

УДК 621.454.2

Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-3-498-507

Для цитирования: Способ обработки результатов кавитационных испытаний насосов ТНА с целью получения аппроксимирующей функции / А. С. Торгашин, Д. А. Жуйков, В. П. Назаров, А. М. Бегишев // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 3. С. 498–507. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-3-498-507.

For citation: Torgashin A. S., Zhujkov D. A., Nazarov V. P., Begishev A. M. [Method for processing the results of cavitation tests of TNA pumps in order to obtain an approximating function]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 3, P. 498–507. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-3-498-507.

Способ обработки результатов кавитационных испытаний насосов турбонасосных агрегатов с целью получения аппроксимирующей функции

А. С. Торгашин^{*}, Д. А. Жуйков, В. П. Назаров, А. М. Бегишев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31

^{*}E-mail: ttarg23@gmail.com

При проектировании ракетных двигателей решается задача обеспечения заданных основных конструктивных параметров. В связи с повышением требований к изделиям ракетно-космической техники, возрастают и требования к обеспечению энергетической эффективности всех входящих в него элементов. Как правило, задача повышения энергетических характеристик ракетного двигателя осуществляется увеличением давления в камере сгорания и частоты вращения вала турбонасосного агрегата. Увеличение частоты вращения вала турбонасосного агрегата требует обеспечения бескавитационного режима работы насоса с отсутствием кавитационного срыва.

Данную проблему можно решить различными способами: конструктивным улучшением насоса или увеличением параметра давления на входе в насос. Однако слишком большое увеличение давления на входе невозможно, так как это приведет к увеличению толщины стенок топливных баков ракеты и соответствующему увеличению массы всей ракеты. Включение шнека хоть и не гарантирует бескавитационной работы при любом входном давлении, однако является наиболее предпочтительным способом.

Геометрия проточной части как шнекового преднасоса, так и лопаток насоса проектируется с учетом обеспечения бескавитационного режима работы. При проектировании, на этапе экспериментальной отработки режимов насоса, возможно применение методов вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD). Данные методы применяются в различных областях общего машиностроения и хорошо себя зарекомендовали. Однако насос ракетного двигателя отличается высоким перепадом давлений при относительно малых габаритах. Возникает вопрос об адаптации методов CFD к моделированию кавитационных испытаний.

Данная работа направлена на выведение функции, аппроксимирующей группу данных об испытании насоса турбонасосного агрегата с целью ее дальнейшей адаптации для методов CFD.

Ключевые слова: кавитация, турбонасосный агрегат, жидкостный ракетный двигатель, численное моделирование.

Method for processing the results of cavitation tests of TNA pumps in order to obtain an approximating function

A. S. Torgashin^{*}, D. A. Zhujkov, V. P. Nazarov, A. M. Begishev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
^{*}E-mail: ttarg23@gmail.com

When designing rocket engines, the problem of providing the specified basic design parameters is solved. In connection with the increase in requirements for products of rocket and space technology, the requirements for ensuring the energy efficiency of all its constituent elements are also increasing. As a rule, the task of increasing the energy characteristics of a rocket engine is carried out by increasing the pressure in the combustion chamber and the rotational speed of the turbopump shaft. An increase in the rotational speed of the shaft of a turbopump unit requires the provision of a cavitation-free operation of the pump with the absence of cavitation breakdown.

This problem can be solved in various ways: by constructive improvement of the pump or by increasing the pressure parameter at the pump inlet. However, too much increase in inlet pressure is not possible, as this will increase the thickness of the walls of the rocket's fuel tanks and a corresponding increase in the mass of the entire rocket. Turning on the screw, although it does not guarantee cavitation-free operation at any inlet pressure, is the most preferred method.

The geometry of the bore part of both the screw prepump and the pump blades is designed to ensure non-cavitation operation. When designing, at the stage of experimental testing of pump modes, it is possible to use the methods of computational fluid dynamics (Computational Fluid Dynamics, CFD). These methods are used in various areas of general engineering and have proven themselves well. However, the rocket motor pump has a high pressure drop with relatively small dimensions. The question arises of adapting CFD methods to modeling cavitation tests.

This work is aimed at deriving a function approximating the TNA pump test data set with a view to its further adaptation for CFD methods.

Keywords: Cavitation, TNA, LRE, numerical simulation.

Введение

Одним из наиболее ответственных и энергонапряженных узлов жидкостного ракетного двигателя является турбонасосный агрегат (ТНА), необходимый для обеспечения непрерывной подачи компонентов топлива в камеру двигателя с заданным расходом и давлением. К ТНА, как к агрегату жидкостного ракетного двигателя (ЖРД), предъявляются следующие требования:

- обеспечение работоспособности и основных параметров при заданном ресурсе с необходимыми возможными паузами установленной продолжительности;
- обеспечение на всех режимах работы двигателя подачи компонентов топлива требуемого расхода и давления при высокой степени надежности с приемлемым КПД всего агрегата и минимальной стоимости изготовления;
- обеспечение минимальных размеров и массы всей двигательной установки (ДУ) за счет наименьших габаритных размеров и массы самого ТНА.

При работе ТНА, в насосе может возникнуть явление кавитации, отрицательно влияющее на выполнение указанных выше требований. Кавитацией называют процесс роста пузырька в жидкости вследствие динамического понижения давления до давления насыщенного пара, происходящий при постоянной температуре [1]. Данный процесс схож с кипением (рост пузырька, вызванный повышением температуры жидкости). При кавитации сам пузырек в жидкости динамически меняется: сначала происходит рост, затем, если на него не будет действовать возрастающее давление, рост сначала прекратится и начнется сжатие пузырька. Затем пузырек

схлопнется и, вероятно, исчезнет вследствие растворения газов и конденсации пара. Схлопывание происходит «скачком», если паровые пузырьки, или каверны, содержат малое количество газа, и менее резко, если содержание в них значительно. Таким образом, кавитация включает целый ряд явлений от зарождения пузырька до его схлопывания [2]. Само же явление ведет к понижению рабочих параметров насоса, что может отразиться на работе жидкостного ракетного двигателя в целом. При более длительном воздействии, вследствие местных повышений давления из-за схлопывания пузырьков, кавитация вызывает деформацию крыльчатки насоса – так называемую кавитационную эрозию.

Вследствие воздействия кавитации возникает вопрос об учете данного явления при проектировании ТНА и разработке методики, позволяющей смоделировать кавитационное течение при работе насоса. Такие методики существуют, например они описаны в работах [3; 4]. Также существуют методы вычислительной гидродинамики CFD, позволяющие численно смоделировать кавитационное течение в различных агрегатах (крыльчатка насосов, винт турбины, гидрокрыло, различные объекты в жидкости) и с применением сред с различной вязкостью и поверхностным натяжением, в том числе и криогенных. Данные методики представлены в работах [5–7].

С технической точки зрения, насосы окислителя и горючего предназначены для подачи компонентов топлива в газогенераторы и коллектор подвода камеры двигателя. Основным рабочим элементом насоса является крыльчатка закрытого типа с односторонним входом, реже двусторонним [8]. Для улучшения антикавитационных качеств насоса на входе перед крыльчаткой устанавливается шнек. Обычно крыльчатки отливают из высокопрочного алюминиевого сплава, шнек изготавливают из нержавеющей стали.

При изготовлении ТНА насосы подвергаются целому ряду испытаний на экспериментальное определение количественных и качественных характеристик объекта как результата воздействия на него сил при его функционировании, среди которых и испытание на определение кавитационного срыва. Как и в общем машиностроении, для испытаний насосов ТНА можно выделить виды испытаний, которые можно классифицировать по организационно-юридическому признаку, их содержанию, составу, месту проведения и объектам испытаний [9]. Согласно данной классификации, испытания насосов на определение кавитационного срыва можно определить к прямо-сдаточным по организационно-юридическому виду, параметрическим – по содержанию, кавитационным – по составу и стендовым – по месту проведения.

Вследствие ряда допущений в различных моделях кавитации, теоретические и практические данные имеют определённое расхождение. Данное расхождение должно быть учтено с учетом специфики работы насоса ТНА, а именно высокого перепада давлений при малых габаритах рабочего колеса. Целью работы является разработка методики аппроксимации данных гидравлического пролива насосов ТНА для дальнейшей верификации полученной модели с данными испытаний насоса с другой геометрией. Разработка и совершенствование новых методов численного моделирования гидродинамических процессов ведет к повышению энергоэффективности и КПД ТНА и ЖРД в целом.

Описание средств измерений

Средства измерений (СИ) для данных испытаний выбирались так, чтобы погрешность измерения отдельных параметров на режиме испытаний, определяемая классом точности СИ, не превышала заданных значений:

- для расходов $\pm 1,5$ %;
- давлений $\pm 1,0$ %;
- перепада давлений $\pm 1,5$ %;
- температуры воды ± 1 %.

Для измерения давления используются образцовые манометры класса 0,4 по ГОСТ 65217–72. Также, при проведении натуральных испытаний на определение кавитационного срыва, разрешается применять манометры точных измерений класса 0,6 по ГОСТ 2405–88. Манометры выби-

раются с таким диапазоном шкалы, чтобы измеряемые значения параметра находились во второй трети шкалы прибора. Подготовка манометров и эксплуатация при стендовых испытаниях осуществляется в соответствии с ОСТ 92-1608–80.

Все приборы должны располагаться в правильном положении с обеспечением их устойчивости. Положение самого наблюдателя при всех его действиях не должно вызывать препятствий при записи показаний [10].

Определение и исключение промахов

Обычно данные испытаний записываются в виде зависимости напора по оси Y , выраженного в метрах или в Дж/кг, к давлению на входе по оси X , выраженному в Па или кгс/см². Для возможности сравнения показаний кавитационных испытаний с аналогичными показаниями других насосов, а также определения функции приведем значения к безразмерным коэффициентам. Для оси X будем использовать число кавитации σ [2] записанное в следующем виде:

$$\sigma = \frac{2(P_{ex} - P_v)}{\rho * v_{ex\text{ ср}}^2}, \quad (1)$$

где P_{ex} – давление на входе в МПа; P_v – давление насыщенного пара в МПа; ρ – плотность жидкости в кг/м³. Для оси Y будем использовать коэффициент напора Ψ (англ. head coefficient). Данный коэффициент применяется в достаточном большом числе работ, например в статьях [11–13]:

$$\Psi = 2 * g * \frac{H}{v_2^2}, \quad (2)$$

где H – полный напор насоса в м; v_2 – скорость на выходе из насоса в м/с².

Результаты гидравлических испытаний со снятием кавитационной характеристики модельного (подобного натурному) насоса с полученными значениями давления входа, давления выхода, расхода, числа оборотов крыльчатки заносятся в таблицу. Для каждого испытания снимаются показания параметров давления на входе и выходе из насоса, а также расхода в 12–13 точках. В данной статье рассматриваются результаты 78 виртуальных испытаний с суммарным числом в 944 точках, представленных на рис. 1. Для определения точек промахов воспользуемся критерием Шовене, основанном на распределении Гаусса. Для этого определяется число стандартных отклонений с учетом всех результатов, в том числе и потенциальных промахов, а затем сравнивается с вероятностью повторения данного события. Значение вероятности определяется с помощью распределения Гаусса. Для точного определения промахов, разобьем все точки, представленные на рис. 1 на группы справа налево по интервалам значений σ : 1-я группа $\sigma = [0,26–0,25]$, 2-я $[0,24–0,23]$, 3-я $[0,22–0,21]$, 4-я $[0,17–0,18]$, 5-я $[0,15–0,16]$, 6-я $[0,13–0,14]$, 7-я $[0,125–0,13]$, 8-я $[0,12–0,125]$, 9-я $[0,115–0,12]$, 10-я $[0,11–0,115]$, 11-я $[0,104–0,11]$, 12-я $[0,095–0,104]$, 13-я $[0,09–0,095]$. В каждой группе 78 точек данных, за исключением 13-й, в которой 8 точек. Для работы с критерием Шовене подсчитано для каждой группы значения среднего числа и среднеквадратического отклонения. Рассмотрим выполнения критерия Шовене для всех 13-ти групп.

В первом приближении не подошли под критерий Шовене (значение числа точек значений испытаний, умноженное на вероятность повторения должно быть не ниже 0,5) нижние точки в группах с 12 по 5. Уберем из рассмотрения данные точки. Следовательно, число точек уменьшится для этих групп с 78 до 77, соответственно. Повторно рассчитываем критерий Шовене для данных групп.

По результатам второго приближения все точки 1–6 группы подошли под критерий Шовене, когда нижние точки групп 7–12 нет. Повторно убираем из рассмотрения точки испытания. В группах 7–12 число точек уменьшится с 77 до 76 соответственно.

По результатам третьего приближения не подошли под критерий Шовене нижние точки 9-й, 11-й и 12-й групп. Аналогично убираем из рассмотрения данные точки. После данного

приближения можно утверждать, что грубых промахов во всех группах нет, так как критерий Шовене выполняется для всех 12-ти групп.

Отдельно рассмотрим точки 13-й группы. В данной группе грубых промахов нет, для учета испытаний подходят все 8 точек. По результатам отбрасывания промахов, общее число точек для рассмотрения уменьшилось с 944 до 927.

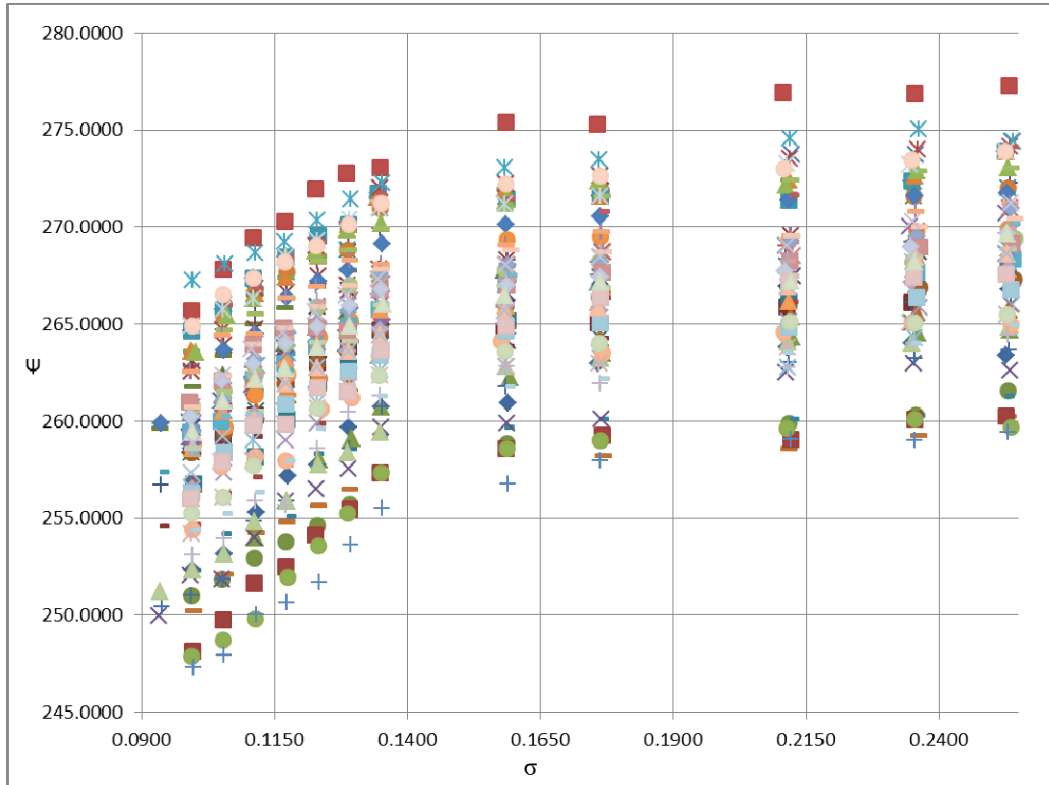


Рис. 1. График данных испытаний

Fig. 1. Plot of test data

Аппроксимация результатов испытаний

Для определения функции, ее характера (линейная, степенная, логарифмическая и т. д.), необходимо воспользоваться одним из методов математического анализа – аппроксимацией. Для аппроксимации полученных результатов с целью получения зависимости воспользуемся методом наименьших квадратов [14]. Метод заключается в рассмотрении суммы квадратов разностей y_i , полученных при кавитационном испытании и аппроксимирующей функции $\varphi(x)$ в соответствующих точках. Параметры функции a, b, c, \dots, n $\varphi(x)$ подбираются так, чтобы разность в квадрате была наименьшей. В зависимости от вида функции: линейная вида $y = ax + b$, трехчлена второй степени $y = ax^2 + bx + c$ и т. д. – различаются системы линейных уравнений, необходимых для получения неизвестных a, b, c .

При рассмотрении общего для всех 78 испытаний поведения значений коэффициента напора Ψ от числа кавитации σ , можно сделать вывод о невозможности аппроксимации значений линейной зависимостью. В качестве аппроксимирующей функции необходимо рассмотреть логарифмическую, экспоненциальную и степенную функции.

В случае аппроксимации логарифмической функцией, зависимость задается в виде $F(x) = a + b \cdot \ln(x)$. В случае аппроксимации экспоненциальной функцией, зависимость задается в виде $F(x) = a \cdot e^{b \cdot x}$. В случае аппроксимации степенной функцией, зависимость задается в виде $F(x) = a \cdot x^b$. Используя метод наименьших квадратов, получим следующие уравнения аппроксимации, описывающие все 927 точек значений испытаний:

$$F(x) = 283.106 + 9.742 * \ln(x); \tag{3}$$

$$F(x) = 255.799 * e^{(0.213*x)}; \tag{4}$$

$$F(x) = 283.78 * x^{0.0369} \tag{5}$$

По полученным уравнениям построим график для каждого уравнения и сравним их со средними значениями групп 1–13 испытаний. График представлен на рис. 2.

Наиболее близкие показания аппроксимации и значений испытаний насоса в режиме кавитации (крайние левые значения точек на графиках) показывает степенная функция (5). Для дальнейшей работы по приближению аппроксимирующей функции к показаниям испытаний будет взята за основу степенная функция.

Чтобы приблизить значения аппроксимирующей функции (5) к графику средних значений испытаний, зададимся коэффициентами для функции Ψ : $a = 0,35$, $b = -0,092456$ и $c = 1,0239$. Запишем, полученное аппроксимирующее уравнение и сравним его с данными средних значений испытаний (рис. 3):

$$\Psi = 283,78 \frac{(\sigma + b)^{a*0,0369}}{c} = 283,78 \frac{(\sigma - 0,092456)^{0,35*0,0369}}{1,0239}. \tag{6}$$

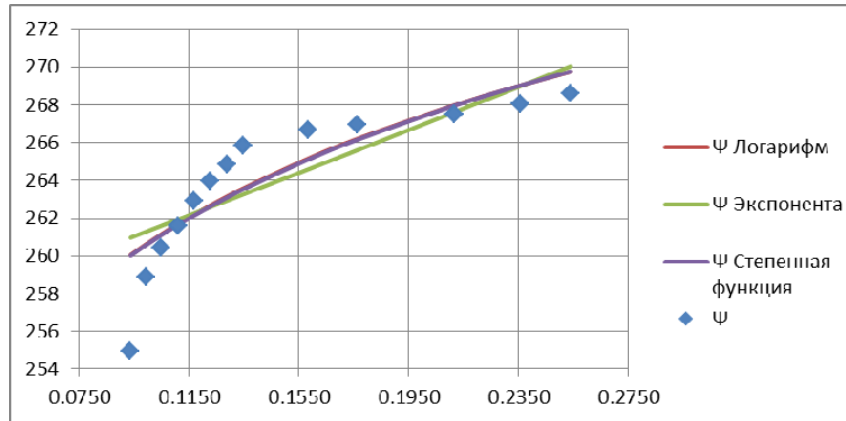


Рис. 2. График средних значений групп испытаний и их аппроксимации

Fig.2. Plot of means of test groups and their approximations

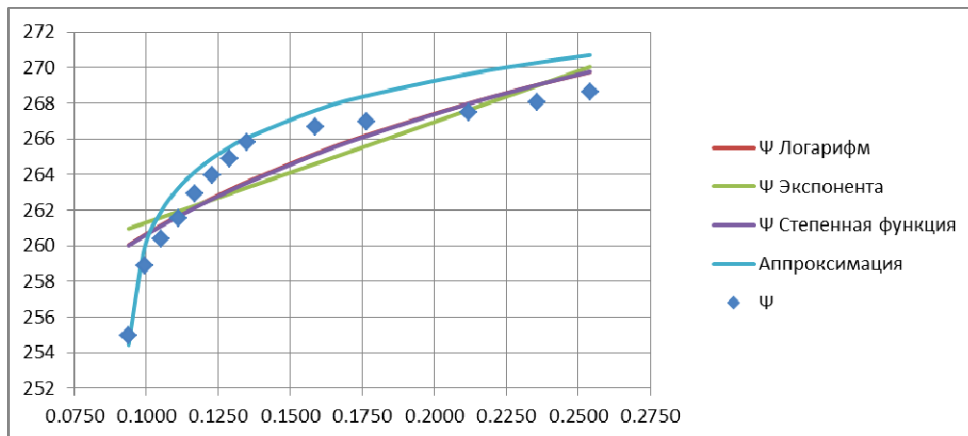


Рис. 3. График средних значений групп испытаний и сравнение с аппроксимирующим уравнением, логарифмической, экспоненциальной и степенной аппроксимацией

Fig. 3. Plot of test group means and comparison with fitted equation, logarithmic, exponential, and power approximation

Максимальная относительная погрешность уравнения (6) и средних значений испытаний групп 1–13 (рис. 1) равна 0,97 %. Однако, если сравнивать уравнение (6) со значениями каждого испытания из групп точек на рис. 1 по отдельности, то максимальная относительная погрешность будет равняться 4,59 %. Для более точного приближения уравнения к данным испытаний, рассмотрим отдельные испытания с минимальными и максимальными значениями Ψ . Введем новые коэффициенты для уравнения (6), чтобы понять характер смещения аппроксимирующего графика относительно значений Ψ . Коэффициент степени a оставим равным 0,35, а коэффициенты для значений b примем $-0,094$ и $-0,0957$, для значений c примем $0,998$ и $1,07$ для минимального и максимального испытания соответственно. Запишем полученные аппроксимирующие функции:

$$\Psi = 283,78 \frac{(\sigma - 0.094)^{0,35 \cdot 0,0369}}{0.998}; \quad (7)$$

$$\Psi = 283,78 \frac{(\sigma - 0.0957)^{0,35 \cdot 0,0369}}{1.07}. \quad (8)$$

Для определения общей для всех испытаний аппроксимирующей функции, зависимой от номинального значения Ψ , представим зависимость Ψ от коэффициента в линейном виде $y = a * x + c$, получим систему уравнений для коэффициента b и c функций (6), (7) и (8):

$$\begin{cases} -0,094 = a * 277.2724 + c \\ -0.0957 = a * 259.4448 + c \end{cases}; \quad (9)$$

$$\begin{cases} 0.998 = a * 277.2724 + c \\ 1.07 = a * 259.4448 + c \end{cases} \quad (10)$$

Запишем полученное аппроксимирующее уравнение для всей группы испытаний

$$\Psi = 283,78 \frac{(\sigma + (\Psi * 0,000093577 - 0,12044))^{0,35 \cdot 0,0369}}{(-\Psi * 0,004038 + 2,11762)}. \quad (11)$$

Формула (11) приближает значения функции к данным испытаний, за исключением данных, находящихся в значениях испытаний близких к средним. Данное отличие становится очевидным, если рассмотреть зависимость коэффициентов b и c от Ψ . Для еще более точного приближения функции (11) к данным испытаний обратимся к методу интерполяции функций при помощи алгебраических многочленов (полиномиальная интерполяция). Воспользуемся интерполяционной формулой Ньютона для неравных промежутков [15]. Данная формула является видоизменённой формулой Лагранжа и в общем виде ее можно записать

$$f(x) = B_1 + (x - x_1)B_2 + (x - x_1)(x - x_2)B_3 + \dots + (x - x_1) * \dots * (x - x_{n-1})B_n. \quad (12)$$

С помощью разделенных разностей, составляя интерполяционную таблицу, находим коэффициенты $B_1, B_2, B_3 \dots B_n$. Для коэффициентов разности b и деления c получим уравнения

$$\begin{aligned} a_{разн} = & -0.094 + (6.27205 * 10^{-5}) * (\Psi_n - 277.2724) - \\ & - (3.66748 * 10^{-6}) * (\Psi_n - 277.2724) * (\Psi_n - 268.3439); \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} a_{дел} = & 0.998 - 0.00290082 * (\Psi_n - 277.2724) + \\ & + 0.000127862 * (\Psi_n - 277.2724) * (\Psi_n - 268.3439). \end{aligned} \quad (14)$$

Учитывая, что в данных восьми испытаний присутствуют 13 точек замеров вместо 12, изменим коэффициент $-0,094$ в формуле (13) на коэффициент $-0,092$, окончательно формула коэффициента разности b будет выглядеть:

$$a_{разн} = -0.092 + (6.27205 \cdot 10^{-5}) * (\Psi_n - 277.2724) - (3.66748 \cdot 10^{-6}) * (\Psi_n - 277.2724) * (\Psi_n - 268.3439) \quad (15)$$

Запишем окончательную функцию аппроксимации испытаний

$$\Psi = 283,78 \frac{(\sigma + a_{разн})^{0,35 * 0,0369}}{a_{дел}} \quad (16)$$

Максимальная относительная погрешность, при сравнении функции (16) с каждым графиком испытаний по отдельности, не превышает значений 1,9 %. Преимущественно, погрешность находится в пределах 1 % для большинства точек. Данные значения можно считать удовлетворительными.

Заключение

В ходе анализа результатов, выявлена общая хорошая сходимость данных испытания и функции (16). Аппроксимирующая функция может иметь расхождения в начале кавитационных испытаний, однако в области кавитационного срыва приближается к значениям испытаний. При рассмотрении относительной погрешности для всех испытаний (исключая грубые промахи) функция показывает применимость к данным испытаний. Дополнительный охват минимальных и максимальных значений испытаний дал более точные приближения к данным испытаний. В некоторых сравнениях данные функции и испытаний могут отличаться сильнее, что объясняется учетом всех данных испытаний, в том числе вышедших за заданные конструкторской документацией пределы.

Для дальнейшей работы необходимо уточнить коэффициент b и c с целью увеличения диапазона охвата значений σ и Ψ , а также увеличения точности приближения. При рассмотрении результатов аппроксимации в части возможности применения функции (16) к аналогичной аппроксимации значений испытаний других высоконапорных насосов, необходимо уточнить коэффициенты a , b и c . Коэффициенты можно уточнить, применяя для функции (16) как данные кавитационных испытаний других насосов (особенно в данной части интересно приближение функции к результатам испытаний других высоконапорных насосов, характерных для ТНА), так и другие методы интерполяции и аппроксимации коэффициентов и функции. Таким образом, полученный способ позволит проводить анализ кавитационных свойств центробежного насоса с целью улучшения антикавитационных качеств ТНА, тем самым позволяя выполнить современные требования по энергоэффективности, предъявляемые к новым разрабатываемым ТНА ЖРД.

Библиографические ссылки

1. Биркгоф Г., Сарантонелло Э. Струи, следы и каверны : пер. с англ. под ред. Г. Ю. Степанова. М. : Мир, 1964, 466 с.
2. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация : пер. с англ. под ред. В. И. Полежаева М. : Мир, 1974, 688 с.
3. Петров В. И., Чебаевский В. Ф. Кавитация в высокооборотных лопастных насосах. М. : Машиностроение, 1982. 192 с.
4. Малюшенко В. В. Лопастные насосы. Теория, расчет и конструирование. М. : Машиностроение, 1977. 288 с.
5. Ломакин В. О., Бибик О. Ю. Влияние эмпирических коэффициентов модели Рэлея – Плеттета на расчетные кавитационные характеристики центробежного насоса // Гидравлика. 2017. № 1(3). [Электронный ресурс]. URL: <http://hydrojournal.ru/images/JOURNAL/NUMBER3/LBK.pdf>.

6. Моделирование срывной кавитационной характеристики бустерного турбонасосного агрегата и сравнение экспериментальных и численных результатов / И. С. Казённов, Ю. И. Каналин, Н. П. Полетаев, И. А. Чернышева // Вестник Самарского гос. аэрокосмич. ун-та. 2014. № 5(47), ч. 1. С. 188–198.
7. Попов Е. Н. Моделирование пространственного течения жидкости в кислородном насосе ЖРД с учетом кавитации // Труды НПО Энергомаш. 2010. № 27. С. 65–94
8. Краева Е. М. Высокооборотные центробежные насосы / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 210 с.
9. Яременко В. В. Испытания насосов : справоч. пособ. М. : Машиностроение, 1976. 224 с
10. Маликов М. Ф. Основы метрологии. Ч. 1. Учение об измерении. М. : Комитет по делам мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, 1949. 479 с.
11. Song, Pengfei & Zhang, Yongxue & Xu, Coolsun & Zhou, X & Zhang, Jinya. (2015). Numerical studies in a centrifugal pump with the improved blade considering cavitation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 72. 032021. 10.1088/1757-899X/72/3/032021.
12. DONG Liang, SHANG Huanhuan, ZHAO Yuqi, LIU Houlin, DAI Cui, WANG Ying. Study on unstable characteristics of centrifugal pump under different cavitation stages // Journal of Thermal Science. 2019. Vol. 28, No. 4. P. 608–620.
13. LIU Hou-lin; LIU Dong-xi; , WANG Yong; WU Xian-fang; WANG Jian; DU Hui; Experimental investigation and numerical analysis of unsteady attached sheetcavitating flows in a centrifugal pump. // Journal of Hydrodynamics. 2013. No. 25(3). P. 370–378.
14. Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисление для втузов. М. : Наука, 1985. 432 с.
15. Березин И. С., Жидков Н. П. Методы вычислений. М. : Государственное издательство математической литературы, 1962. 464 с.

References

1. Birkhof G., Sarantonello E. *Strui, sledy i kaverny* [Jets, traces and caverns]. Moscow, Mir Publ., 1964, 466 p.
2. Кнепп Р., Дежли Дзх., Хеммит Ф. *Kavitaciya* [Cavitation]. Moscow, Mir Publ., 1974, 688 p.
3. Petrov V. I., Chebaevskiy V. F. *Kavitaciya v vysokooborotnyh lopastnyh nasosah* [Cavitation in high-speed vane pumps]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982, 192 p.
4. Malyushenko V. V. *Lopastnye nasosy. Teoriya, raschet i konstruirovaniye* [Vane pumps. Theory, calculation and design]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977, 288 p.
5. Lomakin V. O. Bibik O. Yu. [Influence of the empirical coefficients of the Rayleigh-Plesett model on the calculated cavitation characteristics of a centrifugal pump]. *Gidravlika*. 2017, No. 1(3). Available at: <http://hydrojournal.ru/images/JOURNAL/NUMBER3/LBK.pdf>.
6. Kazyonov I. S., Kanalin Yu. I., Poletaev N. P., Chernysheva I. A. [Modeling the Stall Cavitation Characteristic of a Turbopump Booster Unit and Comparison of Experimental and Numerical Results]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*. 2014, No. 5(47), Part 1, P. 188–198 (In Russ.).
7. Popov E. N. [Simulation of the spatial flow of liquid in the oxygen pump of the LRE, taking into account cavitation]. *Trudy NPO Energomash*. 2010, No. 27, P. 65–94 (In Russ.).
8. Kraeva E. M. *Vysokooborotnye centrobezhnye nasosy* [High speed centrifugal pumps]. Krasnoyarsk, 2011, 210 p.
9. Yaremenko V. V. *Ispytaniya nasosov* [Testing of pumps]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 224 p.
10. Malikov M. F. *Osnovy metrologii. Ch. 1. Uchenie ob izmerenii*. Moscow, Komitet po delam mer i izmeritel'nyh priborov pri Sovete Ministrov SSSR Publ., 1949, 479 p.
11. Song, Pengfei & Zhang, Yongxue & Xu, Coolsun & Zhou, X & Zhang, Jinya. (2015). Numerical studies in a centrifugal pump with the improved blade considering cavitation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 72. 032021. 10.1088/1757-899X/72/3/032021.

12. DONG Liang, SHANG Huanhuan, ZHAO Yuqi, LIU Houlin, DAI Cui, WANG Ying. Study on unstable characteristics of centrifugal pump under different cavitation stages. *Journal of Thermal Science*. 2019, Vol. 28, No. 4, P. 608–620.

13. LIU Hou-lin; LIU Dong-xi; , WANG Yong; WU Xian-fang; WANG Jian; DU Hui; Experimental investigation and numerical analysis of unsteady attached sheetcavitating flows in a centrifugal pump. *Journal of Hydrodynamics*. 2013, No. 25(3), P. 370–378.

14. Piskunov N. S. *Differencial'noe i integral'noe ischislenie dlya vtuzov* [Differential and integral calculus for technical colleges]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 432 p.

15. Berezin I. S., Zhidkov N. P. *Metody vychisleniy* [Computational Methods]. Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo matematicheskoy literatury Publ., 1962, 464 p.

© Торгашин А. С., Жуйков Д. А., Назаров В. П., Бегишев А. М., 2022

Торгашин Анатолий Сергеевич – аспирант; Сибирский государственный университет науки и технологии имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ttarg23@gmail.com.

Жуйков Дмитрий Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры двигателей летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологии имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: d_zhuikov@sibsau.ru.

Назаров Владимир Павлович – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой двигателей летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологии имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: nazarov@sibsau.ru.

Бегишев Алексей Михайлович – аспирант; Сибирский государственный университет науки и технологии имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: alex-beg95@mail.ru.

Torgashin Anatoliy Sergeevich – graduate student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: ttarg23@gmail.com.

Zhujkov Dmitriy Aleksandrovich – Cand. Sc.; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: d_zhuikov@sibsau.ru.

Nazarov Vladimir Pavlovich – Cand. Sc.; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: nazarov@sibsau.ru.

Begishev Aleksej Mihajlovich – graduate student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: alex-beg95@mail.ru.
