

УДК 621.165

М. И. Гринман^{*}, канд. техн. наук**А. А. Епифанов**^{**}^{*} ООО «Комтек-Энергосервис»

(г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail; greenman@comtec-energo.ru)

^{**} ФГБОУ ВПО «СПбГПУ»

(г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail; a.a.epifanov@gmail.com)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТУРБОПРИВОДОВ ПИТАТЕЛЬНЫХ НАСОСОВ НА БАЗЕ МАЛОРАСХОДНЫХ ТУРБИН ЛЕНИНГРАДСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Описана модернизация питательных установок на теплоэлектроцентрали с поперечными связями с заменой электропривода на турбопривод, предлагаемая ООО «Комтек-Энергосервис». Рассмотрены конструктивные особенности проточных частей турбоприводов, в основе которых – малорасходные ступени конструкции Ленинградского политехнического института и методы проектирования таких ступеней: экспериментальный, одномерный расчет и трехмерное моделирование. Приведены результаты натурных испытаний турбопривода Р-2.6-0.85/0.15 П на Черниговской ТЭЦ.

Описана модернізація живильних установок на теплоелектроцентралі з поперечними зв'язками з заміною електропривода на турбопривід, що запропонована ТОВ «Комтек-Енергосервіс». Розглянуто конструкційні особливості проточних частин турбоприводів, в основі яких - маловитратні ступені конструкції Ленінградського політехнічного інституту та методи проектування таких рівнів: експериментальний, одновимірний розрахунок і тривимірне моделювання. Наведено результати натурних випробувань турбопривода Р-2.6-0.85/0.15 П на Чернігівській ТЕЦ.

Введение

Для ТЭЦ с поперечными связями, оснащенных турбинами типа «ПТ» и «Р», характерно наличие общестанционного коллектора производственного отбора пара (П-отбора) с давлением на уровне 13 ата и общестанционного коллектора теплофикационного отбора пара (Т-отбора) с давлением около 1.5 ата. Из-за снижения потребности в производственном отборе пара турбины таких ТЭЦ, как правило, недогружены. В связи с этим для увеличения тепловой и электрической нагрузок ТЭЦ целесообразно использовать взамен электропривода питательного насоса турбопривод (рис. 1), пар в который поступает из коллектора П-отбора, а отработанный пар подается в коллектор Т-отбора [1].

Замена электропривода на приводную турбину экономически выгодна, т.к., кроме снижения потребления электроэнергии на собственные нужды, ТЭЦ получит возможность отпускать дополнительное количество электроэнергии и теплоты внешним потребителям за счет увеличения расхода пара в коллектор П-отбора и сброса отработанного пара турбоприводов питательных насосов в коллектор Т-отбора. Другое преимущество замены электродвигателя на турбопривод заключается в более экономичном регулировании производительности питательного насоса изменением числа оборотов ротора турбопривода.

В ООО «Комтек-Энергосервис» совместно с кафедрой ТДУ ФГБОУ ВПО «СПбГПУ» разработана линейка турбоприводов номинальной мощностью 2 600–4 700 кВт, предназначенных для привода питательных насосов с номинальной подачей 380–720 м³/ч. Три турбопривода (Р-2.6-0.85/0.15 П, Р-3.15-1.28/0.2 П, Р-3.7-1.28/0.2 П) сданы в эксплуатацию и работают на Черниговской, Ново-Кемеровской и Иркутской ТЭЦ соответственно,

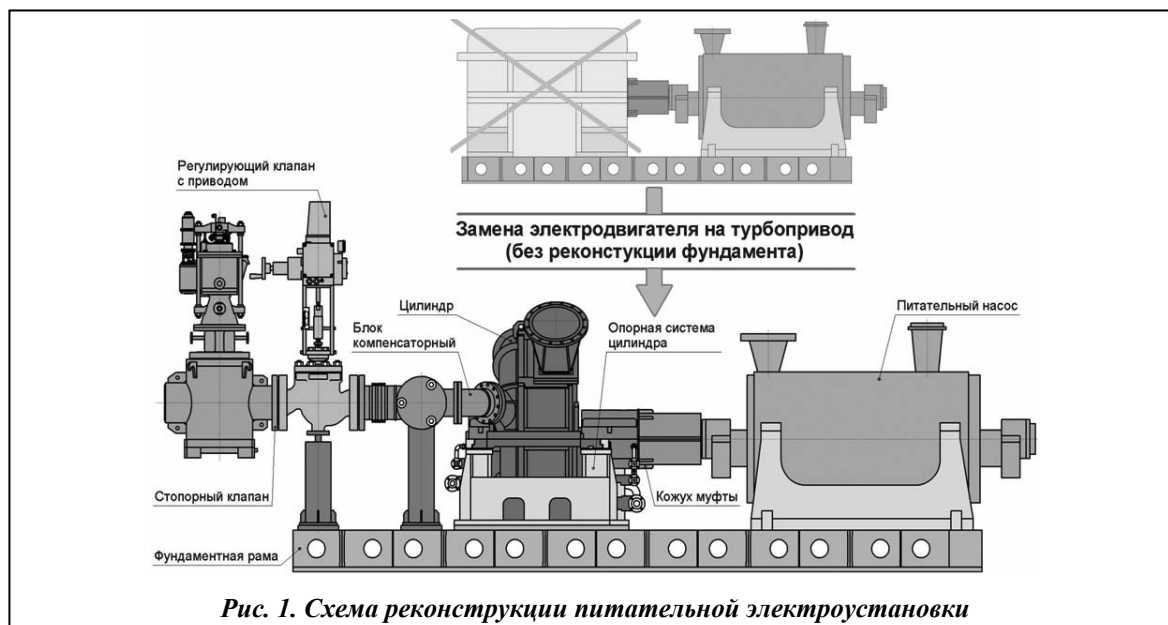


Рис. 1. Схема реконструкции питательной электроустановки

турбопривод Р-4.7-1.08/0.15 П находится на стадии пусконаладочных работ на Красноярской ТЭЦ.

Для того чтобы схема с использованием турбопривода была эффективнее электропривода и соответствовала условиям размещения и работы на действующих ТЭЦ, турбопривод должен удовлетворять ряду требований. К ним относят высокую маневренность, обеспечение необходимых параметров питательного насоса на всех режимах работы котлоагрегата в течение года, экономичность, простоту в обслуживании, возможность размещения на фундаменте насоса на освободившемся от электродвигателя месте и др.

Требования к турбоприводу, указанные выше, соблюдаются при использовании высокоэкономичной и компактной малорасходной турбины конструкции Ленинградского политехнического института (ЛПИ) с двухступенчатой проточной частью. Проточная часть по принципу действия является двухвечной ступенью скорости. В первой ступени конструкции ЛПИ активного типа срабатывается большая часть общего перепада энтальпии на турбину. Вторая ступень с профилями решеток традиционного типа, выполненная с небольшой степенью реактивности, использует большую часть выходной кинетической энергии первой ступени, снижает скорость за турбиной и обеспечивает близкое к осевому направлению выходящего потока.

Малорасходная турбина конструкции ЛПИ

Созданием малорасходных турбин ЛПИ на кафедре турбинных двигателей и установок (ТДУ) Ленинградского политехнического института (ЛПИ) в 70-х гг. прошлого века начала заниматься группа сотрудников под руководством проф. И.И. Кириллова. В результате многолетних исследований разработан новый класс малорасходных высоконагруженных сверхзвуковых турбинных ступеней конструкции ЛПИ (рис. 2).

Малорасходные ступени конструкции ЛПИ имеют конструктивные особенности лопаточного аппарата, отличающие их от ступеней турбин традиционного типа [2]:

- малые углы выхода сопловой решетки, $\alpha_{1л} = 3 \dots 9^\circ$;
- малые углы входа рабочей решетки, $\beta_{1л} = 6 \dots 14^\circ$;
- большие углы поворота потока в рабочей решетке, $\theta_2 = 150 \dots 170^\circ$;
- малые безразмерные длины сопловой ($l_1/B_1 = 0.6 \dots 1.2$) и рабочей ($l_2/B_2 = 0.9 \dots 1.7$) решеток;
- большие безразмерные шаги сопловой ($t_1/B_1 = 3.2 \dots 8.7$) и рабочей ($t_2/B_2 = 1.2 \dots 1.7$) решеток;
- трансзвуковое и сверхзвуковое течение в сопловой и рабочей решетках.

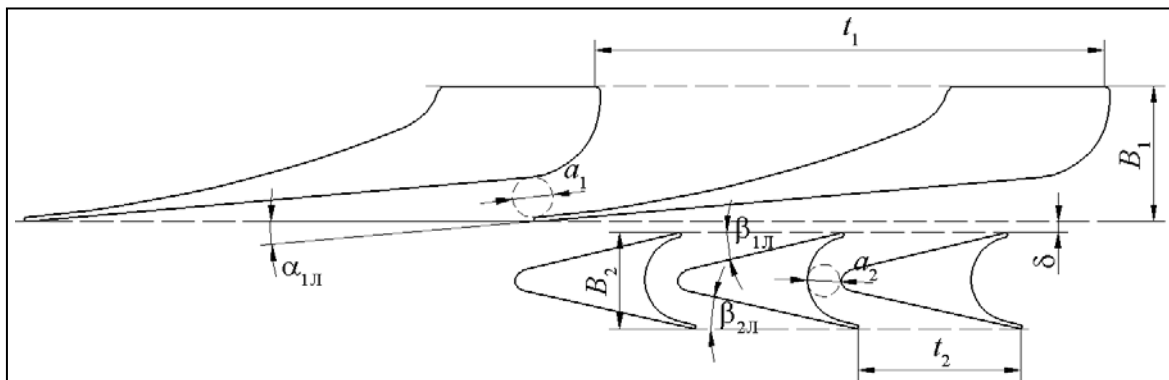


Рис. 2. Малорасходная ступень конструкции ЛПИ:
 B – ширина решетки; t – шаг решетки; a – ширина межлопаточного канала;
 $\alpha_{л}$, $\beta_{л}$ – геометрические углы; δ – межвенцевой зазор;
 индекс 1 относится к сопловой решетке; индекс 2 – к рабочей

Экспериментальное исследование

В основе разработанного класса малорасходных турбин ЛПИ лежат результаты многолетних стендовых исследований, которые ведутся на кафедре и сегодня. Совместными усилиями сотрудников кафедры ТДУ и ООО «Комтек-Энергосервис» проведена модернизация экспериментального стенда ЭТ-3М (рис. 3). В результате модернизации стенд позволяет дистанционно, с высокой точностью получать экспериментальные интегральные и локальные характеристики малорасходных одноступенчатых турбин конструкции ЛПИ.

Исследования, выполненные на этом стенде, позволили разработать и внедрить линейку турбоприводов номинальной мощностью 2 600–4 700 кВт, предназначенных для привода питательных насосов с номинальной подачей 380–720 м³/ч.

Трехмерное моделирование

Достигнутые за последние годы успехи в развитии вычислительной гидродинамики позволяют ставить вопрос о существенном сокращении доли экспериментальных и доводочных работ при конструировании решеток и ступеней турбомашин. Например, многократно апробированный и удобный для пользователя программный комплекс вычислительной гидродинамики ANSYS CFX, ориентированный, в частности, на численное моделирование течения в проточных частях турбомашин, позволяет в короткие сроки и с относительно небольшими трудозатратами получить детальную информацию о структуре течения в ступени и ее интегральных характеристиках.

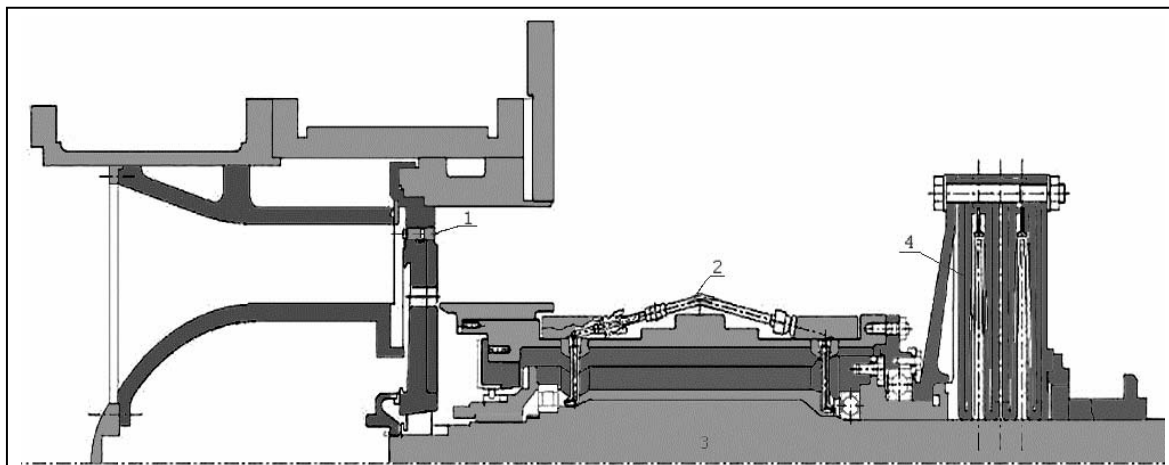


Рис. 3. Схема экспериментального стенда:
 1 – малорасходная ступень ЛПИ; 2 – система смазки подшипников; 3 – вал; 4 – гидротормоз

В ФГБОУ ВПО «СПбГПУ» разработана методика расчета трехмерного течения в решетках и ступенях малорасходных турбин ЛПИ [3, 4]. Применительно к малорасходным сопловым и рабочим решеткам подробно исследованы основные вопросы постановки численного эксперимента: влияние расчетной сетки, модели турбулентности, входной интенсивности турбулентности, неоднородности потока на входе в решетку и положения плоскости осреднения за решеткой. Применительно к ступеням малорасходных турбин ЛПИ исследованы способы сопряжения течения в неподвижной (сопловой) и вращающейся (рабочей) решетках, выявлены потери от нестационарности в типовых малорасходных ступенях.

Сопоставление опытных и расчетных данных

В качестве объекта исследования выбрана малорасходная ступень конструкции ЛПИ, испытания которой проводились на упомянутом ранее модернизированном стенде ЭТ-3М. Проектирование данной ступени осуществлялось в программном комплексе оптимального проектирования и профилирования лопаточных аппаратов, разработанном на кафедре ТДУ, для проекта турбопривода Р-3.7-1.28/0.2 П, предназначенного для привода питательного насоса ПЭ-580-185 на Иркутской ТЭЦ.

Исследование данной ступени проводилось также и в программном комплексе ANSYS CFX. Для корректной верификации расчета по опытным данным в численном эксперименте моделировались все конструктивные особенности турбины: уплотнения, разгрузочные отверстия и т.д. Течение в проточной части турбины рассчитывалось на неструктурированных умеренно подробных расчетных сетках, RANS-подходом, с помощью высокорейнольдсово́й модели турбулентности SST-CC с поправками на кривизну линий тока и вращение. Общее число узлов расчетной сетки 1.8 млн.

Рассмотрим расчетную структуру потока. На номинальном режиме работы турбины ($p^*_0 = 0,42$ МПа, $u/C_0 = 0,28$) в сопловой решетке (рис. 4) поток ускоряется до максимального значения в косом срезе 1,38. При расширении сверхзвукового потока в косом срезе за задними кромками лопаток формируется серия косых скачков уплотнения. За фронтом сопловой решетки основной поток частично перемешивается со следом, вследствие чего абсолютная скорость уменьшается до значения в выходной плоскости $M_{c1} = 1,17$. В рабочей решетке поток ускоряется от $M_{w1} = 0,77$ до максимального значения в канале 1,15 с образованием скачка уплотнения. Число Маха за скачком уплотнения в контрольном сечении на выходе из решетки равно 0,85.

В целом, структура потока в ступени вполне согласуется с общими представлениями о характере течения в турбинах. Никаких вычислительных артефактов или явлений, противоречащих физической сути, не обнаружено. Благодаря этому и расчетные значения внутреннего КПД турбины практически совпадают с опытными значениями в широком диапазоне режимов ее работы (рис. 5).

Натурные испытания

Для подтверждения расчетных характеристик турбопривода Р-2.6-0.85/0.15 П, предназначенного для привода питательного насоса ПЭ-380-185-2 на Черниговской ТЭЦ (Украи-

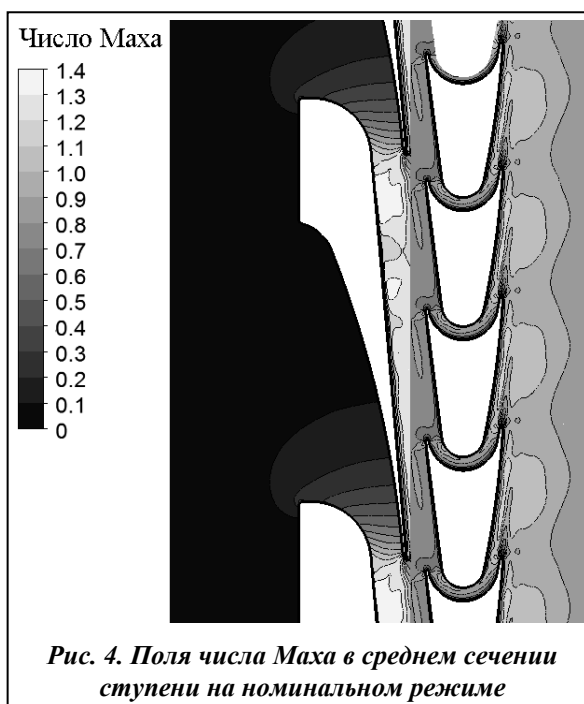
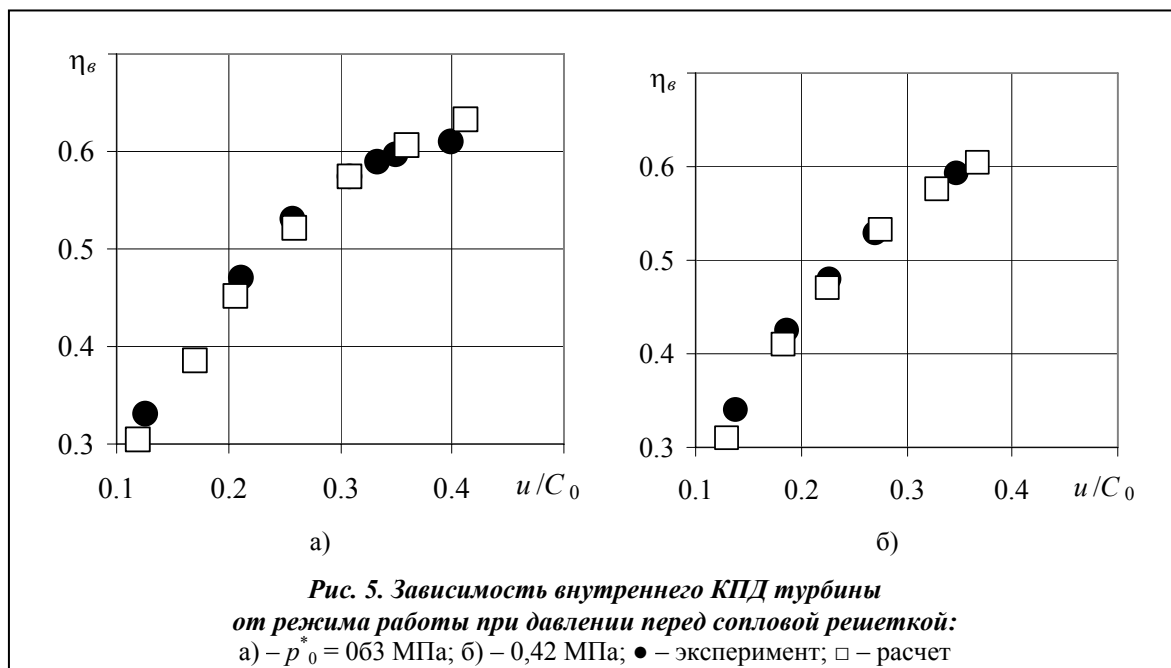


Рис. 4. Поля числа Маха в среднем сечении ступени на номинальном режиме



на), проведены его тепловые испытания с привлечением независимой специализированной организации.

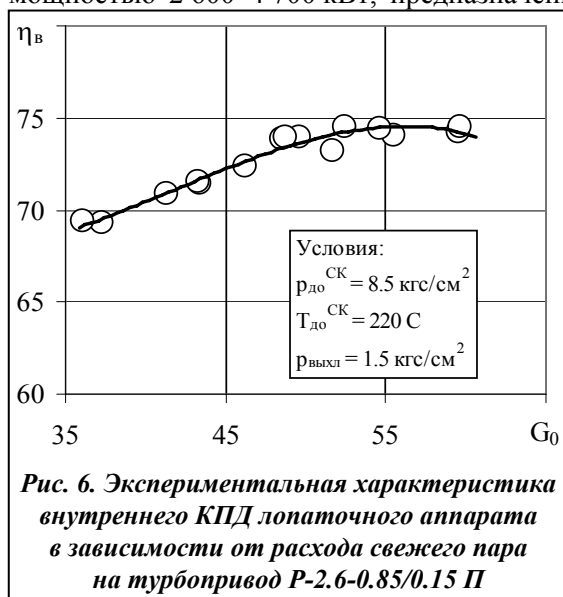
Подготовка к испытаниям, обработка экспериментальных данных и расчет погрешностей измерений проводились в соответствии с отработанными методиками [5].

При испытаниях проведена серия из 15 опытов, которые осуществлялись при расходе пара на турбину 75–120% от номинального значения. Перед каждым опытом режим стабилизировался в течение 15 минут. Основные параметры турбопривода фиксировались каждые 2 минуты. Измерялись следующие параметры: расход свежего пара, число оборотов ротора, давления и температуры перед клапанами, перед и за турбиной. С целью снижения погрешности прямых измерений основные параметры турбопривода дублировались.

Экспериментальная характеристика турбопривода приведена на рис. 6 и полностью подтверждает расчетную.

Заключение

В ООО «Комтек-Энергосервис» разработана линейка турбоприводов номинальной мощностью 2 600–4 700 кВт, предназначенных для привода питательных насосов с номинальной подачей 380–720 м³/ч. Три турбопривода (Р-2.6-0.85/0.15 П, Р-3.15-1.28/0.2 П, Р-3.7-1.28/0.2 П) сданы в эксплуатацию и работают на Черниговской, Ново-Кемеровской и Иркутской ТЭЦ соответственно, турбопривод Р-4.7-1.08/0.15 П находится на стадии пусконаладочных работ на Красноярской ТЭЦ.



Линейка турбоприводов стала результатом комплекса расчетно-экспериментальных работ, проведенных совместно с ФГБОУ ВПО «СПбГПУ», включающих в себя:

- модернизацию экспериментального стенда ЭТ-3М на кафедре ТДУ ФГБОУ ВПО «СПбГПУ»;
- проведение воздушных испытаний одноступенчатой турбины конструкции ЛПИ на стенде ЭТ-3М;

– проведение тепловых испытаний турбопривода Р-2.6-0.85/0.15 П, предназначенного для привода питательного насоса ПЭ-380-185-2 на Черниговской ТЭЦ (Украина).

В рамках диссертационной работы разработана методика расчета трехмерных течений в проточных частях малорасходных турбин ЛПИ в среде программного комплекса ANSYS CFX, которая дает возможность существенно уменьшить объем экспериментальных исследований в процессе проектирования.

Литература

1. Турбопривод для питательных насосов ТЭЦ / М. И. Гринман, В. А. Егоров, С. Л. Ушаков, А. А. Плахин // Новости теплоснабжения. – 2010. – № 5 – С. 51–53.
2. Рассохин В. А. Турбины конструкции ЛПИ: Преимущества, характеристики, опыт разработки и применение / В. А. Рассохин // Энергомашиностроение. Тр. СПбГПУ, № 491. Изд-во Политехн. ун-та, СПб, 2004. – С. 152–161.
3. Епифанов А. А. Расчет характеристик лопаточных решеток малорасходных турбин / А. А. Епифанов, А. И. Кириллов, В. А. Рассохин // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Наука и образование СПб: Изд-во Политехн. ун-та. – 2012. – № 1 – С. 50–55.
4. Епифанов А. А. Расчет трехмерного течения в ступенях малорасходных турбин / А. А. Епифанов, А. И. Кириллов, В. А. Рассохин // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Наука и образование. СПб: Изд-во Политехн. ун-та. – 2012. – № 1 – С. 65–70.
5. Сахаров А. М. Методические указания по тепловым испытаниям паровых турбин / А. М. Сахаров, М. Г. Теплицкий. – М.: Союзтехэнерго, 1986. – 103 с.

Поступила в редакцию
29.09.12

УДК 533.6.621.548

В. М. Липовий

Сумський державний університет
(e-mail: gidro@ukr.net)

РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОРТОГОНАЛЬНИХ ВІТРОДВИГУНІВ

Описано попередній розрахунок потоку повітря в робочій зоні аеродинамічної труби, яка створюється з метою дослідження робочого процесу ортогональних вітродвигунів. Розрахунки течії виконано з використанням CFD розв'язувача. Показано, що створена конструктивна схема та геометрія направляючого та випрямного апаратів стенда є працездатними, придатними для визначення аеродинамічних характеристик ортогональних вітродвигунів.

Описан предварительный расчёт потока воздуха в рабочей зоне аэродинамической трубы, которая создается для исследования рабочего процесса ортогональных ветродвигателей. Расчеты течения выполнены с использованием CFD решателя. Показано, что предложенная конструктивная схема и геометрия направляющего и спрямляющего аппаратов стенда работоспособна, пригодна для определения аэродинамических характеристик ортогональных ветродвигателей.

Вступ

На сьогодні на кафедрі прикладної гідроаеромеханіки широко ведуться роботи з вивчення та модернізації методів визначення основних аеродинамічних характеристик ортогональних вітродвигунів. Є певний науковий наробіток за даним напрямом, наприклад, доведено використання програмного комплексу ANSYS CFX [1] для моделювання робочого процесу вертикальних вітротурбін. На основі цього комплексу розроблено методику визна-