

УДК 614.8:621.9

ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ПОЖАРНЫХ НАСОСОВ

И. И. СУТОРЬМА, кандидат технических наук,
А. В. ЛИФАНОВ, магистр технических наук,
Д. М. СКИДАН.

Гомельский инженерный институт МЧС Республики Беларусь, г. Гомель, Беларусь

Предложен способ проведения исследований гидродинамических процессов, протекающих в полости центробежных пожарных насосов с целью оптимизации их конструкции. Представлены результаты численного эксперимента по моделированию номинального режима работы центробежного пожарного насоса ПН-40У.

Ключевые слова: центробежный пожарный насос, гидродинамический процесс, математическое моделирование, численные методы.

Введение. Существующие конструкции центробежных пожарных насосов типа ПН-40У и их современные аналоги – НЦПН, по существу, разработаны в середине прошлого века. Эти конструкции имеют ряд существенных недостатков, приводящих к снижению общей эффективности работы насосных установок. Оптимизация конструкций центробежных пожарных насосов представляет значительные трудности обусловленные, прежде всего, сложностью проведения исследований гидродинамических процессов, протекающих в полости насоса и, в особенности, экспериментальных исследований.

В настоящей работе предлагается методика исследования гидродинамических процессов путем постановки численных экспериментов на основе математического моделирования с использованием средств вычислительной техники, а также некоторые результаты оценки адекватности математической модели для стационарных режимов работы центробежного пожарного насоса.

Основная часть. В основу предлагаемой математической модели положена система дифференциальных уравнений в частных производных типа Навье-Стокса, описывающих в нестационарной постановке законы сохранения массы, импульса и энергии движущейся текучей среды [1]. Вследствие того, что течение жидкости в полости центробежного насоса носит турбулентный характер и формируется в

результате вращения рабочего колеса с некоторой угловой скоростью (Ω), указанная система дифференциальных уравнений в рамках подхода Эйлера с осреднением по Рейнольдсу, имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = S_i, \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((\rho E + P) u_k + q_k - \tau_{ik} u_i) = S_k u_k + Q_H, \quad (3)$$

где t – время;

u – скорость;

ρ – плотность текучей среды;

P – давление;

S_i – внешние массовые силы;

E – полная энергия единичной массы текучей среды;

Q_H – тепло, выделяемое тепловым источником в единичном объеме текучей среды;

τ_{ik} – тензор вязких сдвиговых напряжений;

q_i – диффузионный тепловой поток.

Внешние массовые силы, учитывающие действие вращающейся системы координат, определяются по формуле:

$$S_i = -2 e_{ijk} \Omega_j \rho u_k + \rho \Omega^2 r_i, \quad (4)$$

где e_{ijk} – функция Леви – Чевита;

Ω – угловая скорость вращения системы координат;

r – радиус-вектор, приходящий в данную точку пространства от ближайшей к ней точки, лежащей на оси вращения данной системы координат.

Для нахождения искомого решения, в общем случае, нестационарная численная математическая модель физических процессов дискретизируется как по пространству, так и по времени.

В данной работе, с целью дискретизации по пространству, вся расчетная область покрывалась расчетной сеткой грани ячеек, которой параллельны координатным плоскостям, используемой в расчете декартовой глобальной системы координат модели. Ячейки расчетной сетки имеют форму параллелепипедов.

Область, в которой строится сетка, также имеет форму параллелепипеда. Расчеты проводятся только в ячейках, попавших в расчетную область, т.е. в пространство, заполненное в соответствии с постановкой задачи текучей средой. Значения независимых переменных рассчитываются в центрах ячеек, а не в узлах расчетной сетки, как в методах конечных разностей. Такой метод носит название метода конечных объемов [2].

Сущность дискретизации дифференциальных уравнений в методе конечных объемов заключается в том, что пространственные производные аппроксимируются с помощью неявных разностных операторов второго порядка точности. Полученные из уравнений (1-3) путем интегрированием по поверхности и объему ячейки расчетной сетки интегральные уравнения имеют вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V U dv + \oint_S F ds = \int_V Q dv, \quad (5)$$

где U – вектор независимых переменных (физических) параметров;

V – объем ячейки;

F – потоки;

S – площадь поверхности граней ячейки;

Q – массовые силы.

При этом массовые силы преобразуются к дискретной форме:

$$\frac{\partial}{\partial t} (U \cdot V) + \sum_S F \cdot s = Q \cdot V. \quad (6)$$

С целью дискретизации расчетной области по времени для более эффективного расчета давления и скорости используется метод расщепления операторов. В результате, для расчета значений параметров течения на очередном временном слое (n+1) по известным значениям этих параметров на предыдущем временном слое (n) используется следующая система алгебраических уравнений:

$$\frac{U^* - U^n}{\Delta t} + A_h(U^n, p^n) U^* = S^n; \quad (7)$$

$$L_h \delta p = \frac{\text{div}_h(\rho u)^*}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta t} \frac{\rho^* - \rho^n}{\Delta t}; \quad (8)$$

$$\rho^* = f(p^n + \delta p, T^*, y^*); \quad (9)$$

$$(\rho u)^{n+1} = (\rho u)^* - \Delta t \cdot \text{grad}_h \delta p; \quad (10)$$

$$p^{n+1} = p^n + \delta p; \quad (11)$$

$$(\rho T)^{n+1} = (\rho T)^*; (\rho k)^{n+1} = (\rho k)^*; (\rho \varepsilon)^{n+1} = (\rho \varepsilon)^*; (\rho y)^{n+1} = (\rho y)^* \quad (12)$$

$$\rho^{n+1} = f(p^{n+1}, T^{n+1}, y^{n+1}), \quad (13)$$

где U – вектор всех независимых переменных кроме давления;

u – вектор скорости;

y – вектор концентраций компонентов текучей среды;

Индексом (*) обозначены промежуточные значения переменных (между слоями). Дискретные операторы A_h , div_h , $grad_h$ и $L_h = div_h grad_h$ аппроксимируют соответствующие дифференциальные операторы со вторым порядком точности.

Для реализации данной методики была построена твердотельная 3-D модель центробежного пожарного насоса ПН-40У (рис.1) в системе SolidWorks. Внутренние моделируемые полости моделей корпуса и крышки, а также рабочее колесо выполнялись точно в соответствии с реальными деталями насоса. Внешние поверхности корпуса и крышки насоса были выполнены упрощенно, вследствие того, что они не входят в расчетную область гидродинамического исследования.

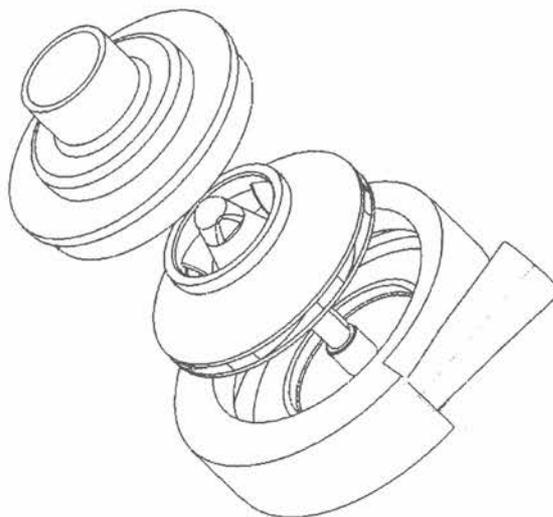


Рисунок 1 – Твердотельная 3-D модель центробежного пожарного насоса ПН-40У

С целью проверки адекватности приведенной математической модели проводились расчеты в стационарной постановке задачи для случаев имеющих известные значения входных и выходных параметров насоса. Реализация расчетов осуществлялась с использованием пакета COSMOSFloWorks.

На рис. 2, в качестве примера, представлены результаты расчета при исходных данных, соответствующих номинальному режиму работы насоса ПН-40У [3]: частота вращения рабочего колеса $n = 2700 \text{ мин}^{-1}$; общее давление на входе 10^5

Па; расход на выходе 40 л/с. По анализу изолиний давления, представленных на рисунке видно, что среднее давление в выходном сечении напорного патрубка насоса составляет порядка 11×10^5 Па, или напор насоса 10^6 Па. Полученные данные свидетельствуют о высокой степени сходимости результатов расчета с известными в литературе данными, а, следовательно, об адекватности предлагаемой математической модели.

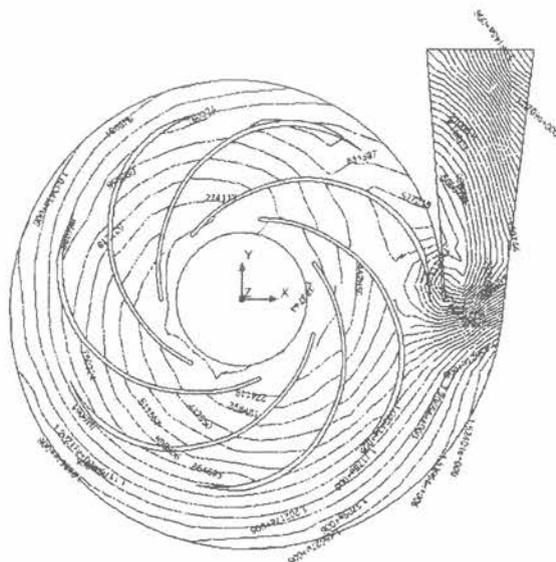


Рисунок 2 – Распределение изолиний давления по сечению центробежного пожарного насоса ПН-40У при номинальном режиме работы

Использование методов численного моделирования позволяет не только получить разнообразные данные по количественной оценке параметров гидродинамического режима в полости центробежного пожарного насоса, но и визуализировать реальную картину течений жидкости (рис. 3).

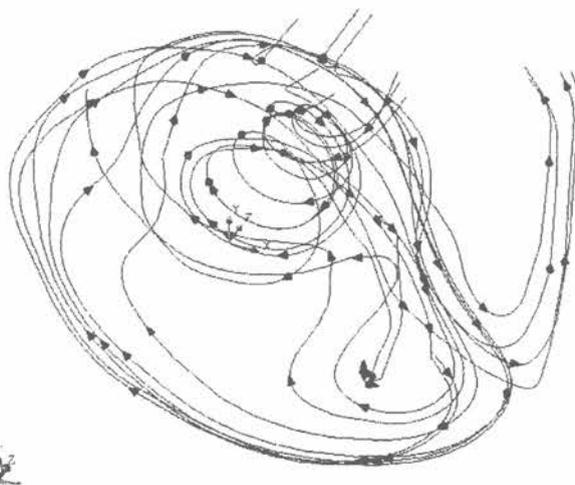


Рисунок 3 – Картина течения жидкости в полости центробежного пожарного насоса ПН-40У при номинальном режиме работы

Выводы. Ввиду исключительной сложности экспериментальных исследований гидродинамических процессов, протекающих в полости центробежных пожарных насосов, целесообразно решать данную проблему постановкой численного эксперимента на основе математического моделирования с использованием средств вычислительной техники.

Математические модели, основанные на использовании систем дифференциальных уравнений в частных производных типа Навье-Стокса (1-3), в сочетании с методом конечных объемов дают удовлетворительную сходимость получаемых результатов с имеющимися в литературе данными при численном исследовании центробежных пожарных насосов.

Литература

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М., 1978 г.
2. Алямовский А.А. и др. COSMOSFloWorks. Моделирование в инженерной практике. – Санкт-Петербург, 2005г.
3. Иванов А.Ф. и др. Пожарная техника, ч.1. – М, 1988 г.

Поступила в редакцию 15.12.07.

I.I. Sutorma, A.V. Lifanov, D.M. Skidan

NUMBER EXPERIMENT AT RESEARCHES OF CENTRIFUGAL PUMPS

The authors propose an experimental method of investigating hydrodynamic process in the chamber of centrifugal pumps with the aim of their construction improvement. The results of number experiment for modeling nominal operation modes of fire fighting pump PN-40U are given in the article.