

CFD - МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОПАДАНИЯ ВОЗДУХА В ПИТАЮЩИЙ ТРУБОПРОВОД ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ

© 2012 С. А. Гафуров, Л. В. Родионов

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

В статье рассматривается случай попадания воздуха в трубопровод топливной системы. Промоделирован разный объём воздуха в топливной системе. Трёхкомпонентная жидкость (керосин, пары керосина и воздух) промоделирована с использованием метода Эйлера. При проведении расчётов упор делался на отслеживание динамики осевой силы, действующей на ротор шнекоцентробежной ступени. В результате расчёта выявлено, что с увеличением объёмного газосодержания амплитуды пульсаций осевой силы возрастают.

Комбинированный насос, шнекоцентробежная ступень, численный анализ, нерастворённый воздух, пары керосина, осевая нагруженность.

Зачастую надёжность авиационных силовых установок определяется надёжностью функционирования топливной системы. Существует несколько путей появления воздуха в нерастворённом виде в топливной системе. Во-первых, при прекращении подкачки топлива в расходные баки активное топливо от подкачивающих баковых насосов продолжает подаваться, в то время как линия подвода перекачиваемого топлива не отключается, т.е. через неё возможно поступление газа, которым наддуваются баки. Во-вторых при изменении внешних условий происходит изменение давления в баках, что приводит к выделению газа в подводящих магистралях и попадание его на вход в насосы.

Известно, что при работе насосных систем на газожидкостной смеси возможно появление неустойчивых режимов работы, характеризующихся интенсивными автоколебаниями давления и расхода в гидравлическом тракте системы [1].

В данной работе проведено численное моделирование влияния попадания нерастворённого воздуха в питающий трубопровод комбинированного насосного агрегата (рис. 1) на изменение осевой нагруженности ротора его шнекоцентробежной ступени (ШЦС).

Режимы для проведения численного CFD - моделирования рабочих процессов ШЦС НД-25А - были выбраны на основе проведённых ранее экспериментальных исследований комбинированного насосного агрегата НД-32 [2].



Рис. 1. 3D - модель сборки НД-25

Общий подход к построению сеточных моделей расчётных областей, а также методология проведения численного анализа не изменились и описаны в работе [3]. Расчётная область (рис. 2) включает в себя неподвижные области - питающий трубопровод, сливные магистрали, улитку, а также подвижные области - шнек и центробежное колесо. Сеточные модели вращающейся и невращающейся частей расчётной области для проведения стационарного расчёта соединяются при помощи интерфейса «frozen-rotor», для проведения нестационарного расчёта используется интерфейс «transient rotor».

CFD моделирование проведено на основе метода конечных объёмов с помощью коммерческого кода ANSYS CFX. В работах Zhang [4] и Gonzalez [5,6] приведены приме-

ры нестационарных численных расчётов центробежных насосных агрегатов.

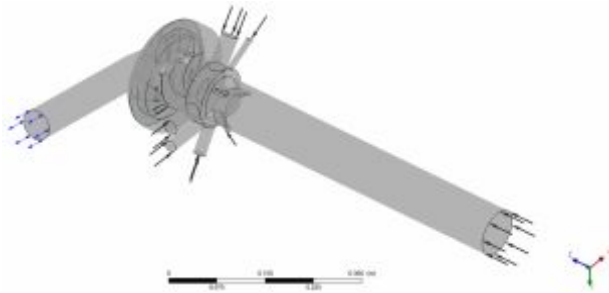


Рис. 2. Расчётная область

Для всех пристеночных зон используются призматические слои, позволяющие промоделировать пристеночные течения с достаточной точностью. Расчёт толщины первой ячейки проводился в следующей последовательности:

1. Определение числа Рейнольдса

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot D}{\mu} \text{ в различных сечениях про-}$$

точной части насоса:

ρ - плотность жидкости, кг/м³;

U - осевая скорость, м/с;

D - характерный размер, м;

μ - динамическая вязкость, Пас.

2. Определение внутреннего трения в пограничном слое:

$$C_f = \frac{0,0078}{Re^{\frac{1}{4}}}. \quad (1)$$

3. Определение касательного напряжения на стенках:

$$\tau_w = \frac{1}{2} C_f \rho U^2. \quad (2)$$

4. Определение касательной к стенке скорости:

$$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}. \quad (3)$$

5. Исходя из заданного значения y^+ из выражения

$$y_p = \frac{y_p^+ \cdot \nu}{U_\tau} \quad (4)$$

определяется толщина первого слоя.

Для численного моделирования динамики 3-компонентной жидкости (керосин, пары керосина и воздух) использовался метод Эйлера. В эйлеровом подходе выбирается пространство, заполненное жидкостью, и

изучается изменение состояния жидкости в каждой точке течения, т.е. рассматриваются поля газодинамических переменных. Турбулентные явления для всех компонентов жидкости рассчитываются одними и теми же уравнениями. Это физично для жидкостей, имеющих слоистое течение.

Для проведения нестационарного расчёта с многокомпонентной жидкостью заранее были проведены расчёты в стационарной постановке с однокомпонентной жидкостью без учёта кавитации и с двухкомпонентной жидкостью с учётом кавитации.

В рассматриваемом случае рабочая жидкость состоит из трёх основных компонентов: керосин, пары керосина, воздух.

Относительное количество каждого из компонентов оценивается с помощью величины объёмного содержания α . Сумма фракций должна быть равна единице:

$$\alpha_k + \alpha_v + \alpha_a = 1, \quad (5)$$

где α_k - объёмная доля керосина;

α_v - объёмная доля паровой фазы керосина;

α_a - объёмная доля нерастворённого воздуха.

Расчёт изотермический, температура рабочей жидкости – плюс 25°С. Для задания условий взаимодействия компонентов рабочей жидкости использовались следующие параметры:

1. Воздух – вода.

Задано условие смешивания компонентов путём задания длины контакта веществ – 1 мм.

2. Вода – пары керосина.

Задано условие возникновения кавитации. Для описания динамики пузырьков паров керосина использовалась классическая модель Рэлея-Плессета:

$$R_B \frac{d^2 R_B}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR_B}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{\rho_f R_B} = \frac{p_v - p}{\rho_f}, \quad (6)$$

где R_B – радиус парового пузырька; σ - коэффициент поверхностного натяжения между жидкостью и паром; ρ_f - плотность жидкости; p_v - давление внутри газового пузырька; p – давление жидкости; t – время.

Коэффициент поверхностного натяжения – 0,0263257 Н/м. Заданием постоянного коэффициента поверхностного натяжения ограничивается рост газового пузырька, что

является одним из допущений численной модели. Ещё одним допущением модели является неучёт роста диаметра газового пузырька, что требует задания переменного значения коэффициента поверхностного натяжения. Давление насыщенных паров керосина – 4666 Па.

3. Воздух – пары керосина.

Задано условие смешивания компонентов путём задания длины контакта веществ – 1 мм.

При проведении численного моделирования временной шаг задавался равным 0,001 с, что соответствует частоте дискретизации 1000 Гц при проведении нестационарного расчёта.

Отметим, что лопастные частоты колебаний определяются из выражения

$$f = \frac{\pi}{60} z i. \quad (7)$$

Тогда

- для шнека:

$$f_{1ш} = 214,4 \text{ Гц};$$

$$f_{2ш} = 428,9 \text{ Гц};$$

$$f_{3ш} = 643,3 \text{ Гц};$$

$$f_{4ш} = 857,7 \text{ Гц};$$

- для центробежного колеса:

- $f_{1цк} = 1179,4 \text{ Гц};$

- $f_{2цк} = 2358,8 \text{ Гц};$

- $f_{3цк} = 3538,2 \text{ Гц};$

- $f_{4цк} = 4717,5 \text{ Гц}.$

При проведении данной серии расчётов упор делался на отслеживание динамики осевой силы, действующей на ротор ШЦС.

На рис. 3 – 8 показаны результаты численного нестационарного расчёта колебания осевой силы на режимах с различным содержанием нерастворённого воздуха в питающем трубопроводе.

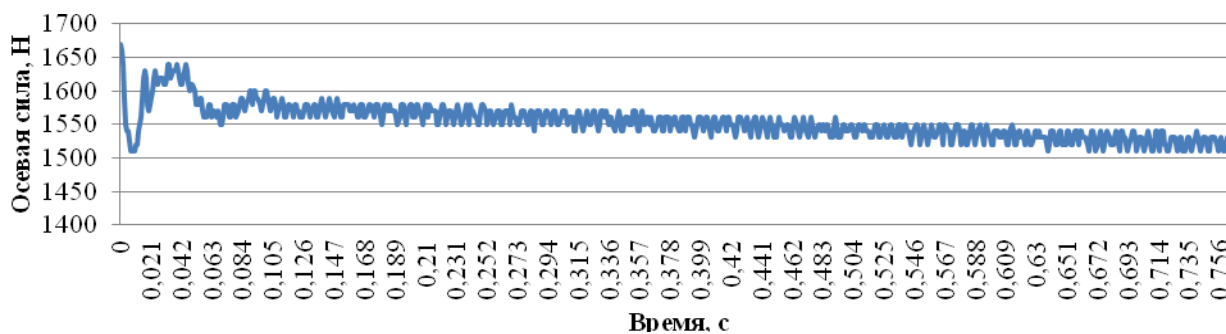


Рис. 3. Колебания осевой силы, действующей на ротор ШЦС. 0% воздуха

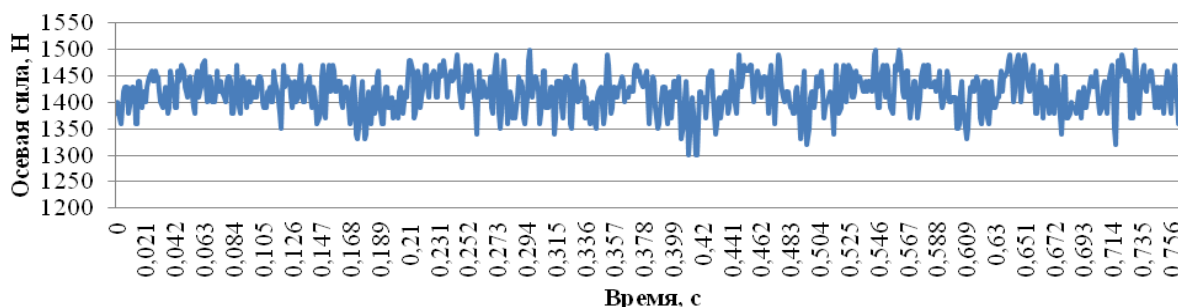


Рис. 4. Колебания осевой силы, действующей на ротор ШЦС. 8,7% нерастворённого воздуха

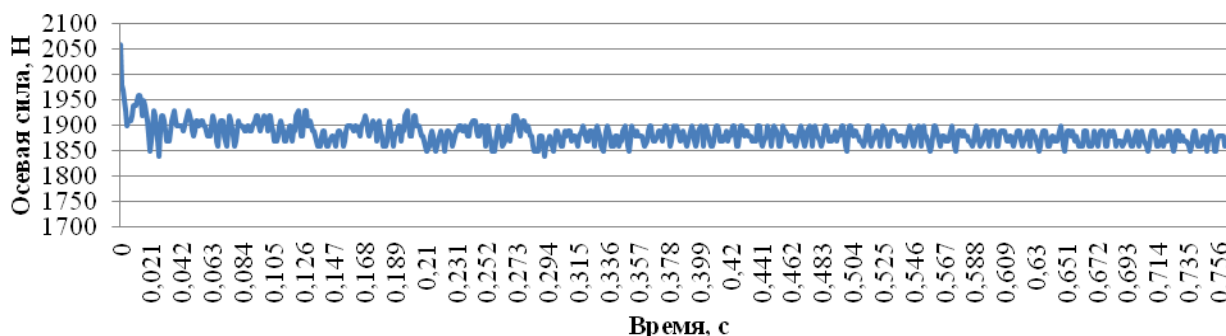


Рис. 5. Колебания осевой силы, действующей на ротор ШЦС. 8,0% нерастворённого воздуха

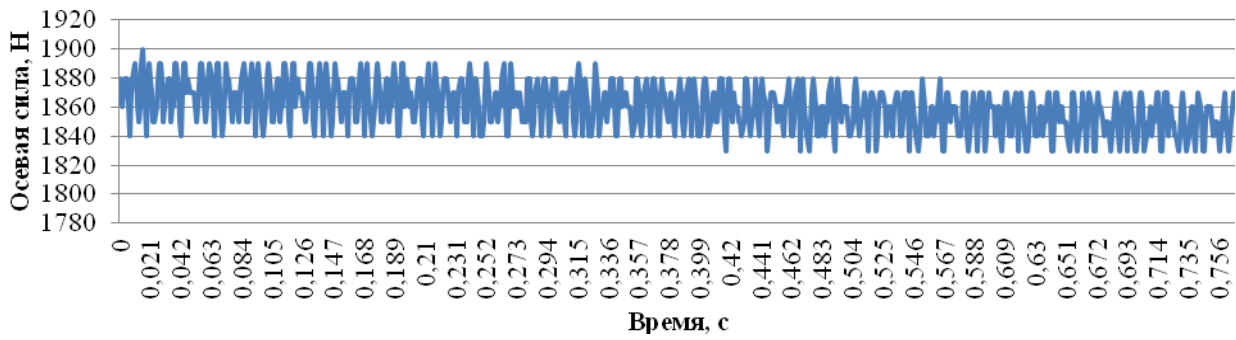


Рис. 6. Колебания осевой силы, действующей на ротор ШЦС. 10,0% нерастворённого воздуха

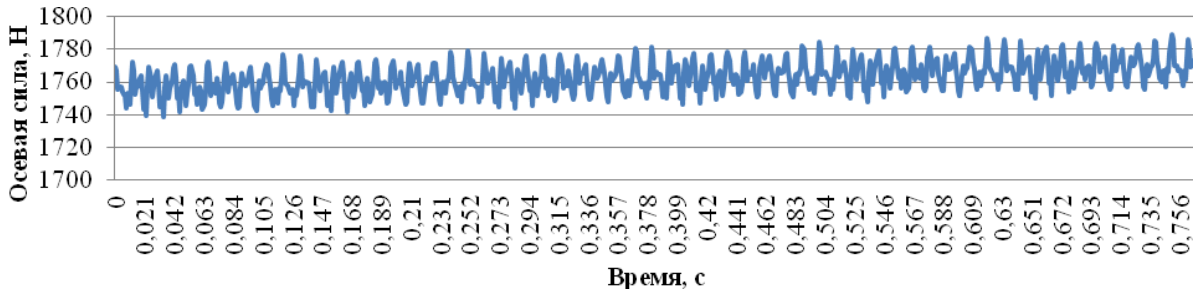


Рис. 7. Колебания осевой силы, действующей на ротор ШЦС. 11,4% нерастворённого воздуха

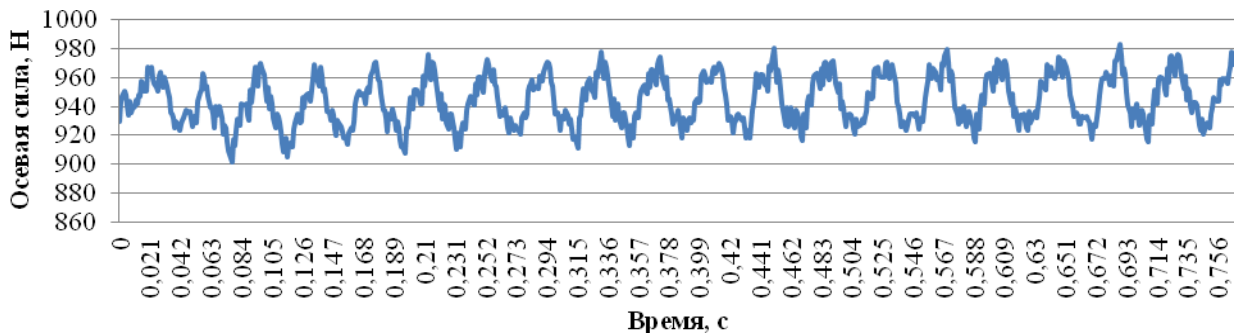


Рис. 8. Колебания осевой силы, действующей на ротор ШЦС. 6,8% нерастворённого воздуха

Из рис. 3 – 8 видно, что не во всех случаях удалось получить полигармонические колебания. Численный расчёт динамики осевой силы, действующей на ротор ШЦС, по-

казал, что среднее значение силы при работе без воздуха и с ним практически не изменяется (рис. 9).

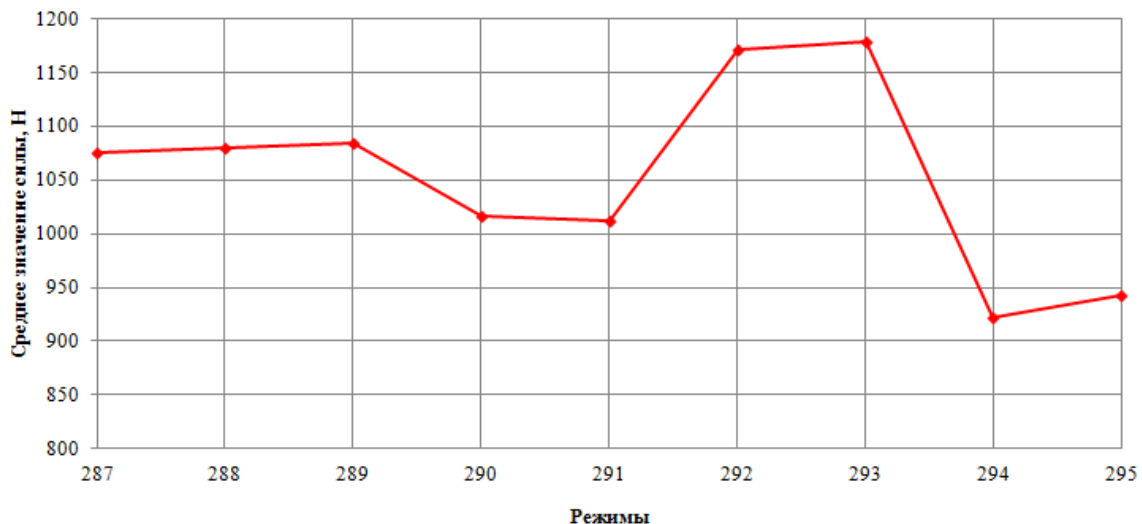


Рис. 9. Среднее значение осевой силы на роторе ШЦС

При принятом временном шаге 0,001 с частота дискретизации составляет 1000 Гц. Из этого следует, что при проведении FFT анализа (построении спектров) доверительный диапазон частот составляет от 100 до 500 Гц. Таким образом, построенные спектры колебаний могут охватить только первую и вторую шнековые частоты. Однако по

данным разработчика собственные частоты ротора исследуемой ШЦС лежат в диапазоне 0...800 Гц. Таким образом, выбранная частота дискретизации является приемлемой.

Для анализа амплитуд колебания осевой силы на исследуемых режимах были построены АЧХ (рис. 10, а - г).

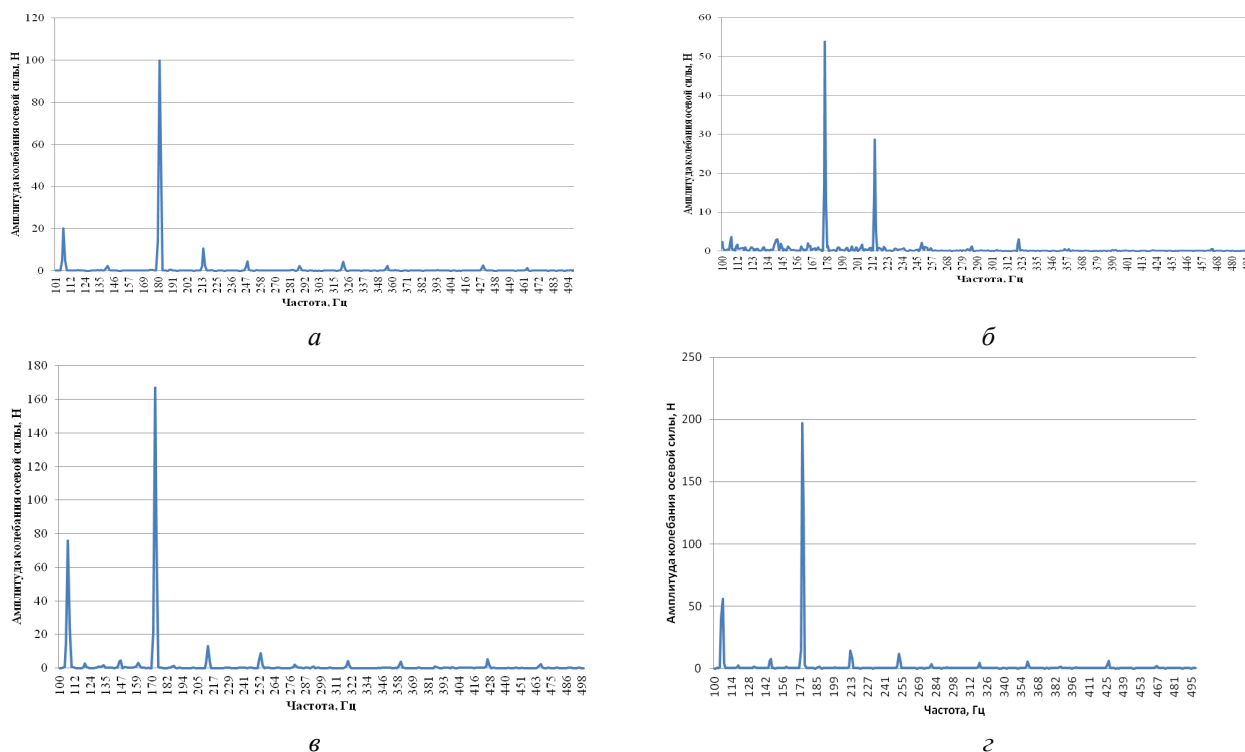


Рис. 10. Спектры колебаний осевой силы:
 а - 0% воздуха, б - 8,7% нерастворённого воздуха, в - 11,4% нерастворённого воздуха,
 г - 6,8% нерастворённого воздуха

При работе без воздуха наблюдается амплитуда в 20 Н на роторной частоте 107Гц, а также амплитуда силы, равная 100 Н на частоте 180 Гц. При подаче 4% воздуха наблюдается перестраивание частотного спектра: амплитуды силы 105 Н на частоте 140Гц, 60Н на 160Гц, а также 215Н на частоте 200Гц. При подаче 5,3% воздуха картина практически идентична картине работы без воздуха. При подаче 6,5% воздуха также наблюдаются всплески на частотах 107, 180 и 214Гц, однако максимальная амплитуда не превышает 40Н. При подаче 8% воздуха амплитуда силы на частоте 107Гц составляет 75Н, а на частоте 180Гц – 167Н. При подаче 8,7% воздуха наблюдаются два всплеска амплитуды на частоте 178Гц – 54Н и на частоте 214Гц – 28Н. При подаче 10% воздуха на частоте 107Гц амплитуда силы составляет 55Н, а на частоте 171Гц – 198Н.

Таким образом, из анализа рис. 10 видно, что с возрастанием объёмного газосодержания амплитуды пульсаций осевой силы практически на всех режимах имеют тенденцию к возрастанию.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010.

Библиографический список

- 1 Исследование влияния подачи воздуха во всасывающую магистраль центробежного насоса на его виброакустические характеристики [Текст] / А.А. Иголкин, А.Н. Крючков, А.Б. Прокофьев, Е.В. Шахматов // Вестн. СГАУ.- 2002. - № 1. - С. 78-83.
- 2 Исследование влияния схемы топливоснабжения на пульсационно-вибрационное состояние насосного агрегата [Текст] / С.А.

Гафуров, В.И. Перминов, Л.В. Родионов, [и др.] // Вестн. ЦНЦ РАН.- 2012. - Т. 14. -№4.- С. 254-261.

3 Разработка численной модели рабочего процесса в топливном шнекоцентробежном насосе [Текст] / С.А. Гафуров, М.Г. Михеев, Л.В. Родионов [и др.] // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. - №3 (27). – С. 254-262.

4 Numerical Analysis of Unsteady Hydrodynamic forces on a Diffuser Pump Impeller due to Rotor-Stator Interaction [Text] / M.

Zhang, H. Wang, H. Tsukamoto // ASME, 2002 - Paper FEDSM2002-31181.

5 Numerical Simulation of the Dynamic Effects Due to Impeller-Volute Interaction in a Centrifugal Pump [Text] / J. Gonzalez, J. Fernandez, E. Blanco [et al.]// ASME J. Fluids Eng., 124, 2002. - P. 348–355.

6 Unsteady Flow Structure on a Centrifugal Pump: Experimental and Numerical Approaches [Text] / J. Gonzalez, C. Santolaria, E. Blanco, [et al.]// ASME, 2002. - Paper FEDSM2002-31182.

CFD MODELING OF AIR PENETRATION INTO THE FUEL SUPPLY PIPELINE

© 2012 S. A. Gafurov, L. V. Rodionov

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

The article deals with the case of air into the fuel system piping. Different amount of air in the fuel system was simulated. The Euler method is used for modeling three component liquid (kerosene, kerosene and air, air). Calculation was focused on tracking the dynamics of the axial force acting on the rotor auger centrifugal stage. The calculation showed that the increasing of volume of gas lead to increases the amplitude fluctuations of axial force.

Combined pump, centrifugal-auger stage, numerical simulation, kerosene vapour, combined air, axial loading.

Информация об авторах

Гафуров Салимжан Азатович, аспирант кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sa.gafurov@gmail.com. Область научных интересов: гидродинамика, численные методы, лопаточные машины.

Родионов Леонид Валерьевич, кандидат технических наук, ассистент кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: rl63@bk.ru. Область научных интересов: гидравлика, объёмные гидромашин.

Gafurov Salimzhan Azatovich, graduated student of ASEU department, Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: sa.gafurov@gmail.com. Area of research: fluid dynamics, blade machine.

Rodionov Leonid Valerevich, Candidate of Technical Sciences, assistant of ASEU department, Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: rl63@bk.ru. Area of research: hydraulics, positive-displacement hydraulic machine.