

ПРИКЛАДНА ГІДРОАЕРОДИНАМІКА І ТЕПЛОМАСООБМІН

УДК 621.224

ЧИСЛЕННИЙ РАСЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОТОКА В СПИРАЛЬНОЙ КАМЕРЕ

С.Д.Косторной, проф.; А.Ю.Хатунцев, асп.

Спиральная камера является одним из основных элементов проточной части гидравлических машин. Она предназначена для организованного подвода жидкости к рабочему колесу или отвода от него и изменения величины циркуляции до требуемых значений.

Размеры спиральной камеры гидротурбины определяют поле скоростей как в самой камере, так и в направляющем аппарате и рабочем колесе. Экспериментально установлено, что гидравлические потери в спиральной камере гидротурбины имеют относительно небольшую величину и оказывают незначительное влияние на баланс энергии в машине. Однако неудачная геометрия камеры, не вызывая заметного роста местных потерь, может привести к существенной неравномерности поля скорости на входе в статор, направляющий аппарат и рабочее колесо, к повышенным потерям в этих и последующих рабочих органах и увеличению гидродинамических нагрузок на них. Экспериментальные исследования показывают [1-4], что спирали, используемые в турбинах, не обеспечивают осевой симметрии потока на выходе. Неравномерность скорости по абсолютной величине достигает 20-30 % в спиралях с углом охвата 345 градусов. В камерах с неполным углом охвата неравномерность еще более высокая.

В спиральных отводах лопастных насосов поля скорости и давления нестационарны. Осредненные по времени параметры потока зависят от геометрии отвода и от режима работы насоса. Отвод оказывает существенное влияние на характеристику насоса. В насосах со спиральным отводом отсутствует окружная равномерность потока на выходе из колеса и на входе в отвод во всех режимах работы. Если в оптимальном режиме неравномерность может быть сравнительно небольшой, то при отклонении от этого режима ее значение существенно возрастает. Наличие неравномерности потока на выходе из колеса или перед колесом оказывает решающее влияние на радиальную силу, действующую на рабочее колесо и опоры вала.

Методы определения геометрии спиральной камеры, применяемые при проектировании, базируются на ряде предположений о характере и структуре потока. Поэтому приобретает практическое значение разработка метода расчета течений в спиральных камерах гидромашин для трехмерного потока на основе приближенной математической модели, которая базируется на объективных законах механики жидкости, на наблюдениях и обобщении экспериментальных данных о действительной структуре потока в спиральной камере насосов и турбин.

Обобщая результаты исследования поля скоростей в спиральных камерах, можно считать, что поток в спиральной камере не обладает осевой

симметрией, имеют место зоны сложного возвратного течения и течения типа парного вихря. Полная энергия с точностью до 1-3 % (точность проведения эксперимента) сохраняется постоянной для всех точек. Так как течение в спиральной камере, статоре и направляющем аппарате происходит без передачи энергии, а изменение энергии имеет место из-за потерь, то в невязком ядре потока можно считать $\text{Grad } E = 0$, где E - полная механическая энергия жидкости. Тогда в соответствии с уравнением Громеки-Ламба $\Omega^* \nabla^2 V = -\text{Grad } E = 0$, в ядре потока течение должно быть либо потенциальным, либо винтовым, когда завихренность в область течения вносится извне через входное сечение. Проанализированные исследования обнаружили в радиальных сечениях вторичное течение типа парного вихря, когда $\Omega_U \neq 0$. Однако это течение, по-видимому, имеет вязкую природу и появляется только в спиральной части камеры. Винтового движения в ядре потока на подводящем участке и во входном сечении турбинных камер не установлено. Поэтому есть основания принимать для невязкого ядра течение потенциальным.

Учитывая имеющиеся исследования зондирования потока, задачу расчета трехмерного потенциального потока идеальной жидкости обычно сводят к серии двумерных задач [5,6]. Вследствие того, что по ширине (высоте) спирали вдоль координаты Z компонента скорости V изменяется слабо и в симметричных спиралях близка к постоянной величине, а изменение радиальной составляющей V_r от Z обусловлено вторичным течением, и для невязкого ядра приближенно можно принять $V_r(Z) = \text{const}$, то трехмерное течение в спирали сводят к двумерному для осредненного по координате Z поля скорости. На поверхности тока осредненных скоростей компонента скорости по оси Z равна нулю. Изложенное выше показывает, что задача определения скорости в плоском сечении спиральной камеры $Z = \text{const}$ может быть сведена к задачам Дирихле или Неймана или к задаче определения аналитической функции $V(Z) = V_{x_i} V_y$ по заданному значению скорости на границе контура. Так, в работе [5] получено интегральное уравнение для обобщенного комплексного потенциала скорости, которое положено в основу численного решения двумерной задачи расчета скорости в спиральной камере в [6], а в [7] для решения аналогичной задачи использовано уравнение относительно нормальной скорости на границе контура. В данной работе на основе модели потенциального течения решена трехмерная задача методом дискретных вихрей.

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ СПИРАЛЬНОЙ КАМЕРЫ

Поверхность спиральной камеры и прилегающие к ней поверхности направляющего аппарата, камеры рабочего колеса, включая диффузор отсасывающей трубы и корпус рабочего колеса с обтекателем, а также входное и выходное сечения, представим непрерывной системой четырехугольных рамок, стороны которых совместим с вихревыми отрезками. Считая распределение нормальной скорости в сечениях известным, из условия непротекания твердой поверхности получим систему линейных алгебраических уравнений относительно циркуляций вихревых рамок. Для вихревого отрезка общего положения с точками $M_1(x_1, y_1, z_1)$, $M_2(x_2, y_2, z_2)$ на концах проекции индуцируемой им скорости на оси

координат в точке $M(x, y, z)$ вычисляются согласно формуле Био-Савара по следующим формулам:

$$Vr_x = b \cdot a_x; Vr_y = b \cdot a_y; Vr_z = b \cdot a_z, \quad (1)$$

где

$$a_x = (y - y_1)(z_2 - z_1) - (z - z_1)(y_2 - y_1); a_y = (z - z_1)(x_2 - x_1) - (x - x_1)(z_2 - z_1);$$

$$a_z = (x - x_1)(y_2 - y_1) - (y - y_1)(x_2 - x_1);$$

$$b = \frac{1}{a^2} \left[\frac{(x - x_1)(x_2 - x_1) + (y - y_1)(y_2 - y_1) + (z - z_1)(z_2 - z_1)}{r_{01}} \right] -$$

$$- \frac{1}{a^2} \left[\frac{(x - x_2)(x_2 - x_1) + (y - y_2)(y_2 - y_1) + (z - z_2)(z_2 - z_1)}{r_{02}} \right],$$

$$a^2 = a_x^2 + a_y^2 + a_z^2,$$

$$r_{01} = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2}, \quad r_{02} = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2},$$

а проекции индуцируемой скорости от вихревой рамки определяются суммированием одноименных составляющих от каждого отрезка рамки.

Граничное условие непротекания для расчетных точек T_i с радиус-векторами $r_{oi}(i=1, 2, \dots, N_s)$, расположенных в центре вихревой рамки, записывается следующим образом:

$$\vec{V}(\tau, rs) * \vec{n}(\tau, rs) = V_x * \cos(n_i, x) + V_y * \cos(n_i, y) + V_z * \cos(n_i, z), \quad (2)$$

где $\vec{V}(\tau, rs)$ - суммарная скорость в расчетной точке;

$\vec{n}(\tau, rs)$ - вектор нормали к поверхности.

Косинусы углов, которые образует в любой расчетной точке нормаль с осями координат к плоскости, проходящей через три точки $M_0(x_0, y_0, z_0)$, $M_1(x_1, y_1, z_1)$, $M_2(x_2, y_2, z_2)$, определяются следующими выражениями:

$$\cos(n, x) = \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}},$$

$$\cos(n, y) = \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}},$$

$$\cos(n, z) = \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}},$$

где

$$A = (z_2 - z_0)(y_1 - y_0) - (z_1 - z_0)(y_2 - y_0), \quad B = (x_2 - x_0)(z_1 - z_0) - (x_1 - x_0)(z_2 - z_0),$$

$$C = (y_2 - y_0)(x_1 - x_0) - (y_1 - y_0)(x_2 - x_0).$$

Если ввести матрицу индуцируемых вихревыми рамками скоростей A и матрицу-столбец вектора скорости от заданных скоростей во входном и выходном сечениях B , то (2) запишется в матричном виде

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

Равенство (3) рассматривается как система линейных алгебраических уравнений для определения циркуляций вихревых рамок.

После решения системы уравнений (3) скорость в любой точке области течения вычисляется по вышеприведенным формулам.

Пример расчета. В качестве примера расчета трехмерного потока в спиральной камере взята проточная часть реальной гидротурбины со спиральной камерой круглого поперечного сечения с углом охвата 345

градусов. Во входном и выходном сечениях спиральной камеры нормальная скорость задавалась в 18 точках. Все геометрические размеры проточной части приняты согласно чертежам. Процесс описания проточной части вихревыми рамками, расчет элементов матрицы и векторного поля скоростей в сечениях $F_i=const$ и $Z=const$ выполняются в автоматизированном режиме на ЭВМ типа IBM 586 в среде Borland Pascal 7.0. Время расчета циркуляций вихревых рамок составляет 1 мин, а расчета поля скоростей в одном сечении - 15 сек. Ниже на рисунках, полученных на матричном принтере, по расчетным значениям составляющих скорости V_x , V_y , V_z стрелками изображены направления скорости в соответствующих сечениях спиральной камеры, а точками - области течения, в которых скорости в пять раз меньше величины скорости во входном сечении. Сечение Z_0 соответствует миделевому сечению, которое совпадает с серединой высоты направляющего аппарата, равной 876 мм. Z_{400} - на 400 мм выше от Z_0 . Сечения спирали $F_i=const$ отсчитываются в градусах от зуба спирали по часовой стрелке, как и на чертеже. Результаты расчета поля скоростей в сечениях $Z=const$ сравнивались с решением аналогичной двумерной задачи в постановке [7] и с материалами зондовых испытаний для спиральной камеры аналогичной формы в сечениях $F_i=const$, которые кратко изложены во вступительной части статьи.

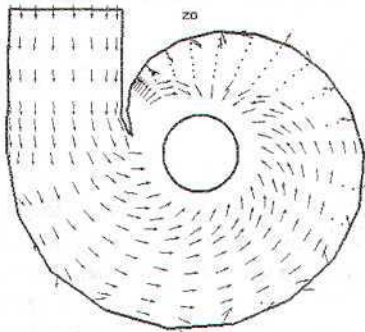


Рисунок 1

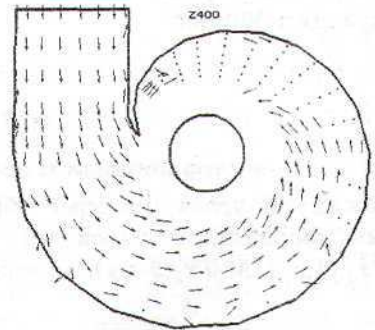


Рисунок 2

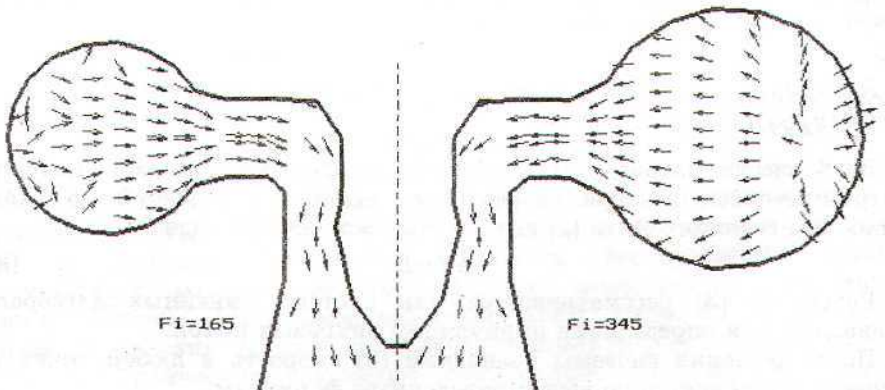


Рисунок 3

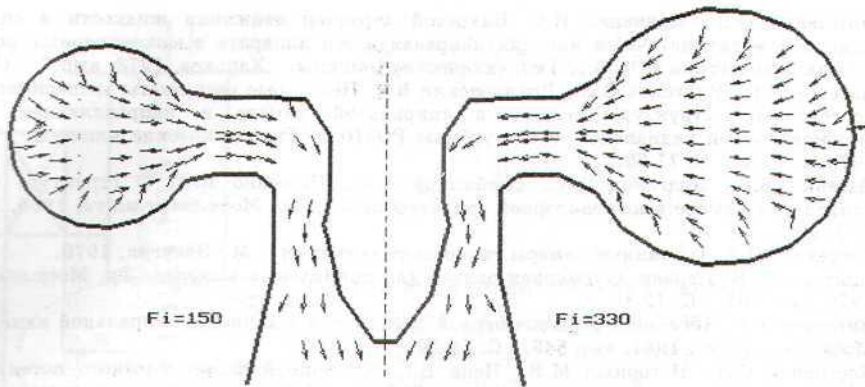


Рисунок 4

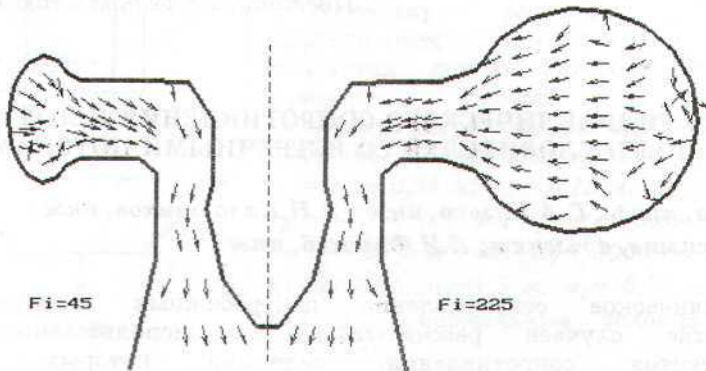


Рисунок 5

На основе полученных результатов расчета, которые частично отображены на представленных рисунках, возможно сделать следующие утверждения.

1 Поток в реальной спиральной камере круглого поперечного сечения с углом охвата 345 градусов является трехмерным. Неравномерность поля скоростей в сечениях $Z=const$ достигает до 50 %, имеются зоны с обратным течением.

2 В сечениях $Fi=const$ поток неравномерный. В отдельных сечениях имеют место зоны обратного от основного направления движения жидкости, что может служить основанием для предположения о существовании в спиральной камере сложных возвратных течений и течений типа парного вихря. Практически во всех исследованных сечениях имеет место симметрия поля скорости относительно миделевого сечения $Z=0$.

3 Результаты расчетов поля скорости в сечении $Z=0$ количественно и качественно согласуются с аналогичными расчетами по двухмерной задаче.

SUMMARY

Shown the algorithm of the digital decision of 3D the task of potential flood in espiral camera by the method of hidrodinamic characteristics and the stand-alone results of the calculation of the margine of velocities.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потетенко О.В., Панченко Н.С. Вихревой характер движения жидкости в спиральной камере и медилопаточных каналах направляющего аппарата высоконапорных радиально-осевых гидротурбин РО500 // Гидравлические машины. - Харьков, 1973, вып.7. - С. 3-9.
2. Ласенко В.Е., Булгаков В.А., Дранковский В.Е. Некоторые результаты экспериментального исследования структуры потока в спиральной камере и направляющем аппарате высоконапорной радиально-осевой турбины РО310 // Гидравлические машины. - Харьков, 1976, вып.10. - С. 77-80.
3. Ласенко В.Е., Булгаков В.А., Олейников А.А., Пащенко Ю.Г. О структуре потока в спиральной камере высоконапорной гидротурбины // Тр. Моск.энерг.ин-та, 1986, вып 98. - С. 83-89.
4. Михайлов И.Е. Турбинные камеры гидроэлектростанций. - М.: Энергия, 1970.
5. Виктор Г.В. Первая двумерная задача для спиральных камер // Тр. Моск.энерг.ин-та, 1979, вып 404. - С. 12-18.
6. Виктор Г.В. Численное решение первой двумерной задачи для спиральной камеры // Тр. Моск.энерг.ин-та, 1981, вып 543. - С. 15-22.
7. Косторной С.Д., Нагорный М.В., Неня В.Г. Численный расчет плоского потенциального течения жидкости в каналах произвольной формы // Гидравлические машины. - Харьков, 1988, вып.22. - С. 59-62.

Поступила в редколлегию 17 мая 1999 г.

УДК 621.928.9

РАСЧЕТ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ СО ВСТРЕЧНЫМИ ПОТОКАМИ

*А.Р.Якуба, проф.; С.А.Кузько, инж.; А.Н.Калашников, инж.;
В.М.Герасимив, адъюнкт; Л.И.Фарисей, инж.*

Гидравлическое сопротивление центробежных пылеуловителей в большинстве случаев рассчитывается с использованием опытных коэффициентов сопротивления, величина которых определяется конструкцией пылеуловителя. Такой метод является оценочным, он не приемлем для новых типов аппаратов.

Метод теоретического расчета сопротивления циклонных пылеуловителей впервые предложен в 50-х годах немецким исследователем Вальтером Бартом [1,2]. Но такой метод, с одной стороны, рекомендован применительно к циклонам, а, с другой стороны, его применение сталкивается с большими трудностями из-за отсутствия в период создания метода моделей расчета поля скоростей в аппарате. Предложенные в [3,4] методы расчета характеристических скоростей носили эмпирический характер, искажающий саму сущность теоретического подхода.

Разработанные авторами статьи методы расчета поля скоростей вихревых камер позволяют упростить расчеты циклонов и впервые в инженерной практике применить метод В. Барта для прогнозирования сопротивления аппаратов со встречными закрученными потоками (АВЗП) [5].

Схема АВЗП представлена на рисунке. Запыленный газ подается в виде двух потоков, направленных навстречу один другому. Большая часть (2 части) подается сверху и называется вторичным потоком (расход 2ч.); меньшая часть (1ч.) подается снизу. Образующий совместный поток имеет более равномерное распределение скоростей и давлений по высоте пылеуловителя и позволяет более эффективно улавливать частицы пыли. Концепция В. Барта состоит в отдельных определениях сопротивления