

К. А. МИРОНОВ, Ю. Ю. ОЛЕКСЕНКО

ПРИМЕНЕНИЕ CFD ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГИДРОТУРБИН

Для того чтобы разработать экономически рентабельный проект конструкции гидротурбины, необходимо понять характеристики потока в различных сечениях гидротурбины, что позволит спрогнозировать работу отдельных ее элементов еще до изготовления. В работе показано, что в последнее время CFD широко используется ведущими учеными во всем мире для получения подробной информации о свойствах потока в проточной части гидротурбины с учетом взаимодействия различных ее элементов, а также для прогнозирования работы гидротурбины в целом.

Ключевые слова: CFD, КПД, гидротурбина, проточная часть, подвод, рабочее колесо, отсасывающая труба, давление.

Введение. ГЭС состоит из множества узлов, но гидротурбина (ГТ) – это самая важная из них, потому что от нее зависит как стоимость электростанции, так и ее работа в целом. Следовательно, для создания экономически рентабельного проекта ГЭС очень важно спрогнозировать поведение и эффективность ГТ прежде чем она будет запущена в эксплуатацию. В случае с высоконапорными ГЭС стоимость ГТ ниже по сравнению со строительными работами, что объясняется сложностью проведения строительных работ в холмистой местности. Но для средне- и низконапорных ГЭС стоимость турбины колеблется от 15 % до 35 % [1] от стоимости всего проекта. Следовательно, для создания экономически рентабельного проекта ГТ необходимо знание о связи характеристики потока с потерей энергии в различных элементах проточной части (ПЧ) ГТ еще до того, как эти элементы будут изготовлены. Традиционная практика прогнозирования характеристик ГТ опирается либо на теоретический подход, либо на экспериментальное тестирование модели. Теоретический подход позволяет определить эффективность элементов ПЧ ГТ, но при этом трудно установить причину неполадок и неисправностей. И наоборот, тестирование модели оказывается дорогостоящим и занимает много времени.

Традиционно принято проектировать ГТ в соответствии с заданными величинами изменения напоров и мощности, а также с другими географическими и топографическими условиями [2, 3]. Рабочее колесо (РК) является одним из самых важных компонентов ГТ, потому что передача энергии в основном происходит в нем. Следовательно, работа любой ГТ зависит, главным образом, от степени эффективности разработанного РК. Поток внутри РК нестабилен и неоднороден, так как именно в нем происходит перераспределение энергии потока, то очень важно определить, каким будут его геометрические параметры. Правильное проектирование профиля лопасти и прочности РК позволяет оптимизировать распределение скорости и уровень кавитации, которые оказывает воздействие на работу ГТ в целом [4, 5].

Поток в РК имеет сложную структуру, поэтому его точное численное моделирование выполнить затруднительно. За последние три десятилетия были

предприняты усилия моделирования потока в РК с максимально допустимым приближением. Для выполнения численного расчета потока необходимо иметь трехмерные геометрические модели неподвижных и вращающихся элементов ГТ, а также знать граничные условия. Численное моделирование применяется для оптимизации и модернизации имеющегося или для разработки нового проекта ГТ [6–8].

История возникновения CFD. Жидкая среда оказывает всестороннее влияние на нашу жизнь. Динамика жидкости означает понимание и прогноз движения жидкости. К программному обеспечению, связанному с изучением динамики жидкой среды относятся программы, позволяющие изучать погоду, циркуляцию крови, турбодвигатели, авиатранспорт и т. д. Поведение любой жидкости зависит от законов движения, механики вязкой жидкости и термодинамики. Однако, решать уравнения, построенные на этих законах очень сложно, что делает теоретический метод невыгодным для решения больших производственных задач. Классический подход к решению этой проблемы заключается в делении большой задачи на множество небольших. С улучшением быстродействия и развитием компьютеров, обладающих высокими параметрами, этот подход становится осуществимым, поэтому усовершенствование компьютеров и послужило причиной появления CFD в конце 50-х гг. XX века.

CFD является инструментом численного решения сложных неполных дифференциальных уравнений, известных как определяющие уравнения потока жидкости, используемые для подробного описания поведения потока в рассматриваемом поле течения [9, 10]. Физические законы, управляющие потоками жидкости, могут быть описаны посредством точного определения математического соотношения, составляющего основу любого анализа. Известные численные методы, применяемые для дискретизаций в CFD – это метод конечной разности (FDM), метод конечного объема (FVM), и метод конечного элемента (FEM).

CFD по сравнению с модельными испытаниями имеет следующие преимущества:

1) финансовые расходы и время, затрачиваемое на создание проекта и его развитие значительно

меньше;

2) позволяет моделировать условия потока, которые трудно воспроизвести при экспериментальном тестировании модели;

3) позволяет получить более подробную и полную информацию о потоке;

4) не требует увеличения масштаба.

История развития ГТ. Гидравлическая энергия впервые была применена в Азии в виде механической энергии, полученной путем пропуска воды через водяное колесо. В эпоху зарождения гидравлической науки и практики, водяные колеса, изготовленные из дерева, находили широкое применение, а в основе их лежал либо механизм энергии падающей, либо текущей воды. Самой древней разновидностью считается водяное колесо. Оно состоит из серии прямых лопастей, присоединенных к периферии колеса. В таком водяном колесе энергии вырабатывалось крайне мало из-за низкой эффективности конструкции и небольшого слива. Фактически, первая известная конструкция водяного колеса впервые была выполнена Леонардо да Винчи, чертежи которой были сделаны от руки (1452–1519 гг.).

К началу девятнадцатого века, применение научных методов анализа и проведение опытов наряду с наличием достаточного количества дешевого железа способствовало совершенствованию конструкции водяных колес и турбин [11, 12]. Турбины были разработаны Леонардом Эйлером (1826–1827). Во Франции, Виктор Понселе применил изогнутые лопасти, что способствовало увеличению эффективности водяного колеса вдвое. Первая радиальная турбина была разработана Бенуа Фурнейроном (1827) [13]. Юрайа А. Бойден (1844) разработал турбину с внешне направленным потоком. РК этой турбины было похоже на РК современной радиально-осевой (РО) ГТ [4].

Женевский изобретатель Сэмюэл Б. Хоуд (1838) [2, 13] был первым, кто создал турбину с внутренне направленным потоком, у которой были менее дорогостоящие колеса и более высокая скорость вращения. Джеймс Б. Фрэнсис (1849) усовершенствовал конструкцию Хоуда [2, 13]. Он выполнил экспериментальную работу и усовершенствовал конструкции рабочих колес (РК) ГТ. Немногим позже уже несколько производителей работало над совершенствованием конструкции, сделанной Фрэнсисом. Название, данное современной турбине, связано с именем Джеймса Б. Фрэнсиса. Это реактивная турбина с внутренне направленным потоком, имеющая более высокую производительность по сравнению с турбиной с внешне направленным потоком. В то время как вращающийся поток воды из направляющего аппарата поступает в РК, он ускоряется, и передает энергию. Давление воды падает до атмосферного, а в некоторых случаях ниже атмосферного, так как вода проходит через лопасти турбины и теряет энергию.

В 1866 году Сэмюэл Найт [4] изобрел первую импульсную систему, которая была оснащена

реактивными системами высокого давления, используемыми в гидравлической горной промышленности на золотых приисках. Найт разработал водяное колесо, которое использовало кинетическую энергию свободного потока воды с высоким напором. Такая турбина называется активной или тангенциальной турбиной. Колесо, разработанное Найтом, было усовершенствовано Лестером Пелтоном (1879) [2, 4]. Он разработал двойную конструкцию ковша.

Виктор Каплан (1913) [4] разработал поворотнлопастную (ПЛ) ГТ, машину пропеллерного типа. Это было развитием радиально-осевой (РО) ГТ, что позволило развивать низконапорные ГЭС.

Применение CFD в гидравлических машинах.

Компьютеры используются для решения проблемы исследования, моделирования и расчета потока жидкости уже в течение многих лет. Разработано множество программ для решения конкретных проблем и задач, связанных с расчетом потока жидкости. Развитие современной вычислительной гидродинамики (CFD) началось с появлением цифрового компьютера в начале 1950-х [14]. С середины 70-х годов XX века стала очевидной необходимость сложных математических формул для обобщения алгоритмов, поэтому были разработаны решающие устройства CFD общего назначения. Использование коммерческого программного продукта для анализа возможностей проектирования и производительности гидравлических машин началось в начале 1980-х годов. Для этого потребовались очень мощные компьютеры, а также глубокие знания динамики жидкости, и большое количество времени для моделирования [6, 14, 15]. К этому же времени был усовершенствован компьютерный анализ гидродинамической среды, для получения численного решения поля потока в ГТ и других гидротехнических сооружениях.

Работы многих исследователей были посвящены дискретизации вязкого трехмерного сжимаемого и несжимаемого потока жидкости для полностью трехмерного режима течения [4, 10, 13]. Исследования проводились как для стационарного и нестационарного течения.

Мартенсен (1959) дал объяснение нелинейной теории интегралов применительно к решеткам турбомашин [1, 5]. Д. Х. Уилкинсон в 1967 году расширил нелинейную теорию интегралов для решеток турбомашин Мартенсена [5]. Льюис упростил подход Уилкинсона и предложил простой способ обработки данных на микрокомпьютерах.

В 1983 году Фрейзер вместе с другими исследователями провел трехмерный анализ турбулентного потока в РК радиально направленного потока, основанный на преобразовании уравнений, использованных Патанкарком и Бордынком (1980) для прямого вращающейся канала произвольной кривизны [16]. Численный метод был построен таким образом, что использовались параболические или частично параболические методы решения вдоль потока канала. Этот метод предполагал

геометрическое ограничение на форму поперечного сечения и функцию стенки.

Киemen вместе с другими исследователями в 1988 году провели численное уточнение конструкции турбины и улучшили ее эффективность на этапе проектирования путем применения интегральной численной системы с использованием квазитрехмерных подходов. Проверка достоверности результатов разработанного численного метода была выполнена на основе полного тестирования модели [17].

Айзингер и Рупри в своих работах применяли три различных алгоритма для автоматической оптимизации формы отсасывающей трубы ГТ на основе анализа CFD в 1990 году [18]. Было установлено, что алгоритм, основанный на аппроксимации градиента, имеет быструю сходимость.

Велвзель и др. в 1996 предложили численный метод оптимизации для получения оптимальной формы элементов ПЧ ГТ путем максимизации эффективности и минимизации потерь с помощью изменения геометрических параметров. Разработанный оптимизационный метод имеет хорошую сходимость результатов [19].

В 1998 году Маджи и Бисуас рассчитали потери напора и расхода в спиральной камере, разработав компьютерную модель для решения уравнений Рейнольдса. В результате было получено хорошее согласование с результатами экспериментальных данных [20].

Геде из Штутгартского Университета в 2000 году использовал параметрический инструмент проектирования на основе виртуальной среды пропеллерной гидравлической турбины [21]. Он использовал уравнение Эйлера для параметрического проектирования турбоагрегатов. Была разработана компьютерная программа позволяющая корректировать геометрию лопасти при изменении параметров напора, расхода, скорости и т. д. Виртуальная среда помогла более полно раскрыть картину потока в РК ГТ.

Панде и др. в 1999 году использовали CAD программное обеспечение в CFD для совместной разработки алгоритмов при совершенствовании профилей РК. Этот алгоритм оказался экономически эффективным для турбин всех размеров. Полученные результаты были подтверждены модельными испытаниями [22].

Бран и др. в 1999 году предложил компьютерный метод визуализации для оценки кавитации в ПЧ ПЛ ГТ и проанализировал топографическую структуру кавитации в отсасывающей трубе. Результаты показали, что метод визуализации был наиболее подходящим для мониторинга кавитации [23].

В 1999 Бернад и др. использовали CFD моделирование для повышения эффективности работы РО ГТ, путем модификации выходной кромки лопасти РК для устранения крупных вихрей в отсасывающей трубе [24]. Это дало возможность повысить выходную мощность на 7,8 МВт, в

результате чего был получен рост доходов в размере от \$ 200 000 до \$ 500 000 в год.

Липей и Полони в 2000 году использовали программный комплекс CFD-TaskFlow для оптимального проектирования РК ГТ [25]. В результате разработанная методика численного анализа потока и многоцелевой генетический алгоритм были включены в данный программный комплекс. Полученные параметры потока имели большое расхождение с экспериментальными у стенок ПЧ, поэтому данная методика рекомендуется только для численного анализа потока для РК осевых ГТ.

В 2002 году Пэнг и др. использовали квазитрехмерную обратную задачу для прогнозирования характеристик РК ПЛ ГТ мощностью 440 кВт [26]. Суммарные гидравлические потери и коэффициент кавитации были взяты в качестве цели оптимизации, в то время как параметры, описывающие циркуляцию и положение лопасти РК в меридиональной плоскости, принимались в качестве параметров оптимизации. Численные результаты показали, что эффективность проектируемого РК повышается за счет оптимизации.

Нильссон и др. в 2003 году проводили CFD моделирование РК РО и ПЛ ГТ с использованием низких чисел Рейнольдса $k-\epsilon$ модели турбулентности [27]. Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными результатами при различных условиях эксплуатации и показали при этом хорошую сходимость.

Чо и Чой в 2004 году представили экспериментальные исследования для вращающихся лопастей РК ГТ. Большое количество экспериментов проводилось на роторе турбины, для нахождения оптимальной частоты вращения. Было обнаружено, что частота вращения ротора оказывает большое влияние на эффективность работы ГТ. Было показано, что когда ГТ имеет высокий диапазон изменения мощности, то ее КПД уменьшается [28].

Свидерский в 2004 году использовал CFD для выявления областей улучшения показателей гидравлических турбин с использованием численного метода моделирования [29]. CFX-TASCFlow был использован для улучшения конструкций РО и ПЛ ГТ малых ГЭС. В ПЛ ГТ изменение геометрии и расположения лопастей РК привело к 8-ми процентному росту производительности, а модификация РК РО ГТ позволило увеличить мощность на 15 МВт.

В 2004 году Липеем разработаны методы численного моделирования для проектирования и оптимизации осевой ГТ. Для анализа потока использовался CFX-TASCFlow со стандартной $k-\epsilon$ моделью турбулентности. [30].

В 2004 году Лоан и др. представили исследовательскую работу по изучению гидравлических потерь в РО ГТ. В работе представлены некоторые расчеты, связанные с гидравлическими потерями в спиральной камере, направляющем аппарате и отсасывающей трубе РО ГТ. Численные результаты сравнивались со

значениями гидравлических потерь в различных научных работах [31].

Джейсика Менез и Деринг в 2005 году модифицировали метод прогнозирования и моделирования рабочих характеристик пропеллерных турбин на основе данных теста производительности, разработанного Гордоном в 2005 году [32]. Этот метод, улучшил точность на 3 % по сравнению с первоначальным методом, предложенным Гордоном.

В 2005 году Зумбом и Рудольфом разработан многоуровневый метод CFD для оптимизации геометрии лопастей гидравлических машин, в этом способе, квази-3D подход был использован для первоначальной геометрии с последующим добавлением 3D уравнения Эйлера для получения оптимальной формы, а затем кода вязкого 3D потока Навье-Стокса. Этот многоуровневый подход был применен для РК РО ГТ и признан эффективным инструментом для оптимального инженерного проектирования лопастей РК ГТ [33].

Заккер и Данасекаран в 2005 году представили исследовательскую работу, в которой приведены результаты экспериментального и расчетного анализа потерь в направляющем аппарате ГТ [34]. Сначала были использованы несколько моделей турбулентности в двумерной постановке, чтобы найти подходящую модель для этого вида турбины. В результате было получено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных. Показано, что с помощью стандартной $k-\epsilon$ модели турбулентности можно прогнозировать экспериментальные значения на достаточно хорошем уровне, особенно КПД ГТ. Экспериментальные результаты показали, что лопатки направляющего аппарата оказывают большое влияние на понижение КПД ГТ и было установлено, что 21 % от среднего давления теряется из-за направляющего аппарата. Было доказано, что с помощью 3D CFD модели можно прогнозировать экспериментальные значения количественно и качественно. Кроме того, в результате расчетов было подсчитано, что КПД ГТ уменьшается примерно на 4 %, в связи с утечками в зазорах при более высоких коэффициентах потока.

Марьявара в 2006 году использовал суррогатную оптимизацию для оптимизирования формы отсасывающей трубы ГТ, которая могла бы заменить дорогую модель CFD в фазе оптимизации, для того, чтобы обеспечить более быстрое и эффективное проектирование. Результаты этого исследования продемонстрировали потенциал и преимущества использования суррогатных моделей на этапе проектирования отсасывающих труб ГТ [35].

В 2006 году Лиз и Хозерсал провели квазитрехмерное проектирование и анализ новых РО РК для ГЭС с мощностью 4,5 МВт с помощью многофункционального пакета CFD, разработанного доктором И. Хантсманом. Новое РК имело лучший коэффициент кавитации по сравнению со старой модификацией. Разработанный метод проектирования РК стал успешно применяться в технических и инженерных расчетах [36].

Ксавье Эскалер и др. в 2006 году представили работу об обнаружении кавитации в гидравлических турбинах. В исследовании отмечается влияние на стабильность работы ГТ кавитационных пузырьков и вихревых жгутов в отсасывающей трубе. Были сделаны выводы об улучшении датчиков замера, обработки сигналов и анализа для каждого типа кавитации, для улучшения обнаружения кавитации [37].

Родригез и др. в 2007 году экспериментально исследовали влияние неподвижного потока на энергетические характеристики уменьшенной модели турбины Фрэнсиса [38]. В первой части эксперимента РК было в воздухе, а во втором оно было опущено в резервуар, полный неподвижной воды. В обоих случаях были определены собственные частоты. Эффект добавленной массы и демпфирование воды были существенными. Снижение собственных частот зависело от режима вибрации.

Ванг и др. в 2007 году осветили вопросы вычислительной гидродинамики жидкостей для крупных ГТ. При больших числах Рейнольдса, неустойчивость потока и сложная геометрия ПЧ приводят к сложным явлениям потока в крупных ГТ. Целью их работы была оценка моделей турбулентности, плотность сетки и вычисление уравнений для сложных потоков в ГТ. Крупномасштабную РО ГТ на ГЭС «Три ущелья» в Китае изучали с помощью различных численных методов [39].

Шлем Кек и Мирьям [40] в 2008 году занимались исследованием применения вычислительной гидродинамики в проектировании ГТ и насосов. Согласно их исследованиям, численное моделирование течения в турбомашине было начато 30 лет назад. В работе рассматриваются основные этапы и достижения в методах, которые были сделаны в этот период. Также подробно рассмотрено использование уравнений Рейнольдса и Навье-Стокса для анализа установившегося и неустойчивого потока жидкости. Для иллюстрации развития инструментов с 1978 по 2008 год используются практические примеры, проведен обзор развития конструкций гидравлических турбин, которые разрабатывались в течение этого периода времени.

В 2009 году Никола и др. [41] применили CFD анализ для оптимизации нового профиля лопасти. Был использован метод проб и ошибок для изменения геометрии с целью повышения эффективности лопасти и для уменьшения кавитационных явлений в новом РК.

Саид Р. А. и др. [42] в 2010 году представил анализ напряжений на лопастной системе РО ГТ. Нагрузка на лопасти РК, определенная из анализа CFD турбин Фрэнсиса при различных граничных условиях, была включена в конечно-элементную модель для расчета распределения напряжений в РК. Сделан вывод, что лопасти рабочего колеса деформируются под давлением воды в окружном и осевом направлении.

В своей работе Сантьяго Латин и др. [43] в 2010 году описали поток внутри турбины Фрэнсиса с численной точки зрения, были получены графики пульсаций давления. Это дало возможность более глубоко изучить вопрос формирования вихревого жгута в отсасывающей трубе, а также пульсаций давлений в различных элементах ГТ.

В настоящее время многие ученые продолжают применять и совершенствовать методики и модели используемые в CFD.

Выводы. CFD используется во многих странах мира для разработки конструкций и оценки эффективности существующих и новых типов ГТ. Для анализа распределения параметров потока в различных элементах ПЧ ГТ используется стационарное и нестационарное гидродинамическое моделирование. Требуется дальнейшего развития вопрос, связанный с исследованием параметров потока при изменении режимов течения в ГТ.

Список літератури: 1. *Sanjay Jain* CFD Approach for Prediction of Efficiency of Francis Turbine / *Jain Sanjay, R. P. Saini, Kumar Arun* // Proceedings of 8th International Conference on Hydraulic Efficiency measurement. – 21–23 October 2010, P. 257–263. 2. *Raabe Ing. Joachim* Hydro Power. The design, Use and Function of Hydro Mechanical Hydraulic and Electrical Equipment / *Ing. Joachim Raabe*. – Dusseldorf : VDI-Verlag GmbH, 1985. 3. *Барлит В. В.* Гидравлические турбины / *В. В. Барлит*. – Киев : Вища школа, 1977. – 360 с. 4. *Barlit V. V.* Hydraulic Turbines / *V. V. Barlit, P. Krishnamachar, M. M. Deshmukh [et al.]*. – Bhopal : MACT, 1983. – Vol. 1. 11. 5. *Lewis R. I.* Turbo-machinery Performance Analysis / *R. I. Lewis*. – London : Arnold, 1996. 6. *Барлит В. В.* Расчет и проектирование проточной части реактивных гидротурбин на основе численного моделирования рабочего процесса : учебн. пособие / *В. В. Барлит, К. А. Миронов, А. В. Власенко [и др.]* – Харьков : НТУ «ХПИ», 2008. – 216 с. 7. *Миронов К. А.* Проектирование рабочих колес радиально-осевой высоконапорной гидротурбины на параметры ГЭС Каменг / *К. А. Миронов* // Вестник НТУ «ХПИ». Тематический выпуск «Технологии в машиностроении». – Харьков : НТУ «ХПИ». – 2010. – № 24. – С. 69–76. 8. *Миронов К. А.* Особенности течения жидкости в низконапорных радиально-осевых гидротурбинах / *К. А. Миронов* // Вісник НТУ «ХП». Сер.: Гідрравлічні машини та гідроагрегати. – X. : НТУ «ХП». – 2015. – № 3 (1112). – С. 53–58. 9. *letcher C. A. J.* Computational Techniques for Fluid Dynamics / *C. A. J. letcher*. – Berlin : Springer Verlag, 1988. 10. *John D.* Computational Fluid Dynamics / *D. John, Jr. Anderson*. – New York : McGraw-Hill Inc., 1995. 11. *Shepherd D. G.* Principles of Turbo machinery / *D. G. Shepherd*. – New York : The Macmillan Company, 1956. 12. *Balje O. E.* Turbo machines : A guide to Design Selection and Theory / *O. E. Balje*. – New York : Wiley Inter Science Publication, 1981. 13. *Streeter Victor L.* Fluid Mechanics / *Victor L. Streeter, E. Benjamin Wylie*. – New York : McGraw Hill, 1983. 14. *Sick M.* Recent Developments in Dynamic Analysis of Water Turbines / *M. Sick, W. Michler, T. Weiss [et al.]* // Journal of Power and Energy. – 2009. – Part A, vol. 223. – P. 415–427. 15. *Lewis R. J.* Developments of Actuator Disc Theory for Compressible Flow Through Turbo-machines / *R. J. Lewis* // Int. Journal of Mech. Sci. – 1995. – Vol. 37, № 10. – P. 1061–1066. 16. *Fraser D. A.* A Three-Dimensional Turbulent Flow Analysis Method for the Rotating Channels of a Centrifugal Turbo-machine / *D. A. Fraser, J. H. G. Howard, W. C. Lennox* // Transaction of ASME. – 1983. – Vol. 105. – P. 422–429. 17. *Kiermm D.* Numerical Refinement of Palmiet's Pump Design-Turbine Design / *D. Kiermm, R. Schilling* // Journal of Water Power and Dam Construction. – 1988. – P. 17–20. 18. *Balabhakaran V.* Application of Surface Vorticity Distribution Theory for Flow Through Axial Flow Hydro Turbo-machines / *V. Balabhakaran, R. I. Lewis, H. C. Radhakrishna* // Journal of Irrigation and Power. – 1988. – P. 124–142. 19. *Welzel B. A.* Numerical Optimization Method and its Application to the Design of an Axial Hydraulic Turbine / *B. A. Welzel, A. Ruprecht, G. Lein* // Report on Modeling. Testing and Monitoring of Hydropower Plants-II. –

Lausanne. – 1996. – P. 67–76. 20. *Maji P. K.* Three-Dimensional Analysis of Flow In the Spiral Casing of a Reaction Turbine Using a Differently Weighted Petrov-Galerkin Method / *P. K. Maji, G. Biswas* // Journal of Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1998. – Vol. 167. – P. 167–190. 21. *Geode E.* Hydro Turbine Design In a VR Environment / *E. Geode, A. Kaps, A. Ruprecht [et al.]* // ISIMADE. – Baden-Baden. – 1999. – P. 1–4. 22. *Pande. K.* Use of Modern Techniques to Provide a Cost-Effective Solution for Up-rating/renovating of Power Plants in India / *K. Pande, K. Giridhar, L. K. Harwani [et al.]* // Proceeding of Conference on Up-rating & Refurbishing Hydro Power Plants. – Berlin. – 1999. 23. *Brane S.* Monitoring of Cavitation in the Kaplan Turbines / *S. Brane, K. Igor, H. Marko [et al.]* // IEEE. – 1999. – Vol. 4. – P. 1224–1228. 24. *Bernard M.* Simulation Creates Potential \$5 Million Revenue gain from Hydropower Turbines / *M. Bernard* // Journal Article by Fluent Software Users. – 1999. – JA 101. – P. 1–4. 25. *Lipej Andrej* Design of Kaplan Runner using Multi-objective Genetic algorithms Optimization / *Andrej Lipej, Carlo Poloni* // Journal of Hydraulic Research. – 2000. – Vol. 38, № 1. – P. 73–79. 26. *Peng Guoyi* Design Optimization of Axial Flow Hydraulic Turbine Runner : Part I-An Improved Q3D Inverse Method / *Guoyi Peng, Shuliang Cao, Masaru Ishizuka [et al.]* // International Journal for Numerical Methods in Fluids. – 2002. – Vol. 39 (6). – P. 517–531. 27. *Nilsson R.* Validation of CFD Against Detailed Velocity and Pressure Distributions in Water Turbine Runner Row / *R. Nilsson, L. DavWson* // International Journal for Numerical Methods In Fluids. – 2003. – Vol. 41 (8). – P. 863–879. 28. *Cho Soo-Young* Experimental Study on the Incidence Effect on Rotating Turbine Blades / *Soo-Young Cho, Sang-Kyu Choi* // Proceeding of Institution of Mechanical Engineers. Part A : Journal of Power and Energy. – 2004. – Vol. 218. – P. 96–113. 29. *Swiderski Jacek* Recent Approach to Refurbishments of Small Hydro Projects Based on Numerical Flow Analysis / *Jacek Swiderski* // Small Hydro Workshop. – Montreal. – 2004. – P. 1–10. 30. *Lipej A.* Optimization Method for the Design of Axial Hydraulic Turbines / *A. Lipej* // Proceeding of institution of Mechanical Engineers. Part-A : Journal of Power and Energy. – 2004. – Vol. 218. – P. 43–50. 31. *Padurean Loan* Study of Hydraulic Losses in Francis Turbine / *Loan Padurean, Ion Vela, Octavian Megheles* // 6th International Conference on Hydraulic Machinery and Hydrodynamics Timisora. – Romania, 21–22 October 2004. – P. 147–150. 32. *Manness Jessica* An Improved Model for Predicting the Efficiency of Hydraulic Propeller Turbines / *Jessica Manness, Jay Doering* // National Research Council P Canada. Canadian Journal of Civil Engineering. – 2005. – № 32 (5). – P. 789–795. 33. *Thum Susanne* Optimization of Hydraulic Machinery Bladings by Multilevel CFD Techniques / *Susanne Thum, Rudolf Schilling* // International Journal of Rotating Machinery. – 2005. – Vol. 5. – P. 161–167. 34. *Thakker A.* Experimental and Computational Analysis on Guide Vane Losses of Impulse Turbine for Wave Energy Conversion / *A. Thakker, T. S. Dhanasekaran* // Journal of renewable energy. – 2005. – Vol. 30. – P. 1359–1373. 35. *Marjavaara Daniel B.* CFD Driven optimization on Hydraulic Turbine Draft Tubes using Surrogate Models / *Daniel B. Marjavaara* // Ph.D thesis, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering. – Lulea : University of Technology. – 2006. 36. *Lees Ian A.* Turbine Upgrade with Computational Fluid Dynamics / *Ian A. Lees, Rik J. Hothersall* // Hydro Review. – 2006. – Vol. 14, № 4. – P. 20–24. 37. *Esclaer Xavler* Detection of cavitation in hydraulic turbines / *Xavler Esclaer, Eduard Egusquiza, Mohammad Farahat [et al.]* // Mechanical system and signal processing. – 2006. – Vol. 20. – P. 983–1007. 38. *Rodngues Liang W.* Numerical Simulation of Fluid Added Mass Effect on a Francis Turbine Runner / *Liang W. Rodngues, E. Egusquiza, X. Escaler [et al.]* // Journal of Computers & Fluids. – 2007. – Vol. 36. – P. 1106–1118. 39. *Wang Wuen-quan* Large- Eddy Simulation of Turbulent Flow Considering Inflow Wakes in a Francis Turbine Blade Passage / *Wuen-quan Wang, Zhang U-xteng, Yan Yen* // Journal of Hydrodynamic. – 2007. – Sec. B, vol. 19 (2). – P. 201–209. 40. *Keck Helmut* Thirty Years of Numerical Flow Simulation In Hydraulic Turbomachines / *Helmut Keck, Mirjam Sick* // Springer Online Journal. – 2008. – P. 211–225. 41. *V. Nicola* Improvement of a Francis Runner Design / *Nicola V.* // 3rd IAHR International Meeting and Workgroup on Cavitations and Dynamics Problems in Hydraulic Machinery and Systems. – Czech Republic, Brno, 14–16 October 2009. – P. 177–182. 42. *Saeed R. A.* Modeling of Flow Induced Stresses in a Francis Turbine Runner / *R. A. Saeed, A. N. Galybin, V. Popov* // Elsevier online Journal. – 2010. – P. 1–11. 43. *Latin Santiago* CFD Numerical Simulations of Francis Turbine / *Santiago Latin, Garcia Manuel,*

Quinterio Brian [et al.] // Rev. Fac. Ing. Univ. – Antioquia. – 2010. – № 51. – P. 24–33.

References: 1. Sanjay, Jain, R. P. Saini and Arun Kumar. "CFD Approach for Prediction of Efficiency of Francis Turbine." *Proceedings of 8th International Conference on Hydraulic Efficiency measurement*. 21–23 October 2010. 257–263. Print. 2. Raabe, Ing. Joachim. *Hydro Power. The design, Use and Function of Hydro Mechanical Hydraulic and Electrical Equipment*. Dusseldorf: VDI-Veriag GmbH, 1985. Print. 3. Barlit, V. V. *Gidravlicheskie turbiny*. Kiev: Vischa shkola, 1977. Print. 4. Barlit, V. V., et al. *Hydraulic Turbines*. Vol. 1 (11). Bhopal: MACT, 1983. Print. 5. Lewis, R. I. *Turbo-machinery Performance Analysis*. London: Arnold, 1996. Print. 6. Barlit, V. V., et al. *Raschet i proektirovanie protochnoy chasti reaktivnykh gidroturbin na osnove chislennogo modelirovaniya rabocheho protsessa*. Kharkov: NTU "KhPI", 2008. Print. 7. Mironov, K. A. "Proektirovanie rabochih kolez radialno-osevoy vysokonapornoy gidroturbiny na parametry GES Kameng." *Vestnik NTU "HPI". Tematicheskii vyipusk "Tehnologii v mashinostroenii"*. No. 24. Kharkov: NTU "KhPI", 2010. 69–76. Print. 8. Mironov, K. A. "Osobennosti techeniya zhidkosti v nizkonapornykh radialno-osevoy gidroturbinah." *Visnyk NTU "HPI". Ser.: Gidravlichni mashini ta gidroagregati*. No. 3 (1112). Kharkov: NTU "KhPI", 2015. 53–58. Print. 9. Fletcher, C. A. J. *Computational Techniques for Fluid Dynamics*. Berlin: Springer Verlag, 1988. Print. 10. John, D., and Jr. Anderson. *Computational Fluid Dynamics*. New York: McGraw Hill Inc., 1995. Print. 11. Shepherd, D. G. *Principles of Turbo machinery*. New York: The Macmillan Company, 1956. Print. 12. Balje, O. E. *Turbo machines: A guide to Design Selection and Theory*. New York: Wiley Inter science Publication, 1981. Print. 13. Streeter, Victor L., and E. Benjamin Wylie. *Fluid Mechanics*. New York: McGraw Hill, 1983. Print. 14. Sick, M., et al. "Recent Developments in Dynamic Analysis of Water Turbines." *Journal of Power and Energy. Part A* 223 (2009): 415–427. Print. 15. Lewis, R. J. "Developments of Actuator Disc Theory for Compressible Flow Through Turbo-machines." *Int. Journal of Mech. Sci.* 37.10 (1995): 1061–1066. Print. 16. Fraser, D. A., J. H. G. Howard and W. C. Lennox. "A Three-Dimensional Turbulent Flow Analysis Method for the Rotating Channels of a Centrifugal Turbo-machine." *Transaction of ASME*. Vol. 105. 1983. 422–429. Print. 17. Kierm, D., and R. Schilling. "Numerical Refinement of Palmiet's Pump Design-Turbine Design," *Journal of Water Power and Dam Construction* (1988): 17–20. Print. 18. Balabhakaran, V., R. I. Lewis and H. C. Radhakrishna. "Application of Surface Vorticity Distribution Theory for the Analysis of Flow Through Axial Flow Hydro Turbo-machines." *Journal of Irrigation and Power* (1988): 124–142. Print. 19. Welzel, B., A. Ruprecht and G. Lein. "A Numerical Optimization Method and its Application to the Design of an Axial Hydraulic Turbine" *Report on Modeling, Testing and Monitoring of Hydropower Plants-II*. Lausanne, 1996. 67–76. Print. 20. Maji, P. K., and G. Biswas. "Three-Dimensional Analysis of Flow In the Spiral Casing of a Reaction Turbine Using a Differently Weighted Petrov-Galerkin Method." *Journal of Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 167 (1998): 167–190. Print. 21. Geode, E., et al. "Hydro Turbine Design In a VR Environment." *ISIMADE*. Baden-Baden, 1999. 1–4. Print. 22. Pande, K., et al. "Use of Modern Techniques to Provide a Cost-Effective Solution for Up-rating/renovating of Power Plants in India." *Proceeding of Conference on Up-rating & Refurbishing Hydro Power Plants*. Berlin, 1999. Print. 23. Brane, S., et al. "Monitoring of Cavitation in the Kaplan Turbines." *IEEE*. Vol. 4. 1999. 1224–1228. Print. 24. Bernard, M. "Simulation Creates Potential \$5 Million Revenue gain

from Hydropower Turbines." *Journal Article by Fluent Software Users* JA 101 (1999): 1–4. Print. 25. Lipej, Andrej, and Carlo Poloni. "Design of Kaplan Runner using Multi-objective Genetic algorithms Optimization." *Journal of Hydraulic Research* 1.38 (2000): 73–79. Print. 26. Peng, Guoyi, et al. "Design Optimization of Axial Flow Hydraulic Turbine Runner: Part I-An Improved Q3D Inverse Method." *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 39.6 (2002): 517–531. Print. 27. Nilsson, R., and L. DavWson. "Validation of CFD Against Detailed Velocity and Pressure Distributions in Water Turbine Runner Row." *International Journal for Numerical Methods In Fluids* 41.8 (2003): 863–879. Print. 28. Cho, Soo-Young, and Sang-Kyu Choi. "Experimental Study on the Incidence Effect on Rotating Turbine Blades." *Proceeding of Institution of Mechanical Engineers. Part A: Journal of Power and Energy* 218 (2004): 96–113. Print. 29. Swiderski, Jacek. "Recent Approach to Refurbishments of Small Hydro Projects Based on Numerical Flow Analysis." *Small Hydro Workshop*. Montreal, 2004. 1–10. Print. 30. Lipej, A. "Optimization Method for the Design of Axial Hydraulic Turbines." *Proceeding of institution of Mechanical Engineers. Part-A: Journal of Power and Energy* 218 (2004): 43–50. Print. 31. Padurean, Loan, Ion Vela and Octavian Megheles. "Study of Hydraulic Losses in Francis Turbine." *6th International Conference on Hydraulic Machinery and Hydrodynamics Timisora*. Romania, 2004. 147–150. Print. 32. Manness, Jessica, and Jay Doering. "An Improved Model for Predicting the Efficiency of Hydraulic Propeller Turbines." *National Research Council P Canada. Canadian Journal of Civil Engineering* 32.5 (2005): 789–795. Print. 33. Thum, Susanne, and Rudolf Schilling. "Optimization of Hydraulic Machinery Bladings by Multilevel CFD Techniques." *International Journal of Rotating Machinery* 5 (2005): 161–167. Print. 34. Thakker, A., and T. S. Dhanasekaran. "Experimental and Computational Analysis on Guide Vane Losses of Impulse Turbine for Wave Energy Conversion." *Journal of renewable energy* 30 (2005): 1359–1373. Print. 35. Marjavaara, Daniel B. "CFD Driven optimization on Hydraulic Turbine Draft Tubes using Surrogate Models." *Ph. D thesis, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering*. Lulea: University of Technology, 2006. Print. 36. Lees, Ian A., and Rik J. Hothersall. "Turbine Upgrade with Computational Fluid Dynamics." *Hydro Review*. Vol. 14. 4. 2006. 20–24. Print. 37. Esclaer, Xavler, et al. "Detection of cavitation in hydraulic turbines." *Mechanical system and signal processing*. Vol. 20. 2006. 983–1007. Print. 38. Rodngues, Liang W., et al. "Numerical Simulation of Fluid Added Mass Effect on a Francis Turbine Runner." *Journal of Computers & Fluids* 36 (2007): 1106–1118. Print. 39. Wang, Wuen-quan, Zhang U-xteng and Yan Yen. "Large-Eddy Simulation of Turbulent Flow Considering Inflow Wakes in a Francis Turbine Blade Passage." *Journal of Hydrodynamic Sec. B*. 19.2 (2007): 201–209. Print. 40. Keck, Helmut, and Mirjam Sick. "Thirty Years of Numerical Flow Simulation In Hydraulic Turbomachines." *Springer Online Journal* (2008): 211–225. Print. 41. V., Nicola. "Improvement of a Francis Runner Design." *3rd IAHR International Meeting and Workgroup on Cavitations and Dynamics Problems in Hydraulic Machinery and Systems*. Czech Republic, Brno, 2009. 177–182. Print. 42. Saeed, R. A., A. N. Galybin and V. Popov. "Modeling of Flow Induced Stresses in a Francis Turbine Runner." *Elsevier online Journal* (2010): 1–11. Print. 43. Latin, Santiago, et al. "CFD Numerical Simulations of Francis Turbine." *Rev. Fac. Ing. Univ.* No. 51. Antioquia, 2010. 24–33. Print.

Поступила (received) 8.09.2015

Міронов Константин Анатолієвич – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідравлічні машини», г. Харків; тел.: (063) 809-09-41; e-mail: cosmir@i.ua.

Mironov Konstantin Anatolievich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of "Hydraulic Machines", Kharkov; tel.: (063) 809-09-41; e-mail: cosmir@i.ua.

Олексенко Юлія Юрєвна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістр кафедри «Гідравлічні машини», г. Харків; тел.: (063) 242-77-05; e-mail: yuliayo@ukr.net.

Oleksenko Yulia Yuriivna – National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Master Student at the Department of "Hydraulic Machines", Kharkov; tel.: (063) 242-77-05; e-mail: yuliayo@ukr.net.