обусловлены конструкцией шнеков. В то время как вихри 2, 3 и 5 в насосе являются нежелательными. Снижение интенсивности этих вихрей увеличит КПД и напор насоса. Это можно достичь изменением геометрий лопаток крыльчатки низкого давления (КНД), крыльчатки высокого давления (КВД) и переходного канала (ПК) между ступенями.

Была поставлена задача оптимизации: увеличить внутренний КПД насоса при сохранении или незначительном увеличении напора насоса. В качестве параметров оптимизации были выбраны средние линии лопаток КНД, КВД и ПК в двух сечениях (втулка и периферия). Число независимых переменных составило 22.

Наиболее быстрым способом оценки влияния геометрии лопаток на характеристики насоса является оптимизация этих лопаток.

В качестве программы-оптимизатора использовалась программа IOSO [5]. Алгоритм оптимизации требует многократного

обращения к CFD-модели. В связи с этим было проведено изучение возможностей упрощения её для увеличения скорости расчётов:

- сравнение результатов моделирования с кавитацией и без её учета;
- сравнение результатов моделирования в стационарной и нестационарной постановке;
- изучение возможности оптимизации без осесимметричных входного и выходного устройств;
- изучение поведение характеристик в зависимости от размерности сеточной модели.

В качестве модели для оптимизации была принята CFD-модель в стационарной постановке, без учёта процессов кавитации с входным и выходным устройствами. Сеточная модель содержала в себе в 2.4 раза меньше элементов по сравнению с базовой (из предыдущих работ).

Оптимизация насоса потребовала более 200 обращений к CFD-модели. Был получен Парето-набор «КПД-напор», из которого были выбраны 2 решения (v33 и v41), соответ-

ствующие критериям. Для этих моделей был проведен расчёт с настройками базовой сеточной модели, на рис. 2 показана КПД-характеристика насоса.

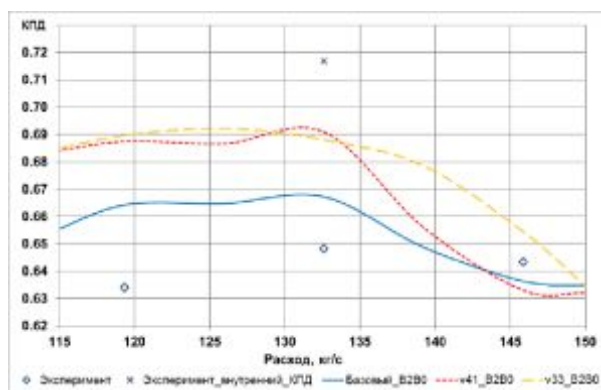


Рис. 2. КПД-характеристика насоса

Значительному изменению подверглась лопатка переходного канала, коэффициент восстановления полного давления которого увеличился с 0,7 до 0,91. Также незначительно увеличился КПД крыльчатки высокого давления и коэффициент восстановления полного давления в выходном устройстве. В тоже время КПД крыльчатки низкого давления и шнека высокого давления снизились. Несмотря на это, КПД и напор насоса увеличились. По-видимому, причиной этому является более согласованная работа элементов насоса.

Таким образом, была проведена оптимизация двухступенчатого насоса, в результате которой были повышены КПД насоса на 3.1% и напор на 0.4%.

#### Библиографический список

1. Andronov, A.L., 2004, "Features of operation of centrifugal pumps and the requirements for their electric drive," Polzunovskii Almanac (Barnaul, Russia), Volume 1, pp. 150-152.
2. Ivanov, V.K., Kashkarov, A.M., Romanenko, E.N., Tolstikov L.A., 2006, "Turbopump units for LPRE designed by NPO Energomash," Conversion in engineering, Volume 1, pp. 15 21.
3. Zubanov, V.M., Shabliy, L.S., Krivcov, A.V., 2015, "Rational Technique for Multistage Centrifugal Pump CFD-Modeling," In Proceedings of the ASME Turbo Expo, Paper No. GT2015-42070, pp. 1-9.
4. Zubanov, V.M., Shabliy, L.S., Krivcov, A.V., Matveev, V.N., 2016, "Document Technique for adequate CFD-modeling of the pump with hydro-drive of the low-pressure stage," In Proceedings of the ASME Turbo Expo, Paper No. GT2016-57689, pp. 1-11.
5. IOSO Optimization Technology. Access mode: <http://www.iosotech.com>

УДК 621.89.097.3

### АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОТБОРА ВОЗДУХА В ТРЕТИЙ КОНТУР НА ЭФФЕКТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ

©2018 А.Б. Агульник, А.А. Горбунов, А.А. Новоселова

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

### INFLUENCE ANALYSIS OF AIR BLEEDING IN THE THIRD FLOW ON THE EFFICIENT PERFORMANCE OF ENGINE

Agulnik A.B., Gorbunov A.A., Novoselova A.A. (Moscow National Research University-MAI, Moscow, Russian Federation)

*The paper considers a three flow engine with controlled air bypass in the third flow. Its characteristics are studied by methods of mathematical modeling. The values of air changes in the third flow are determined, under which the engine has the best economy in different rating.*