

УДК 621.45.043

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ВОДОРОДНЫХ ШНЕКОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ANSYS CFD

© 2015 А. В. Сулинов, Л. С. Шаблий, В. М. Зубанов

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

Описаны основные методы моделирования гидродинамических процессов водородных шнекоцентробежных насосов в программном комплексе ANSYS CFD, в том числе с учётом переменной плотности жидкой среды. Сжимаемость жидкого водорода при изменении температуры и давления, несмотря на принимаемые в расчётах допущения о средней плотности, требует учёта переменной плотности для повышения точности моделирования рабочего процесса водородных насосов. Приведена методика проведения CFD-моделирования водородных насосов с применением специальных программных инструментов для построения геометрии и сеточных моделей межлопаточных каналов. Предложены три метода моделирования потоков жидкости с переменной плотностью в ANSYS CFD. Для реализации метода задания переменной плотности жидкого водорода в виде функциональной зависимости получены регрессионные модели второго и четвёртого порядков в диапазоне давления от 0,09 до 30 МПа и температуры от 18 до 34К.

Турбонасосный агрегат, шнекоцентробежный насос, жидкий водород, рабочий процесс, методы моделирования, жидкость с переменной плотностью, регрессионные модели.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-305-315

В настоящее время достигнуты крупные успехи в использовании водородных технологий в энергетике, на транспорте и других отраслях промышленности. Большое значение водородные технологии имеют и для ракетно-космической техники.

Применение водорода в качестве рабочего тела жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) позволяет увеличить не только энергетические возможности средств выведения, тем самым увеличив полезную нагрузку, выводимую на космическую орбиту, но и решать вопросы экологии, используя экологически чистые компоненты ракетных топлив. Всё это делает актуальными работы по созданию перспективных ЖРД, использующих водород в качестве рабочего тела [1-3].

Одним из основных агрегатов, определяющих характеристики и надёжность ЖРД, является турбонасосный агрегат (ТНА) [4, 5], состоящий из насосов, перекачивающих компоненты топлива, и из приводящей (или приводящих) их во вращение турбины (турбин).

Из анализа физико-химических свойств жидкого водорода [1] можно отметить следующие его особенности по сравнению с другими компонентами топлива:

- низкая плотность, отличающаяся от плотности других жидких компонентов более, чем на порядок;
- низкая температура кипения, равная 20,4 К при давлении 0,1 МПа;
- узкий температурный диапазон жидкого состояния водорода от 13,9 до 20,4К при давлении 0,1 МПа;
- низкие значения критической температуры 33,2 К и критического давления 1,273 МПа;
- более высокое значение теплоты испарения жидкого водорода 454 кДж/кг по сравнению с теплотой испарения широко распространённого в ЖРД керосина 343 кДж/кг;
- зависимость свойств (плотности, теплоёмкости, вязкости, теплопроводности) не только от температуры, но и от давления (рис. 1).

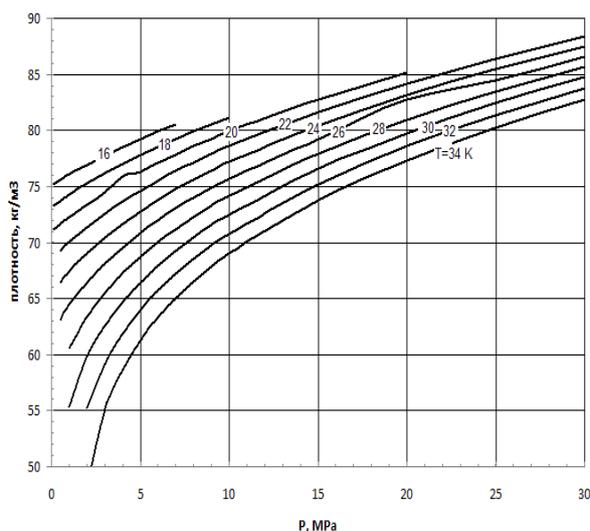


Рис. 1. Зависимость плотности жидкого водорода от давления и температуры

Особенности физико-химических свойств жидкого водорода накладывают отпечаток на организацию рабочего процесса и проектирование шнеко-центробежного насоса ТНА:

- из-за низкой плотности водорода для достижения требуемых значений давления насос, как правило, выполняется многоступенчатым;

- сжимаемость жидкого водорода и изменение температуры водорода и его физических свойств при изменении давления, несмотря на принимаемые в расчётах допущения о средней плотности и осреднение других параметров, требует учёта переменной физическими свойствами водорода при организации и моделировании рабочего процесса водородного насоса;

- существенная разница в максимально возможных угловых скоростях роторов насоса горючего-водорода и насоса окислителя, а также насосов других несжимаемых жидких горючих требует для повышения энергоёмких характеристик применения либо редукторной конструктивной схемы ТНА, либо схемы с раздельными турбонасосными агрегатами для горючего и окислителя;

- жидкий водород относится к классу низкокипящих криогенных жидкостей, что требует решения дополнительных задач по вопросам распределения и защиты

от тепловых потоков элементов конструкции ТНА.

В свете описанных выше особенностей физико-химических свойств водорода моделирование рабочего процесса насоса жидкого водорода является сложной задачей. При этом сложная геометрия и нестационарность протекающих процессов также накладывают дополнительные трудности на создание CFD-модели.

В соответствии с мировым и отечественным опытом CFD-моделирования турбомашин, а также опыта авторского коллектива [6, 7], процессы моделируются стационарно, а геометрия насоса создаётся в упрощённом виде секторных моделей межлопаточных каналов. Что же касается сложных свойств рабочего тела, то они описываются дополнительно, поскольку стандартных моделей для жидкостей с переменной плотностью в ANSYS CFX нет.

Задачи с зависимостями параметров рабочего тела, заданными пользователем, как правило, являются намного менее стабильными по сравнению с задачами, рабочее тело которых имеет постоянные параметры. Это связано как с объективными причинами (возрастающей физико-математической сложностью таких задач), так и с субъективными причинами, поскольку в таких задачах увеличивается количество мест, в которых расчётчик может допустить ошибку при постановке задачи.

Для уменьшения вероятности ошибок при постановке задачи рекомендуется увеличивать сложность постепенно. Поэтому решение задачи с переменной плотностью, зависящей от давления и температуры, рационально выполнять в несколько этапов. Сначала решить задачу с постоянной плотностью без учёта изменения температуры, затем решить аналогичную задачу с учётом изменения температуры, затем – с зависимостью плотности от давления и температуры. Поэтапное движение позволяет локализовать возможную область возникновения ошибки, и общее время решения задачи оказывается меньше, чем при попытке решения

«сходу». И при старте усложнённой задачи желательно инициализироваться с результатов предыдущей, поскольку старт «с нуля» (с поля параметров, полученного стандартной инициализацией) крайне затруднителен и решение даже верно собранной компьютерной модели может завершаться аварийно.

Таким образом, поэтапное решение задачи подразумевает создание более простой модели. В качестве такой модели был принят вариант с постоянной плотностью жидкого водорода, принятой по среднему значению.

Насос (рис. 2) - это лопаточная машина, поэтому для создания геометрии

лопаточных венцов целесообразно использовать специальное программное обеспечение. В данной работе для построения геометрии шнека и рабочего колеса был использован программный продукт BladeGen из линейки программного обеспечения ANSYS (рис. 3). Вместе с тем, у любого насоса есть элементы, к которым невозможно применить подход моделирования лопаточных машин. Это входные патрубки, переходные каналы и спиральные сборники (сборные улитки). Для их геометрического моделирования применялся универсальный CAD-пакет Siemens NX (рис. 4).

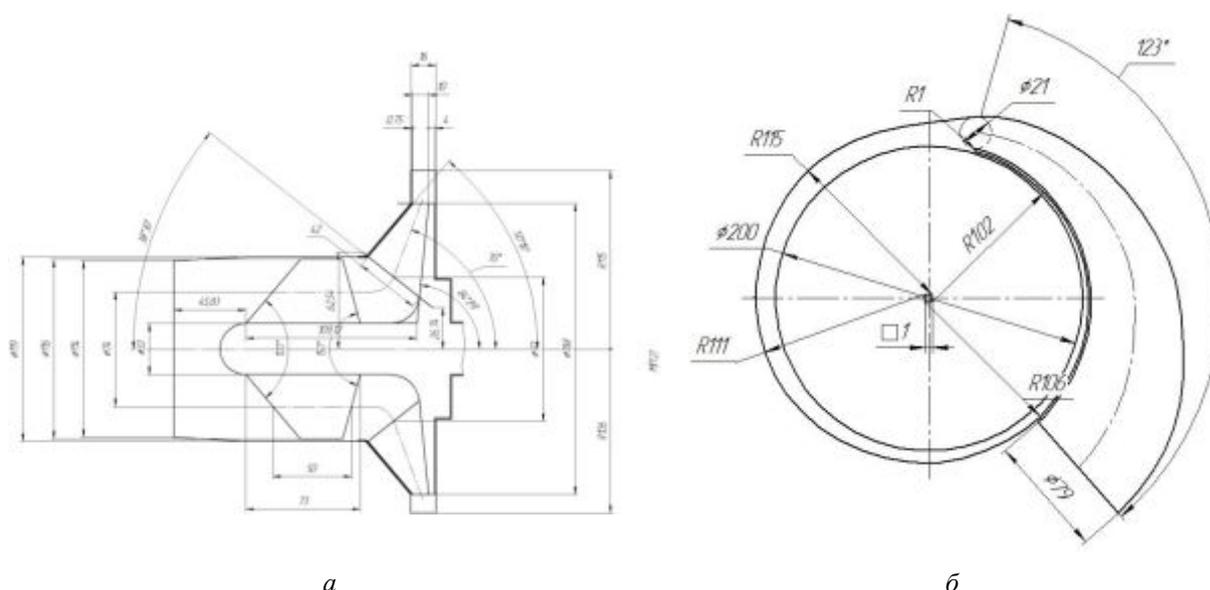


Рис. 2. Схема проточной части моделируемого насоса в меридиональной (а) и окружной (б) плоскостях

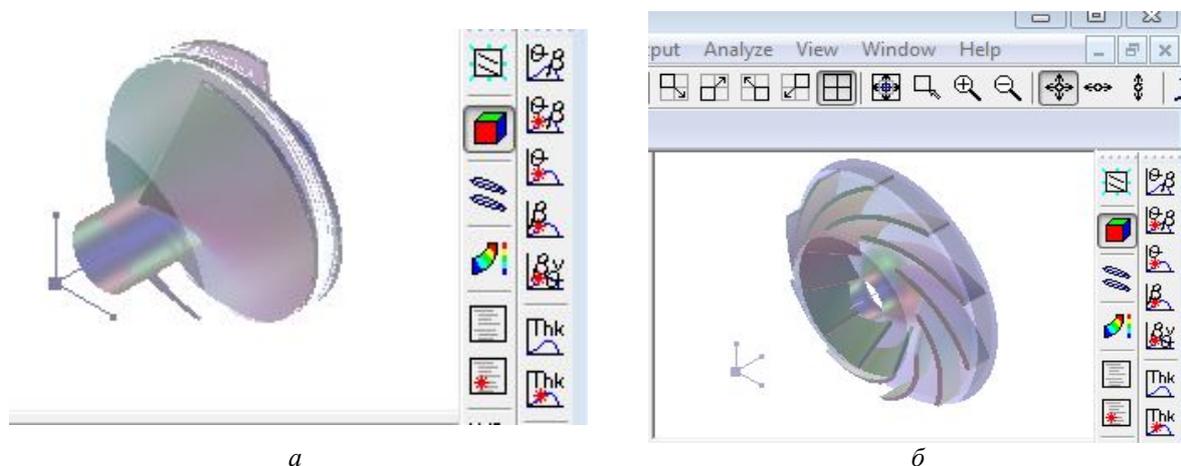


Рис. 3. Окно программы BladeGen с построенными моделями шнека (а) и рабочего колеса (б)

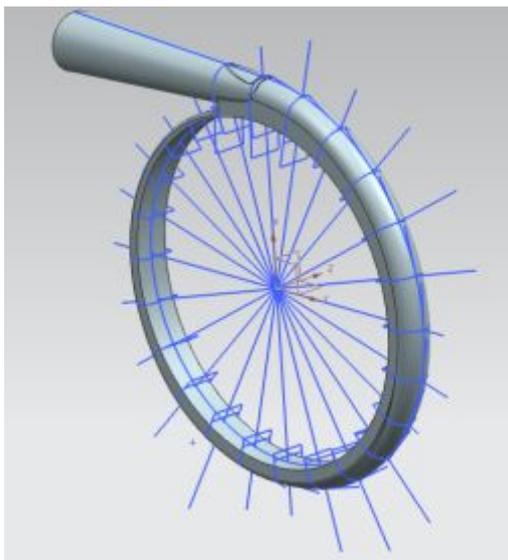


Рис. 4. Схема построения CAD-модели сборной улитки в универсальном программном комплексе Siemens NX

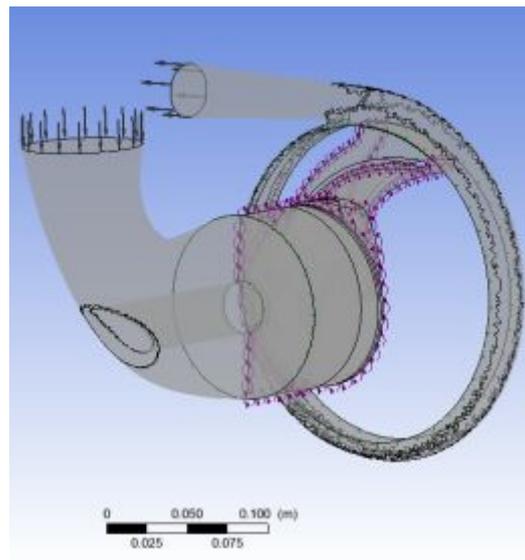


Рис. 6. Модель проточной части насоса в окне программы ANSYS CFX

Далее с использованием этих геометрических моделей была построена расчётная сетка с помощью специализированного программного продукта ANSYS TurboGrid для лопаточных венцов и универсального ANSYS Meshing для остальных элементов (рис. 5). После этого все сеточные модели были собраны в единую модель проточной части насоса в программе ANSYS CFX (рис. 6).

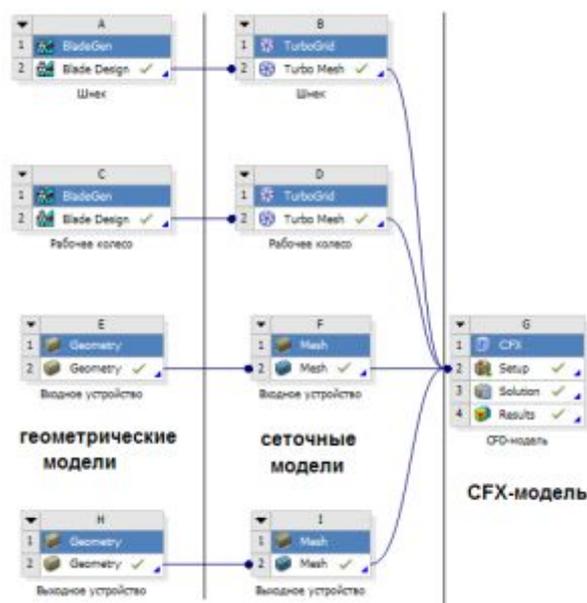


Рис. 5. Схема этапов расчётного проекта в окне программы ANSYS Workbench

В данной работе проводилось моделирование насоса, спроектированного по методикам [8-10]. Поэтому параметры насоса, рассчитанные по этим методикам, легли в основу граничных условий CFD-модели:

- скорость вращения ротора 45000 об/мин;
- полное давление на входе в насос в неподвижной системе координат 500 кПа;
- полная температура жидкого водорода на входе в насос 20 К;
- свойства жидкого водорода: плотность жидкого водорода $76,81 \text{ кг/м}^3$, молярная масса $2,0159 \text{ кг/кмоль}$, изобарная теплоёмкость $9630 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, динамическая вязкость $8,6567 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$, теплопроводность $0,118 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$;
- массовый расход на выходе из насоса $7,429 \text{ кг/с}$;
- моделирование рабочего процесса проводилось в стационарной постановке;
- модель турбулентности $k-\varepsilon$;
- интенсивность турбулентности на входе 5% ;
- тип интерфейсов «вход-шнек», «шнек-крыльчатка», «крыльчатка-улитка» - Stage Average Velocity;
- интерфейсы периодичности «Rotational Periodicity» для шнека и крыльчатки;

- отсутствие вибраций различной природы;
- отсутствие шероховатости поверхностей (стенки гладкие);
- отсутствие кавитации.

В результате было получено распределение параметров (давления, температуры, скорости) по ходу проточной части (рис. 7), а также интегральные параметры насоса, сравнение которых с имеющимися данными проектного расчёта приведено в табл. 1.

Таблица 1. Результаты моделирования рабочего процесса в насосе с постоянной плотностью

Параметр	Результат проектного расчёта	Результат CFD-расчёта
Давление на входе в РК, МПа	1,068	1,081
Давление на выходе из РК, МПа	6,458	7,493
Давление на выходе из насоса, МПа	9,761	10,96
Угол выхода потока из шнека, град	5,209	11,41
Угол выхода потока из РК, град	1,486	5,611

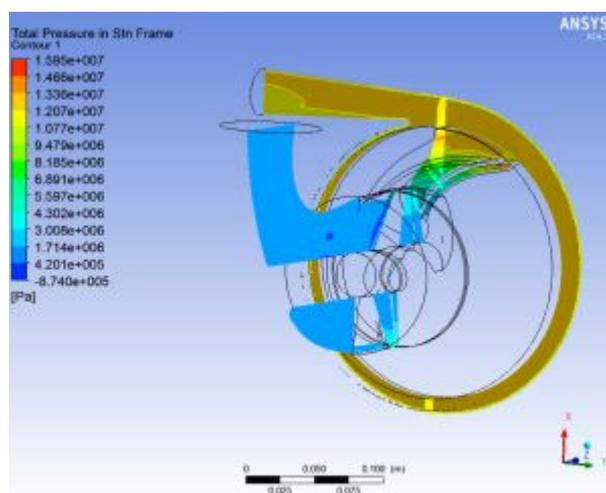


Рис. 7. Распределение абсолютного полного давления по ходу проточной части насоса

Описанный выше CFD-расчёт был выполнен без учёта изменения плотности из-за изменения давления и температуры. Давление от входа насоса к выходу изменяется от 0,1 до 15 МПа (рис. 7), а температура – от 20 до 25 К. Поэтому, несмотря на то, что повышение давления и повы-

шение температуры – факторы, действующие на изменение плотности в разных направлениях, совокупное их воздействие приведёт к повышению плотности на 15%: от 70 кг/м³ на входе до 80 кг/м³ (см. рис. 1).

В настоящей работе были предложены варианты учёта изменения плотности жидкого водорода в CFD-расчёте, поскольку в ANSYS CFX существует возможность задавать параметры рабочего процесса не только постоянными, но и переменными. Было рассмотрено три варианта моделирования переменной плотности:

1. Использование встроенной в ANSYS CFX модели уравнения состояния Пенга-Робинсона.
2. Задание переменных свойств в табличном виде.
3. Задание переменных свойств через функциональные зависимости.

1. Задание переменной плотности по модели Пенга-Робинсона

Уравнение Пенга-Робинсона является одной из модификаций уравнения Ван-дер-Ваальса [11]:

$$p = \frac{RT}{v - b} - \frac{a_0 \alpha(T)}{v^2 + 2bv - b^2},$$

где R – универсальная газовая постоянная; v – объём одного моля вещества; $\alpha(T)$ – универсальная функция, зависящая от двух индивидуальных параметров, характеризующих свойства той или иной конкретной жидкости: критической температуры T_c и, так называемого, ацентрического фактора ω :

$$\alpha(T) = \{1 + m[1 - \sqrt{T/T_c}]\}^2,$$

$$m = 0,375 + 1,542\omega - 0,270\omega^2.$$

Из приведённых формул видно, что отличие этого уравнения от уравнения Ван-дер-Ваальса связано с членом, описывающим притяжение молекул друг к другу. При переходе от уравнения Ван-дер-Ваальса к уравнению Пенга-Робинсона константа a в члене a/v^2 заменена на вполне определённую функцию темпера-

туры, а величина v^2 в знаменателе Вандер-Ваальсовского члена – на специального вида квадратный трёхчлен.

В библиотеке ANSYS CFX существует раздел веществ со свойствами, заданными этим уравнением «Materials-pengrob.ccl», включающий группу «влажных» веществ «Wet Peng Robinson», которая содержит водород с уравнением состояния Пенга-Робинсона. Параметры модели были оставлены по умолчанию, изменениям подверглись только ограничения по температуре: нижний предел («Lower Cp0(T) Temperature Limit») был изменён со 100 на 14 К, а верхний («Upper Cp0(T) Temperature Limit») – с 1000 на 100 К.

Представленные в табл. 2 результаты расчёта показывают, что параметры, полученные с использованием уравнения состояния Пенга-Робинсона, существенно отличаются от результатов при постоянной плотности. Однако уровень отличий оказался значительно больше, чем ожидался. Изменение плотности в диапазоне 75...80 кг/м³ по экспертным оценкам должно было вызвать изменение параметров не более, чем на 5...10% по отношению к расчёту с постоянной средней плотностью. При детальном рассмотрении было установлено, что плотность, рассчитываемая по модели Пенга-Робинсона, оказалась на уровне 40...45 кг/м³ и практически не изменялась по ходу проточной части вслед за изменением давления и температуры.

Таблица 2. Результаты моделирования рабочего процесса в насосе с плотностью, заданной по модели Пенга-Робинсона

Параметр	С постоянной плотностью	С переменной плотностью
Давление на входе в РК, МПа	1,081	0,5689
Давление на выходе из РК, МПа	7,493	4,113
Давление на выходе из насоса, МПа	10,96	6,882
Угол выхода потока из шнека, град	11,41	17,14
Угол выхода потока из РК, град	5,611	6,972

В результате проведённого исследования не удалось применить модель свойств рабочего тела Пенга-Робинсона, взятую из библиотеки ANSYS CFX со значениями по умолчанию, для моделирования потока жидкого водорода в насосе.

2. Задание переменной плотности в табличном виде

Самым очевидным способом задания переменной плотности является ввод табличных данных об изменении плотности жидкого водорода [1] в гидродинамическую модель. В ANSYS CFX для задания табличных данных предусмотрены так называемые пользовательские функции (User Function), через которые дискретно задаются зависимости параметров в табулированном виде, интерполяция и экстраполяция значений выполняется автоматически.

Для задания таблицы плотности, зависящей от температуры и давления, необходима двухмерная табулированная функция. Поскольку из многомерных функций в программе представлены только трёхмерные, двухмерная функция была организована добавлением третьего фиктивного аргумента, постоянного во всём диапазоне.

При расчёте экстраполяция табличных функций выполняется автоматически, и для предотвращения забросов параметров было предложено два метода. Первый – добавление в таблицу параметров фиктивных граничных значений (рис. 8), обеспечивающих постоянство крайнего значения функции даже при выходе аргументов за границы описанного таблицей диапазона при флуктуациях давления и температуры, которые на начальном этапе могут быть даже нефизичными (например, отрицательные значения давления).

При проверочном табулировании функции было выявлено, что данный способ не позволяет правильно ограничить функциональную зависимость и при экстраполяции, например, давления за пределами физического диапазона 0,09-10 МПа

значение плотности может сильно отличаться от граничного значения (рис. 9). Причина данного явления, по всей вероятности, кроется в неверных алгоритмах экстраполяции трёхмерных пользовательских функций ANSYS CFX.

T, K	P, МПа							
	-50	0,09	0,1	0,2	0,8	1	1,6	
0	77,12	77,12	77,12	75,559	75,929	76,303	76,826	
14	77,12	77,12	77,12					
16	75,475	75,475	75,475	75,559	75,929	76,303	76,826	
18	73,628	73,628	73,628	73,735	74,169	74,581	75,165	
20	71,512	71,512	71,512	71,639	72,152	72,62	73,306	
22	1,192	1,192	1,192	69,228	69,779	70,413	71,209	
24	1,075	1,075	1,075	2,318	67,153	67,876	68,85	
26	0,9794	0,9794	0,9794	2,077	63,916	64,883	66,139	
28	0,9021	0,9021	0,9021	1,888	59,749	61,2	62,939	
30	0,8361	0,8361	0,8361	1,735	6,384	56,138	58,962	
32	0,7789	0,7789	0,7789	1,607	5,628	12,584	53,444	

Рис. 8. Задание фиктивных граничных значений для корректировки экстраполяции

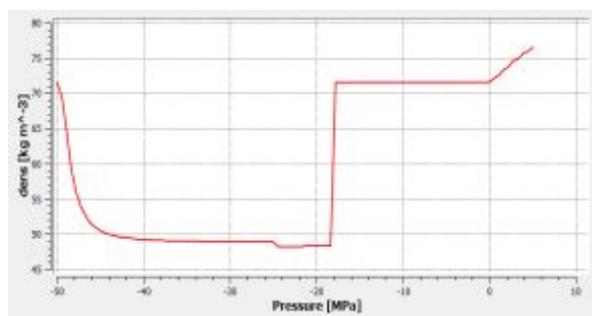


Рис. 9. График табулирования пользовательской функции плотности (при T=20K, p=-50...10 МПа), иллюстрирующий неверную экстраполяцию значений

Второй способ подразумевает явное ограничение значений аргументов и функции математическим выражением вида:

$$\rho_{[\min-max]} = \min\{\rho_{\max}; \max[\rho(p, T); \rho_{\min}]\},$$

где $\rho(p, T)$ – табличная функция вычисления плотности, значения которой выходят за границы $[\rho_{\min}; \rho_{\max}]$. Значения аргументов p и T также могут быть предварительно ограничены аналогичным способом.

3. Задание переменной плотности через функциональные зависимости

Поскольку задание в программе ANSYS CFX табличных функций сопряжено с описанными выше трудностями и не удаётся обойтись без использования математических выражений, то наиболее очевидным способом задания переменной

плотности рабочего тела является описание её в виде явной двухпараметрической функции вида $\rho = f(p, T)$, записанной непосредственно в поле для значения плотности на языке математических выражений CFX Expression Language (CEL).

Однако лёгкость ввода такой функции в программу связана со сложностью функционального выражения табличных зависимостей параметров в виде двухпараметрической регрессионной модели.

Несмотря на то, что математические методики выражения функции тренда хорошо отлажены и являются встроенными инструментами даже офисной программы MS Excel, применить их бывает непросто. Во-первых, описать поведение изменяющегося параметра простой зависимостью во всём диапазоне его изменения затруднительно. Так, например, на рис. 10 приведены графики зависимостей, аппроксимирующих изменение плотности при изменении давления при постоянном значении температуры в диапазоне давлений от 0,09 до 15 МПа:

$$\begin{aligned} \rho(18K) &= -0,0257p^2 + 1,0457p + 73,223; \\ \rho(22K) &= -0,0286p^2 + 1,2761p + 68,833; \\ \rho(26K) &= -0,0491p^2 + 1,8172p + 62,772; \\ \rho(30K) &= -0,0657p^2 + 2,3444p + 56,013; \\ \rho(34K) &= -0,0752p^2 + 2,7633p + 49,156. \end{aligned}$$

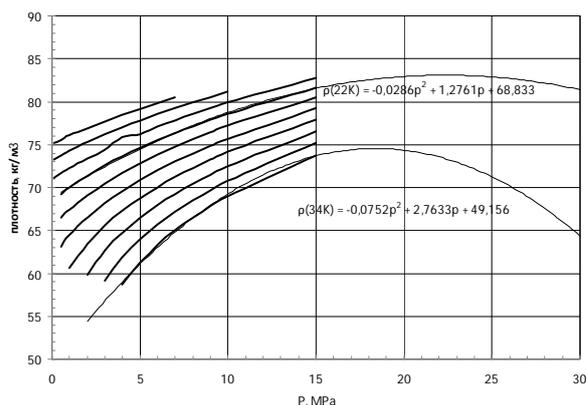


Рис. 10. Аппроксимирующие зависимости плотности при изменении давления в диапазоне от 0 до 15 МПа

Однако при сравнении рис. 10 и рис. 1 видно, что при выходе за этот диапазон значения плотности, найденные по указанным зависимостям, будут сильно отличаться от реальных. Если же аппрок-

смировать диапазон от 0,09 до 30 МПа, то сложность описания существенно возрастает:

$$\rho (18\text{K}) = -0,0001p^4 + 0,0034p^3 - 0,0593p^2 + 1,1517p + 73,165;$$

$$\rho (22\text{K}) = -0,00002p^4 + 0,002p^3 - 0,0653p^2 + 1,4772p + 68,606;$$

$$\rho (26\text{K}) = -0,00006p^4 + 0,0042p^3 - 0,1228p^2 + 2,209p + 62,33;$$

$$\rho (30\text{K}) = -0,0001p^4 + 0,0106p^3 - 0,2857p^2 + 3,965p + 52,441;$$

$$\rho (34\text{K}) = -0,0003p^4 + 0,0188p^3 - 0,5043p^2 + 6,4977p + 38,666.$$

Вторая трудность заключается в том, чтобы аппроксимировать двухпараметрическую зависимость. В данном случае нетрудно видеть, что коэффициенты всех однопараметрических зависимостей изменяются монотонно вслед за изменением второго параметра – температуры, причём характер этих зависимостей близок к линейному (рис. 11).

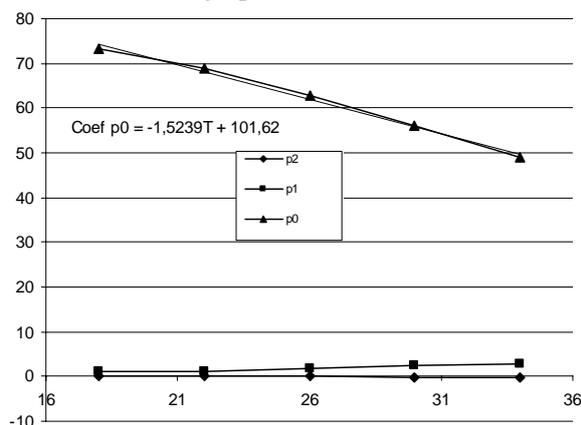


Рис. 11. Зависимость коэффициентов в однопараметрических уравнениях от температуры

Таким образом, формируя тренд-зависимости для коэффициентов однопараметрических выражений:

$$\text{Coef } p2 = -0,0034T + 0,0396,$$

$$\text{Coef } p1 = 0,1126T - 1,0779,$$

$$\text{Coef } p0 = -1,5239T + 101,62,$$

получаем одно двухпараметрическое уравнение, описывающее изменение плотности при изменении давления от 0,09 до 15 МПа и температуры от 18 до 34 К:

$$\rho = (-0,0034T + 0,0396)p^2 + (0,1126T - 1,0779)p - 1,5239T + 101,62.$$

В случае аппроксимации диапазона давления от 0,09 до 30 МПа с использованием полиномов четвёртого порядка изменение коэффициентов можно описать квадратичными зависимостями:

$$\text{Coef } p4 = -0,000002T^2 + 0,0001T - 0,0014,$$

$$\text{Coef } p3 = 0,0001T^2 - 0,0044T + 0,0495,$$

$$\text{Coef } p2 = -0,0024T^2 + 0,0954T - 1,0112,$$

$$\text{Coef } p1 = 0,0243T^2 - 0,933T + 10,129,$$

$$\text{Coef } p0 = -0,0984T^2 + 2,9881T + 101,62.$$

Уравнение, описывающее изменение плотности при изменении давления от 0 до 30 МПа и температуры от 16 до 34 К, примет вид:

$$\rho = (-0,000002T^2 + 0,0001T - 0,0014)p^4 + (0,0001T^2 - 0,0044T + 0,0495)p^3 + (-0,0024T^2 + 0,0954T - 1,0112)p^2 + (0,0243T^2 - 0,933T + 10,129)p - 0,0984T^2 + 2,9881T + 101,62.$$

Язык выражений CEL имеет строгий синтаксис относительно единиц измерения, и поскольку температура подставляется в это выражение в кельвинах, а давление – в мегапаскалях, то CEL-выражение для расчёта плотности в ограниченном диапазоне вводится в ANSYS CFX в виде:

$$\rho = ((-0,0034 * T/1[\text{K}] + 0,0396) * (p/1[\text{MPa}])^2 + (0,1126 * T - 1,0779) * (p/1[\text{MPa}]) - 1,5239 * T/1[\text{K}] + 101,62) * 1 [\text{kg}/\text{m}^3].$$

Из предложенных трёх методов моделирования рабочего процесса водородного насоса с учётом переменной плотности жидкого водорода наиболее перспективным с точки зрения реализации в ANSYS CFX является метод задания переменной плотности в виде функциональной зависимости.

Таким образом, в результате проведённого исследования методов моделирования гидродинамических процессов водородных шнекоцентробежных насосов в программном комплексе ANSYS CFD можно отметить следующее.

1. Сравнительный анализ результатов моделирования рабочего процесса водо-

родного шнекоцентробежного насоса в ANSYS CFX с применяемыми проектными методами показал, что ANSYS CFX может быть применён для качественной оценки результатов проектных расчётов путём моделирования рабочего тела с постоянной средней плотностью рабочего тела.

2. Перспективно применение для моделирования рабочего процесса водородного шнекоцентробежного насоса в ANSYS CFX метода задания переменной плотности жидкого водорода в виде функциональной зависимости.

3. Для реализации метода задания переменной плотности жидкого водорода в

виде функциональной зависимости получены регрессионные модели второго и четвёртого порядков в диапазоне давления от 0,09 до 30 МПа и температуры от 18 до 34 К.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления №218 от 09.04.2010 (шифр темы 2013-218-04-4777) с использованием оборудования ЦКП САМ-технологий, оснащённого в рамках проекта RFMEFI59314X0003.

Библиографический список

1. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение / под ред. Д.Ю. Гамбурга, Н.Ф. Дубовкина. М.: Химия, 1989. 672 с.

2. Липлявый И.В., Мартыненко Ю.А., Романов В.Н., Титков Н.Е. Двигатели РД0146 и РД0148 // Научно-технический юбилейный сборник «Труды КБХА». Воронеж: КБ химв автоматики, 2001. С. 18–22.

3. Гусев В.Н., Семенов В.И., Стороженко И.Г. Трёхкомпонентный двухрежимный маршевый двигатель для аэрокосмических систем и ракет-носителей нового поколения // Альтернативная энергетика и экология. 2008. № 3 (59). С. 36–41.

4. Иванов В.К., Кашкаров А.М., Романенко Е.Н., Толстиков Л.А. Турбонасосные агрегаты ЖРД конструкции НПО Энергомаш // Конверсия в машиностроении. 2006. № 1. С. 15–21.

5. Дмитренко А.И., Иванов А.В., Рачук В.С. Развитие конструкции турбонасосных агрегатов для водородных ЖРД безгенераторной схемы, разработанных в КБХА // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2010. № 4 (24). С. 38–48.

6. Сулинов А.В., Шаблей Л.С. CFD-моделирование автономных осевых турбин турбонасосных агрегатов ЖРД в ANSYS CFX: метод. указания. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2012. 47 с.

7. Сулинов А.В., Шаблей Л.С. CFD-моделирование шнекоцентробежных насосов турбонасосных агрегатов ЖРД в ANSYS CFX: метод. указания. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2013. 57 с.

8. Матвеев В.Н., Мусаткин Н.Ф., Радько В.М. Проектный расчёт шнекоцентробежного насоса: уч. пособие. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2006. 64 с.

9. Овсянников Б.В., Селифонов В.С., Черваков В.В. Расчёт и проектирование шнекоцентробежного насоса: учебное пособие. М.: МАИ, 1996. 72 с.

10. Иванов А.В. Расчёт и профилирование шнекоцентробежного насоса турбонасосного агрегата ЖРД: учебное пособие. Воронеж: Воронежский гос. технический ун-т, 2010. 120 с.

11. Equation of state. http://en.wikipedia.org/wiki/Equation_of_state.

Информация об авторах

Сулинов Александр Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: abcsamara@yandex.ru. Область научных интересов: исследование рабочих процессов двигателей летательных аппаратов.

Шаблий Леонид Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика

С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), E-mail: shelbi-gt500@mail.ru. Область научных интересов: лопаточные машины, численные методы расчёта, программирование.

Зубанов Василий Михайлович, ассистент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: waskes91@gmail.com. Область научных интересов: лопаточные машины, моделирование рабочих процессов тепловых машин.

METHODS OF MODELING THE WORK PROCESS OF HYDROGEN SCREW-CENTRIFUGAL PUMPS USING ANSYS CFD

© 2015 A. V. Sulinov, L. S. Shabliy, V. M. Zubanov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

Basic methods of modeling hydrodynamic processes in hydrogen screw-centrifugal pumps using the ANSYS CFD software are described in the paper, including those that take into account variable density of the fluid. Compressibility of liquid hydrogen caused by temperature and pressure changes, despite the allowances of average density, requires taking into account variable density for improved accuracy of modeling the workflow of hydrogen pumps. A technique of CFD-modeling of hydrogen pumps using special software tools to build the geometry and grid models of interblade channels is presented. Three methods for modeling variable-density fluid flows in ANSYS CFD are proposed. Regression models of the second and fourth orders have been obtained in the pressure range from 0.09 to 30 MPa and in the temperature range from 18 to 34 K to implement the method of setting variable density of liquid hydrogen in the form of functional relation.

Turbopump assembly, screw-centrifugal pump, liquid hydrogen, workflow, simulation method, variable density liquid, regression models.

References

1. *Vodorod. Svoystva, poluchenie, khranenie, transportirovanie, primeneniye* [Hydrogen: properties, generation, storage, transportation, application / ed. by D.Yu. Hamburg, V.P. Semenov] Moscow: Khimiya Publ., 1989. 672 p.
2. Liptyaviy I.V., Martinenko Yu.A., Romanov V.N., Titkov N.E. Engines RD0146 and RD0148. *Nauchno-tekhnicheskiiy yubileynyy sbornik «Trudy KBKhA»*. Voronezh: KB Khimavtomatiki Publ., 2001. P. 18-22. (In Russ.)
3. Gusev V.N., Semenov V.I., Storojenko I.G. Three-propellant dual-mode propulsion engine for the next generation aerospace systems and launch vehicles. *Alternative Energy and Ecology*. 2008. No. 3(59). P. 36-41. (In Russ.)
4. Ivanov V.K., Kashkarov A.M., Romasenko E.N., Tolstikov L.A. Turbo-

driven pump sets of liquid-propellant rocket engines at NPO «Energomash». *Conversion in machine building*. 2006. No. 1. P. 15-21. (In Russ.)

5. Dmitrenko A.I., Ivanov A.V., Rachuk V.S. Development of turbopump unit design for hydrogen liquid-propellant rocket engines without generators developed at the design bureau of chemical automation. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2010. No. 4 (24). P. 38-48. (In Russ.)

6. Sulinov A.V., Shabliy L.S. *CFD-modelirovanie avtonomnykh osevykh turbin turbonasosnykh agregatov ZhRD v ANSYS CFX* [CFD-modeling of standalone axial turbines of liquid rocket engine turbopump assemblies using ANSYS CFX: procedural guidelines]. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2012. 47 p.

7. Sulinov A.V., Shabliy L.S. *CFD-modelirovanie shnekotsentrobezhnykh nasosov turbonasosnykh agregatov ZhRD v ANSYS CFX* [CFD-modeling of screw-centrifugal pumps of liquid rocket engine turbopump

assemblies using ANSYS CFX: procedural guidelines]. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2013. 57 p.

8. Matveev V.N. Musatkin N.F., Rad'ko V.M. *Proektnyy raschet shnekotsentrobezhnogo nasosa* [Design calculation of a screw-centrifugal pump: study guide]. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2006. 64 p.

9. Ovsyannikov B.V., Selifonov V.S., Chervakov V.V. *Raschet i proektirovanie shnekotsentrobezhnogo nasosa* [Calculation and design of a screw-centrifugal pump: study guide]. Moscow: Moscow Aviation Institute Publ., 1996. 72 p.

10. Ivanov A.V. *Raschet i profilirovanie shnekotsentrobezhnogo nasosa turbo-nasosnogo agregata ZhRD* [Calculation and design of a screw-centrifugal pump of the liquid rocket engine pump assembly: Text-book]. Voronezh: Voronezh State Technical University Publ., 2010. 120 p.

11. Equation of state. Available at: http://en.wikipedia.org/wiki/Equation_of_state.

About the authors

Sulinov Alexander Vasilyevich, Candidate of Science (Engineering), Assistant Professor of the Department of Aircraft Engines Theory, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: abcsamara@yandex.ru. Area of Research: investigation of aircraft engine cycles.

Shabliy Leonid Sergeevich, Candidate of Science (Engineering), Assistant Professor of the Department of Aircraft Engines Theory, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [\[gt500@mail.ru\]\(mailto:gt500@mail.ru\). Area of Research: impeller machines, numerical calculations, programming.](mailto:shelbi-</p></div><div data-bbox=)

Zubanov Vasili Mihailovich, teaching assistant, Department of Aircraft Engines Theory, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: waskes91@gmail.com. Area of Research: impeller machines, numerical calculations, processes of combustion, heat exchange and diffusion.