

УДК 631.3:621.9

И. И. СУТОРЬМА, кандидат технических наук, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

Получены рекомендации по разбиению расчетной области при численном моделировании одноступенчатых центробежных насосов на две части, с неподвижной и вращающейся системами координат, размерам расчетной сетки, а также длине выходного патрубка насоса для устранения эффекта пересечения границ расчетной области вихревыми потоками. Представлены результаты оптимизации точности результатов расчета статического и динамического давлений в полости насоса ПН-40У при использовании метода конечных объемов для решения задачи математического моделирования на основе системы дифференциальных уравнений в частных производных типа Навье-Стокса.

Центробежные насосы получили широкое распространение в различных отраслях техники. Их применяют в системах внутреннего и наружного водоснабжения, пожарных насосных установках, системах охлаждения двигателей внутреннего сгорания. В настоящее время важной задачей является повышение надежности и эффективности работы центробежных насосов, что в немалой степени зависит от их конструктивных параметров. При этом оптимизация конструкций центробежных насосов представляет значительные трудности, обусловленные сложностью проведения исследований гидродинамических процессов, протекающих в их полостях и, в первую очередь, экспериментальных исследований по определению полей скоростей и давлений. Одним из путей решения данной проблемы является численный эксперимент [1].

Методика математического моделирования, предложенная в работе [2], была разработана на основе системы дифференциальных уравнений в частных производных типа Навье-Стокса, замыкаемых уравнением неразрывности потока. Эта математическая модель нашла достаточно широкое применение в системах гидродинамического типа. В качестве численного метода решения, в указанной работе, использовался метод конечных объемов, реализуемый на алгоритмическом и программном уровне в пакете прикладных программ COSMOSFloWorks среды 3D-моделирования SolidWorks [3].

Сущность методики состоит в том, что течение жидкости в полости центробежного насоса носит турбулентный характер и формируется в результате вращения рабочего колеса с некоторой угловой скоростью (Ω). При этом, указанная система дифференциальных уравнений рассматривается в рамках подхода Эйлера с осреднением по Рейнольдсу и 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 текущей среды; p – давление; S_i – внешние массовые силы; E – полная энергия единичной массы текущей среды; Q_H – тепло, выделяемое тепловым источником в единичном

объеме текущей среды; τ_{ik} – тензор вязких сдвиговых напряжений; q_i – диффузионный тепловой поток.

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

С целью дискретизации по пространству вся расчетная область покрывается 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 текущей средой. Значения независимых переменных рассчитываются в центрах ячеек, а не в узлах расчетной сетки, как в методах конечных разностей. Такой метод носит название «метод конечных объемов».

Сущность дискретизации дифференциальных уравнений в методе конечных объемов заключается в том, что пространственные производные аппроксимируются с помощью неявных разностных операторов второго порядка точности.

С целью дискретизации расчетной области по времени для более эффективного расчета давления и скорости также используется метод расщепления операторов.

Для реализации данной методики была построена твердотельная 3D-модель центробежного насоса ПН-40У в системе SolidWorks. Внутренние моделируемые полости моделей корпуса и крышки, а также рабочее колесо выполнялись точно в соответствии с реальными деталями насоса.

Для рассматриваемого насоса имеются известные значения входных и выходных параметров в стационарной постановке задачи. На рисунке 1 представлены результаты расчета, соответствующие номинальному режиму работы насоса: частота вращения рабочего колеса 2700 мин⁻¹; общее давление на входе 10⁵ Па; подача на выходе 40 л/с. По анализу изолиний давления, представленных на рисунке 1, видно, что среднее давление в выходном сечении напорного патрубка насоса составляет 11×10⁶ Па, или напор насоса порядка 10⁷ Па, что на порядок ниже действительного значения.

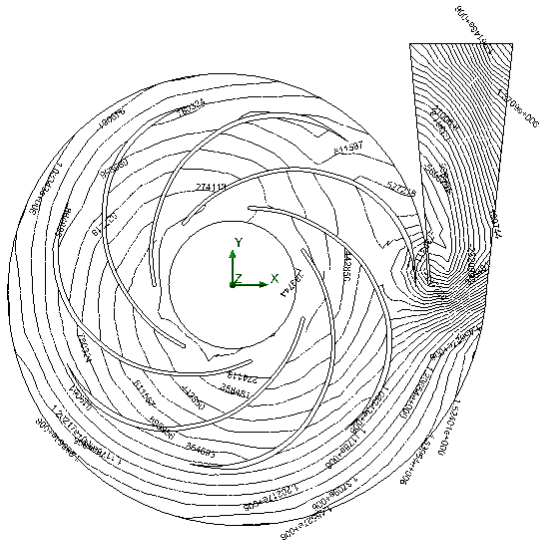


Рисунок 1 – Распределение изолиний давления по сечению центробежного насоса ПН-40У при номинальном режиме работы

Полученные данные свидетельствуют о невысокой степени сходимости результатов расчета с известными в литературе данными, что обусловлено следующими причинами [4]:

- искажением 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 вы-

ходном патрубке эти силы не воздействуют на движущийся поток жидкости;

- возникновением вихрей, которые пересекают области с граничными условиями на входных и выходных отверстиях и вносят погрешность при расчете входного и выходного расхода соответственно;

- крупным шагом дискретизации расчетной области, возникающим вследствие стремления сократить время расчета, которое существенно даже для высокопроизводительного компьютера.

С целью адаптации математической модели и численного метода для повышения точности результатов расчета гидродинамического режима работы центробежного насоса ПН-40У расчет проводили при известных значениях динамического и статического давления: $P_{дин} = 19731$ Па; $P_{ст} = 1080269$ Па. Эти значения принимались за точные решения задачи.

На рисунке 2 представлены зависимости контролируемых параметров от размеров расчетной сетки, а в таблице 1 – точность полученных результатов.

Анализ результатов первой серии численных экспериментов показал, что с уменьшением шага дискретизации по пространству общее давление и расход уже на сетке $70 \times 70 \times 70$ 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.

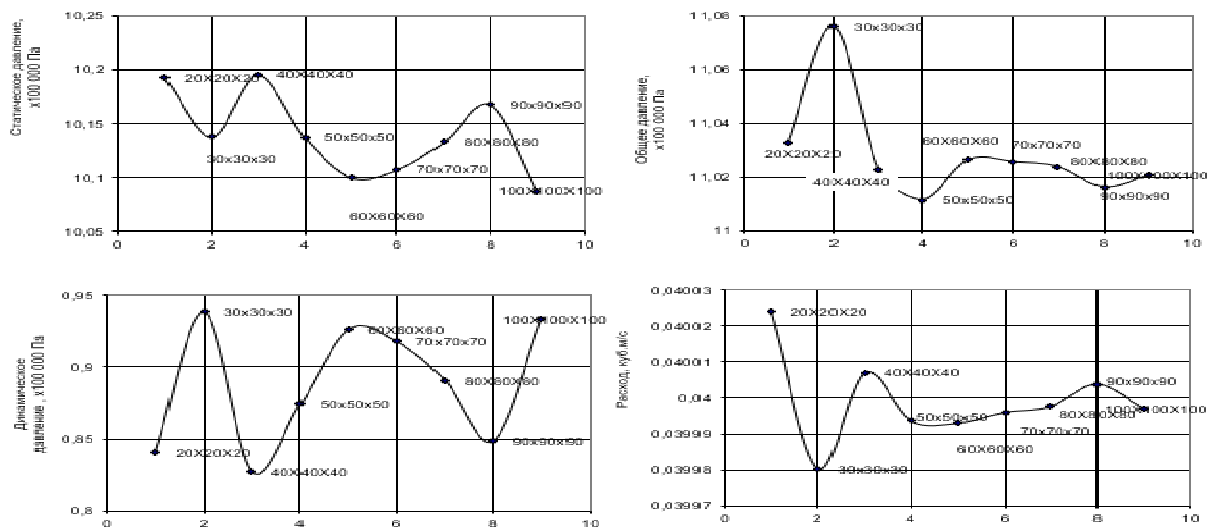


Рисунок 2 – Графики зависимостей параметров на выходе насоса от количества ячеек расчетной сетки для модели насоса без удлинения выходного патрубка

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

Количество ячеек расчетной сетки	Давление			Расход
	общее	статическое	динамическое	
50×50×50	-0,10	6,12	-332,97	-0,02
60×60×60	-0,24	6,46	-358,74	-0,02
70×70×70	-0,23	6,39	-354,59	-0,01
80×80×80	-0,22	6,16	-341,05	-0,01
90×90×90	-0,15	5,84	-320,26	0,01
100×100×100	-0,19	6,58	-362,04	-0,01

В процентах

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 отверстии.

С этой целью увеличивалась длина выходного патрубка, т. к. 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 $10 \times 16 \times 6$ до $100 \times 160 \times 60$ ячеек.

Анализ результатов этой серии показал, что увеличение выходного патрубка насоса существенно стабилизирует процесс сходимости результатов по статическому и динамическому давлению на выходе и 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 всё же существенно больше максимально допустимого значения.

Следует отметить, что при расчетной сетке $90 \times 144 \times 54$ ячейки наблюдается аномальный скачок статического, динамического и, как следствие, общего давления.

Поведение кривой аналогично тому, как если бы увеличение выходного патрубка не производилось вообще. 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 избавиться 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.

Анализ результатов расчета и отклонений параметров насоса на выходе показал, что при увеличенной на 0,5 м длине выходного патрубка модели насоса, процесс счета стабилизируется уже на расчетной сетке размером $50 \times 110 \times 30$ ячеек, а на расчетной сетке $60 \times 132 \times 36$ 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.

Заключение

С целью исключения погрешности при численном моделировании одноступенчатых центробежных насосов с диаметром рабочего колеса 0,3–0,5 м на основе системы дифференциальных уравнений в частных производных типа Навье-Стокса с применением метода конечных объемов в качестве численного метода решения задачи, обусловленной пересечением вихрей потока границ расчетной области на выходном отверстии насоса, необходимо удлинять выходной патрубок не менее чем на 0,5 метра от выходного сечения.

При этом погрешность расчетов общего, статического и динамического давления, а также расхода на сетке $60 \times 132 \times 36$ ячеек не превышает 5 %.

Список литературы

- 1 **Суторьма, И. И.** Численный эксперимент при исследовании центробежных пожарных насосов / И. И. Суторьма, А. В. Лифанов, Д. М. Скидан // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – № 2 (2). – 2007. – Гомель : ГИИ МЧС Респ. Беларусь. – С. 18–27.
- 2 **Суторьма, И. И.** Математическая модель для исследования центробежных пожарных насосов / И. И. Суторьма, А. В. Лифанов // Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : ГИИ, 2008. – С. 75–76.
- 3 COSMOSFloWorks / А. А. Алямовский [и др.] // Компьютерное моделирование в инженерной практике. – СПб., 2005.
- 4 **Суторьма, И. И.** Адаптация численного метода решения к математической модели центробежного пожарного насоса / И. И. Суторьма, А. В. Лифанов // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – № 1 (3). – 2008. – Гомель : ГИИ МЧС Респ. Беларусь. – С. 90–96.

Получено 11.03.2020

I. I. Sutarma. Improving results accuracy numerical modeling centrifugal pumps.

Recommendations are obtained on dividing the computational domain when numerically simulating single-stage centrifugal pumps into two parts, with a fixed and rotating coordinate systems, the dimensions of the computational grid, and also the length of the pump outlet pipe to eliminate the effect of crossing the boundaries of the computational domain by vortex flows. The results of optimizing the accuracy of the results of calculating the static and dynamic pressures in the PN-40U pump cavity using the finite volume method to solve the mathematical modeling problem based on a system of partial differential equations of the Navier-Stokes type are presented.