

**ВЫДЕЛЕНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА НАСОСОВ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ И
ИХ КОМБИНИРОВАННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ**

А.А. Евтушенко, канд. техн. наук, доц.; И.П. Каплун;

А.А.Шепеленко

Сумский государственный университет

В статье рассматривается структурирование рабочего процесса вихревых гидромашин с целью дальнейшего возможного физического и математического описания отдельных его составляющих, выявления их полезных и вредных свойств, а также определения рациональных областей использования каждой из них как в отдельности, так и в комбинации с другими рабочими процессами.

Широкое распространение насосного оборудования практически во всех сферах деятельности человека в совокупности со значительной его энергоемкостью предопределяет устойчивый рост требований к качеству и эффективности подобных машин. Дальнейший поиск резервов улучшения качества существующего насосного оборудования ведется в разных направлениях: использование новых достижений технологии машиностроения, материаловедения, машиноведения и др. Одновременно все больше внимания уделяется анализу работы гидравлических сетей в комплексе, когда насосное оборудование выступает в виде отдельной составляющей сети, имеющей установленные свойства и характеристики. Но вместе с тем первоосновой остается осуществление рабочего процесса насосом, и уровень наших знаний о нем предопределяет содержание и качество принимаемых решений. В этом плане углубление знаний о физической сущности рабочего процесса является актуальной и значимой задачей, решение которой позволит разрабатывать более качественное оборудование. Способ решения такой задачи только один – все более глубокое изучение отдельных составляющих рассматриваемого процесса, продвижение на микроуровень [1].

Сегодняшнее положение по рассматриваемому вопросу характеризуется следующим. Введено понятие “вихревой рабочий процесс” (ВРП) [2] и “лопастный рабочий процесс” (ЛРП). Принципиальное отличие этих процессов друг от друга заключается в величине теоретически достижимого гидравлического КПД. В первом случае она равна единице (ЛРП), в то время как для ВРП – обязательно меньше единицы [3], т.к. повышение давления в машине с ВРП определяется потерей энергии в жидкости, движущейся в ее проточной части.

Лопастной рабочий процесс разделен на две составляющие [4]:

- процесс, осуществляемый под действием инерционных сил (кориолисовых сил инерции);
- процесс, осуществляемый под действием циркуляционных сил.

Указанные составляющие ЛРП можно было бы для краткости написать назвать – первый “центробежным”, а второй – “осевым” рабочим процессом. Центробежный рабочий процесс осуществляется за счет действия инерционных сил – жидкость стремится переместиться в радиальном направлении – обязательно условие наличия разности радиусов входа и выхода в лопастную систему рабочего колеса. Осевой рабочий процесс осуществляется за счет циркуляционных сил (подъемная

сила Н.Е. Жуковского при обтекании криволинейного профиля или неравномерного распределения давлений по ширине криволинейного канала в движущемся вдоль него потоке) – обязательно условие наличия разности углов входа и выхода потока при обтекании им решетки профилей.

Вопрос о разделении вихревого рабочего процесса сегодня практически не рассматривается за исключением предложения о разделении используемых при осуществлении вихревого рабочего процесса вихревых структур (вихрей) на крупные (обеспечивающие наиболее интенсивное рассеяние энергии), средние (осуществляющие рассеяние энергии при турбулентном обмене) и мелкие (непосредственный переход энергии поступательного движения в энергию молекулярных движений) [3].

Практика использования вихревого рабочего процесса в насосостроении сегодня во многом опережает его теоретическое рассмотрение. Действительно, к насосам с вихревым рабочим процессом относятся, например, свободновихревые, лабиринтно-винтовые, струйные и дисковые насосы. Очевидно, что непосредственный механизм передачи энергии от рабочего органа к жидкости у них разный, хотя для всех указанных насосов теоретически достижимый гидравлический КПД меньше единицы. Следуя С.С. Рудневу, можно говорить, что в свободновихревых насосах (СВН) рабочий процесс осуществляется на базе крупноразмерных вихрей, в лабиринтно-винтовых – на базе среднеразмерных вихрей, в дисковых – на базе мелкогабаритных вихрей. Тем самым можно выделить три относительно самостоятельные составляющие вихревого рабочего процесса. В качестве критерия в первом приближении можно принять относительный масштаб размеров и структуру вихревых образований, энергия которых полезно используется при осуществлении рабочего процесса насоса.

Структурирование вихревого рабочего процесса позволит более осознанно подойти к решению задачи физического и математического описания отдельных его составляющих, выявить полезные и вредные свойства каждой из них, определить рациональные области их использования. Одним из шагов в направлении более глубокого осмысления сути ВРП является выделение роли в нем так называемых "поперечных" вихрей, введение понятия гидродинамической вихревой решетки и показанная возможность использования для описания ее работы существующей теории турбулентных струй [5].

Однако говорить сегодня о наличии какого-то целенаправленного развития теории насосостроения в части разделения вихревого рабочего процесса на составляющие и изучения их как самостоятельных явлений, так и во взаимосвязи или комбинации с другими рабочими процессами, практически нельзя. Безусловно, достаточно веским аргументом, оправдывающим существующее положение дел по рассматриваемому вопросу, является исключительная сложность анализируемых явлений. Требуется рассмотрение под одним углом зрения различных сведений, в том числе уже известных, но излагающихся как разрозненные и не взаимосвязанные. Наглядный пример последнему – использование в насосах рабочих органов шнекового типа [6].

Напомним, что речь ведется об малогабаритной осевой ступени (рис. 1) с рабочим колесом (шнеком), имеющим винтовые лопасти постоянного шага (выполняется условие $r \times tg\beta_n = const$ для изменения углов установки вдоль радиуса), и статорным аппаратом с упрощенной лопаточной системой (кольцевая решетка прямых плоских пластин).

Внешне имеем осевой рабочий процесс, но по своей сути он является вихревым. Действительно, профиль лопастей рабочего колеса в развертке цилиндрического сечения имеет вид плоской решетки прямых пластин. Данная решетка может создавать напор только при наличии ударного

обтекания входных кромок при положительных углах атаки, что при работе на реальной жидкости неизбежно приводит к отрыву пограничного слоя и образованию застойных вихревых зон. В результате поток обтекает уже не лопасть, а этот вихрь, "округляющий" ее.

Еще в большей мере все вышесказанное относится к статорному аппарату. Анализ картин течения, представленных на (рис. 2 а и б) показывает, что даже на подачах, соответствующих режиму максимальной экономичности, значительную часть площади поперечного сечения каналов аппарата занимают относительно крупные вихревые структуры. Очевидно, что они оказывают заметное влияние как на характер течения в ступени, так и ее энергетические показатели.

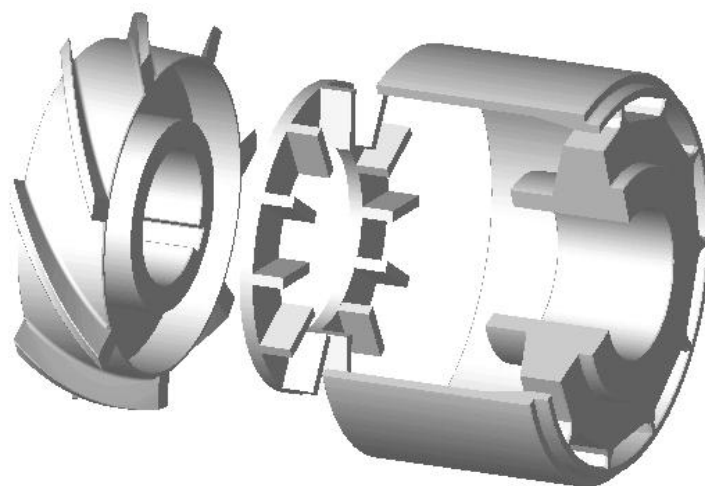


Рисунок 1 – Общий вид комбинированной ступени

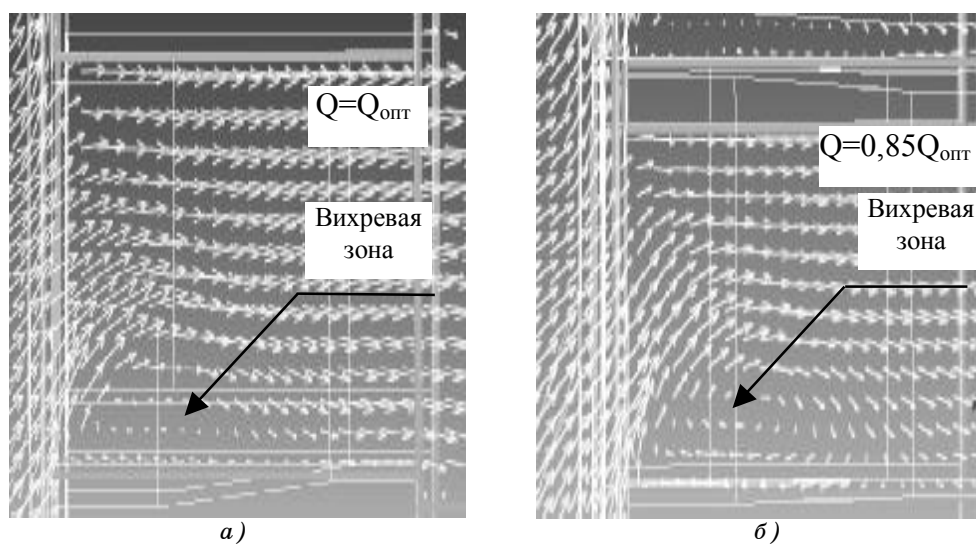


Рисунок 2 – Картина течения в каналах статорного аппарата

Отчетливо видны вихревые зоны, образующиеся при обтекании лопатки. Сечения находятся на середине высоты канала. В виде векторов представлена абсолютная скорость потока. Визуализация течения выполнена в программном продукте Flow Vision [7].

Изложенное выше делает особо сложным теоретическое осмысление последующего, рекомендуемого на практике процесса – комбинированного использования в целом лопастного и вихревого рабочих процессов и отдельных их составляющих.

Экспериментальные проработки по указанному вопросу, имеющие своей целью повышение удельной напорности (отношения монтажной длины ступени L_{cm} к развиваемому напору H_{cm}) и улучшение формы энергетических характеристик шнековой ступени при помощи установки дополнительных решеток лопастей, дают противоречивые результаты [8]. С одной стороны, подтверждается возможность получения дополнительного напора путем установки в торцовой пяте импеллера (рис.1), который в данных условиях работы можно рассматривать как рабочее колесо вихревого насоса; с другой стороны, становится очевидной вся сложность согласования потоков от двух различных частей ступени.

Рассмотрим условия работы вихревой части ступени в соответствии с гипотезой рабочего процесса вихревых насосов [2]. Опираясь на экспериментальные результаты, приведенные в [8], можно утверждать, что между жидкостью в полостях колеса 1 и расточки 2 статорного аппарата (рис. 3) и основным потоком происходит обмен энергией – предположительно по границе 3. Предположим также, что в определенном диапазоне подач обмен энергией происходит в направлении от вихревого колеса к основному потоку, что подтверждается изменением характеристик на рис. 4.

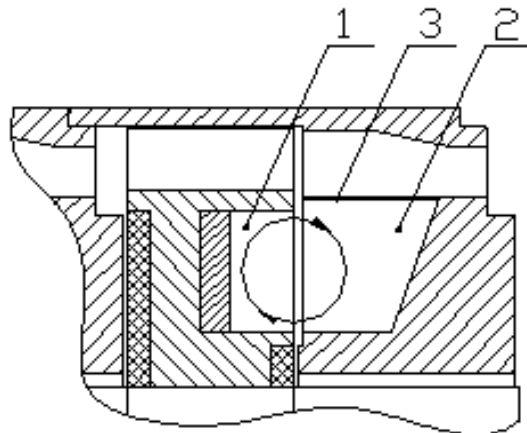


Рисунок 3 - Схема проточной части комбинированной ступени

Тогда, учитывая тормозящее влияние лопаток статорного аппарата и стенок полости 2 расточки, можно принять, что средняя угловая частота вращения жидкости в расточке вокруг оси ступени меньше угловой частоты вращения рабочего колеса (соответственно и жидкости в полости 1). Возникающая при этом динамическая неуравновешенность потока (центробежные силы, действующие на частицы жидкости в вихревом колесе и в боковом канале, разнятся по величине) приводит образованию продольного вихря.

Необходимо отметить, что рассматриваемая вихревая часть ступени имеет ряд особенностей:

- 1) отсутствует характерная для вихревых насосов уплотнительная перемычка, отделяющая область всасывания от области нагнетания – расточка имеет вид замкнутого кольца;
- 2) отсутствует подвод жидкости в вихревую часть;
- 3) существует кольцевое пространство взаимодействия с основным потоком на периферии расточки.

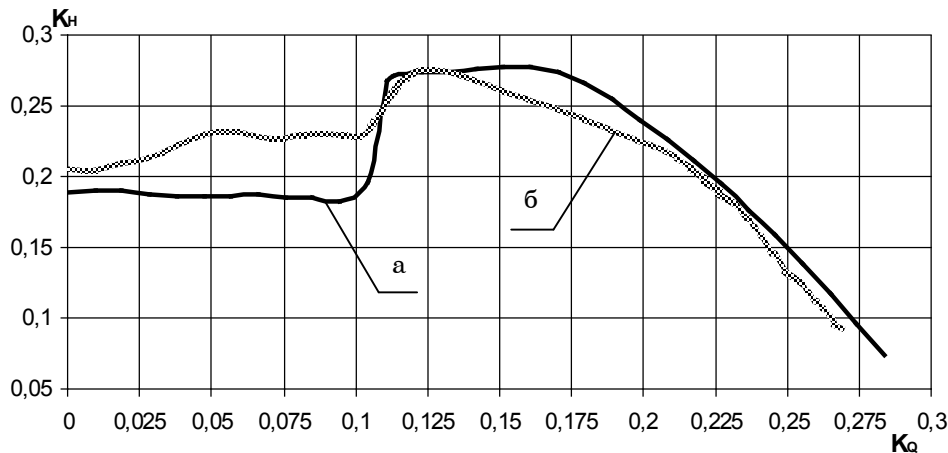


Рисунок 4 - Безразмерные характеристики ступеней $K_H = \frac{H}{n^2 \times D_2^2}$,

$$K_Q = \frac{Q}{n \times D_2^3} \quad \text{а) исходной шнековой; б) комбинированной}$$

Ввиду вышеизложенного представляется более обоснованным рассматривать данную часть ступени как некое подобие свободновихревого насоса, работающего на нулевом расходе. В связи с этим можно предположить, что и рабочий процесс, и соответствующая ему картина течения в рассматриваемой части ступени будут в какой-то мере отвечать модели рабочего процесса свободновихревых насосов типа "Turo", подробно изложенной в работе [9]. Отличительной особенностью данных насосов является существенно меньшее влияние расхода на величину скорости V_m , характеризующую интенсивность меридионального потока, по сравнению с вихревыми насосами. По данным, приведенным в работе [10], она составляет на разных режимах $V_m = (0,15 \dots 0,25)U_2$ (здесь под $U_2 = \omega \cdot R_2$ понимается линейная скорость на наружном диаметре рабочего колеса насоса). Согласно той же работе окружная скорость V_u вращения жидкости в свободной камере вокруг оси насоса в области выхода из рабочего колеса на разных режимах остается практически постоянной и равняется $V_u = (0,6 \dots 0,7)U_2$. Учитывая постоянство угловой скорости вращения шнекового рабочего колеса и отсутствие подвода жидкости в вихревую часть ступени, можно предположить, что во всем диапазоне подач энергия, передаваемая данной частью ступени основному потоку, будет иметь примерно постоянное значение.

Соответственно представляется маловероятным резкое увеличение напора на подачах, близких к нулевым, – характеристика СВН имеет пологий характер. Поэтому требуемый прирост напора может быть обеспечен при удельном весе энергии, сообщаемой потоку вихревым венцом, не менее 30% от общего энергетического баланса комбинированной ступени (см. рис. 4).

Еще одной особенностью рассматриваемой части ступени является то, что передача энергии к основному потоку имеет в определенной мере "двухступенчатый" характер: от вихревого венца - потоку в расточке с

КПД вихревого рабочего процесса, и от потока в расточке – основному потоку, т.к. участок, на котором могло бы происходить прямое взаимодействие с основным потоком, слишком мал.

Данная особенность в совокупности с нерациональной конфигурацией зоны обмена, по мнению авторов, представляет собой наиболее вероятную причину малоэффективности импеллера как источника дополнительного напора. Следовательно, указанного выше баланса энергии в ступени и соответствующего улучшения энергетических характеристик в условиях ограниченных радиальных габаритов можно достичь путем "одноступенчатой" передачи энергии от вихревого венца основному потоку.

В свете вышеприведенного становится очевидной необходимость проведения дополнительных исследований, направленных на:

1) определение рациональной формы и размеров зоны взаимодействия потоков от двух частей ступени;

2) определение оптимальных параметров потока жидкости на выходе из вихревого венца, обеспечивающих необходимый прирост напора с минимальными потерями.

Другим, не менее перспективным направлением для получения улучшенных характеристик насоса выглядит комбинация осевого и вихревого рабочих процессов путем применения винтовой нарезки, расположенной на периферии рабочего колеса, известная под названием осевихревая ступень [11]. Такая ступень состоит из осевого колеса и размещенной на его периферии неподвижной винтовой нарезки с ходом, противоположным ходу лопастей осевого колеса. Течение в такой ступени имеет сложный пространственный характер. Упрощенно весь поток можно разделить на две зоны: основной осесимметричный поток, расположенный вблизи втулки, и вихревой поток в периферийной части колеса и в неподвижной решетке.

Проведенные предварительные эксперименты [12] принципиально подтверждают возможность значительного повышения напора указанной комбинированной ступени на подачах, близких к нулевой даже в условиях жестко ограниченных радиальных габаритов скважинных насосов на фоне существенного падения КПД. Поэтому аналогично комбинированной ступени, которая была описана выше, при разработке малогабаритной осевихревой ступени для получения приемлемых результатов необходимо решить ряд вопросов:

1) отыскать наиболее рациональное соотношение критериев технологичности, экономичности и напорности, т.к. винтовая нарезка трудоемка в изготовлении;

2) определить оптимальные геометрические параметры и их соотношение в рассматриваемой ступени для малых габаритов, ограниченных радиальных размеров и специфических условий работы в многоступенчатом насосе.

Наименее трудоемким и затратным способом получения предварительных результатов по вышеуказанным вопросам в современных условиях является проведение расчетного эксперимента. Поэтому ведущее место в планируемых исследованиях планируется отвести математическому моделированию структуры течения в рассматриваемых комбинированных ступенях при помощи пакетов современных прикладных программ (таких, как Flow Vision, CFX, Flow Works и др.) с последующей проверкой лучших из полученных результатов физическим моделированием – физическим экспериментом.

ВЫВОДЫ

В заключение необходимо отметить, что примеров комбинированного использования различных рабочих процессов реализованных сознательно

или установленных постфактом сегодня в практике насосостроения можно найти много. Но все они выглядят как отдельные разрозненные результаты - отсутствуют какие - либо сознательные системные подходы, позволяющие на стадии проектирования, комбинируя различные составляющие лопастного и вихревого рабочих процессов, получать наперед известные эксплуатационные показатели качества проточной части насоса. Для практики весьма важным является ответ на вопрос об оптимальном соотношении различных рабочих процессов при разработке нового оборудования с качественно новыми характеристиками, затребованными практикой.

Изложенное в основном ставит вопросы, ответы на которые еще предстоит искать. Вместе с тем, даже в таком виде авторам представляется полезным вынести данный материал на обсуждение специалистам, работающим в области турбомашиностроения в целом. В частности, похожие задачи сегодня стоят перед разработчиками вихревых компрессоров, пневматических и гидравлических вихревых турбин. Очевидно, что круг рассматриваемого вида технических устройств далее будет только расширяться.

SUMMARY

The article describes the structure of working process of vortex and centrifugal pumps with the purpose to analyze physical and mathematical description of its separate components, evaluation of useful and harmful properties of each component, determination of rational regions of application for each of them.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евтушенко А.А. Законы развития технических систем применительно к насосостроению // Труды VIII Международной научно-технической конференции "Насосы-96". - Сумы, ИПП "Мрия - 1" ЛТД, 1996. - С. 68-77.
2. Байбаков О.В. Вихревые гидравлические машины. - М.: Машиностроение, 1981. - 197 с., ил.
3. Руднев С.С. Основы рабочего процесса вихревых насосов // Труды ВНИИгидромаша, "Гидромашиностроение" - М.: Энергия, 1972. - Вып. 43. - С. 3-9.
4. Овсянников Б.В. Связь напора колеса радиальной машины с моментом кориолисовых сил инерции // Известия ВУЗов, серия "Авиационная техника". - 1963. - №2.
5. Евтушенко А.А. Основы теории рабочего процесса вихревых гидромашин // Технологические системы.-2002.-№ 2 (13). - С. 110-114.
6. Елин А.В. Шнековые многоступенчатые насосы: методика расчета, показатели качества: Дис... канд. техн. наук: 05.05.17. - Сумы, 2002. - 230 с.
7. Кочевский А.Н. Расчет внутренних течений жидкости в каналах с помощью программного продукта FlowVision // Вісник СумДУ. - 2004. - № 2 (61). - С. 25-36.
8. Евтушенко А.А., Елин А.В., Каплун И.П. Комбинированное использование вихревого и лопастного рабочих процессов в насосах гидродинамического принципа действия // Промислова гідроліка і пневматика. - 2004. - № 2 (4). - С. 24-29.
9. Соляник В.А. Рабочий процесс и энергетические качества свободновихревых насосов типа "Туро": Дис... канд.техн.наук:05.04.13. - М., 1989. - 154 с.
10. Герман В.Ф. Создание и исследование сточномасных свободновихревых насосов повышенной экономичности: Дис... канд. техн. наук: 05.05.17. - Сумы, 1999. - 217с.
11. Анкудинов А.А. Расчет и проектирование предвключенной осевыхревой ступени центробежного насоса: Уч. пособие. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. - 64 с.
12. Евтушенко А.А., Елин А.В., Каплун И.П. О попытках повышения напорности малогабаритных осевых ступеней путем комбинированного использования различных рабочих процессов // Материалы научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов инженерного факультета. - Суми: Ризоцентр, 2004. - С. 176.

Поступила в редакцию 3 апреля 2006 г.