

Данный текст является русскоязычной версией опубликованной на английском языке статьи и представлен в авторской редакции только на данном сайте!

UDC 621.454.2

Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-3-417-422

For citation: Torgashin A. S., Zhujkov D. A., Nazarov V. P., Begishev A. M., Vlasenko A. V. CFD methods for cavitation modeling in centrifugal and axial pumps of LRE. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2020, Vol. 21, No. 3, P. 417–422. Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-3-417-422

Для цитирования: Методы CFD моделирования кавитации в центробежных и осевых насосах жидкостных ракетных двигателей / А. С. Торгашин, Д. А. Жуйков, В. П. Назаров, А. М. Бегишев, А. В. Власенко // Сибирский журнал науки и технологий. 2020. Т. 21, № 3. С. 417–422. Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-3-417-422

CFD METHODS FOR CAVITATION MODELING IN CENTRIFUGAL AND AXIAL PUMPS OF LRE

A. S. Torgashin*, D. A. Zhujkov, V. P. Nazarov, A. M. Begishev, A. V. Vlasenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: ttarg23@yandex.ru

Currently, design and manufacture of liquid-propellant rocket engines (LRE) are imposed with ever greater reliability requirements. Accordingly, the standards for the design and manufacture of rocket engine units are raising. One of these units is a turbopump unit (TNA), which provides continuous supply of liquid components from combustion reaction to the combustion chamber of a rocket engine to create traction or other engine units. TNA is also the main source of pressure increase for these liquid components in front of the LRE combustion chamber. Important requirements are imposed on a turbopump unit (TNA): ensuring work performance and basic parameters for a given resource with the necessary possible pauses of a specified duration; providing all engine operating modes, supplying the fuel components of the required flow rate and pressure, guarantying a high degree of reliability with acceptable entire unit efficiency; providing high anti-cavitation characteristics of the pump in all modes. In the article, the authors summarize the latest results of the study on cavitation in turbopump units of liquid propellant rocket engines alongside with the relevant research in the field of hydraulics. The problems of cavitation in cryogenic liquids, simulation of stall characteristics, and usability of various models to simulate cavitation flow are observed. A solution to the problems of flow modeling was considered with respect to applicability to the following structural elements of LRE units: interscapular space of the screw centrifugal main and booster pumps, axial pre-pump. Particular attention is paid to the implementation of various numerical methods based on the use of various cavitation models, computational fluid dynamics in various CFD packages, and also comparison of results with the model. In summary, the authors draw conclusions about the possibility of applying these methods to solve the problems of the cavitation phenomenon research in LRE.

Keywords: Cavitation, TNA, LRE, CFD modeling.

МЕТОДЫ CFD МОДЕЛИРОВАНИЯ КАВИТАЦИИ В ЦЕНТРОБЕЖНЫХ И ОСЕВЫХ НАСОСАХ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А. С. Торгашин*, Д. А. Жуйков, В. П. Назаров, А. М. Бегишев, А. В. Власенко

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

*E-mail: ttarg23@yandex.ru

В настоящее время к проектированию и производству жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) предъявляются все большие требования по обеспечению надежности. В соответствии с этим повышаются требования по проектированию и изготовлению агрегатов ЖРД. Одним из таких агрегатов является турбонасосный агрегат (ТНА), обеспечивающий непрерывную подачу жидких компонентов реакции горения в камеру сгорания ракетного двигателя для создания тяги или в другие агрегаты двигателя. Также ТНА является основным источником повышения давления данных жидких компонентов перед камерой сгорания ЖРД. К ТНА предъявляются важные требования по обеспечению работоспособности основных параметров при заданном ресурсе с необходимыми возможными паузами установленной продолжительности; подачи компонентов топлива требуемого расхода и давления на всех режимах работы двигателя; высокой степени надежности с приемлемым КПД всего агрегата; высоким антикавитационным характеристикам насоса на всех режимах. В данной статье авторы обобщают последние результаты исследования кавитации в турбонасосных агрегатах ЖРД, а также применимые к ним исследования в области гидравлики. Рассмотрены проблемы кавитации в криогенных жидкостях, моделирование срывной характеристики, применение различных моделей к моделированию кавитационного потока. Решение данных проблем моделирования течения рассматривалось относительно применяемости к следующим элементам конструкции агрегатов ЖРД: межлопаточного пространства шнекоцентробежного основного и бустерных насосов, осевого преднасоса. Особое внимание уделено реализации различных численных методов, основанных на использовании различных моделей кавитации, вычислительной гидрогазодинамики в различных CFD пакетах, а также сравнении результатов с модельными. Авторы делают выводы о возможности применения данных методов к решению вопросов исследования явления кавитации в ЖРД.

Ключевые слова: кавитация, ТНА, ЖРД, CFD моделирование.

Ведение. Кавитацией в гидродинамике называют частный случай кипения жидкости (фазовый переход жидкости в газ внутри жидкости при определенной температуре и давлении), который возникает в движущейся жидкости вследствие местных понижений давления до давления насыщенного пара. В гидродинамике явление кавитации играет отрицательную роль, так как вызывает нарушение однородности среды. В результате, в потоке могут оказаться пузырьки, которые при соприкосновении с лопатками лопаются, что может привести к гидравлическому удару, разрушающему лопатки. При этом важно учитывать, что полости, соединяющие агрегаты, подвижные части насосов и турбин, подводящие трубопроводы являются элементами сложной пространственной конструкции, геометрия которых также оказывает влияние на поток. В рабочих частях насоса понижение давления внутри проточной части связано с обтеканием профилей лопаток, где, как и при обтекании любого профиля, образуется полость пониженного давления у входа с задней (нерабочей) стороны. Данная область минимального давления является областью зарождения кавитации. Чем большую скорость имеет поток, обтекающий лопатку, тем

больше будет разрежение на лопатке. Поэтому, наиболее отдаленная от оси вращения точка входной кромки лопатки может являться центром зарождения кавитации. Появление кавитации при работе ТНА ЖРД может привести к трем основным отрицательным последствиям:

а) К срыву режимов работы ТНА, то есть к резкому снижению основных выходных параметров – напора, расхода и, вследствие, КПД;

б) К схлопыванию пузырьков кавитации пара в районе лопаток, сопровождаемое сильными ударами, способствует разрушению лопаток рабочего колеса машины – эрозийному разрушению. Данное явление обычно при длительной работе на кавитационном режиме, при работе ТНА ЖРД также проявляется;

в) К возникновению низкочастотных автоколебаний, вследствие возможной неустойчивой работе ТНА ЖРД [1].

Для определения условий наступления кавитации в теоретических и экспериментальных исследованиях используют следующий безразмерный параметр:

$$C_a = \frac{p - p_v}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (1)$$

где p – давление для потока (например, давление на входе), p_v – давление насыщенного пара для жидкости, знаменатель представляет собой динамическое давление. Данный коэффициент представляет разность давлений в точке тела и в невозмущенной жидкости на некотором расстоянии от него пропорциональна квадрату скорости относительного движения. Из него также выводится определение основного условия снижения давления до минимального, при котором начинается кавитация.

В 1917 г. лорд Рэлей, опубликовал статью «О давлении, развивающемся в жидкости при схлопывании сферической каверны» [2]. Рэлей использовал предложенную Безантом в 1859 г. постановку задачи о пустой полости в однородной жидкости при постоянном давлении на бесконечности: «Бесконечно большая масса однородной несжимаемой жидкости, на которую действуют силы, находится в состоянии покоя. Жидкость внутри некоторой сферической поверхности мгновенно исчезает. Требуется найти мгновенное изменение давления в любой точке жидкости и время заполнения полости, полагая, что давление на бесконечности является постоянным». Решение данной задачи основывается на полном превращении работы, совершаемой массой при схлопывании каверны, в кинетическую энергию. Получаемое уравнение:

$$\rho(RR_{TT} + \frac{3}{2} R_T^2) = -p \quad (2)$$

где p – давление на бесконечности, R – радиус пузырька, ρ – плотность жидкости вокруг каверны, а R_T и R_{TT} производные радиуса по времени. Так же существует версия уравнения Рэля для газонаполненного пузырька, в котором принимается условие, что газ не обменивается теплом с жидкостью, а значит, его состояние описывается адиабатой Пуассона $pV^\gamma = \text{const}$:

$$\rho(RR_{TT} + \frac{3}{2} R_T^2) = P_0 \left(\frac{R_0}{R}\right)^{3k} - p \quad (3)$$

где k – показатель политропы, P_0 – атмосферное давление газа в пузырьке, R_0 – атмосферный радиус пузырька. Отметим, что уравнения (1) и (2) не учитывают влияния содержимого газовой каверны, поверхностного натяжения, вязкости, сжимаемости. Также, для данных уравнений принимается, что давление на расстоянии от пузыря также является постоянным. На данный момент, различные обобщения уравнения Рэля используются для решения задач гидродинамики.

На данный момент, проведены значительные работы по исследованию применимости модели Рэлея-Плессета для решения задач моделирования кавитационного потока в трактах насосов ЖРД. Уравнение Рэлея-Плессета обеспечивает основу для уравнения расхода, контролирующего образование и конденсацию пара. Уравнение Рэлея-Плессета, описывающее рост газового пузырька в жидкости, выводится из уравнений моментов:

$$R_B \frac{d^2 R_B}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR_B}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{\rho_f R_B} = \frac{p_v - p}{\rho_f} \quad (4)$$

где R_B представляет радиус пузырька, p_v давление в пузырьке (предполагается что это давление пара при температуре жидкости), p - давление в жидкости, окружающей пузырь, ρ_f - плотность жидкости, а σ - коэффициент поверхностного натяжения между жидкостью и паром. В практике моделирования кавитационных течений различными программными пакетами, обычно используют упрощенные модификации уравнения Рэлея – Плессета. Например, в пакете ANSYS CFX пренебрегается членами второго порядка (которые подходят для низких частот колебаний) и поверхностным натяжением [3].

Помимо численного исследования кавитирующих потоков в насосе, в работах [4] и [5] получены общие решения уравнений Рэлея и Рэлея – Плессета соответственно.

Современные подходы к моделированию кавитационного течения. Рассмотрим подходы, применяемые при моделировании кавитационного течения в насосах, применяемых в различных направлениях гидромашиностроения. Основное внимание уделим наличию показательного сравнения с реальными испытаниями, а также упоминание в тексте используемых кавитационных моделей. За последние несколько десятилетий, благодаря росту вычислительных мощностей, было проведено множество тестов, результаты которых позволяют выделить наиболее оптимальную кавитационную модель для моделирования потока в насосе ТНА ЖРД.

В работе [6] авторы рассматривают возможность применения модели Рэлея- Плессета к моделированию течения криогенных компонентов. Так как данная работа проводилась непосредственно в применении к агрегату ТНА ЖРД, также необходимо выделить следующие замечания и допущения, приведённые авторами:

- отсутствие учета тепловых эффектов, влияющих на развитие каверны, разработка модели которой, согласно [6] на данный момент ведется;
- малое количество эмпирических данных по криогенным жидкостям;
- при расчете использовалась модель с тремя межлопаточными каналами.

Работа проведена в среде ANSYS CFX. Важно отметить, что помимо уравнения кавитации, рассмотренного выше, модель ANSYS CFX также включает k- ω модель турбулентности, которая также влияет на результаты численного моделирования. В статье сравнение происходит по общему объему кавитационных каверн. В отличие от результатов, рассмотренных ниже, в тексте лишь упоминаются результаты натурных испытаний шнека, однако численные данные или процентное сравнение не приводятся. Однако авторы отмечают, несмотря на отсутствие учета в формуле Рэлея – Плессета тепловых эффектов, хорошую сходимость полученных данных по численному моделированию. Также авторами проведено численное моделирование кавитационного течения с улучшенным шнеком.

В работе [7] рассматривается методика моделирования срывного кавитационного течения в бустерном турбонасосном агрегате. В данной статье построение кавитационной модели также основывается на применении модели Рэлея – Плессета. Работа, также как и в [4], проведена в среде ANSYS. Авторы рассмотрели методику задания параметров для построения расчетной сетки, задания начальных условий, а также провели сравнение полученных результатов для моделей с зазором и без, а также с натурных испытаний. Расхождения с модельным испытанием для модели с зазором в случае расчета кавитационного запаса составили около 15 %, без зазора 10 %. Однако, модель с зазором

показала лучшую сходимость по напору с модельными испытаниями. Также, модель без зазора не учитывает вихревую составляющую потока. Авторы делают вывод о большей применимости модели с зазором к моделированию кавитационного течения, чем без него.

Статьи [8–12] были также рассмотрены в [7], в которой авторы сравнивали полученные результаты с результатами авторов статей [8–12], однако представляется необходимым также рассмотреть применимые в них кавитационные модели и выводы авторов о возможных причинах расхождений результатов моделирования и модельных испытаний.

В статье [8] авторы рассматривают вопрос развития и применения методики численных методов моделирования кавитации. Работа проводилась в программной среде CFX TASCflow 2.12. В настоящее время разработчики данной программной среды входят в ANSYS. Построенная модель сравнивалась с результатами, полученными при модельных испытаниях Национальной высшей школе искусств и ремёсел. В предисловии, авторы отмечают, что для течений с большими ускорениями необходимо использовать метод решения, основанный на решении уравнений сохранения для каждой из фаз и применяемыми при разработке неравновесных условий обмена теплом, массой, импульсом между фазами. При этом при модели будут содержать определенные допущения. Модель, используемая авторами в работе [8], базируется на использовании неравновесного приближения, с целью уменьшения числа решаемых уравнений. По данным проведённого моделирования, в сравнении с реальным экспериментом, результаты численной модели хорошо сходятся при показателях отношения расходов (текущего к номинальному) от 0,91 до 1,09. В данной работе использовалось упрощенное уравнение Рэлея – Плессета, аналогичное используемому уравнению в программной среде ANSYS CFX.

В статье [9] также рассматривается вопрос численного моделирования кавитации. Авторы подчеркивают что, на момент 2003 года, задача оптимизации потока посредством уменьшения кавитации применялась редко и, в основном, заключалась в оптимизации угла потока на входе в насос. В статье рассматриваются несколько программных пакетов CFX-Tascflow, FLUENT и STAR-CD. В настоящее время FLUENT, как и CFX-Tascflow, входят в пакет ANSYS и позволяют использовать модели Zwart-Gerber-Belamri, Schnerr and Sauer и Singhal et al. Пакет STAR-CD также выпускается по настоящее время и использует модель кавитации Рэлея-Плессета. На момент написания статьи, ни в одном из них не учитывается трехмерное турбулентное течение и влияние вязкости. По результатам моделирования, авторы отмечают, что из трех выбранных программ, наиболее точные результаты в сравнении с модельным испытанием показывает CFX-Tascflow. Также, было проведено сравнение наиболее точных результатов полученных в CFX-Tascflow с упрощенной методом, основанным на использовании начальной формы кавитационной каверны. Данная модель подробно описывается в [9]. Оба метода хорошо предсказывают начальный уровень и процент падения напора. По результатам сравнения, авторы делают вывод, что ни один из предложенных программных пакетов на момент 2003 г. не оправдывает затраченное на расчет время, в сравнении с достигнутым уровнем точности. Однако данные по моделированию в среде CFX-Tascflow остаются относительно точными.

Статья [10] затрагивает вопросы моделирования кавитации в диагонально-центробежном насосе. В статье авторы используют коммерческий пакет ANSYS CFX и уточняют, что использовали модель ANSYS CFX без изменений, то есть модель, основанную на методе VOF (volume of fluid – объема жидкости). Целью исследования была проверка возможности применения данного коммерческого пакета в рамках стандартного инженерного исследования. В части построения пространственной модели и метода ее разбиения на элементы, авторы отмечают, что гексаэдрическая сетка предпочтительней тетраэдрической при моделировании течений в турбонасосных агрегатах. Также в модели подвижная и стационарная части сетки соединяются в модели при помощи интерфейса frozen-rotor. Как в работах предыдущих авторов, исследования также рассматривают кавитацию при

превышающем, равном и меньшем по сравнению с номинальным расходом насоса. В сравнении с реальными испытаниями, авторы отмечают, что кавитация в модели начинается при меньшем числе кавитации, а падение напора круче. Они связывают это с отсутствием учета неустойчивости в используемой численной модели. В условиях перегрузки при значении расхода в 1.25 от номинального расхода, модель показала наиболее близкие к реальному эксперименту результаты. Анализируя полученные данные, авторы подтверждают, что модель построенная в ANSYS CFX показывает точные результаты в части отображения положения, размера кавитационной каверны, а также подчеркивают важность использования сеток на основе гексаэдральных элементов.

В статье [11] авторы рассматривают численное моделирование кавитирующего потока выполненное по стандартной модели, встроенной в ANSYS CFX. Авторы сравнили результаты численного моделирования стандартной моделью, используемой в ANSYS CFX, а также с моделью с модифицированной $k-\omega$ моделью турбулентности, учитывающей сжимаемость каверны в кавитирующем потоке. Также к модифицированной $k-\omega$ моделью турбулентности используется модель кавитации Шнерра-Зауэра. Сравнение также проводилось в сравнении с реальными модельными испытаниями и показало, что, несмотря на наличие расхождений реальной кривой кавитации и построенной на основе численного моделирования, модифицированная модель $k-\omega$ дает более близкие к реальным данным результаты. Однако при более высоком коэффициенте расхода кривые спада напора, полученные по двум моделям, практически не имеют отличий. Также, в сравнении с модельными испытаниями, кавитация наступает при меньшем числе кавитации и общий напор выше в обоих численных моделях. Высокий напор объясняется авторами статьи несовершенством модели и отсутствием учета потерь потока, неизбежно возникающих при работе реального насоса. Основываясь на результатах сравнения, авторами сделан вывод, что применение модели Шнерра-Зауэра может повысить точность моделирования кавитационного течения.

В статье [12] авторы анализируют влияние кавитирующих потоков на шнеках с различной геометрией лопастей. Для каждой из трех вариантов геометрий проведен ряд исследований. В своей работе авторы использовали программный пакет Fluent. В модели массопереноса скорость кавитации также основывается на упрощенной модели Рэлея – Плессета. Перед работой с насосами, авторы проделали предварительную работу в части исследования кавитации сначала в трубках Вентури, затем в двухлопастных каскадах и осевых шнеках. Определен тип возникающей кавитации и развитие кавитации в течении испытания при всех перечисленных геометриях. В части более точного поведения характеристик потока, рассматривая сравнение данных устойчивого потока модельных испытаний и численного моделирования: аналогично предыдущим исследованиям численная модель показывает начало кавитации при больших числах кавитации, для всех трех испытываемых авторами насосов. Авторы также отмечают хорошую согласованность результатов. Факторами, влияющими на расхождения модельных испытаний и численного моделирования, согласно выводам авторов, являются: моделирование только одного межлопаточного канала и, как следствие, отсутствие учета взаимодействий между каналами, по сравнению с реальной геометрией модели является идеальной без дефектов и отклонений, также численная модель не учитывает радиальный зазор.

В статье [13] представлена разработка и численное моделирование кавитационного потока на основе набора инструментов с открытым исходным кодом в OpenFOAMR, позволяющим использовать различные модели кавитации. Авторы провели работу по рассмотрению применимости различных моделей кавитации к задаче моделирования кавитационного потока в насосе. В статье, авторы рассмотрели 4 модели: Kunz et al, Merkle et al., Schnerr-Sauer-Yuan и Zwart et al. Как и во всех предыдущих исследованиях моделировалось 3% падение напора из-за кавитации. Из указанных моделей выше, модель Zwart сначала

показала лучшие результаты на аэродинамическом профиле, и затем использовалась при моделировании кавитационного потока. Сравнение с модельными испытаниями показали также высокие значения напора, но низкие значения числа кавитации для численной модели по сравнению с экспериментальной. Авторы объясняют данное расхождение тем, что материал, использованный при создании рабочего колеса, имеет низкую жесткость и мог деформироваться во время реального эксперимента, что невозможно учесть в численной модели, также влияет на расхождение отсутствие учета расстояния между рабочим колесом и корпусом и возникающих утечек во время работы насоса в численной модели.

В статье [14] авторы рассматривают нестационарное течение в насосе, а также структурный расчет прочности на основе гидравлического расчета. Не смотря на то, что основной данной статьи является анализ возможности реализации совмещения в программном пакете взаимосвязанного прочностного и гидравлического расчета, авторами также проводились исследования в части моделирования кавитации. При проведении гидравлического расчета, также проводилось сравнение модельных испытаний и численной модели. Авторы использовали модель Zwart–Gerber–Belamri, также базирующуюся на упрощенной модели Рэлея – Плессета. Данную модель также использовали авторы статьи [13]. Результаты, представленные авторами, показывают хорошую сходимость с модельными испытаниями. Численная модель кавитации показывает начало срыва при больших числах кавитации, по сравнению с модельными испытаниями, при значении расхода насоса равного номинальному ($1.0Q_d$). Отметим, что в данном исследовании значения напора при реальном испытании и результаты численной модели близки друг к другу.

В статье [15] рассматривают оптимизацию рабочего колеса насоса с целью повышения производительности. Работа проводилась с использованием программного обеспечения CFTurbo 9.0. Не смотря на то, что основной темой данной статьи является повышение эффективности насоса, авторы также проводили испытания в части определения кавитационных характеристик. Перед представлением результатов испытаний с уже оптимизированной геометрией, авторы также провели сравнение результатов численного и модельного испытаний. При условии использования двухфазной пар-жидкость модели с k-ε моделью турбулентности и постоянной массовой долей газа, базирующейся, на том же уравнении Рэлея-Плессета, данные численного моделирования дают практически идентичные результаты, в сравнении с модельными испытаниями.

Заключение. Рассмотрев все вышеописанные работы, а также выводы сделанные авторами, можно вывести ряд факторов, влияющих на точность моделирования кавитации в программных пакетах, которые необходимо учитывать:

- для повышения точности моделирования необходимо учитывать утечки рабочей жидкости во время работы насоса ТНА;
- необходимо учитывать в геометрических моделях зазор между лопатками и стенкой корпуса;
- при подборе численной модели, необходимо рассматривать не только модель кавитации, но и турбулентности.

В итоге, результаты работ [13; 14] показывают хорошую сходимость численной модели и реального эксперимента, что позволяет делать вывод о большей применимости модели Zwart–Gerber–Belamri, также основанной на модели Рэлея – Плессета, к моделированию кавитирующего потока в насосе. Направление исследования является актуальным и недостаточно проработанным для применения в инженерных методиках расчета и проектирования ТНА ЖРД, особенно для получения множества вариантов более совершенных конструкций на начальных этапах разработки новых образцов ракетных двигателей.

References

1. Gahun G. G., Baulin. V. I., Volodin V. A. et al. *Konstrukciya i proektirovanie zhidkostnyh raketnyh dvigateley* [Construction and design of liquid rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 424 p.
2. Lord R. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity. *Phil. Mag.* 1917, No. 34 (200), P. 94–98.
3. ANSYS CFX Tutorial Guide. Chapter 28: Drop Curve for Cavitating flow in a Pump. ANSYS Inc. Release 15.0.
4. Kudryashov N. A., Sinelshchikov D. I. Analytical solutions of the Rayleigh equation for empty and gasfilled bubble. *J. Phys. A: Math. Theor.* 2014. No. 47. P. 405202.5.
5. Mancas Stefan C., Rosu Haret C. Cavitation of spherical bubbles: closed-form, parametric, and numerical solutions. *Physics of Fluids*. 2016.
6. Afanasyev A. A., Demyanenko Yu. V., Popkov A. N. [Application of the Rayleigh-Plesset cavitation model for studying the flow of cryogenic liquid in the paths of a screw-center-run pump]. *Vestnik voronezhskogo gos. tekhn. un-ta*. 2017, Vol. 12, No. 2, P. 44–49 (In Russ.).
7. Kazyonov I. S., Kanalin Yu. I., Poletaev N. P., Chernysheva I. A. [Modeling of the breakdown cavitation characteristics of a booster turbopump unit and comparison of experimental and numerical results]. *Vestnik samarskogo gos. aerokosmich. un-ta im. ak. S. P. Koroleva (Nats. issled. un-ta)*. 2014, No. 5-1 (47), P. 188–198 (In Russ.).
8. Bakir F., Rey R., Gerber A. G., Belamri T., Hutchinson B. Numerical and Experimental Investigations of the Cavitating Behavior of an Inducer. *International Journal of Rotating Machinery*. 2004, No. 10, P. 15–25.
9. Dupont P., Okamura T. Cavitating Flow Calculations in Industry. *International Journal of Rotating Machinery*. 2003, No. 9 (3), P. 163–170.
10. Pierrat D., Gros L., Couzinet A., Pintrand G. On the Leading Edge Cavitation In a Helico-centrifugal Pump: Experimental and Numerical Investigations. *3rd IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems*. October 14–16, 2009, Brno, Czech Republic.
11. Application of modified k- ω model to predicting cavitating flow in centrifugal pump / Houlin Liu*, Dongxi Liu, Yong Wang, Xian-fang WU, Jian Wang // *Water Science and Engineering*. 2013, No. 6(3), P. 331–339.
12. Rafael Campos-Amezcu, Sofiane Khelladi, Zdzislaw Mazur-Czerwec, Farid Bakir, Alfonso Campos-Amezcu and Robert Rey (2011). Numerical and Experimental Study of Mass Transfer Through Cavitation in Turbomachinery, Mass Transfer – Advanced Aspects, Dr. Hironori Nakajima (Ed.), InTech.
13. Hanimann L., Mangani L., Casartelli E., Widmer M. Cavitation modeling for steady-state CFD simulations. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ.* 2016.
14. Denghao Wu, Yun Ren, Jiegang Mou, Yunqing Gu, Lanfang Jiang. Unsteady Flow and Structural Behaviors of Centrifugal Pump under Cavitation Conditions. Chinese. *Journal of Mechanical Engineering*. 2019.
15. Pei Ji1, Yin Tingyun1, Yuan Shouqi1, Wang Wenjie1, Wang Jiabin. Cavitation Optimization for a Centrifugal Pump Impeller by Using Orthogonal Design of Experiment. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2017, Vol. 30, No. 1, P. 103.

Библиографические ссылки

1. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей / Г. Г. Гахун, В. И. Баулин, В. А. Володин и др. ; под общ. ред. Г. Г. Гахуна. М. : Машиностроение, 1989. 424 с.
2. Lord R. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity // *Phil. Mag.* 1917. No. 34 (200). P. 94–98.

3. ANSYS CFX Tutorial Guide. Chapter 28: Drop Curve for Cavitating flow in a Pump. ANSYS Inc. Release 15.0.
4. Kudryashov N. A., Sinelshchikov D. I. Analytical solutions of the Rayleigh equation for empty and gasfilled bubble // J. Phys. A: Math. Theor. 2014. No. 47. P. 405202.
5. Mancas Stefan C., Rosu Haret C. Cavitation of spherical bubbles: closed-form, parametric, and numerical solutions. Physics of Fluids. 2016.
6. Афанасьев А. А., Демьяненко Ю. В., Попков А. Н. Применение кавитационной модели Релея – Плессета для исследования течения криогенной жидкости в трактах шнекоцентробежного насоса // Вестник воронежского гос. техн. ун-та. 2017. Т. 12, № 2. С. 44–49.
7. Моделирование срывной кавитационной характеристики бустерного турбонасосного агрегата и сравнение экспериментальных и численных результатов / И. С. Казёнов, Ю. И. Канагин, Н. П. Полетаев, И. А. Чернышева // Вестник самарского гос. аэрокосмич. ун-та им. ак. С. П. Королёва (Нац. исслед. ун-та). 2014. № 5-1 (47). С. 188–198.
8. Numerical and Experimental Investigations of the Cavitating Behavior of an Inducer / F. Bakir, R. Rey, A. G. Gerber, T. Belamri, B. Hutchinson // International Journal of Rotating Machinery. 2004. No. 10. P. 15–25.
9. Dupont P., Okamura T. Cavitating Flow Calculations in Industry // International Journal of Rotating Machinery. 2003. No. 9 (3). P. 163–170.
10. On the Leading Edge Cavitation In a Helicocentrifugal Pump: Experimental and Numerical Investigations / D. Pierrat, L. Gros, A. Couzinet, G. Pintrand // 3rd IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems, October 14–16, 2009, Brno, Czech Republic.
11. Application of modified k- ω model to predicting cavitating flow in centrifugal pump / Houlin Liu*, Dongxi Liu, Yong Wang, Xian-fang WU, Jian Wang // Water Science and Engineering. 2013. No. 6(3). P. 331–339.
12. Rafael Campos-Amezcuа, Sofiane Khelladi, Zdzislaw Mazur-Czerwicz, Farid Bakir, Alfonso Campos-Amezcuа and Robert Rey (2011). Numerical and Experimental Study of Mass Transfer Through Cavitation in Turbomachinery, Mass Transfer – Advanced Aspects, Dr. Hironori Nakajima (Ed.), InTech.
13. Cavitation modeling for steady-state CFD simulations / L. Hanimann, L. Mangani, E. Casartelli, M. Widmer // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. 2016.
14. Unsteady Flow and Structural Behaviors of Centrifugal Pump under Cavitation Conditions. Chinese / Denghao Wu, Yun Ren, Jiegang Mou, Yunqing Gu, Lanfang Jiang // Journal of Mechanical Engineering. 2019.
15. Cavitation Optimization for a Centrifugal Pump Impeller by Using Orthogonal Design of Experiment / Pei Ji1, Yin Tingyun1, Yuan Shouqi1, Wang Wenjie1, Wang Jiabin // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2017. Vol. 30, aNo. 1. P. 103.

© Торгашин А. С., Жуйков Д. А., Назаров В. П., Бегишев А. М., Власенко А. В., 2020

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

Zhujkov Dmitrij Aleksandrovich – Cand. Sc., Docent of a department of Aircraft Engines; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: d_zhujkov@sibsau.ru.

Nazarov Vladimir Pavlovich – Cand. Sc., Professor, Head of the Department of Aircraft Engines; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: nazarov@sibsau.ru.

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

Vlasenko Alesksey Vladimirovich – graduate student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: lesa.vlasenko.94@mail.ru.

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

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

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

Власенко Алексей Владимирович – аспирант; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: lesha.vlasenko.94@mail.ru