

УДК 621.454.2

CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В НАСОСЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ОКИСЛИТЕЛЯ ТУРБОНАСОСНОГО АГРЕГАТА ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2014 В.М. Зубанов, Л.С. Шаблий

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Выполнено CFD-моделирование рабочего процесса в насосе окислителя турбонасосного агрегата в программе ANSYS CFX, теоретический расчёт по аналитическим соотношениям на основании геометрических данных и сравнение результатов двух способов расчёта. При построении модели проточной части насоса встречены проблемы, вызванные неточностями чертежа. Радиус скругления в области горла улитки пришлось уменьшить, иначе модель топологически не соответствовала оригиналу. Данные по углам потока на входе и выходе из центробежного рабочего колеса отсутствовали на чертежах. Эти лопаточные углы определялись по построенной ранее геометрической модели. При анализе первых результатов CFD-расчёта было обнаружено отрицательное давление перед лопатками крыльчатки. Увеличение количества элементов в этом месте расчётной модели позволило снизить область отрицательного давления. Погрешность CFD-моделирования относительно аналитического решения в тракте насоса не превышает 11% по параметрам полного и статического давления. Результаты данной работы могут дать наглядное представление о процессах, происходящих при работе насоса высокого давления турбонасосного агрегата. Полученная расчётная модель может использоваться для дальнейшего исследования рабочих процессов в насосах на жидком кислороде.

CFD, турбонасосный агрегат (ТНА,) жидкостный ракетный двигатель (ЖРД), расчётная модель.

При проектировании современных ЖРД необходимо добиваться максимальной тяги за счёт создания значительного давления в камере сгорания, которое способна обеспечить только насосная подача топлива. Понимание процессов, протекающих в насосах, позволяет сократить объём доводки ЖРД.

В данной работе выполнено моделирование рабочего процесса в насосе высокого давления окислителя турбо-

насосного агрегата, теоретический расчёт на основании геометрических данных и сравнение двух способов расчёта.

CFD-моделирование насоса выполнялось в пять этапов:

1. Создание геометрических моделей крыльчатки (рис. 1) и корпуса (рис. 2) насоса в программе Siemens NX, импорт моделей в DesignModeler для создания модели проточной части.

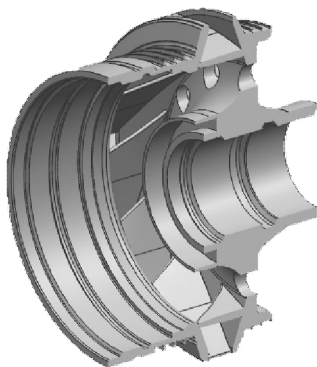


Рис. 1. Геометрическая модель крыльчатки насоса

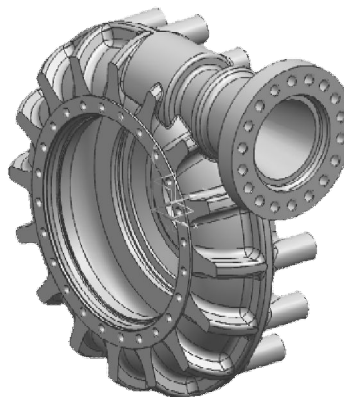


Рис. 2. Геометрическая модель корпуса насоса

2. Наложение расчётной сетки на геометрическую модель в программе ANSYS Meshing.

3. Задание параметров насоса, необходимых для моделирования рабочего процесса в программе ANSYS CFX (свойства рабочего тела, давление, массовый расход).

4. Решение построенной математической модели в программе ANSYS CFX.

5. Анализ полученных результатов расчётов с помощью программы ANSYS CFD-Post.

Геометрические модели крыльчатки и корпуса создавались в программе Siemens NX по чертежам с использованием препарированных образцов деталей. Далее на основе геометрической модели была создана модель проточной части булевой операцией вычитания созданной геометрической модели из «заготовки» – тела цилиндрической формы, соответствующего по габаритам проточной части насоса.

Входную часть ротора для получения устойчивого решения задачи пришлось удлинить по сравнению с чертежом. Проточная часть за разгрузочными отверстиями не моделировалась ввиду того, что при отсутствии утечек расход через неё отсутствует. Для упрощения расчёта [1] использовалась секторная 30-градусная модель – элемент проточной части вокруг одной лопатки ротора (рис. 3).

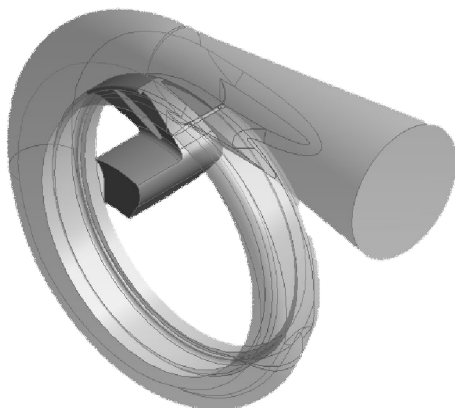


Рис. 3. Модель проточной части насоса

При создании в CAD системе Siemens NX модели прочной части улитки

– корпуса насоса высокого давления – возникали проблемы, вызванные неточностями чертежа. В частности, радиус скругления в области горла улитки пришлось сделать равным 2,2 мм вместо указанных на чертеже 2,5 мм, иначе модель топологически не соответствовала оригиналу (рис. 4).

Также были встречены затруднения при построении улитки в месте перехода языка спирального сборника в диффузор (рис. 5). Последнее сечение на выходе спирального сборника не совпадает с сечением входа конического диффузора из-за того, что их оси пересекаются под небольшим углом. Поэтому с внешней стороны наблюдается ребро, которого нет на чертеже. При построении модели в Siemens NX оно было скруглено радиусом 30 мм.

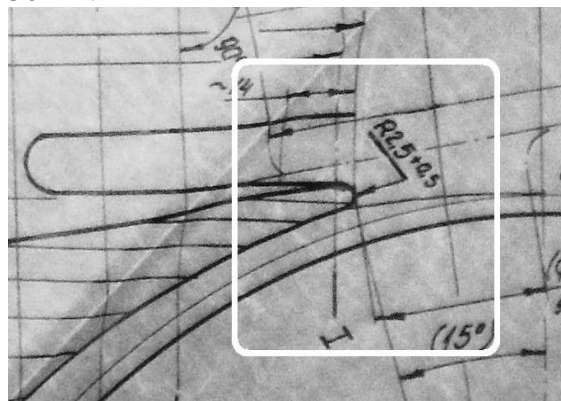


Рис. 4. Горло улитки

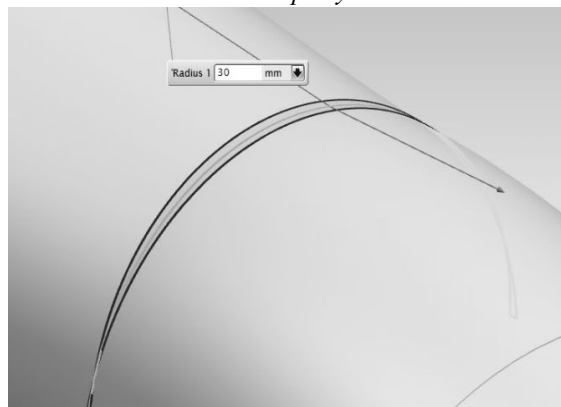


Рис. 5. Переход языка спирального сборника в диффузор

Построение сетки выполнялось в ANSYS Meshing. При генерации сетки использовался алгоритм разбиения *Path Independent* с расширенной размерной функцией элементов ASF: *On: Curvature*, основанной на оценке кривизны геомет-

рии. Также на области скругления горла улитки был применён метод *FaceSizing* для локального уменьшения размера элемента до 3 мм. Это позволило на сложной геометрии получить расчётную сетку из 2,1 млн. расчётных ячеек с качеством (*ElementQuality*) более 0,40 и скошенностью (*Skewness*) менее 0,63, что удовлетворяет требованиям большинства CFD-решателей [2].

В качестве исходных данных для проведения моделирования были заданы:

- параметры рабочего тела – жидкого кислорода при температуре 90 К (динамическая вязкость 0,00022 Па·с, плотность 1141 кг/м³, молярная масса 32 кг/кмоль), изменение температуры и вязкости отсутствует;
- частота вращения ротора (17460 об/мин);
- полное давление на входе в насос в неподвижной системе координат (12,08 МПа);
- массовый расход на выходе из насоса (374 кг/с);
- процессы абсолютно установившиеся (моделирование проводилось в стационарной постановке);
- модель турбулентности k-ε [3];
- интенсивность турбулентности на входе (5%);
- тип интерфейса «ротор-статор» *Stage Average Velocity*;
- отсутствие вибраций;
- отсутствие шероховатости поверхностей (стенки гладкие);
- отсутствие кавитации.

Чтобы провести компьютерные расчёты с большей точностью при меньших затратах времени, в процессе моделирования были использованы некоторые приёмы. В частности, применение переменного множителя масштаба времени *TimescaleFactor*. Суть метода в проведении вычислений в несколько этапов с поэтапным повышением временного шага (*TimescaleFactor*) от 0,001 до 1.

Распределение полного давления, полученное в расчёте, представлено на рис. 6.

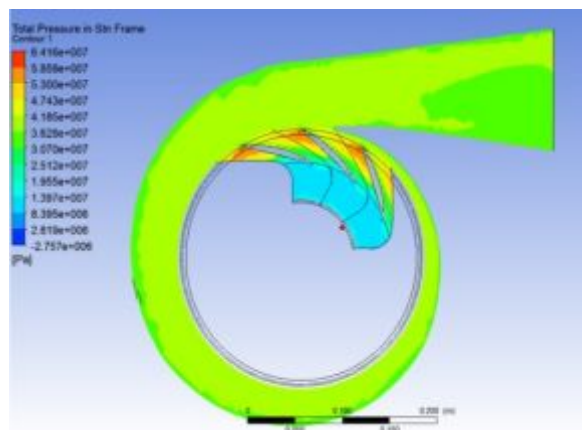


Рис. 6. Распределение полного давления, полученное в расчёте

На картинке полного давления можно видеть отрицательные значения давления перед лопаткой (рис. 7). Это объясняется тем, что параметры при CFD-расчётах определяются в ячейках, которых в данном месте оказывается недостаточно. Увеличение количества элементов сетки в этом месте расчётной модели помогло снизить область отрицательного давления. Чтобы избавиться от данной области окончательно надо учитывать в CFD-модели процессы кавитации.

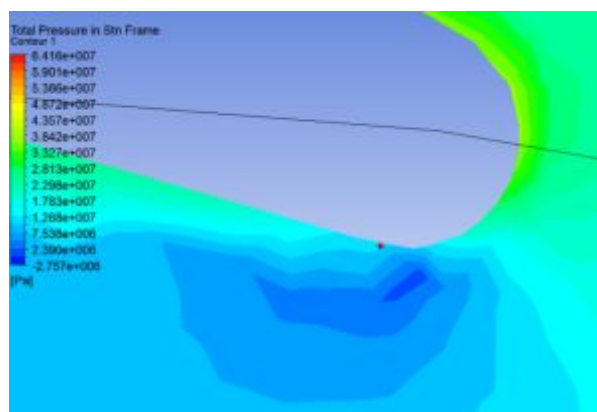


Рис. 7. Вход в центробежную часть перед лопаткой насоса

Распределение полной скорости показано на рис. 8.

Теоретический расчёт выполнялся по аналитическим соотношениям теории лопаточных машин [4]. В качестве исходных данных для проведения моделирования были заданы те же параметры, что и при CFD-моделировании, а также:

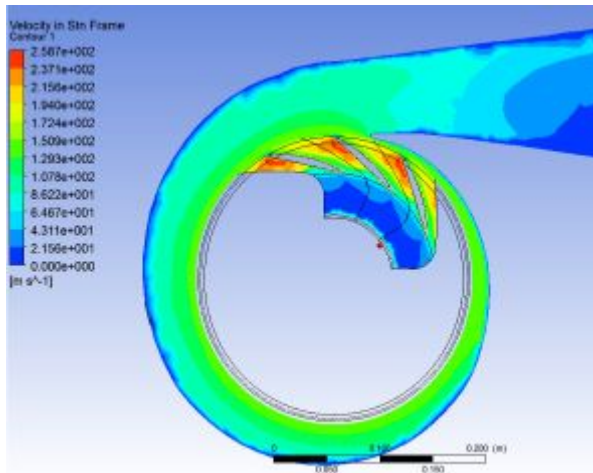


Рис. 8. Распределение полной скорости по тракту насоса

- давление упругости паров кислорода (100 кПа);
- величина расходного КПД насоса (0,88).

Данные по углам потока на входе и выходе из центробежного рабочего колеса (ЦБРК) отсутствовали на чертежах. Эти лопаточные углы определялись по построенной ранее геометрической модели (рис. 9, 10).

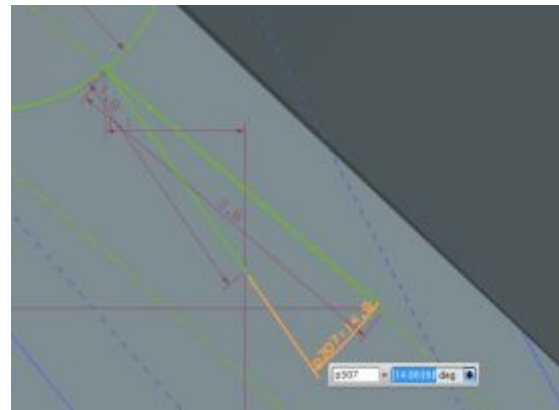


Рис. 9. Лопаточный угол на входе в ЦБРК



Рис. 10. Лопаточный угол на выходе из ЦБРК

Сравнение аналитического расчёта и CFD-моделирования показано в табл. 1 и на рис. 11.

Таблица 1 – Сравнение результатов аналитического расчёта и CFD-моделирования

Вид расчёта	$p_{вх}$, МПа	$p_{вх}^*$, МПа	p_2 , МПа	p_2^* , МПа	$p_{Г}$, МПа	$p_{Г}^*$, МПа	$p_{вых}$, МПа	$p_{вых}^*$, МПа	β_1 , град	β_2 , град
CFD-моделирование	11,89	12,08	28,72	37,74	32,57	36,91	35,83	36,46	7,16	16,86
Аналитический	8,32	12,08	25,91	41,41	31,09	39,87	37,80	38,34	7,1	16,9
Разница, %	42,9	0	10,8	8,9	4,8	7,4	5,2	4,9	0,84	0,24

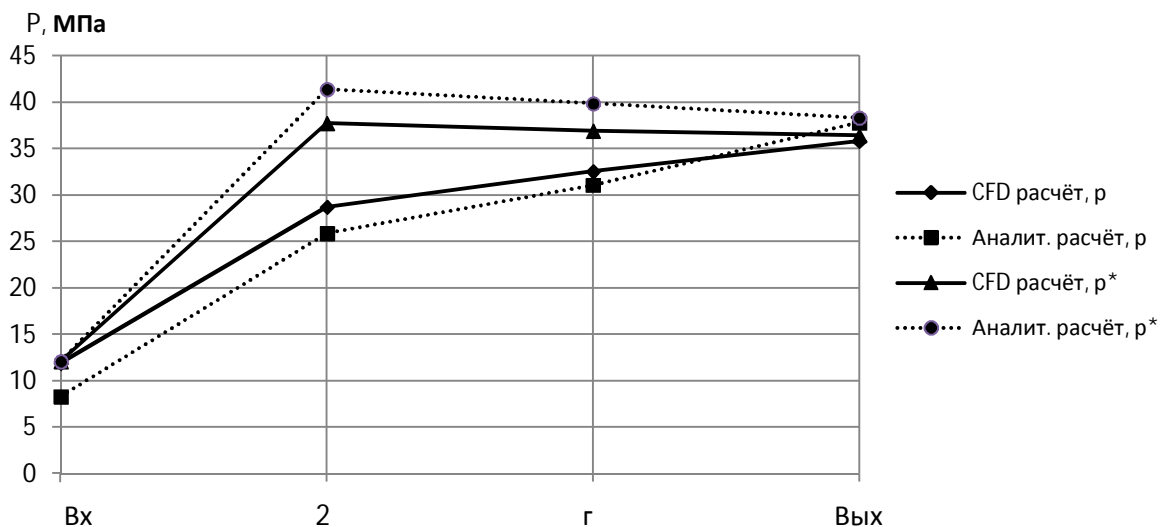


Рис. 11. Распределение давлений по сечениям в насосе: Вх – сечение перед крыльчаткой; 2 – на выходе из крыльчатки; Г – в области горла; Вых – на выходе из насоса

Полученные результаты имеют относительные погрешности до 10,8% (не считая $p_{вх}$). Возможная причина высоких погрешностей - ряд допущений, которые были сделаны при моделировании. Тем не менее, результаты данной работы могут дать наглядное представление о процессах, происходящих при работе насоса окислителя высокого давления турбонасосного агрегата.

После верификации с экспериментальными данными результаты данной работы могут быть использованы при доводке ТНА [5].

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании постановления №218 от 09.04.2010 (шифр темы 2013-218-04-4777).

Библиографический список

1. Шаблий Л.С., Попов Г.М., Колмакова Д.А. Подходы к формированию параметрических моделей лопаточных машин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. № 3(34), часть 3. С. 285-292.

2. ANSYS CFX Solver Modeling guide. ANSYS CFX Release 11.0 / Canons-burg: ANSYS, Inc., 2006. 566 p.

3. Зубанов В.М., Кривцов А.В., Штрауб А.А. Исследование влияния параметров сетки и моделей турбулентности на результаты CFD – расчётов пло-

ских турбинных решёток // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. № 3(34), часть 2. С. 185-191.

4. Матвеев В.Н., Мусаткин Н.Ф., Радько В.М. Проектный расчёт шнекоцентробежного насоса: учебное пособие. Самара: СГАУ, 2006. 64 с.

5. Попов Г.М., Колмакова Д.А., Кривцов А.В. Газодинамическая и прочностная доводка малоразмерной осевой турбины // Электронный журнал «Труды МАИ», 2013. № 71. С. 10

Информация об авторах

Шаблий Леонид Сергеевич, кандидат технических наук, ассистент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: shelbigt500@mail.ru. Область научных интересов: лопаточные машины, численные методы расчёта, программирование.

Зубанов Василий Михайлович, студент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: wakes91@gmail.com. Область научных интересов: лопаточные машины, численные методы расчёта, моделирование рабочих процессов тепловых машин.

CFD-MODELING OF PROCESSES IN A HIGH-PRESSURE OXIDIZER PUMP FOR THE TURBOPUMP ASSEMBLY OF A LIQUID ROCKET ENGINE

© 2014 V.M. Zubanov, L.S. Shabliy

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The article presents CFD modeling of the work process in the oxidizer pump of a turbopump assembly using the ANSYS CFX software, as well as the comparison of numerical and theoretical calculations of the analytical relations based on geometric data. Problems were encountered when modeling the flow of the pump due to inaccuracies in the drawing. The spherical radius in the area of the volute chamber throat had to be reduced, otherwise the model would not be topologically consistent with the original. The data on the vane angles at the inlet and outlet of the centrifugal impeller were absent in the drawings. The blade angles were determined by the previously constructed geometric model. Negative pressure at the entrance of the impeller vanes was found in the analysis of the first results of CFD-calculation. Increasing the number of elements in this part of the calculation model made it possible to reduce the area of the negative pressure. CFD-modeling error with respect to the analytical solution does not exceed 11% by the parameters of total and static pressure. The results of the work can provide a visual representation of the processes taking place during the operation of the high-pressure pump of a turbopump assembly. The CFD-model can also be used for further research of work processes in liquid oxygen pumps to reduce the number of development tests.

CFD, turbopump assembly, liquid rocket engine (LRE), calculation model.

References

1. Shabliy L.S., Popov G.M., Kolmakova D.A. Approaches to parametric models of blade machines formation // Vestnik of the Samara State Aerospace University. 2012. No. 3(34), part 3. P. 285-292. (In Russ.)
2. ANSYS CFX-Solver Modeling Guide (2011) ANSYS, Inc.
3. Zubanov V.M., Krivtsov A.V., Shtraub A.A. The parameters of turbulence models and grids investigation on cfd results of plane turbine cascade // Vestnik of the Samara State Aerospace University. 2012. No. 3(34), part 2. P. 185-191. (In Russ.)
4. Matveev V.N., Musatkin N.F., Rad'ko V.M. Proektnyi raschet shnekotsentrobezhnogo nasosa [Design of a screw centrifugal pump]. Samara: Samara St. Aerosp. Univ. Publ., 2006. 64 p.
5. Popov G.M., Kolmakova D.A., Krivcov A.V. Gas dynamic and strength finishing of a small axial turbine // Trudy MAI. 2013. No. 71. P. 10.(In Russ.)

About the authors

Shabliy Leonid Sergeevich, Candidate of Science (Engineering), Assistant of the Aircraft Engines Theory Department, Samara State Aerospace University. E-mail: shelbi-gt500@mail.ru. Area of Research: blade machines, numerical calculations, programming.

Zubanov Vasily MiKhailovich, undergraduate student, Samara State Aerospace University. E-mail: waskes91@gmail.com. Area of Research: blade machines, numerical calculations, processes of combustion, heat exchange and diffusion.