

## РАЗРАБОТКА ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*А.С. Косторной, Н.С. Мартынова\**

*ОАО «СНПО им. Фрунзе», г. Сумы;*

*\*Сумский государственный университет, г. Сумы*

*Рассматривается подход к проектированию проточной части центробежного насоса на основе метода математического моделирования течения жидкости и решения обратной задачи.*

*В условиях значительного сокращения финансирования научных исследований и фондов развития производства экспериментальные работы по созданию новых технологий практически неосуществимы. В связи с этим задача развития и совершенствования численных методов исследования течений жидкости становится особенно актуальной, так как дальнейшее совершенствование энергетических и эксплуатационных характеристик лопастных гидравлических машин возможно только в результате теоретических и опытных исследований, создающих предпосылки для обоснованных методов расчета и проектирования.*

### ВВЕДЕНИЕ.

На современном этапе развития насосостроения дальнейшее повышение его эффективности при достигнутом уровне коэффициента полезного действия в условиях рыночных отношений должно основываться на развитой теории и методах гидродинамических расчетов на базе ЭВМ. Обеспечение высокой надежности работы и экономичности, сокращения сроков проектирования и снижения стоимости изготовления, уменьшения металлоемкости конструкций и создания образцов машин, конкурентоспособных на международном рынке, приводят к необходимости применения новых схем компоновки проточных частей. Этот комплекс проектных задач требует выполнения физического эксперимента, который весьма трудоемок и дорог. Перспективным для этих целей является метод математического моделирования реальных физических явлений на ЭВМ и постановка вычислительного эксперимента, особенно эффективного в тех случаях, когда он сочетается с аналитическими подходами, физическим экспериментом и автоматизированной подготовкой исходных данных и обработки результатов расчета. Появление нового, весьма мощного и общего метода исследований – вычислительного эксперимента – как никогда ранее тесно связало физическое содержание задачи, математическую формулировку ее и численный метод решения, учитывающий особенности ЭВМ.

Наиболее эффективным оказались естественные описания явления, когда изучается весь процесс его развития. Доминирующими стали нестационарные и дискретные подходы.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пуск и остановка, работа на нерасчетных режимах с максимальными и минимальными нагрузками, а также процесс регулирования рабочего режима, неточность изготовления и сборки лопастных систем и элементов проточной части гидравлической машины происходят на режимах, значительно отличающихся от оптимального, сопровождаются отрывом потока, кавитацией, нестационарными явлениями, повышенным уровнем шума и кризисом сопротивления.

В турбомашине газ или несжимаемая жидкость движутся через систему неподвижных и вращающихся гидродинамических решеток. При периодических движениях жидкости с развитием интенсивного вихревого

следа, а также в процессе дросселирования на входе многоступенчатых осевых компрессоров и насосов течение рабочей жидкости сопровождается целым рядом сложных нестационарных явлений, связанных со срывом потока. Во многих важных для практики случаях наблюдается нелинейная зависимость гидроаэродинамических характеристик лопастных систем от кинематических параметров, характеризующих движение. Это явление называют гистерезисом. Оно сопровождается неоднозначностью гидродинамических характеристик и зависит не только от мгновенных значений кинематических параметров, но и от предыстории работы машины. Влияние предыстории работы машины связано с проявлением нелинейных эффектов, обусловленных процессами деформации, разрушения и восстановления вихревой пелены.

Приведенный далеко не полный перечень проблем, которые необходимо решать при проектировании и изготовлении, указывает на все возрастающую практическую важность теоретических работ, направленных на более полное и точное определение полей скоростей и давления в проточной части на всех режимах работы проектируемой машины.

Ясно, что при имеющихся достижениях последующее улучшение энергетических и динамических характеристик гидравлических машин представляет собой сложную комплексную научно-техническую задачу, которая должна решаться путем совместных экспериментальных расчетно-теоретических исследований рабочего процесса этих машин в процессе их изготовления.

В данной работе предлагается методика проектирования проточной части центробежного насоса, основанная на решении обратной задачи рабочего колеса и прямой 3D-задачи в нестационарной постановке с учетом обтекания всех элементов проточной части, плохобтекаемых тел типа лопатки рабочего колеса и предистории движения, основанная на методе гидродинамических особенностей.

В качестве объекта исследования выбран химический насос со спиральным отводом, разработанный и изготовленный на ОАО «СНПО им. Фрунзе». Параметры насоса: диаметр рабочего колеса  $D_2=160$  мм, количество лопастей  $z=5$ , подача  $Q_{\text{опт}}=12,5$  м<sup>3</sup>/ч, напор  $H=32$  м, частота вращения  $n=2900$  об/мин.

На рис. 1 представлена расчетная схема проточной части.

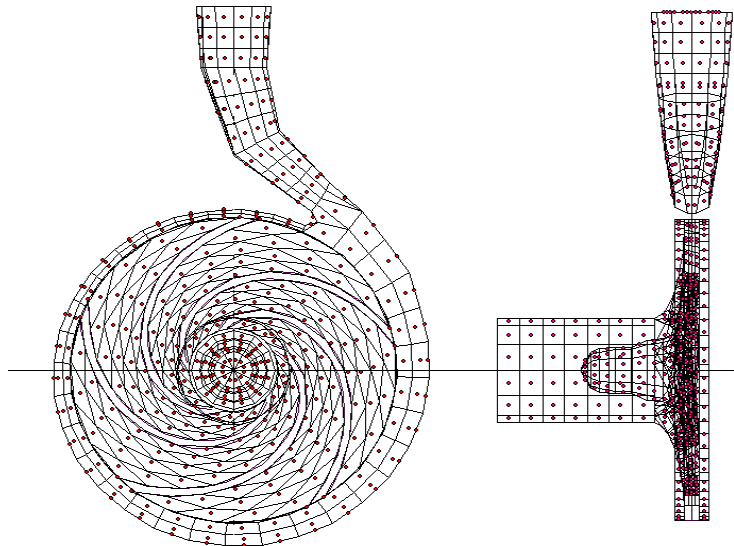


Рисунок 1 – Расчетная схема

## АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

При решении обратной задачи применен метод профилирования лопасти рабочего колеса в осесимметричном потоке идеальной жидкости на заданную форму потока [1], которая принималась из условия минимума кинетической энергии жидкости в проточной части и отсутствия условий для развития вторичных течений. Принятая форма течения потока в рабочем колесе, по нашему мнению, наиболее предпочтительна с точки зрения минимума потерь трения (профильных потерь). В качестве граничных линий тока меридианного сечения рабочего колеса основного и покрывающего дисков принимались линии быстрейшего ската - брахистохроны, которые соединяют две заданные точки А и В, лежащие на входной и выходной кромках, но не на одной вертикальной прямой, и обладающие тем свойством, что материальная точка (частица идеальной жидкости) переместится по этой линии из точки А в точку В за кратчайшее время. Контуры наружных поверхностей основного и покрывающего дисков принимались как минимальные поверхности вращения (цепная линия), что должно обеспечивать минимум потерь трения в боковых пазухах. Меридианный поток и закон распределения циркуляции на исходной линии тока принимались согласно рекомендациям работы [1] и для насосов низкой быстроходности.

## ОБЩИЙ АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ

Задачу о течении жидкости следует решать в полной нестационарной постановке, полагая, что процесс начинается при  $\tau=0$  и  $\rho=\text{const}$ .

На поверхности обтекаемого тела  $S$  должно выполняться условие о непротекании. Вне тела параметры жидкости должны удовлетворять уравнениям Эйлера и неразрывности.

Поверхность обтекаемого тела заменяется, как это принято, дискретными гидродинамическими особенностями. Взяв в качестве основной гидродинамической особенности вихревой отрезок постоянной циркуляции, строится расчетная вихревая система (рис.1). Положения суммарных вихрей на обтекаемой поверхности, первого свободного вихря и расчетных точек выбираются в соответствии с общими положениями метода [ 2 ].

Если обеспечены замкнутость вихревых систем и выполнение теорем о постоянстве циркуляций во времени, то поле скоростей, вызванное системой, потенциально и будет удовлетворять всем уравнениям гидродинамики. Остается обеспечить выполнение граничных условий на  $S$  и условия Чаплыгина-Жуковского о конечности скоростей на выходных кромках.

Скорости от вихревого отрезка зависят от координат начала и конца вихревого отрезка и координат расчетной точки. Как указывалось, тело и след заменяются системой вихревых отрезков. Часть их, расположенных на теле, моделирует суммарные вихри (свободные и присоединенные). Положения этих вихрей и первых свободных фиксированы, а циркуляции  $\Gamma_i^*$  по времени меняются. Циркуляции свободных вихрей после схода в поток на втором расчетном моменте времени и в процессе развития следа принимаются постоянными .

Общее число вихрей на обтекаемой поверхности (вместе с  $m$  первыми свободными) определяется расчетной схемой проточной части (рис.1), а число свободных вихрей, движущихся вместе с потоком на каждом дискретном расчетном шаге по времени, будет зависеть от количества лопастей рабочего колеса, формы их выходной кромки, наличия возможных зон отрывного обтекания поверхности проточной части и количества расчетных шагов по времени.

Циркуляции вихревых отрезков на обтекаемой поверхности определяются решением системы уравнений, записанной из условия непротекания (1) поверхности в каждой расчетной точке в расчетный момент времени с учетом положения каждого элемента поверхности

$$\bar{W} \cdot \bar{n} = \bar{W}^* \cdot \bar{n} = 0, \quad (1)$$

где

$$\bar{W} = \bar{i}W_x + \bar{j}W_y + \bar{k}W_z,$$

$$W^* = W + U,$$

$$\bar{n} = \bar{i} \cos nx + \bar{j} \cos ny + \bar{k} \cos nz.$$

Здесь  $W$ ,  $U$ ,  $W^*$  - скорости абсолютного, переносного и относительного движения поверхности;  $\bar{n}$  - единичная нормаль к поверхности тела.

Важное значение при решении прямой задачи имеет расчет вихревой структуры турбулентного следа (определение положения свободных вихрей, моделирующих ее границы). Пусть  $i$  – номер свободного вихря, движение которого изучается. Изменение координат его начала и конца (индексы 1 и 2) во времени описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} dx_1^i &= W_{x1}^i d\tau; & dy_1^i &= W_{y1}^i d\tau; & dz_1^i &= W_{z1}^i d\tau; \\ dx_2^i &= W_{x2}^i d\tau; & dy_2^i &= W_{y2}^i d\tau; & dz_2^i &= W_{z2}^i d\tau; \end{aligned} \quad (2)$$

Расчет обтекания тела в нестационарной постановке содержит два основных взаимосвязанных этапа решения систем уравнений о непротекании тела для неизвестных циркуляций  $\Gamma_i^*$  и выстраивание вихревых структур с помощью соотношений (2). Строго говоря, то и другое должно осуществляться совместно, однако обычно это делается последовательно с задержкой всякий раз на один временной шаг. При известных положениях свободных вихрей находятся коэффициенты уравнений о непротекании поверхности тела, а затем  $\Gamma_i^*$ . После этого по формулам определяются все индуцируемые от каждой гидродинамической особенности скорости и из (2), обычно методом Эйлера, находят новые положения свободных вихрей. Заметим, что свободные вихри на каждом временном шаге располагаются на выходной кромке.

При численной реализации алгоритма решения задачи отрывного обтекания тел с развитием вихревого следа изложенным методом используется следующий способ регуляризации численных расчетов.

В процессе обтекания тел возможно возникновение таких режимов течения, когда отдельные участки указанных свободных вихревых пелен оказываются расположенными близко к обтекаемой поверхности или друг к другу, а также проникают сквозь неё. В этом случае вычисленное по формуле Био-Савара значение скорости, индуцируемое указанными свободными вихрями, стремится к бесконечно большому значению. В этих случаях выполняется регуляризация процесса ее вычисления путем уменьшения расчетного шага по времени, ограничения величины скорости или объединения вихревых особенностей [6].

Решение указанных задач на ЭВМ открывает новые возможности при описании турбулентного течения в данной области. Одной из

краеугольных при этом оказывается проблема правильного понимания и описания механизма турбулентного перемешивания. В настоящее время сложилось общепринятое представление о турбулентности как иерархии вихрей разных порядков и о двух принципиально разных видах турбулентности: крупномасштабной и мелкомасштабной. При этом первый вид соответствует характерным размерам вихревых образований порядка течения в целом, а второй - существенно меньшим. Параметры крупномасштабной турбулентности определяются конкретными условиями течения – формой обтекаемого тела и состоянием внешней среды, а характеристики мелкомасштабной турбулентности в значительной степени описываются более сложными закономерностями. Первый вид турбулентности в основном определяется силами инерционной природы. Поэтому для достаточно больших чисел Рейнольдса вязкостью среды при анализе ближнего следа или участка течения можно пренебречь. Изучение мелкомасштабной турбулентности и диффузии вихрей необходимо производить с учетом сил вязкости.

Для понимания явления и построения его эффективного математического описания (математической модели турбулентности) принципиальное значение имеет вопрос о природе турбулентности, о главном ее источнике. Мы придерживаемся следующей концепции. Основным источником турбулентных движений являются вихри. Турбулентное течение представляет собой существенно нестационарное движение жидкости, порожденное потерей устойчивости и распадом упорядоченных вихревых образований-пелен, превращением их в вихревые ансамбли. Последние, двигаясь вместе со средой, видоизменяются, вращаются, захватывают друг друга и распадаются, образуя как новые макроструктуры, так и выделяя мелкие вихри. Изучение турбулентности связано с двумя крупными задачами. В первой рассматривают процесс образования вихрей, выявляют и моделируют причину, генерирующую вихри, рассчитывают их появление и начальный этап развития. Во второй проводится анализ «жизни» этих вихрей, моделируют их движение, потерю устойчивости, образования новых устойчивых форм (ансамблей), превращения крупных ансамблей в мелкие, диффузии вихрей и т.д. Обе задачи, конечно, взаимосвязаны. Они базируются на изучении разных сторон проблемы.

Основные механизмы зарождения и появления вихрей в изучаемых гидродинамических задачах таковы:

1 Образование вихревых пелен, связанное с огибанием острых кромок и изломов на поверхности обтекаемого тела при местных дозвуковых скоростях течения. Жидкость не может плавно огибать их, что можно объяснить и с позиции идеальной и вязкой среды. В первом случае возникнут бесконечные скорости и разряжения, во втором – предпосылки для отрыва пограничного слоя. Здесь необязательно привлекать модель вязкой среды для моделирования процесса образования вихрей.

2 Образование вихревых следов, вызванное отрывом пограничного слоя с поверхности гладкого тела. Если на теле возникли условия, когда пограничный слой уже не может далее развиваться и существовать и он отрывается от тела, то в поток за телом сходит система вихрей. Для описания этого явления требуется как минимум модель идеальной среды и пограничного слоя.

В рассмотренной выше схеме турбулентное течение моделируется с помощью свободных вихрей. По мере развития течения их число возрастает и может достигать многих тысяч. При этом на каждом расчетном шаге в поток сходит  $m$  свободных вихрей, так что в расчетный момент  $t$  в уравнениях  $i = 1, 2, 3, \dots, m \cdot t$ . Одно это говорит о тех больших

возможностях, которыми обладает модель для описания турбулентных характеристик потока и следа.

Полный математический анализ системы (2) весьма сложен, тем более что она, строго говоря, решается совместно с (1). Однако логический анализ целого ряда численных экспериментов позволяет понять многие качественные особенности получающихся решений. Укажем некоторые из них. Прежде всего отметим, что модель явления обладает определенными эвристическими свойствами типа «искусственный интеллект». Механизм явления, заложенный в схеме, постановке задачи и алгоритме решения, начинает жить и проявляться сам, уже без участия исследователя. Так, на концах тонких вихревых поверхностей индуктивные скорости обращаются в бесконечность. Дискретная модель не допускает этого: поверхности сворачиваются в спирали, образуя боковые и носовые жгуты, начальный вихрь Прандтля и т.д.

Автоматически в процессе установления выявляется предельная структура следа. Она может быть одного из трех типов: стационарной, периодически меняющейся во времени или обладающей нерегулярной временной зависимостью. Примером стационарных структур могут служить боковые жгуты на крыльях при безотрывном обтекании. Периодические вихревые структуры типа дорожек Кармана наблюдаются при поперечном обтекании пластины и кругового цилиндра. Сложные, так называемые когерентные структуры образуются при истечении струи в затопленное пространство.

Еще одно проявление эвристических возможностей рассматриваемого подхода связано с выделением устойчивых вихревых структур. Как известно, никаким периодическим построением точечных дискретных вихрей нельзя обеспечить устойчивость вихревой дорожки Кармана. Однако модель нашла выход в рамках своих возможностей: в процессе численного формирования вихревого следа образовались сгустки конечных размеров, обладающие устойчивостью. Кроме того, выявлен второй устойчивый режим обтекания пластины – с симметричным вихревым следом, что является также иллюстрацией неединственности решения поставленных задач.

Следует различать два вида информации, получаемой при решении уравнений (2) совместно с (1): построение вихревых макроструктур течения и изучение пульсаций скоростей. Последние всегда зависят от времени и носят хаотический, неупорядоченный характер. Возникает вопрос, имеющий принципиальное значение: можно ли на основе указанных выше схем явления и алгоритмов моделировать случайные процессы и получать стохастические характеристики турбулентности?

Пусть на фоне сформировавшейся вихревой структуры изучаются пульсации скоростей, для чего при достаточно больших  $\tau$  решаются уравнения (2) (о движении вихрей). Если течение периодическое с периодом  $T$ , то рассмотрим сходственные моменты времени ( $\tau_0$  и  $\delta_0 + m\delta_T$ ,  $m$  – целое число). Как при стационарном течении, так и при меняющемся во времени периодически уравнения (2) будут решаться каждый раз при различных начальных условиях (за счет того, что при различных  $\tau_0$  в потоке находится разное число свободных вихрей). А это приведет к различным мгновенным значениям скорости.

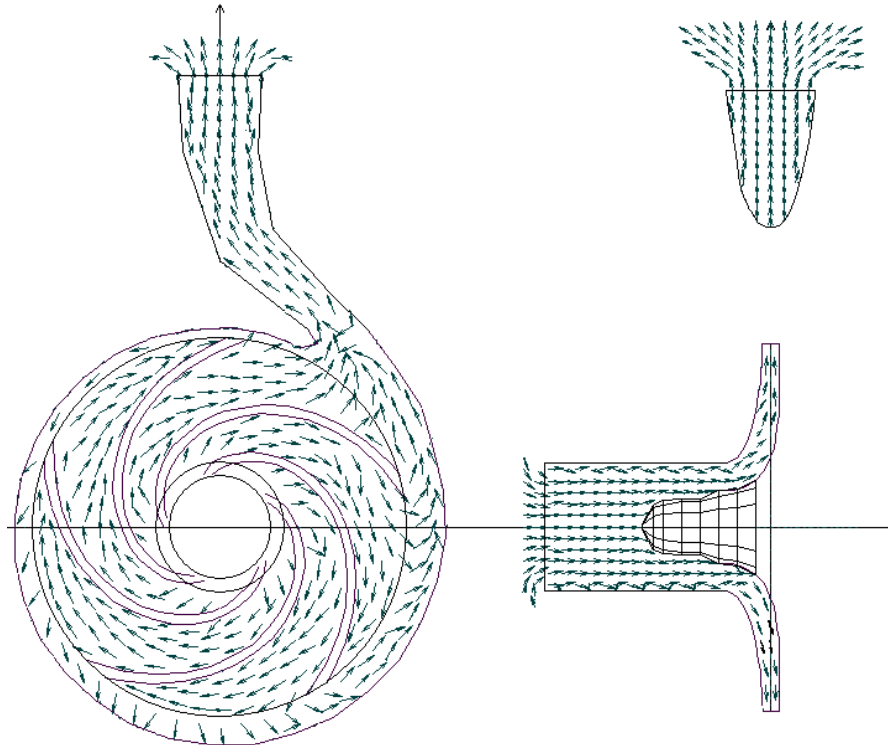
Цель данных рассуждений заключается в том, чтобы выявить возможный источник возникновения случайного процесса. Что касается полного ответа на поставленный вопрос, то он должен в первую очередь решаться путем совместных численно-физических исследований. В конечном счете, только аккуратно поставленные физические эксперименты могут подтвердить или отвергнуть схему явления.

## НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

Представленные на рис.2 результаты расчета векторного поля скоростей (относительных в рабочем колесе и абсолютных в отводе) в точках проточной части получены на основе решения прямой 3D-задачи идеальной жидкости в нестационарной постановке с учетом взаимного влияния всех элементов [2]. На рис. 2 начало вектора совпадает с расчетной точкой, длина вектора пропорциональна модулю скорости, направление вектора по касательной к линии тока. Результаты данного решения в дальнейшем использовались для качественной оценки кинематических параметров, силовых нагрузок на элементы проточной части и лопастей рабочего колеса по методике [3,4], которые частично приведены в работе [5] и на рис.3. Результаты расчета распределения подачи по каналам рабочего колеса приведены в таблице в момент времени, когда лопасти 1 и 5 расположены симметрично по отношению к входному элементу отвода (языка спирали). Этот канал принят за №1, а остальные по направлению вращения против хода часовой стрелки соответственно 2 - 5.

Номер канала	1	2	3	4	5
Подача, %	21	10	13	22	34

Данные таблицы свидетельствуют о различных режимах движения жидкости в каналах и отсутствии осевой симметрии потока.



*Рисунок 2 – Расчетное поле векторов скорости в проточной части*

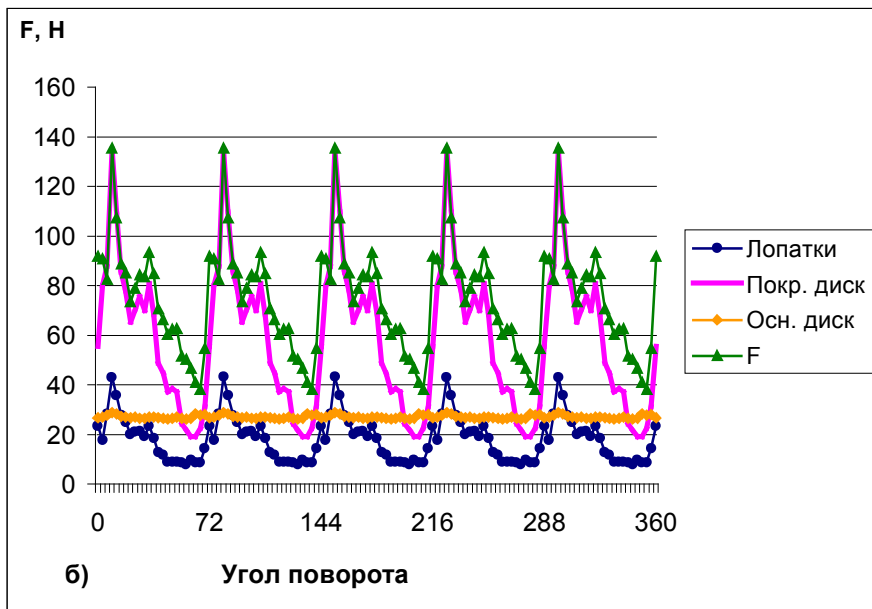
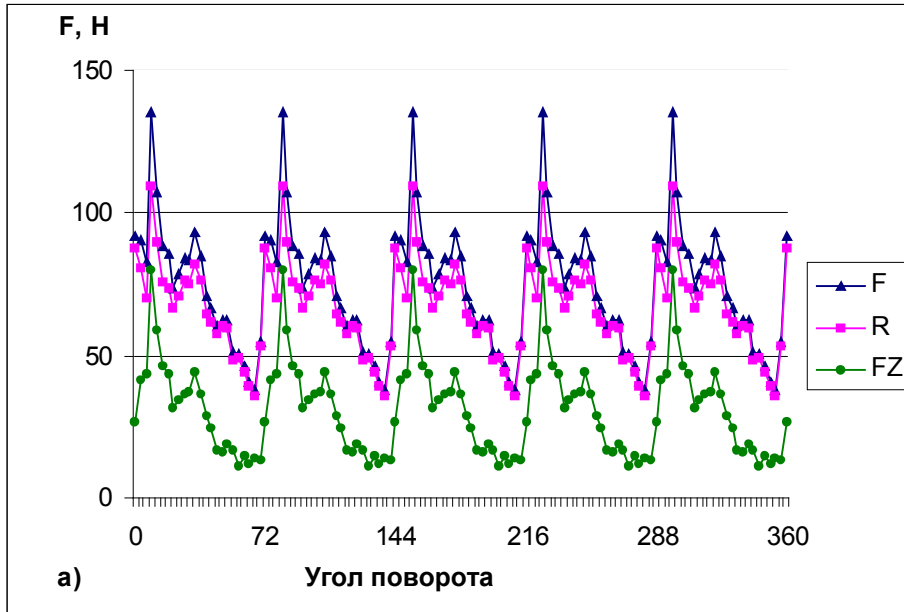


Рисунок 3 – а) изменение суммарной силы  $F$  и ее составляющих радиальной  $R$  и осевой  $FZ$  за один оборот рабочего колеса,  $Z=5$ ,  $Q=0,00333 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  
 б) изменение суммарной силы  $F$  и ее составляющих на лопатках, основном и покрывающем дисках за один оборот рабочего колеса



## ВЫВОДЫ

Применение гидродинамического метода профилирования и комплекса программ расчета пространственного течения жидкости в проточной части с учетом взаимного влияния всех элементов проточной части позволяет получить ранее неизвестные данные по распределению полей скоростей и давлений пространственного потока в любом сечении проточной части.

Определяющим фактором, влияющим на картину течений и величину силовых нагрузок на элементах проточной части, являются граничные условия во входном сечении и режим работы.

На основании обработки и анализа полученных данных можно заключить, что энергетические показатели и силовые нагрузки на элементах проточной части при одинаковых граничных условиях на входе зависят от формы меридионального сечения подвода, рабочего колеса и отвода, закона распределения закона на исходной линии тока и режимах работы.

Использование предлагаемого подхода проектирования и комплекса программ при создании конкретных типов гидравлических машин позволяет расчетным путем на ЭВМ получать достоверную информацию о кинематических и динамических характеристиках нестационарных течений в проточной части, что позволяет сократить объем экспериментальных исследований и обоснованно наметить пути совершенствования проточной части гидравлической машины. Энергетические испытания спроектированного насоса зафиксировали максимальный коэффициент полезного действия на расчетном режиме – 51%.

## SUMMARY

*The article gives methods of solution of direct and inverse problems of perfect and viscous liquid in the air-gas channel of the hydraulic machine. The combined usage of these methods will promote successful solution of the main task of centrifugal pumping equipment industry – to produce the equipment of the world standards quality. Here are examples of the usage of complex theoretical and experimental research of working procedure during the development of centrifugal pumping equipment with the specific speed about 20 based on the methods developed.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Косторной С.Д. Построение лопасти радиально-осевой турбины в осесимметричном потоке // Гидравл. машины. -1968.- Вып.2. - С.116-122.
2. Косторной А.С., Давиденко А.К. Численное решение прямой задачи течения жидкости в проточной части насоса // Насосы & оборудование. Отраслевой журнал. -2004.- №2(25). - С.32-35.
3. Мартинова Н.С. Розрахунок кінематичних параметрів потоку і моментних характеристик лопаток напрямного апарата гідротурбіни на основі 2"Д"- і 3"Д"-моделей ідеальної рідини //Вісник СНАУ. - 2003.- Вып. 10. - С.253-259.
4. Мартынова Н.С. Численное исследование силовых характеристик направляющего аппарата гидротурбины // Вісник СумДУ. - 2003.- №3(49). - С.57-62.
5. Косторной А.С. Исследование нестационарных гидродинамических процессов в проточной части центробежного насоса // Насосы & оборудование. Отраслевой журнал. - 2006.- №3(38). - С.30-33.
6. Белоцерковский С.М., Котовский В.Н., Ништ М.И., Федоров Р.М. Математическое моделирование нестационарного обтекания кругового цилиндра// Изв. АН СССР.ИЖГ.- 1983. - №4.- С.138-147.

**А.С.Косторной**, инженер;

**Н.С. Мартынова**, канд. техн. наук

*Поступила в редакцию 6 марта 2008 г.*