

УДК 614.8:621.9

## АДАПТАЦИЯ ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА РЕШЕНИЯ К МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ПОЖАРНОГО НАСОСА

И. И. СУТОРЬМА, кандидат технических наук,  
А. В. ЛИФАНОВ, магистр технических наук.

*Учреждение образования «Гомельский инженерный институт» МЧС Республики Беларусь, г. Гомель, Беларусь*

Представлены результаты численных экспериментов по адаптации метода конечных объемов к математическому моделированию гидродинамического процесса, протекающего в центробежном пожарном насосе.

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

**Введение.** При проведении исследований гидродинамического режима работы центробежных пожарных насосов возникают значительные трудности, связанные с постановкой натурного эксперимента по определению полей скоростей и давлений. В работе [1] было предложено проводить подобные исследования путем постановки численного эксперимента. В основу математической модели положена система дифференциальных уравнений в частных производных типа Навье-Стокса, замыкаемых уравнением неразрывности потока. В качестве численного метода решения предложен метод конечных объемов.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для достижения достаточной степени точности решения необходимо проводить адаптацию математической модели и численного метода к конкретным условиям пожарного центробежного насоса.

**Постановка задачи.** Причинами возникновения значительных погрешностей при расчете являются:

— искажение картины течения в расчетной области, соответствующей выходному патрубку насоса, вследствие того, что система координат расчетной области колеса должна быть вращающейся и учитывающей центробежные и кориолисовы

силы инерции, а в выходном патрубке эти силы не воздействуют на движущийся поток жидкости;

– возникновение вихрей, которые пересекают области с граничными условиями на входных и выходных отверстиях, и вносят погрешность при расчете входного и выходного расхода соответственно [2];

– крупный шаг дискретизации расчетной области, возникающий вследствие стремления сократить время расчета, которое составляет несколько часов даже на достаточно производительном компьютере.

Задачей настоящей работы является адаптация математической модели и численного метода, изложенных в работе [1], к расчету пожарного центробежного насоса ПН-40У с целью минимизации погрешности расчета и получения адекватных результатов.

**Основная часть.** Известно, что при номинальном режиме работы насоса ПН-40У частота вращения рабочего колеса составляет  $2700 \text{ мин}^{-1}$ , общее давление на выходе из насоса — 1,1 МПа, расход на выходе из насоса —  $0,04 \text{ м}^3/\text{с}$  [3].

При численном моделировании в настоящей работе контролируруемыми параметрами являются: статическое, и динамическое давление, а также расход на выходе.

В соответствии с методикой определения показателей динамических насосов [4] общее давление на выходе из насоса определяется по формуле:

$$P_{\text{общ}} = P_{\text{ст}} + P_{\text{дин}} = \Delta Z \rho g + P + \frac{8\rho Q^2}{\pi^2 d^4} \quad (1)$$

где  $\Delta Z$  — расстояние между осью входного и плоскостью выходного отверстия;  $P$  — манометрическое давление;  $\rho$  — плотность воды;  $g$  — ускорение свободного падения;  $Q$  — расход на выходе из насоса;  $d$  — диаметр выходного сечения;  $P_{\text{общ}}$  — общее давление;  $P_{\text{ст}}$  — статическое давление;  $P_{\text{дин}}$  — динамическое давление.

При этом динамическое и статическое давление соответственно будут:

$$P_{\text{дин}} = \frac{8\rho Q^2}{\pi^2 d^4} = \frac{8 \cdot 998,2 \cdot 0,04^2}{\pi^2 \cdot 0,09^4} = 19\,731 \text{ Па}, \quad (2)$$

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{общ}} - P_{\text{дин}} = 1\,100\,000 - 19\,731 = 1\,080\,269 \text{ Па} \quad (3)$$

Полученные значения принимаются за точные решения задачи. Максимальным отклонением от приведенных параметров насоса при расчете в условиях номи-

нального режима его работы предлагается считать общепринятое значение при проведении натурных экспериментов — 5% [5].

Оценку отклонения параметров от их точных значений определим по формуле:

$$\Delta_i^{\%} = \left( 1 - \frac{X_i}{X_d} \right) \cdot 100\%, \quad (4)$$

где  $\Delta_i^{\%}$  — отклонение в процентах;  $i$  — номер численного эксперимента;  $X_i$  — значение контролируемого параметра в  $i$ -том эксперименте;  $X_d$  — действительное значение параметра насоса.

Чтобы исключить влияние кориолисовых и центробежных сил инерции в выходном патрубке насоса, разделим решение задачи на две части. На первом шаге будем проводить расчет течения в рабочем колесе, используя вращающуюся систему координат, а на втором шаге — расчет течения в полостях корпуса, используя неподвижную систему координат.

На рисунке 1 представлены зависимости контролируемых параметров от размеров расчетной сетки, а в таблице 1 — точность полученных результатов.

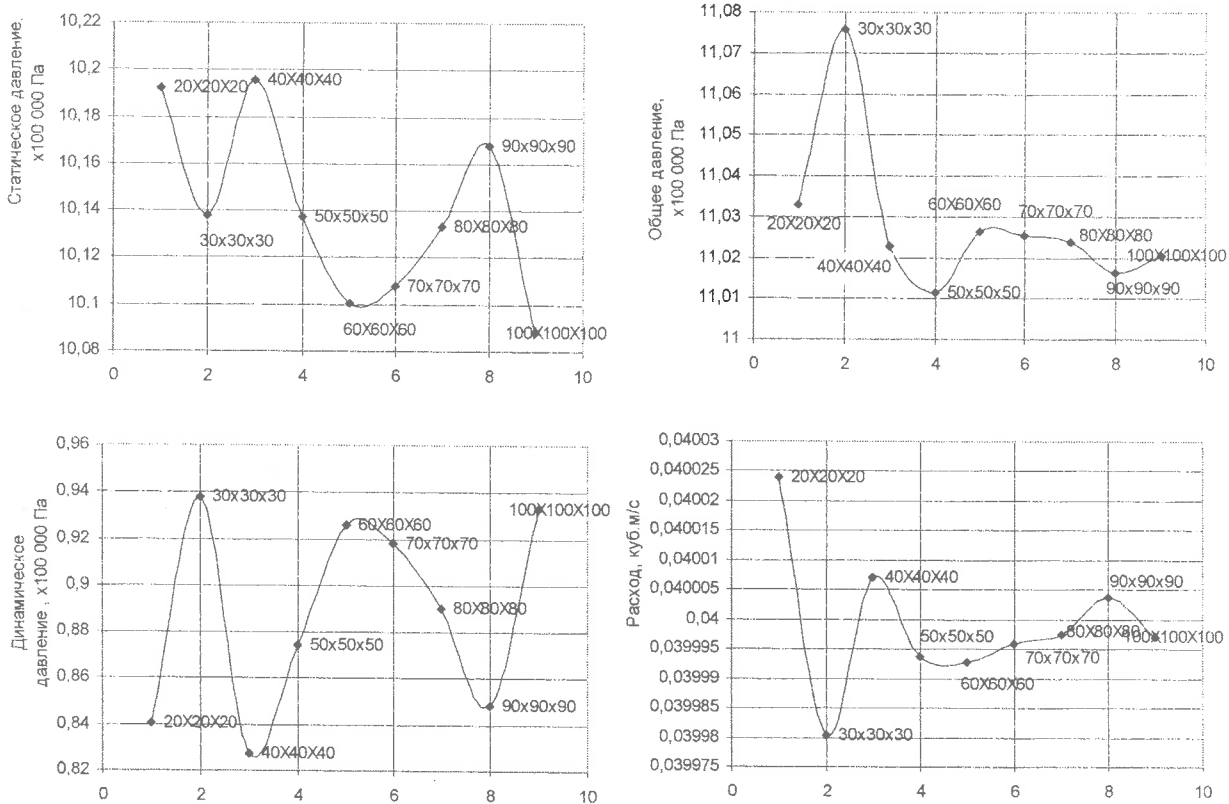


Рисунок 1 — Графики зависимостей параметров на выходе насоса от ячеек расчетной сетки для модели насоса без удлинения выходного патрубка

Анализ результатов первой серии численных экспериментов показывает, что с уменьшением шага дискретизации по пространству общее давление и расход уже на сетке 70x70x70 ячеек близки к значениям установившегося процесса при удовлетворительных отклонениях значений 0,23 и 0,01% соответственно. Вместе с тем, наблюдаются значительные колебания статического и динамического давлений, а значения отклонений этих параметров от установившегося составляют более 300 и 6% соответственно.

Таблица 1 – Отклонения параметров на выходе насоса для модели насоса без удлинения выходного патрубка

Количество ячеек расчетной сетки	Отклонения параметров насоса, %			
	общее давление	статическое давление	динамическое давление	расход
20x20x20	-0,30	5,61	-316,35	0,06
30x30x30	-0,69	6,12	-364,65	-0,05
40x40x40	-0,21	5,58	-309,81	0,02
50x50x50	-0,10	6,12	-332,97	-0,02
60x60x60	-0,24	6,46	-358,74	-0,02
70x70x70	-0,23	6,39	-354,59	-0,01
80x80x80	-0,22	6,16	-341,05	-0,01
90x90x90	-0,15	5,84	-320,26	0,01
100x100x100	-0,19	6,58	-362,04	-0,01

Таким образом, одним измельчением сетки расчетной области достичь результатов с требуемой степенью точности не представляется возможным. При постановке задачи указывалось на необходимость исключения возможности пересечения вихрями потока границ расчетной области на входном и выходном отверстиях.

С этой целью в работе [2] рекомендуется использовать увеличение длины входного и выходного патрубков, в зависимости от постановки граничного условия по давлению. В нашей задаче такое граничное условие ставилось на выходном отверстии.

Вторая серия численных экспериментов проводилась с моделью насоса, у которого выходной патрубок был удлинен на 0,25 м. Так как при изменении геометрических параметров модели изменилась форма расчетной области, то для сохранения кубической формы ячейки изменялись пропорции количества ячеек в направлении осей системы координат. Поэтому расчет производился на расчетных сетках в диапазоне от 10x16x6 до 100x160x60 ячеек.

На рисунке 2 представлены зависимости контролируемых параметров от размеров расчетной сетки, а в таблице 2 – точность полученных результатов.

Анализ результатов второй серии численных экспериментов показал, что увеличение выходного патрубка насоса существенно стабилизирует процесс сходимости результатов по статическому и динамическому давлению на выходе ведет к снижению погрешности эксперимента. Отклонение статического давления значительно снизилось и стало меньше максимально допустимого значения. Отклонение динамического давления уменьшилось по сравнению с первой серией численных экспериментов в среднем в 2 раза, однако оно все же существенно больше максимально допустимого значения.

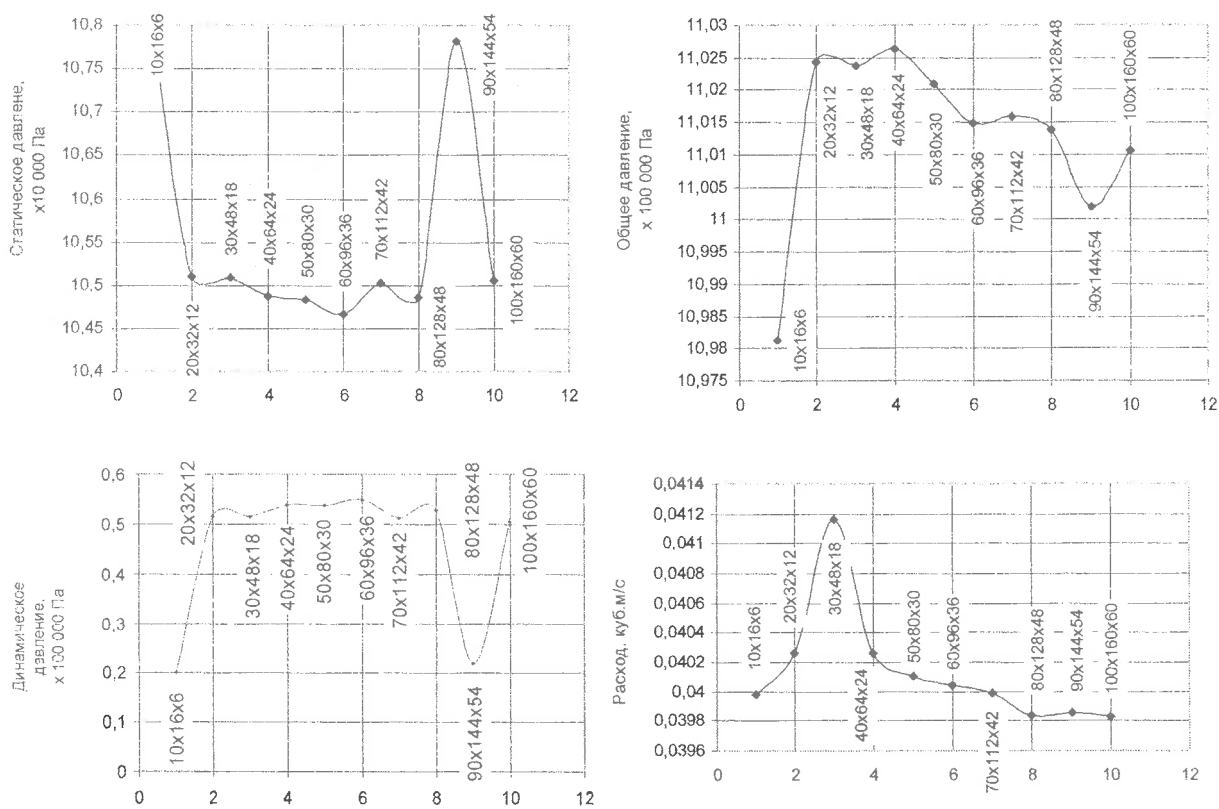


Рисунок 2 – Графики зависимостей параметров на выходе насоса от количества ячеек расчетной сетки для модели насоса с удлиненным выходным патрубком на 0,25 м

Следует отметить, что при расчетной сетке 90x144x54 ячейки наблюдается аномальный скачок статического, динамического и, как следствие, общего давления.

Таблица 2 – Отклонения параметров на выходе насоса для модели насоса с удли-  
ненным выходным патрубком на 0,25 м

Количество ячеек расчетной сетки	Отклонения параметров насоса, %			
	общее давление	статическое давление	динамическое давление	расход
10x16x6	0,17	0,16	0,44	-0,06
20x32x12	-0,22	2,67	-154,98	0,65
30x48x18	-0,22	2,68	-155,07	2,91
40x64x24	-0,24	2,87	-166,66	0,66
50x80x30	-0,19	2,92	-166,30	0,27
60x96x36	-0,13	3,08	-171,79	0,11
70x112x42	-0,14	2,73	-153,96	-0,03
80x128x48	-0,13	2,90	-161,74	-0,40
90x144x54	-0,02	0,15	-9,01	-0,35
100x160x60	-0,10	2,70	-149,79	-0,42

Поведение кривой характерно для режима работы без увеличения выходного патрубка. То есть на сетке, обеспечивающей необходимую точность расчета, произошел выход вихря за пределы расчетной области в выходном сечении. Таким образом, увеличением выходного патрубка на 0,25 м полностью избежится от пересечения выходного сечения вихревым потоком, не удалось.

Для полного исключения вихревого влияния на результаты расчета в выходном патрубке его длина была увеличена на 0,5 м и проведена третья серия численных экспериментов. Расчет производился на расчетных сетках в том же диапазоне, что и для второй экспериментальной серии.

На рисунке 3 представлены зависимости контролируемых параметров от размеров расчетной сетки, а в таблице 3 – точность полученных результатов.

Анализ результатов расчета и отклонений параметров насоса на выходе показывает, что при увеличенной на 0,5 м длине выходного патрубка модели насоса процесс счета стабилизируется уже на расчетной сетке размером 50x110x30 ячеек, а на расчетной сетке 60x132x36 ячеек, что в целом составляет 285120 ячеек, результаты расчета перестают значимо зависеть от частоты сетки. Отклонения всех контролируемых параметров насоса при этом попадают в область допустимых значений.

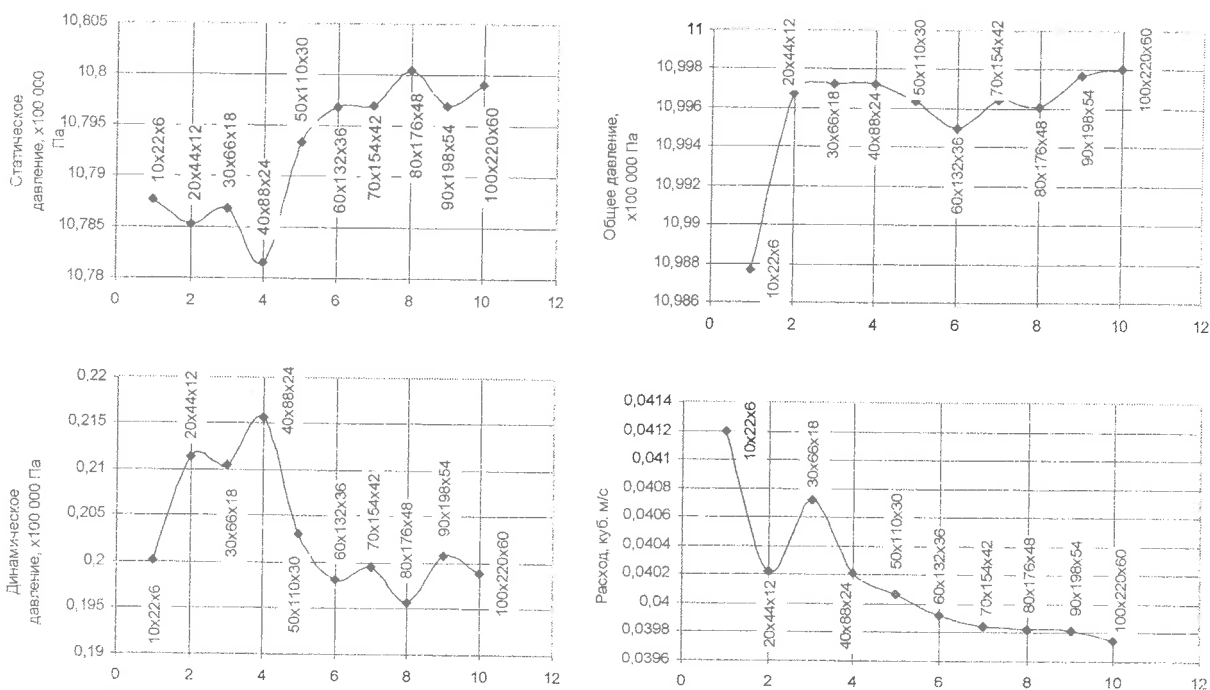


Рисунок 3 – Графики зависимостей параметров на выходе насоса от количества ячеек расчетной сетки для модели насоса с удлиненным выходным патрубком на 0,5 м

Таблица 3 – Отклонения параметров на выходе насоса для модели насоса с удлиненным выходным патрубком на 0,5 м

Количество ячеек расчетной сетки	Отклонения параметров насоса, %			
	общее давление	статическое давление	динамическое давление	расход
10x22x6	0,11	0,10	0,88	2,99
20x44x12	0,03	0,12	-4,71	0,56
30x66x18	0,03	0,10	-4,23	1,81
40x88x24	0,02	0,15	-6,85	0,53
50x110x30	0,03	0,04	-0,57	0,17
60x132x36	0,05	0,01	1,85	-0,19
70x154x42	0,03	0,01	1,19	-0,39
80x176x48	0,04	-0,02	3,10	-0,44
90x198x54	0,02	0,01	0,60	-0,47
100x220x60	-0,01	0,02	1,45	-0,64

**Выводы.** При постановке численного эксперимента по математическому моделированию гидродинамического режима работы центробежного пожарного насоса ПН-40У на основе системы дифференциальных уравнений в частных производных типа Навье-Стокса с применением метода конечных объемов в качестве численного метода решения задачи необходимо:

1. Разбивать задачу на две подзадачи, одна из которых, связанная с расчетной областью рабочего колеса, решается во вращающейся системе координат, а вторая, связанная с корпусом насоса, решается в неподвижной системе координат.

2. С целью исключения погрешности расчета, обусловленной пересечением вихрей потока границ расчетной области на выходном отверстии насоса, удлинять выходной патрубок не менее, чем на 0,5 метра от выходного сечения.

3. Для достижения установившегося режима работы насоса и погрешности значений выходных параметров в пределах 5%, вычисления производить на расчетной сетке не реже  $60 \times 132 \times 36$  ячеек по осям X, Y и Z соответственно (здесь Z – ось вращения рабочего колеса; Y – ось в направлении выходного патрубка; X – ось, перпендикулярная к плоскости OYZ).

### Литература

1. Суторьма И. И., Лифанов А. В., Скидан Д. М. Численный эксперимент при исследовании центробежных пожарных насосов // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. Том 2. – 2007. – № 2. – С. 28-33.

2. Алямовский А. А. и др. COSMOSFloWorks. Моделирование в инженерной практике. – Санкт-Петербург, 2005 г.

3. Иванов А. Ф. и др. Пожарная техника, ч. 1. – М., 1988 г.

4. ГОСТ 6134-87. Насосы динамические. Методы испытаний.

5. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. – М., Издательство «Мир», 1972 г.

*Поступила в редакцию 18.02.2008.*

**I.I. Sutorma, A.V. Lifanov**

### **ADAPTATION OF NUMBER EXPERIMENT METHOD OF SOLUTION TO MATHEMATICAL METHOD OF SOLUTION TO MATHEMATICAL MODEL OF FIREFIGHTING CENTRIFUGAL PUMP**

The results of number experiments for adaptation the method of final volumes to mathematical modeling of hydrodynamic processes in fighting centrifugal pump are given in the article.