

УДК621.224.

И. С. Веремеенко^{*}, д-р. техн. наук**С. В. Гладышев**^{*}**С. А. Андриющенко**^{*}**Е. С. Агибалов**^{**}^{*} ООО «Харьковтурбоинжиниринг»

(г. Харьков, e-mail: khte@online.kharkov.ua)

^{**} Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины

(г. Харьков, e-mail: agibalov @ipmach.kharkov.ua)

ИЗМЕРЕНИЕ ПОВОРОТНОГО МОМЕНТА НА ЛОПАСТИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА МОДЕЛИ ПОВОРОТНО-ЛОПАСТНОЙ ГИДРОТУРБИНЫ С ПОМОЩЬЮ БЕСПРОВОДНОЙ ТЕЛЕМЕТРИИ

Предложен усовершенствованный вариант экспериментального метода исследования поворотного момента лопастей на моделях рабочего колеса поворотной-лопастной гидротурбины на основе современной миниатюрной электроники и беспроводных технологий. Приведен опыт внедрения предложенного метода на гидродинамическом стенде ИПМаш НАН Украины и результаты измерений величины поворотного момента для шестилопастной модели рабочего колеса ПЛ40. Для измерения момента применялся датчик тензометрического типа и модель рабочего колеса, разработанные специалистами ООО "Харьковтурбоинжиниринг". Экспериментальным путем на гидродинамическом стенде получены величины моментов поворота лопастей во всем поле универсальной характеристики. Измерены значения моментов поворота на разгонных режимах, а также значения моментов поворота от действия центробежных сил.

Запропоновано удосконалений варіант експериментального методу дослідження поворотного моменту лопатей на моделях робочого колеса поворотної-лопастової гідротурбіни на основі сучасної мініатюрної електроніки і бездротових технологій. Наведено досвід впровадження запропонованого методу на гідродинамічному стенді ИПМаш НАН України та результати вимірювань величини поворотного моменту для шестилопастової моделі робочого колеса ПЛ40. Для вимірювання моменту застосовувався датчик тензометричного типу та модель робочого колеса, розроблені фахівцями ТОВ "Харківтурбоінжиніринг". Експериментальним шляхом на гідродинамічному стенді отримані величини моментів повороту лопатей у всьому полі універсальної характеристики. Виміряні значення моментів повороту на розгінних режимах, а також від дії відцентрових сил.

Ключевые слова: модель рабочего колеса, ПЛ гидротурбина, лопасть, поворотный момент, тензодатчик, эксперимент.

1. Введение

Величины поворотных моментов, действующих на лопасть рабочего колеса поворотной-лопастной (ПЛ) гидротурбины, необходимы для расчетов при проектировании рабочих органов турбины и механизмов привода. На лопастях ПЛ гидротурбины при работе возникает поворотный момент, стремящийся повернуть лопасть вокруг оси цапфы. Этот момент складывается из гидродинамических сил (M_T) взаимодействия лопасти с потоком и центробежных сил ($M_{цбс}$), действующих на лопасть. В настоящее время, несмотря на существование и развитие расчетных методик определения величин гидравлического момента,

экспериментальные методы не потеряли своей актуальности и используются для подтверждения расчетных данных.

В практике отечественного гидротурбостроения применялись различные экспериментальные способы определения поворотного момента: с помощью индуктивных датчиков, механических динамометров или тензометрических датчиков. В настоящее время, в основном, остался тензометрический способ [1] как наиболее стабильный и надежный.

В процессе измерения модель рабочего колеса находится в проточной части с водой и вращается со значительной частотой, что заметно усложняет проведение измерений. Традиционно для этих целей использовали следующую схему установки: от датчика, установленного на вращающейся под водой модели рабочего колеса, сигнал через провода, размещенные в полом валу, подавался в сухую зону за пределами проточной части модели, затем через вращающийся узел контактного токосъемника передавался на измерительную аппаратуру, установленную неподвижно за пределами модельного блока [2]. Эта схема широко применялась несколько десятилетий, несмотря на то, что имела ряд существенных недостатков:

1) появление помех и искажение слабого сигнала от тензорезисторов при использовании контактных скользящих токосъемников в условиях вибрации от вращающихся машин;

2) повышенная чувствительность установки к наводкам от электрического и магнитного полей на токосъемник и провода, ведущие от датчика к измерительной аппаратуре;

3) влияние состояния рабочих поверхностей (механический износ, загрязнения, окисление и др.) токосъемников на точность измерений.

Для устранения указанных недостатков предложена новая схема установки на базе тензометрических датчиков с использованием современных возможностей по миниатюризации электроники и беспроводных технологий.

В данной статье приведена краткая информация по методике проведения испытаний, обработке полученных данных, а также результаты выполненных измерений.

2. Методика проведения исследований

Измерительная аппаратура была размещена во втулке модели рабочего колеса непосредственно рядом с датчиком для устранения недостатков традиционной схемы измерения момента на лопастях с помощью тензодатчиков, и усиленный, преобразованный сигнал в цифровом виде передавался по беспроводной технологии на компьютер для регистрации, анализа и дальнейшей обработки.

Испытания модели рабочего колеса ПЛ40 диаметром $D_l = 0,35$ метра с шестью лопастями проводились в лаборатории ИПМаш НАН Украины на стенде ЭКС-15.

На рис. 1 представлен внешний вид модели рабочего колеса с установленным датчиком 2 и измерительной аппаратурой 5. В качестве датчика момента использовалась специально разработанная цапфа в виде полого цилиндра, на наружные стенки которой наклеивались тензорезисторы промышленного производства. Для защиты от воздействия влаги тензорезисторы покрывались тремя слоями тонкой стеклоткани, пропитанной эпоксидной смолой с пластификатором. Из-за малых габаритов модели рабочего колеса при шести лопастях цапфы получились миниатюрными. Поэтому пришлось ограничиться размещением на них всего двух линейных тензорезисторов (под углом 45° к оси разворота лопасти и под углом 90° по отношению друг к другу) вместо традиционных четырех.

Цапфа одним концом с помощью конуса закреплена в корпусе рабочего колеса 1, на другой стороне ее с помощью резьбы и штифта зафиксирована лопасть 3. Для минимизации потерь на трение в конструкции установлен шариковый радиально-упорный подшипник 4, выполненный из коррозионно-стойких материалов.

Измерительная аппаратура 5, устанавливаемая на модели, состоит из:

1) серийно выпускаемого малогабаритного тензоусилителя с аналого-цифровым преобразователем (АЦП) марки AD101B фирмы HBM (Германия);

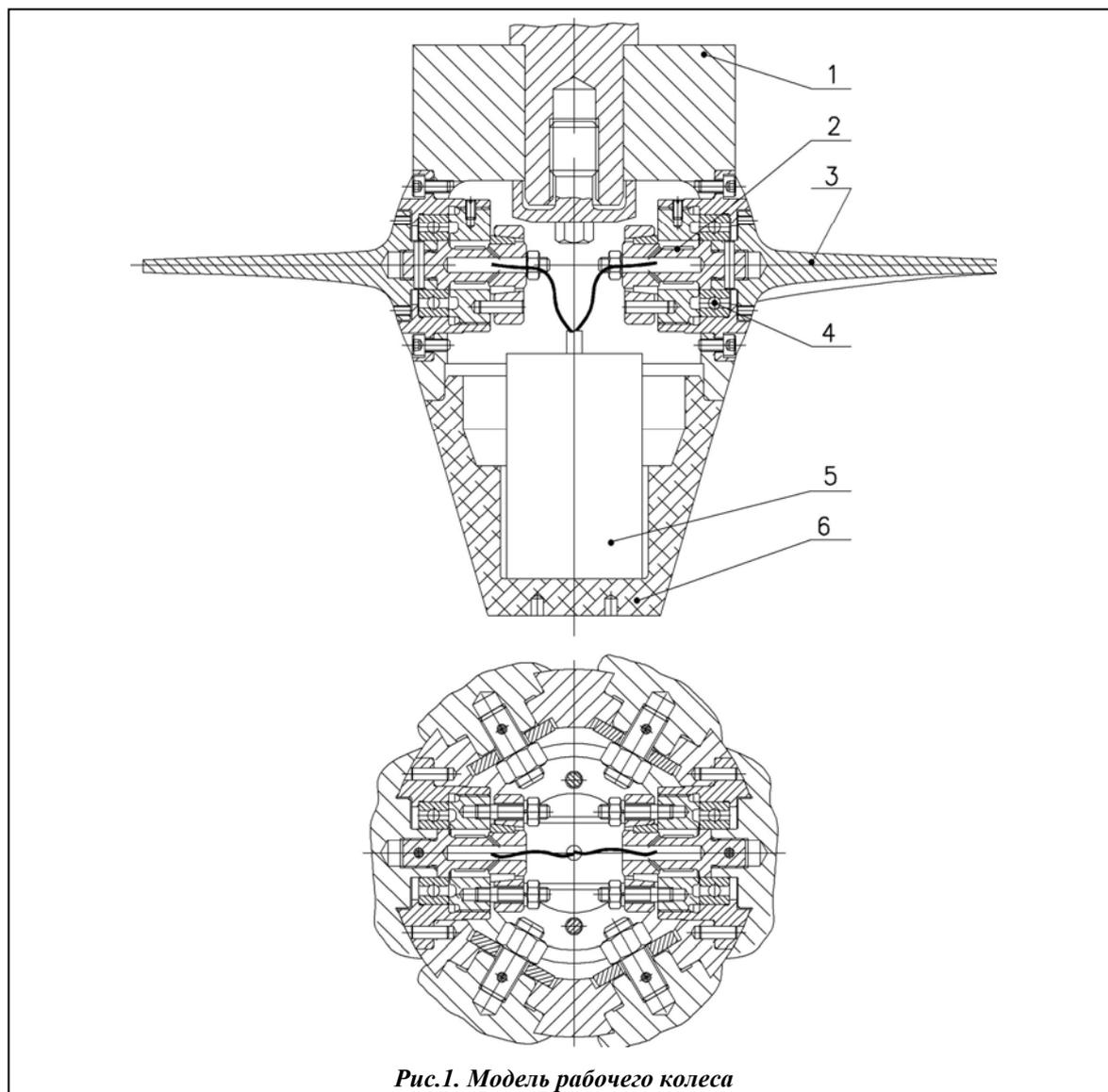


Рис.1. Модель рабочего колеса

2) беспроводного цифрового модема YS-1100 (Китай) с интерфейсом RS-232, работающего на частоте 433 МГц;

3) автономного источника питания в виде аккумуляторной батареи типа Li-ion емкостью 1.8 А·ч и напряжением 7.4 В.

Аппаратура собрана в корпус из стеклопластика, как герметичный моноблок. На модели аппаратура закрепляется в обтекателе 6 из оргстекла. При проведении испытаний, чтобы не экранировать передачу радиосигнала с модели рабочего колеса на компьютер оператора, используется камера рабочего колеса из оргстекла, которая ранее применялась для визуального регистрирования процессов кавитации в проточной части. Сигнал с измерительной аппаратуры модели принимается модемом YS-1100 на компьютере оператора. Для регистрации и обработки результатов замеров применялось программное обеспечение Catman фирмы HBM (Германия).

3. Градуировка датчика и оценка погрешности измерений

Для градуировки датчика было изготовлено специальное приспособление, схема которого приведена на рис. 2. Приспособление состоит из симметричного рычага с плечами по 500 мм, на которых установлены корзины для грузов А и Б.

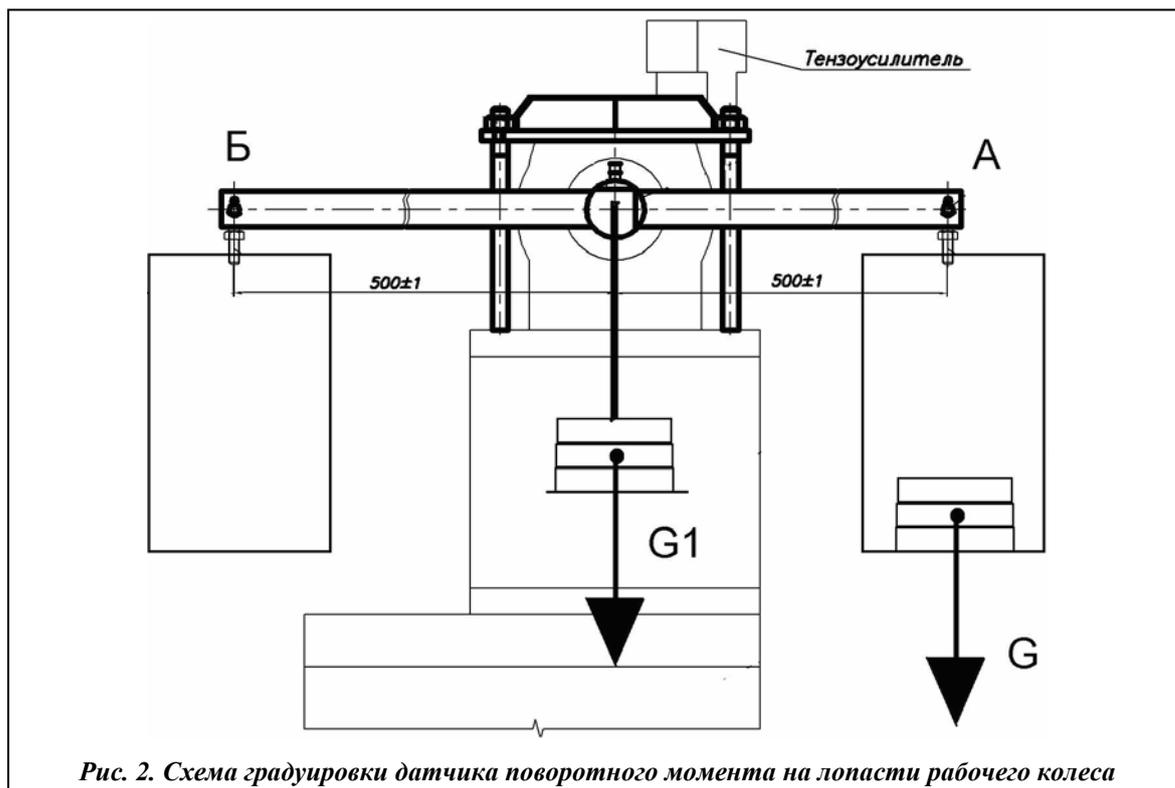


Рис. 2. Схема градуировки датчика поворотного момента на лопасти рабочего колеса

Рычаг крепился с помощью переходника на измерительной цапфе, установленной в корпусе рабочего колеса, и выставлялся горизонтально по уровню. Корзины А или Б последовательно нагружались, создавая момент, действовавший на открытие или закрытие лопасти. Максимальный вес набора грузов составлял 10 кгс, что создавало момент 500 кгс·см. После полного снятия нагрузки контролировалась величина оставшегося значения небаланса измерительного моста. Влияние изгиба цапфы на показания датчиков проверялось установкой грузов $G1$, соответствовавших максимальной осевой силе, действующей на лопасть при напоре испытаний 5–6 метров. Точка приложения груза $G1$ располагалась на расстоянии, эквивалентном положению центра давления на лопасти. Подвес груза осуществлялся лентой через отверстие в переходнике. Градуировка датчиков показала хорошую стабильность и повторяемость результатов.

Погрешность измерения момента M_T зависит от точности градуировочной характеристики датчика, класса регистрирующей аппаратуры, нестабильности режима испытаний, невозврата «0» измерительной системы, влияния осевой гидравлической силы на показания датчика.

В свою очередь, точность градуировочной характеристики зависит от класса тарировочных грузов ($\delta = \pm 0,4\%$), измерительной аппаратуры ($\delta = \pm 0,01\%$), плеча градуировочного рычага ($\delta = \pm 0,2\%$), трения в опорах, приводящего к разбросу показаний ($\delta = \pm 2\%$). Последний фактор является определяющим в величине общей погрешности и столь существенным, что прочими можно пренебречь.

Регистрирующая аппаратура при тарировке датчика момента и в процессе испытаний используется одна и та же, классом точности 0,01.

Нестабильность режима испытаний на стенде (в частности, напора) установлена в результате тарирования приборов и испытаний и не превышает 0,5%.

Невозврат «0» регистрирующей аппаратуры имеет место из-за трения, влияния влажности на сопротивления, температурного дрейфа и др. причин. При проведении испытаний диапазон измеряемых моментов был в пределах ± 300 кгс·см (протарирован до ± 500 кгс·см), при невозврате «0» в пределах $\pm 3,5$ кгс·см.

Влияние осевой гидравлической силы на показания датчика было исследовано при тарировании последнего и составляло до 15 кгс·см на одном из экземпляров датчика и до 17 кгс·см – на другом. Достаточно высокая чувствительность датчика к осевой силе обусловлена неидеальной точностью наклейки тензорезисторов и использованием всего одной пары тензорезисторов вместо традиционных двух пар. Для уменьшения влияния осевой силы на показания датчика и улучшения параметров датчиков в будущем предлагается использовать две пары тензорезисторов (четыре тензорезистора) с уменьшенной базой.

Возможно применение готовых пар тензорезисторов с сформированным на заводе расположением резисторов специально для измерения момента (розетка тензорезисторов под 90°, например, тензорезисторы 1-XY21-1.5/120 фирмы HBM, рис. 3, б).

В данном случае принято во внимание, что влияние изгибной составляющей может вызвать искажение M_r в расчетной точке, но эта погрешность измерений перекрывается при проектировании запасом механизма привода.

Влияние изгибной нагрузки на показания датчика определяется аккуратностью и точностью наклейки тензорезисторов на цапфу. Поэтому целесообразно изготавливать партию датчиков момента с запасом и отбирать в процессе градуировки наиболее удачные экземпляры для использования.

Суммарная оценка погрешности измерений поворотного момента на лопасти в диапазоне $0... \pm 300$ кгс·см составила ± 20 кгс·см. В приведенных единицах, соответствующих рабочему колесу диаметром $D_1 = 1$ м и напору $H = 1$ м, суммарная погрешность (при напоре испытаний ≈ 6 м и диаметре модели РК 0,35 м) эквивалентна $\pm 0,8$ кгс·м.

4. Исследование поворотных моментов на лопасти ПЛ гидротурбины

Перед проведением каждого испытания и заполнением водой проточной части рабочего колеса проводились измерения момента на лопасти от центробежных сил. Собранный колесо, установленное в проточной части модельного блока, принудительно вращалось в воздухе с помощью балансирного динамометра на частотах 400, 600, 800 и 1000 об/мин. Измеренный момент фиксировался в протоколе и сравнивался с предварительно определенными расчетными значениями.

Испытания по замерам поворотного момента на лопасти модели рабочего колеса выполнены при углах установки лопастей $+30^\circ$, $+25^\circ$, $+15^\circ$ и $+5^\circ$ в широком диапазоне приведенных расходов Q_1' , оборотов n_1' , открытий направляющего аппарата a_0 и напоре нетто $H_{\text{нетто}} \approx 6$ м.

При замерах определялся полный момент на модельной лопасти, состоящий из гидравлического момента и момента от центробежных сил. Для определения гидравлического момента из полного момента необходимо вычесть момент от центробежных сил

$$M_r = M_{\text{п}} - M_{\text{цбс}},$$

где $M_{\text{цбс}}$ – расчетный момент на лопасти от центробежных сил; $M_{\text{п}}$ – полный момент на лопасти измеренный аппаратурой; M_r – гидравлический момент на лопасти.

На рис. 4 приведена зависимость значений поворотных моментов на лопасти, вызванных центробежными силами, от частоты вращения вала и угла установки лопастей, полученные расчетом и в результате эксперимента. При проведении экспериментов было принято, что знак «+» соответствует моменту, действующему на разворот лопасти в сторону закрытия. Как видно из рис. 4, существуют небольшие отличия моментов поворота, полученные в результате расчета и эксперимента. Следует иметь в виду, что расчет проводился

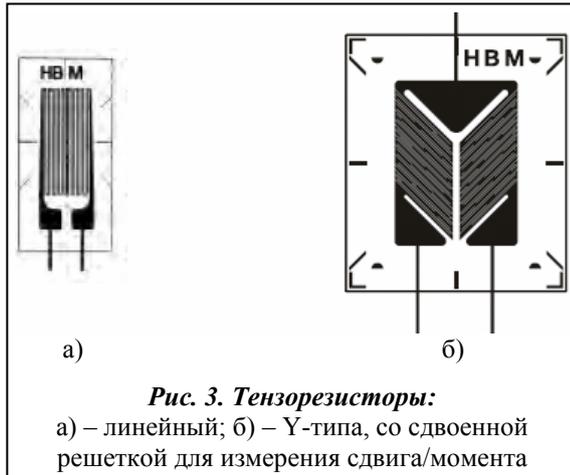
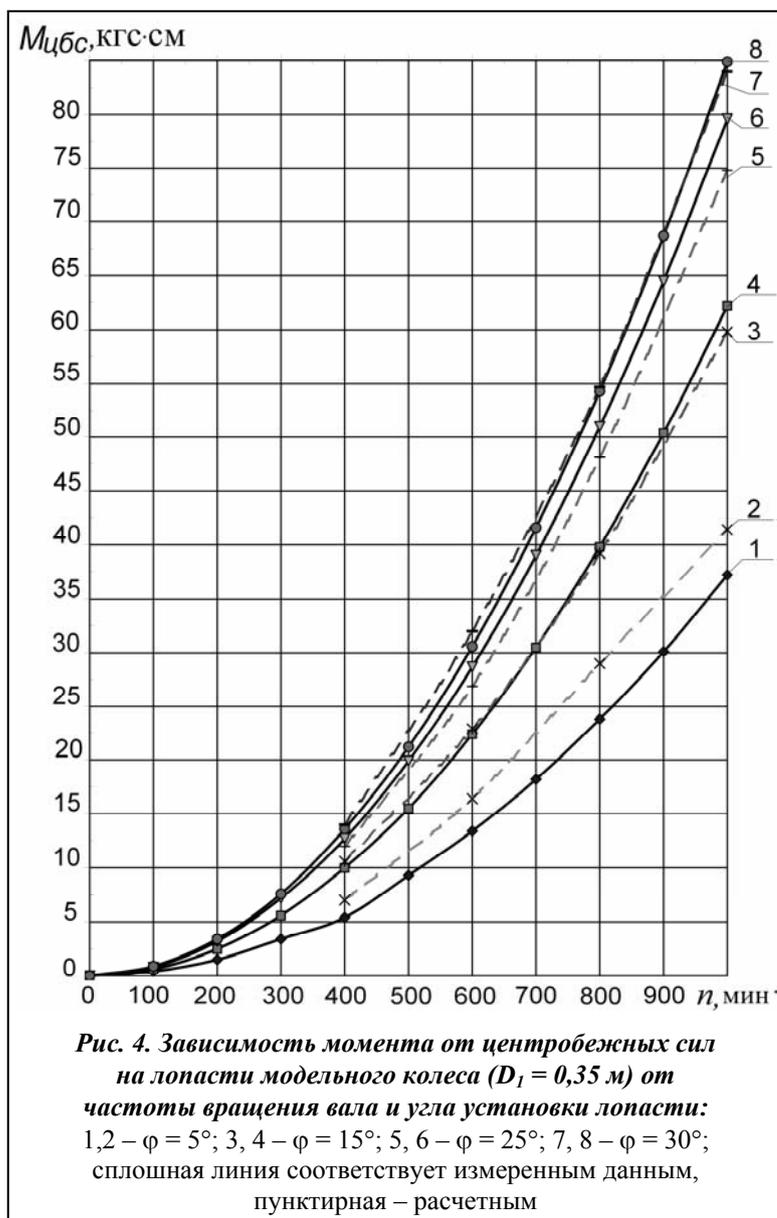


Рис. 3. Тензорезисторы:

а) – линейный; б) – Y-типа, со сдвоенной решеткой для измерения сдвига/момента



выбирались по пропеллерным характеристикам и комбинаторным режимам таким образом, чтобы обоснованно нанести линии равных моментов на универсальную характеристику. Поворотный момент слабо изменяется с изменением величины приведенного расхода при постоянных приведенных оборотах. С увеличением приведенной частоты вращения от 80 до 170 оборотов поворотный момент возрастает от 1 до 15 кгс·м. Характеристика зависимостей поворотного гидравлического момента на лопасти от приведенных расходов и оборотов представлена на рис. 5. Полученные результаты хорошо согласуются с выводами в работе [3].

Дополнительно проведены замеры момента в разгонном режиме на трех углах установки лопастей рабочего колеса. Результаты режимов разгонных испытаний приведены на рис. 6. На этих режимах поворотный момент достигает максимальных значений, которые на порядок превышают значения момента в оптимуме характеристики.

На основании полученных экспериментальных данных построены зависимости поворотных моментов в поле универсальной характеристики. Режимы испытаний выбирались по пропеллерным характеристикам и комбинаторным режимам таким образом, чтобы обоснованно нанести линии равных моментов на универсальную характеристику. Поворотный

без учета сопротивления воздуха, который находился в момент эксперимента в камере рабочего колеса. Центробежный момент всегда действует на закрытие лопастей рабочего колеса. Этот факт подтверждается и в работе [1]. С увеличением угла установки лопастей моменты, действующие на лопасть, увеличиваются, а увеличение частоты вращения приводит к увеличению момента пропорционально квадрату угловой скорости.

Для удобства использования полученных результатов действующий на одну лопасть гидравлический момент приводился к напору 1 м и к диаметру колеса 1 м

$$M_1' = \frac{M_{\Gamma}}{D_{\text{м}}^3 \cdot H_{\text{м}}},$$

где $D_{\text{м}} = 0,35$ м — диаметр модели испытуемого рабочего колеса; $H_{\text{м}}$ — действующий напор при испытаниях модели.

На основании полученных экспериментальных данных построены зависимости поворотных моментов в поле универсальной характеристики. Режимы испытаний

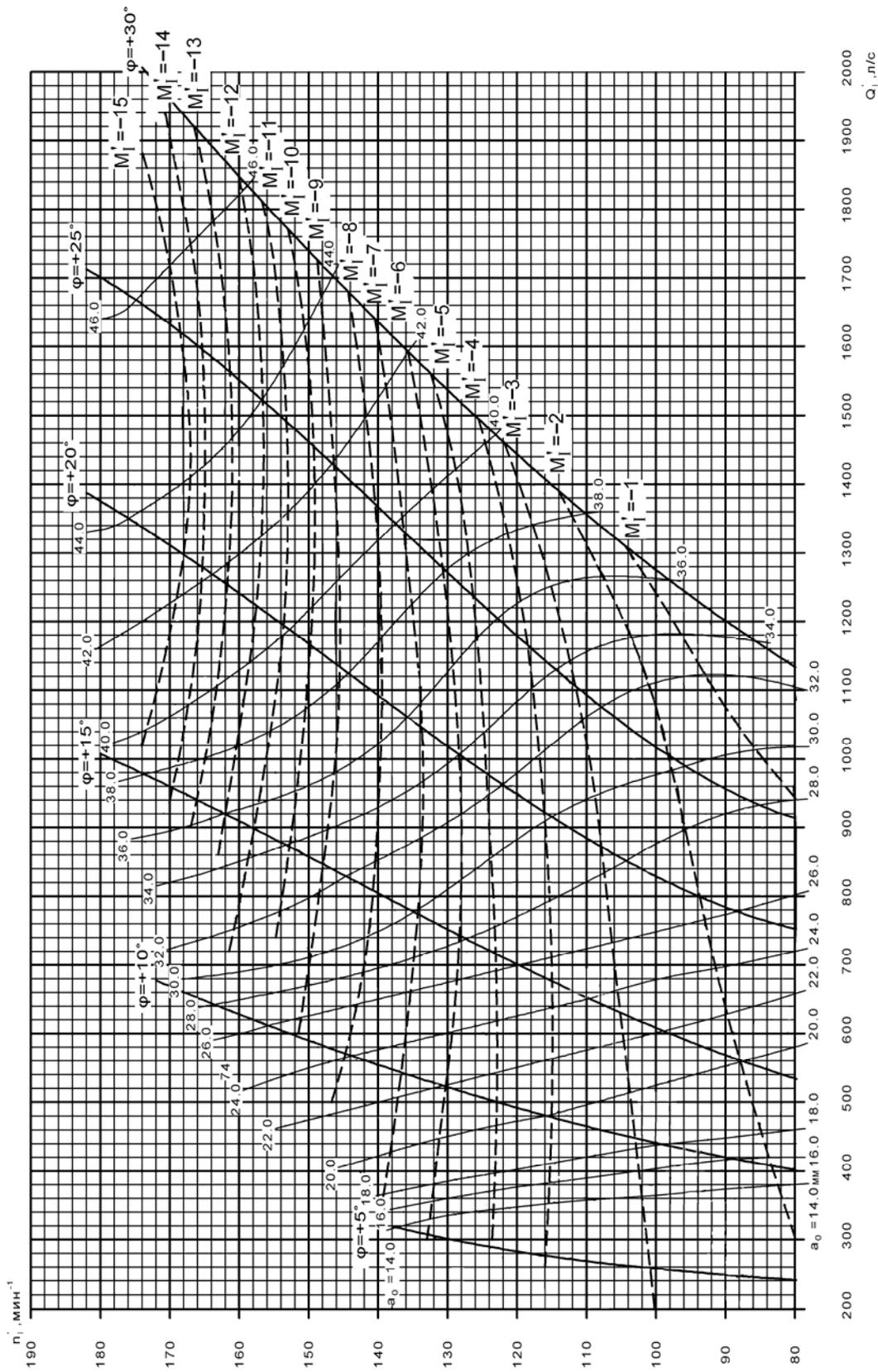
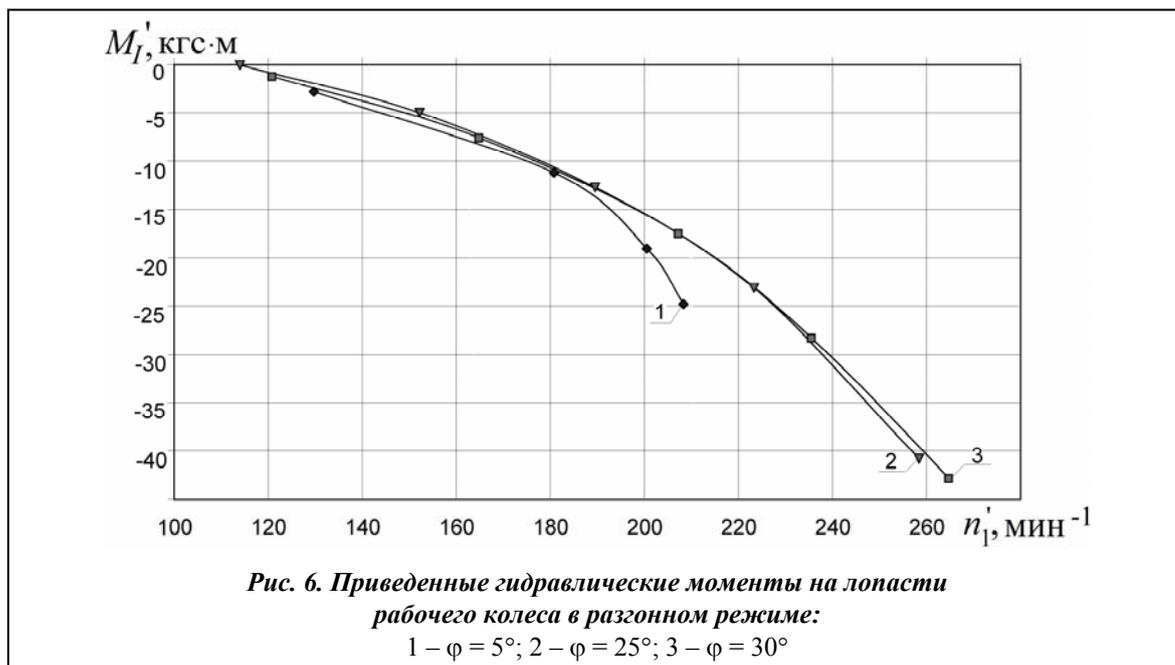


Рис. 5. Значение приведенного гидравлического поворотного момента M_1' (кгс·м), действующего на лопасть модели рабочего колеса гидротурбины типа ПЛ40



момент слабо изменяется с изменением величины приведенного расхода при постоянных приведенных оборотах. С увеличением приведенной частоты вращения от 80 до 170 оборотов поворотный момент возрастает от 1 до 15 кгс·м. Характеристика зависимостей поворотного гидравлического момента на лопасти от приведенных расходов и оборотов представлена на рис. 5. Полученные результаты хорошо согласуются с выводами в работе [3].

Дополнительно проведены замеры момента в разгонном режиме на трех углах установки лопастей рабочего колеса. Результаты режимов разгонных испытаний приведены на рис. 6. На этих режимах поворотный момент достигает максимальных значений, которые на порядок превышают значения момента в оптимуме характеристики.

5. Выводы

Подтверждена работоспособность предложенного варианта экспериментальной методики измерения момента лопасти с размещением измерительной аппаратуры внутри корпуса модели и беспроводной передачей значений замеров с помощью радиомодемов. В процессе эксперимента достигнута достаточно высокая степень стабильности, повторяемости и точности значений поворотного момента. Возможно дальнейшее повышение точности измерений за счет совершенствования измерительных тензодатчиков и использования в них специализированных тензорезисторов Y-типа.

Выполнены исследования момента на лопасти модели рабочего колеса гидротурбины типа ПЛ40 при углах установки лопастей +30°, +25°, +15°, +5° в широком диапазоне приведенных расходов Q_1' , оборотов n_1' и открытий направляющего аппарата a_0 . На основании полученных результатов построена характеристика зависимостей момента на лопасти от приведенных расходов и частоты вращения, а также зависимости моментов в разгонных режимах и момента от центробежных сил.

Литература:

1. *Мальшев, В. М.* Модельные исследования гидротурбин / В. М. Мальшев. – Л.: Машиностроение, 1971. – 286 с.
2. *Орго, В. М.* Гидротурбины / В. М. Орго. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1975. – 320 с.
3. *Ковалев, Н. Н.* Проектирование гидротурбин / Н. Н. Ковалев. – Л.: Машиностроение. – 1974. – 280 с.

Поступила в редакцию
13.12.13