

3. Гнатів Р.М. Експериментальне визначення пульсації дотичних напружень на стінці трубопроводу при перехідному режимі руху рідини/ Р.М. Гнатів// Промислова гідраліка і пневматика.- 2012.- №3(37).- С. 52-54.

УДК 621.671

Косторной С.Д. д.т.н., проф., **Косторной А.С.** к.т.н, **Хатунцев А.Ю.** к.т.н.,
Бондарев А.О.

ПАО “ВНИИАЭН” Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт атомного и энергетического насосостроения, г. Сумы, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ НАСОСЕ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В работе выполнено моделирование вихревого течения идеальной жидкости в рабочем колесе и спиральной камере центробежного насоса удельной быстроходности $n_s = 40-400$ с целью развития научно обоснованного метода проектирования проточной части и определения гидродинамических параметров для совершенствования энергетических и динамических характеристик на этапе проектирования. Рассчитаны мгновенные линии тока и вихревое поле в проточной части, исследовано их взаимное расположение. Построенное вихревое поле позволяет оценить потери из-за трения на поверхности и диссипации вихрей в потоке.

Ключевые слова: вихревое течение, идеальная жидкость, центробежный насос, метод граничных элементов.

Основоположником вихревых методов является метод дискретных вихрей для моделирования течений идеальной жидкости [1-3]. Метод был успешно применен для расчетов нестационарного обтекания тел со сходом вихревого следа на острых краях [4].

При моделировании течения жидкости в различных каналах, или замкнутых пространствах, вихревое распределение обычно считается конечным и распределенным на внутренней границе, на которой имеется тангенциальный разрыв вектора скорости. Величина скачка тангенциальной скорости определяется из интегрального уравнения, которое обеспечивает условие отсутствия течения через поверхность тела.

Постановка задачи

Решить прямую 3D задачу течения в центробежном насосе с учетом взаимного влияния элементов проточной части. Задача решается в дискретные моменты времени. Используется модель вихревой идеальной несжимаемой жидкости для стационарного течения:

$$\begin{aligned}(\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} &= \mathbf{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p, \\ \text{div} \mathbf{V} &= 0, \\ \text{rot} \mathbf{V} &\neq 0.\end{aligned}$$

Рассматривается течение в рабочем колесе центробежного насоса со спиральным отводом b и в ступени центробежного насоса.

Граничные условия:

- на поверхности проточной части S в контрольных точках с радиус-векторами \mathbf{r}_i , записанное в виде:

$$\mathbf{V}(\mathbf{r}_i) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{r}_i) = 4\pi \cdot f(\mathbf{r}_i), \quad (1)$$

где
 $f(\mathbf{r}_i) = 0$, на неподвижной поверхности;

$f(\mathbf{r}_i) = U_n$, на подвижной поверхности - проекция скорости движения поверхности S на нормаль к поверхности;

$f(\mathbf{r}_i) = V_{1n}(\mathbf{r}_i)$, известное распределение нормальной скорости во входном сечении, соответствующее заданному расходу;

$f(r_i) = V_{2n}(r_i)$, равномерное распределение нормальной скорости в выходном сечении, соответствующее заданному расходу;

- условие прилипания не задавалось.

Алгоритм решения прямой задачи методом граничных элементов

Поверхность рабочего колеса, диффузора и спиральной камеры, а также входное и выходное сечения представим непрерывной системой граничных особенностей - вихревых рамок [5, 6].

Поле возмущенных скоростей в произвольной точке проточной части рабочего колеса и в контрольных точках \mathbf{r}_0 на поверхности S определяется по формуле:

$$\mathbf{v}(\mathbf{r}_0) = \sum_{i=1}^N \gamma_i \mathbf{W}_i(\mathbf{r}_0). \quad (2)$$

где

N – общее количество рамок,

γ_i - интенсивность i -ой вихревой рамки,

$\mathbf{W}_i(\mathbf{r}_0)$ - вектор скорости, индуцируемый i -ой вихревой рамкой в точке радиусом вектором \mathbf{r}_0 .

В вихревой модели скорость от вихревой рамки вычисляется как поверхностный интеграл от вихревого диполя \mathbf{Y} [7, 8], равномерно распределенного по площади рамки S :

$$\mathbf{W}(r_0) = \frac{1}{4\pi} \int_S \frac{3[\mathbf{Y} \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)] - Y(r - r_0)^2}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^5} dS.$$

Для вихревой модели

$$\mathbf{rot} \mathbf{W}(r_0) = \int_S \mathbf{Y} \times \nabla \delta(r) dS \neq 0, \mathbf{div} \mathbf{W}(r_0) = 0.$$

Если ввести матрицу:

$$\mathbf{A} = \{a_{ij}\} = \{\mathbf{W}_i(\mathbf{r}_{0j})\}, i, j = 1..N$$

и вектор — матрицы:

$$\mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \dots \\ \gamma_N \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 4\pi \cdot f(r_{01}) \\ 4\pi \cdot f(r_{02}) \\ \dots \\ 4\pi \cdot f(r_{0N}) \end{bmatrix},$$

тогда (1) запишется в виде

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{\Gamma} = \mathbf{B}. \quad (3)$$

Равенство (3) рассматривается как система линейных алгебраических уравнений и используется для определения интенсивностей вихревых рамок $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N$ на S .

Определив интенсивности гидродинамических особенностей, по формуле (2) рассчитывается поле скоростей в любой точке проточной части, в том числе и в контрольных точках на твердых поверхностях.

Результаты проведенного численного эксперимента, выполненного в программном обеспечении собственной разработки на основе метода гидродинамических особенностей [5-6], представлены на рис. 1-4.

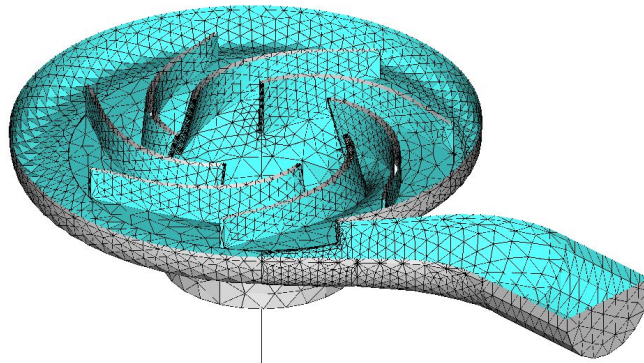


Рис. 1 – Расчетная сетка рабочего колеса и спиральной камеры центробежного насоса для метода граничных элементов

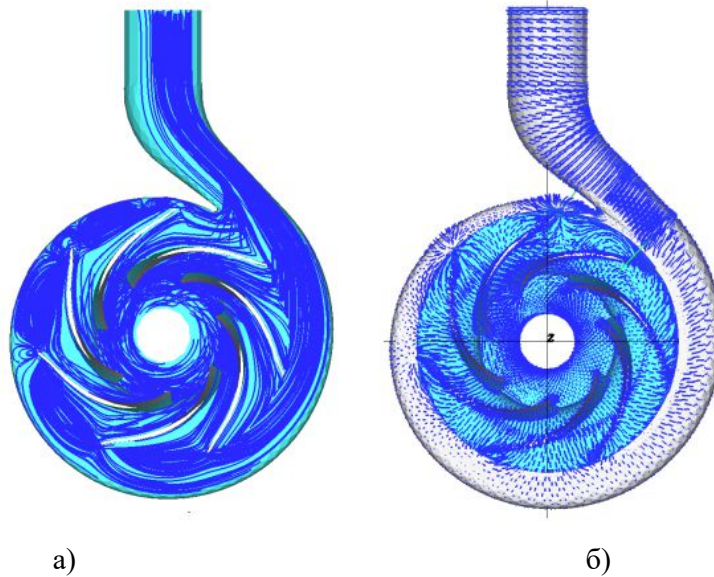


Рис. 2 – Расчетные линии тока а) и вихревое поле б) в рабочем колесе и спиральной камере центробежного насоса

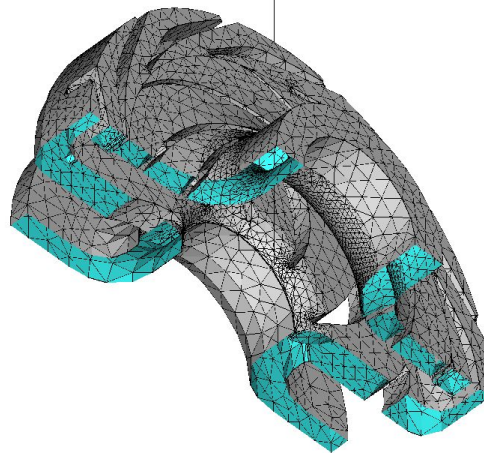


Рис. 3 – Расчетная сетка для ступени центробежного насоса

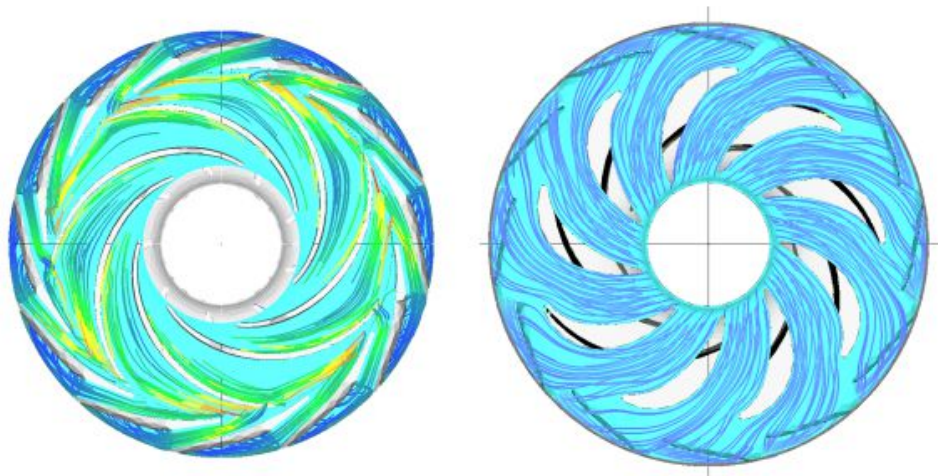


Рис. 4 – Расчетные линии тока в диффузоре центробежного насоса

Построенное вихревое поле $\Gamma = \text{rot}V \neq 0$ позволяет рассчитать напряжение трения на поверхности [8, 10] и соответственно оценить потери из-за трения:

$$\tau_{mp} = -\rho \int_{\Gamma} I_w r(l), r(\Gamma) \times d\Gamma$$

Потери энергии из-за диссипации вихрей в потоке [10]:

$$N_{disc} = 4\mu \iiint_L (\Gamma_x^2 + \Gamma_y^2 + \Gamma_z^2) d\tau$$

Список литературы

1. *Rosenhead, L. Formation of vortices from a surface of discontinuity* / L. Rosenhead // Proc: Roy. Soc. – 1931. – Series A, Vol. 134. – P. 170–192.
2. *Моргунов, Г.М. Разработка численного метода пространственного безвихревого потока в гидромашинах* / Г.М. Моргунов // Тр. МЭИ. Исследование гидромашин. – 1975. – Вып.25. – С. 38-49.
3. *Лифанов, И.К. О методе дискретных вихрей* / И.К. Лифанов // ПММ. –1979. –Т. 43. –№1. – С. 184-188.
4. *Белоцерковский, С.М. Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью* / С.М.Белоцерковский, М.И.Ништ. – Москва : Наука, 1978. – 351 с.
5. *Косторной, С.Д. Математическое моделирование и расчет трехмерного невязкого течения жидкости в лопастных гидромашинах осевого типа с целью определения их силовых и моментных характеристик* / С.Д. Косторной, А.К. Давиденко // Вест. Нац. Техн. Ун-та Украины «Киев. политехн. ин-т»: серия «Машиностроение». – 1999.– № 36. – Т. 2. – С. 487-494.
6. *Косторной, С.Д. Расчет пространственного потока в рабочем колесе поворотного-лопастных гидротурбин осевого типа. Часть 1 - Моделирование пространственного течения* / С.Д. Косторной, А.К. Давиденко // Вісник Сумського державного університету. — 1996. — №2(6). — С. 41-46.
7. *Сеффмен, Ф. Дж. Динамика вихрей* / Ф. Дж. Сеффмен. – Москва : Науч. Мир, 2000. – 367 с..
8. *Дынникова, Г.Я. Расчет трехмерных течений несжимаемой жидкости на основе дипольного представления завихренности.* // ДАН. 2011. Т. 437, №1. С.35-38.
9. *Андронов, П.Р. Вихревые методы расчёта нестационарных гидродинамических нагрузок* / П.Р.Андронов, С.В.Гувернюк, Г.Я.Дынникова. – Москва : Изд-во Моск. ун-та, 2006. – 184 с.
10. *Косторной, С.Д. Создание замкнутых математических моделей расчета потерь механической энергии в проточной части гидравлических машин.* Вестник СумГУ.- Сумы.- 2004.- №2(61).- С. 5-13.