

УДК 621.224

А.В. РУСАНОВ, д-р техн. наук; проф. ИПМаш НАН України; Харьков;
О.Н. ХОРЕВ, канд. техн. наук; с.н.с. ИПМаш НАН України; Харьков;
А.В. ЛИННИК, главный конструктор гидротурбин ОАО «Турбоатом»; Харьков;
П.Н. СУХОРЕБРЫЙ, канд. техн. наук; с.н.с. ИПМаш НАН України; Харьков

ВЛИЯНИЕ ПРОСТОГО ОКРУЖНОГО НАВАЛА ЛОПАСТЕЙ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ОСЕВОЙ ГИДРОТУРБИНЫ ПЛ20 НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ

Представлены результаты численного исследования и анализ влияния простого окружного навала лопасти рабочего колеса осевой гидромашины ПЛ20 на структуру потока и гидродинамические характеристики проточной части. Приведены зависимости потерь энергии в рабочем колесе и значения КПД проточной части при оптимальном режиме работы от величины навала. Показано, что для исследуемой проточной части применение навала позволило повысить значение максимального КПД на оптимальном режиме. Расчеты выполнены с использованием программного комплекса *IPMFlow*.

Ключевые слова: гидротурбина, проточная часть, пространственное профилирование, окружной навал лопасти, рабочее колесо, гидродинамическое совершенствование.

Введение

Одним из главных требований, предъявляемых к новым и модернизируемым гидротурбинам, является их высокая экономичность. Перспективным способом повышения эффективности проточных частей (ПЧ) гидромашин является их гидродинамическое усовершенствование за счет пространственного профилирования основных элементов ПЧ. Наиболее распространенными видами пространственного профилирования в турбостроении являются окружной и осевой навалы лопаток направляющего аппарата (НА) и лопастей рабочего колеса (РК) [1]. При навалах форма сечений лопастных систем остается неизменной, меняется только вид линии привязки и, как следствие, взаимное положение сечений в окружном или осевом направлениях. Навал называется простым, если сечения лопасти по высоте линейно отклоняются относительно оси; если нелинейно, то такой навал называется сложным.

Применяемые в практике отечественного гидротурбостроения методы расчетов элементов ПЧ не дают возможность оценить влияние навалов лопастных систем. Для подобных исследований необходимо использование методов математического моделирования пространственных вязких течений. В статье представлены результаты численного исследования влияния простого окружного навала лопастей РК осевой гидромашины ПЛ20 Кременчугской ГЭС на структуру течения и гидродинамические характеристики ПЧ.

Объект исследования. Методика проведения численного эксперимента

В качестве объекта исследования рассмотрена ПЧ часть осевой поворотно-лопастной гидротурбины ПЛ20 Кременчугской ГЭС [2]. Расчетная область состоит из 32 лопаток направляющего аппарата (НА) симметричного профиля УП-32-2 высотой $b_0=0,4D_1$, диаметром расположения осей поворота лопаток $D_0=1,1625D_1$; РК ПЛ 20/3271у-В с диаметром втулки $d_{вт}=0,37D_1$ и числом лопастей $z_1=4$, а также диффузора отсасывающей трубы.

Исследования выполнены с помощью программного комплекса *IPMFlow*,

позволяющего моделировать пространственные вязкие течения несжимаемой жидкости в проточных частях гидротурбин на основе численного интегрирования уравнений Рейнольдса с дополнительным членом, содержащим искусственную сжимаемость. Для учета турбулентных эффектов применяется дифференциальная двухпараметрическая модель *SST* Ментера. Численное интегрирование уравнений проводится с помощью неявной квазимонотонной схемы Годунова второго порядка точности по пространству и времени. Подробное описание математической модели и численного метода представлено в работах [3, 4].

Физическая область отображается на расчетную с использованием структурированной сетки *H*-типа с числом ячеек $72 \times 72 \times (100+200) = 1.555.200$.

Численные исследования проведены для модели с диаметром РК $D_1 = 1$ м при напоре $H = 1$ м при оптимальном режиме: открытие НА $a_0 = 56,52$ мм, значение угла установки лопасти РК $\varphi_{л} = 15^\circ$, приведенный расход $Q'_1 = 1117,9$ л/с, приведенная частота вращения $n'_1 = 152,9$ мин⁻¹, угол потока на входе $\alpha_{п} = 38,9^\circ$ [2].

Исследование влияния простого окружного навала лопасти РК

Численные исследования проведены для расчетных областей с исходной лопастью РК (навал $\varphi = 0^\circ$) и шестью вариантами простого окружного навала (навалы $\varphi = -30^\circ; -20^\circ; -10^\circ; +10^\circ; +20^\circ; +30^\circ$). На рис. 1 представлена схема простого окружного навала и вид в плане исходной и «наваленных» лопастей РК.

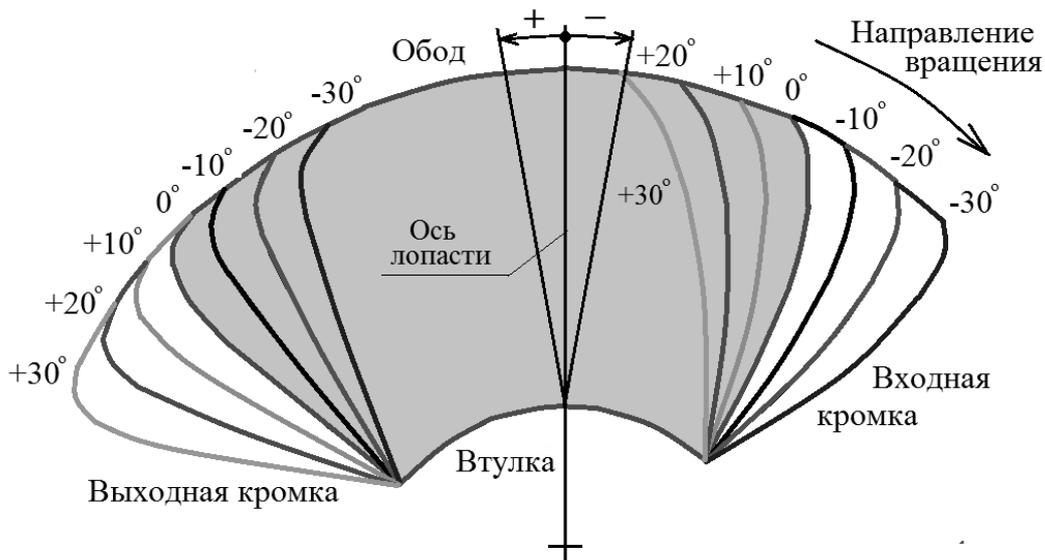


Рис. 1 – Схема простого окружного навала лопасти РК

На рис. 2 приведены распределения изолиний статического давления в плоскости, перпендикулярной оси вращения и расположенной в среднем сечении межлопастного канала РК для трех значений окружного навала: исходного и максимальных положительного и отрицательного. Видно, что градиент давления выше на стороне разрежения, а навал оказывает заметное влияние на положение изолиний давления: при отрицательном значении навала они сдвигаются в сторону разрежения, при положительном – в сторону давления. Наблюдается также изменение распределения давления на рабочих поверхностях РК.

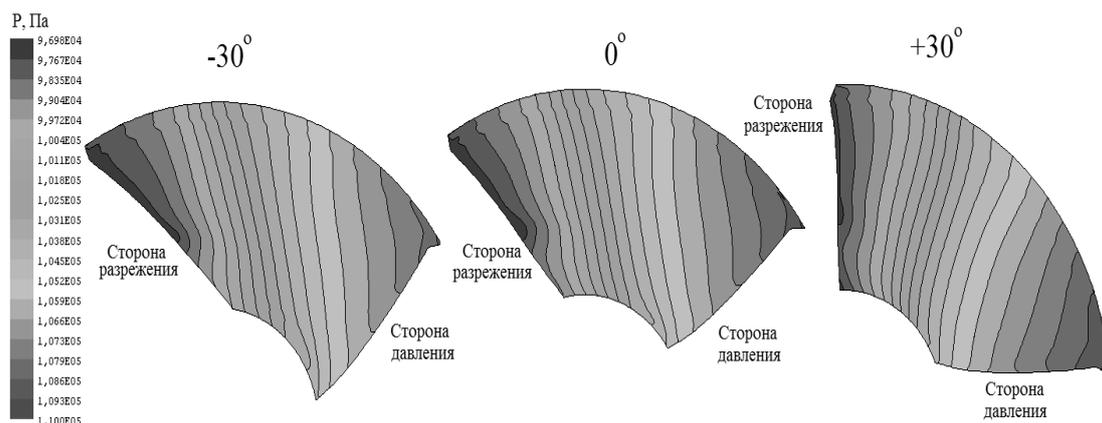


Рис. 2 – Изолинии давления в среднем поперечном сечении межлопастного канала РК для трех значений окружного навала

На рис. 3 приведено распределение статического давления на поверхностях лопасти периферийной области (90 % ширины канала) РК для трех вариантов окружного навала. При простом окружном навале периферийный участок лопасти подвергается наибольшей деформации. Из приведенного рисунка видно, что наибольшее влияние пространственное профилирование оказывает на обтекание входного участка лопасти, где в результате применения навала значительно меняется перепад давления: увеличивается при отрицательном навале и уменьшается при положительном. Дальнейшее увеличение отрицательного навала может привести к образованию локальных зон разрежения на входном участке и, как следствие, ухудшению кавитационных качеств РК. На стороне давления по всей длине сечения положительный навал приводит к повышению уровня давления, отрицательный – к понижению. На стороне разрежения навалы существенно изменяют эпюры давления на первой половине сечения и мало влияют на второй.

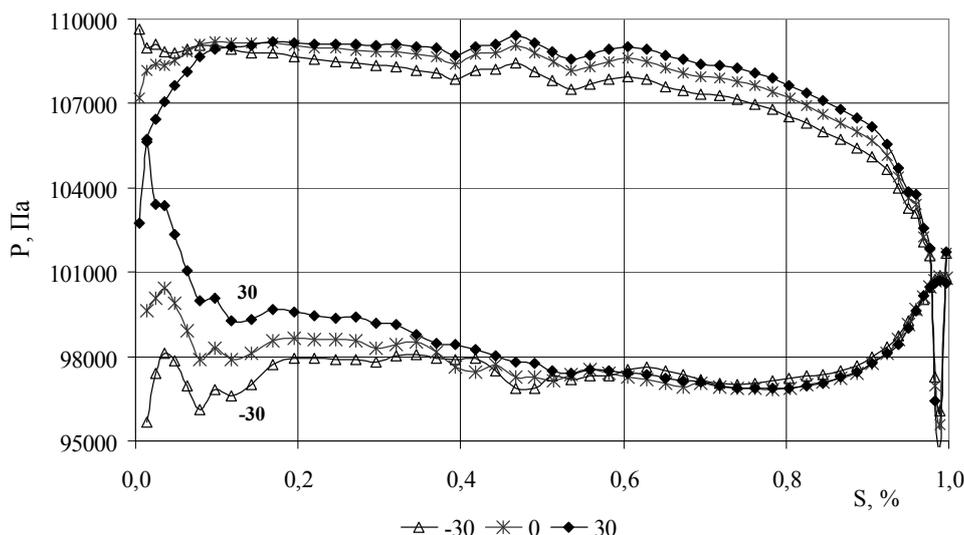


Рис. 3 – Распределение давления вдоль периферийного сечения РК при разных значениях окружного навала

На рис. 4 приведено распределение осредненного по шагу абсолютного полного давления (энергии) по ширине канала в среднем поперечном сечении межлопастного канала РК (то же сечение, что и на рис. 2) при разных значениях окружного навала. Видно, что навалы приводят к заметному перераспределению энергии по ширине канала. Отрицательные навалы повышают уровень энергии в области втулки и понижают на периферийном участке. При положительных навалах картина противоположная. Таким образом, применяя окружной навал, можно добиться более равномерного распределения энергии по ширине канала. В исследуемом РК ПЛ 20/3271у-В наиболее равномерное распределение энергии получено при отрицательном навале $\varphi = -10^\circ$.

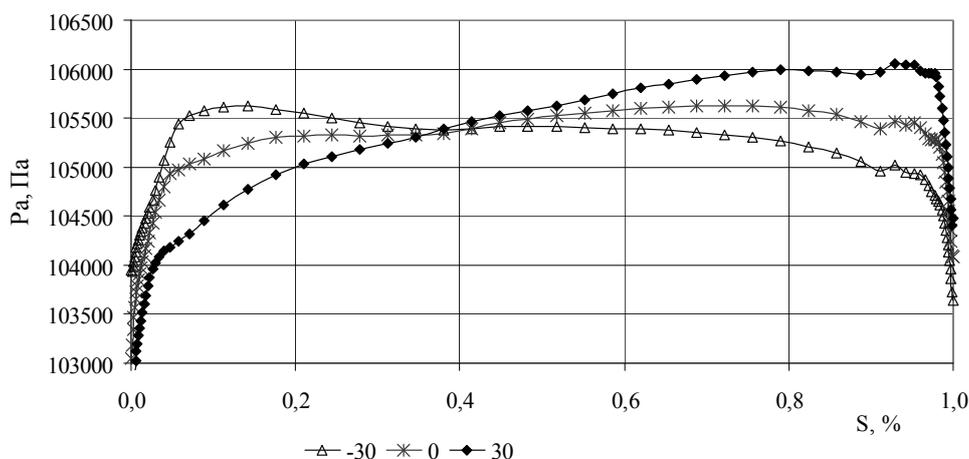


Рис. 4 – Распределение осредненного по шагу абсолютного полного давления по ширине канала в среднем поперечном сечении межлопастного канала РК при разных значениях окружного навала

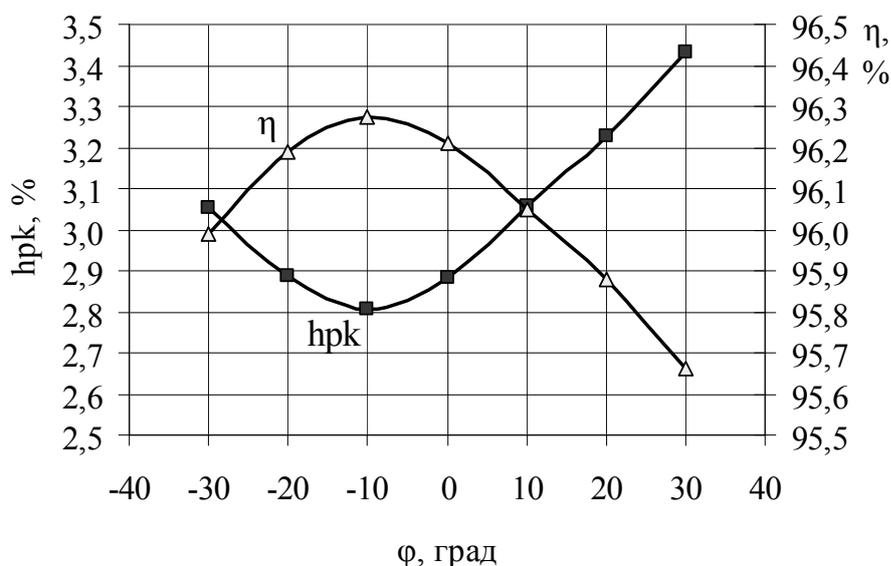


Рис. 5 – Зависимость потерь в РК и КПД проточной части от величины окружного навала

Проведенные расчеты позволили определить потери энергии в элементах ПЧ и значение КПД расчетной области. Потери в НА практически не меняются при навалах

и составляют $h_{НА}=0,91...0,92\%$. На рис. 5 приведены зависимости потерь энергии в рабочем колесе и КПД исследуемой расчетной области (без учета спиральной камеры со статором и отсасывающей трубы) от величины навала. Как видно из рисунка, изменения структуры потока в результате применения окружного навала (рис. 2÷4) приводят к изменению энергетических характеристик. Минимальное значение потерь в РК получено при навале $\varphi=-10^\circ$. При этой же величине навала наблюдается и наибольшее значение КПД.

Выводы

Выполнено численное исследование влияния простого окружного навала лопасти рабочего колеса осевой гидротурбины ПЛ20 Кременчугской ГЭС на структуру потока и интегральные характеристики проточной части. В результате установлено, что при применении навала:

- меняется положение изолиний статического давления в межлопастном канале РК;
- существенно меняется вид эпюр давления на поверхностях лопасти, особенно в районе входной кромки;
- возможно выровнять распределение энергии по ширине канала;
- возможно добиться снижения потерь в РК и повышения максимального значения КПД при оптимальном режиме современной высокоэффективной проточной части Кременчугской ГЭС.

В дальнейшем планируется провести исследования влияния сложных форм навалов на структуру потока и гидродинамические показатели гидротурбин.

Список литературы: 1. Русанов, А. В. Влияние сложного навала рабочих и направляющих лопаток ЦВД паровой турбины на аэродинамические характеристики проточной части [Текст] / А. В. Русанов, Ю. П. Волков // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2008. – Вып. 3 (13). – С. 93–97. 2. Русанов, А. В. Математическое моделирование течения жидкости и анализ характеристик потока в подводе гидротурбины ПЛ20 Кременчугской ГЭС [Текст] / А. В. Русанов, А. В. Линник, П. Н. Сухорезный, О. Н. Хорев, А. В. Рябов // Вісник Національного технічного університету «ХП». Сер. Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХП», 2014. – Вип. 1 (1044). – С. 41–48. 3. Русанов, А. В. Численное моделирование течений вязкой несжимаемой жидкости с использованием неявной квазилинейной схемы Годунова повышенной точности [Текст] / А. В. Русанов, Д. Ю. Косьянов // Восточ.-Европ. журн. передовых технологий. – 2009. – №5. – С. 4–7. 4. Русанов, А. В. Математическое моделирование нестационарных газодинамических процессов в проточных частях турбомашин [Текст] : моногр. / А. В. Русанов, С. В. Ершов. – Харьков: Ин-т пробл. машиностроен. НАН Украины, 2008. – 275 с.

Bibliography (transliterated): 1. Rusanov, A. V., and Ju. P. Volkov. "Vlijanie slozhnogo navala rabochih i napravljajushhij lopatok CVD parovoj turbiny na ajerodinamicheskie harakteristiki protochnoj chasti." *Kompressornoe i jenergeticheskoe mashinostroenie*. No. 3(13). 2008. 93–97. Print. 2. Rusanov, A. V., et al. "Matematicheskoe modelirovanie techenija zhidkosti i analiz harakteristik potoka v podvode gidroturbiny PL20 Kremenchugskoj GJeS." *Visnyk NTU "HPI"*. Ser.: *Energetichni ta teplotehnichni procesi j ustatkuvannja*. No. 1 (1044). Kharkiv: NTU "HPI", 2014. 41–48. Print. 3. Rusanov, A. V., and D. Ju. Kos'janov. "Chislennoe modelirovanie techenij vjazkoj neszhimaemoj zhidkosti s ispol'zovaniem nejavnoj kvazimonotonnoj shemy Godunova povyshennoj tochnosti." *Vostochn.-Evrop. zhurn. peredovyh tehnologij* 5 (2009): 4–7. Print. 4. Rusanov, A. V., and S. V. Ershov. *Matematicheskoe modelirovanie nestacionarnyh gazodinamicheskijh processov v protochnyh chastjah turbomashin*. Kharkov: In-t probl. mashinostroen. NAN Ukrainy, 2008. Print.

Поступила (received) 23.12.2014