

**A. В. ЛИННИК, С. А. РЯБОВА**

### **АО «ТУРБОАТОМ» – 85-ЛЕТНИЙ ПЕРИОД УСПЕХА И ВСЕМИРНОГО ПРИЗНАНИЯ**

Показаны объемы и география поставок АО «Турбоатом» за 85-летний период работы предприятия, отмечена роль завода в создании и изготовлении паро- и гидротурбинного оборудования. Представлен номенклатурный ряд паровых турбин для тепловых электростанций, теплоэлектроцентралей, атомных электростанций; гидравлических турбин для гидроэлектростанций, гидроаккумулирующих электростанций, гидравлических затворов для ГЭС, ГАЭС и насосных станций, другого энергетического оборудования. Представлены достижения предприятия в создании уникальных разработок паро- и гидротурбинного оборудования, а именно создание паровых турбин нового поколения мощностью 325 МВт, создание обратимых гидроагрегатов Днестровской ГАЭС. Показан вклад АО «Турбоатом» в развитие гидроэнергетики Украины – работы по реконструкции ГЭС Днепроовского каскада. Приведены расчетно-теоретические исследования течения жидкости в проточной части гидротурбины Кременчугской ГЭС, выполненные в рамках научно-технического сотрудничества между АО «Турбоатом» и ИПМаш НАН Украины. Детальное численное исследование пространственного течения вязкой несжимаемой жидкости во всех элементах проточной части гидротурбины ПЛ 20 Кременчугской ГЭС выполнено в широком диапазоне режимов работы с помощью программного комплекса *IPMFlow*. Моделирование течения выполнено на основе численного интегрирования уравнений Рейнольдса с дополнительным членом, содержащим искусственную сжимаемость. Для учета турбулентных эффектов применяется дифференциальная двухпараметрическая модель турбулентности SST Ментера. Численное интегрирование уравнений проводится с помощью неявной квази-монотонной схемы Годунова второго порядка точности по пространству и времени. Показаны универсальные стенды ЭКС-100 и ЭКС-150 гидротурбинной лаборатории АО «Турбоатом», на которых проводятся селективные и приемодаточные модельные испытания проточных частей модернизированных ГЭС с участием Заказчика для подтверждения выполнения контрактных условий по обеспечению значений мощности турбины, достижению средневзвешенного КПД, кавитационных показателей и др. согласно функциональным гарантиям.

**Ключевые слова:** АО «Турбоатом», паротурбостроение, гидротурбостроение, турбина, проточная часть, модернизация.

**O. В. ЛИННИК, С. O. РЯБОВА**

### **АТ «ТУРБОАТОМ» – 85-РІЧНИЙ ПЕРІОД УСПІХУ ТА ВСЕСВІТНЬОГО ВИЗНАННЯ**

Показано обсяги та географія поставок АТ «Турбоатом» за 85-річний період роботи підприємства, відзначена роль заводу в створенні і виготовленні паро- і гідротурбінного обладнання. Представлено номенклатурний ряд парових турбін для теплових електростанцій, теплоелектроцентралей, атомних електростанцій; гідравлічних турбін для гідроелектростанцій, гідроаккумуляцій електростанцій, гідравлічних затворів для ГЕС, ГАЕС і насосних станцій, іншого енергетичного обладнання. Представлено досягнення підприємства в створенні унікальних розробок паро- і гідротурбінного обладнання, а саме створення парових турбін нового покоління потужністю 325 МВт, створення оборотних гідроагрегатів Дністровської ГАЕС. Показано внесок АТ «Турбоатом» в розвиток гідроенергетики України – роботи з реконструкції ГЕС Дніпровського каскаду. Наведено розрахунково-теоретичні дослідження течії рідини в проточній частині гідротурбіни Кременчуцької ГЕС, які було виконано в рамках науково-технічного співробітництва між АТ «Турбоатом» і ИПМаш НАН України. Детальне чисельне дослідження просторової течії в'язкої нестисливої рідини в усіх елементах проточної частини гідротурбіни ПЛ 20 Кременчуцької ГЕС виконано в широкому діапазоні режимів роботи за допомогою програмного комплексу *IPMFlow*. Моделювання течії виконано на основі чисельного інтегрування рівнянь Рейнольдса з додатковим членом, що містить штучну стисливість. Для обліку турбулентних ефектів застосовується диференціальна двопараметрична модель турбулентності SST Ментера. Чисельне інтегрування рівнянь проводиться за допомогою неявної квазі-монотонної схеми Годунова другого порядку точності по простору і часу. Показано універсальні стенди ЕКС-100 і ЕКС-150 гідротурбін лабораторії АТ «Турбоатом», на яких проводяться селективні та приймальні модельні випробування проточних частин модернізованих ГЕС за участю Замовника для підтвердження виконання контрактних умов щодо забезпечення значень потужності турбіни, досягнення середньозваженого ККД, кавітаційних показників та ін. згідно з функціональними гарантіями.

**Ключові слова:** АТ «Турбоатом», паротурбобудування, гідротурбобудування, турбіна, проточна частина, модернізація.

**A. V. LYNKY, S. A. RIABOVA**

### **JSC «TURBOATOM» – 85 YEARS OF SUCCESS AND WORLDWIDE RECOGNITION**

The volumes and geography of deliveries of «Turboatom» JSC for the 85-year period of work of the enterprise are shown; the role of the plant in the creation and manufacture of steam- and hydro-turbine equipment is noted. A product range of steam turbines for thermal power plants, central heating plants, nuclear power plants is presented; hydraulic turbines for hydropower plants, pumped storage power plants, hydraulic valves for HPP, PSP and pumping plants. The achievements of the company in creating unique developments of steam- and hydro-turbine equipment, namely the creation of new generation steam-turbines with a capacity of 325 MW, the creation of reversible hydraulic units of the Dniester PSP, are presented. The contribution of «Turboatom» JSC to the development of Ukraine's hydropower industry – the work on the reconstruction of the hydropower plants of the Dnieper cascade is shown. The design-theoretical studies of fluid flow in the flowing part of the hydro-turbine of the Kremenchug HPP carried out in the framework of scientific and technical cooperation between «Turboatom» JSC and IPMash of the National Academy of Sciences of Ukraine are presented. A detailed numerical study of the spatial flow of a viscous incompressible fluid in all elements of the flowing part of PL 20 turbine at the Kremenchug HPP has been performed in a wide range of operating modes using the *IPMFlow* software package. The fluid flow simulation on basis of numerical integration of the Reynolds equations with an additional term containing artificial compressibility has been implemented. The differential two-parameter model of Menter (SST) has been applied to take into account turbulent effects. Numerical integration of the equations is carried out using an implicit quasi-monotone Godunov type scheme of second order accuracy in space and time. The universal stands EKS-100 and EKS-150 of the turbine laboratory of «Turboatom» JSC are shown, where selective and acceptance testing of the flow parts of the modernized hydropower plants with the Customer's participation are carried out to confirm the fulfillment of the contractual conditions for ensuring the turbine power, achieving the weighted average efficiency, cavitation parameters, etc. according to functional guarantees.

**Keywords:** «Turboatom» JSC, steam-turbine construction, hydro-turbine construction, turbine, flowing part, modernization.

**Введение.** Одним из первоочередных приоритетов энергетической независимости Украины является интеграция украинской энергосистемы в энергетическую систему континентальной Европы ENTSO-E. Это означает, что в перспективе украинская энергосистема будет подключена к европейской, став ее составной частью. Процесс этот достаточно сложный и комплексный. Главная задача, которую необходимо решить украинским энергетикам – повысить надежность объединенной энергосистемы Украины, в частности, в части качества поставляемой потребителям электроэнергии и стабильности ее поставок.

АО «Турбоатом» – один из крупнейших в мире производителей энергетического оборудования. За 85-летний период предприятие прошло нелегкий путь к успеху и всемирному признанию. Более 2000 турбин общей мощностью 160 млн. кВт успешно работают на электростанциях 45 стран Европы, Азии, Америки и Африки [1].

Создание турбин на предприятии осуществляется от проектно-конструкторских и научно-исследовательских работ, подготовки производства до изготовления, сборки, испытания турбин и отгрузки их Заказчику. Выполняются шеф-монтажные работы, пуско-наладочные и натурные испытания, ведется техническое инженерное сопровождение на протяжении всего периода эксплуатации, обеспечение ремонтов, модернизация оборудования в процессе эксплуатации.

Производственные возможности позволяют выпускать в год паровых и гидравлических турбин общей расчетной мощностью соответственно 8 млн. кВт и 2 млн. кВт.

**1. Паротурбостроение.** Сегодня технический уровень паровых турбин АО «Турбоатом» характеризуется высоким КПД, надежностью и долговечностью. Номенклатура паротурбостроения включает:

1. Паровые турбины для ТЭС:
  - конденсационные турбины до 300 МВт;
  - конденсационные турбины свыше 300 МВт;
  - теплофикационные турбины.
2. Паровые турбины для АЭС:
  - паровые турбины с частотой вращения ротора  $25 \text{ с}^{-1}$ ;
  - паровые турбины с частотой вращения ротора  $50 \text{ с}^{-1}$ ,  $60 \text{ с}^{-1}$ .
3. Паровые турбины с противодавлением:
  - паровые турбины мощностью до 5 МВт;
  - паровые турбины мощностью 5-12 МВт;
  - паровые турбины с регулируемыми отборами пара мощностью 6-35 МВт.
4. Вспомогательное оборудование:
  - теплообменное оборудование: воздухоподогреватели, маслоохладители, подогреватели сетевой воды;
  - воздуходувки, эжекторы, тягодутьевые машины, роторы к тягодутьевым машинам;
  - фильтры [2].

Для тепловых электростанций изготовлено около 400 паровых турбин суммарной мощностью свыше 63 млн. кВт, из них 55 турбин для 16 ТЭС дальнего зарубежья. Для атомных электростанций изготовлено 175 турбин суммарной мощностью более 65 млн. кВт, из них 49 турбин для 11 АЭС дальнего зарубежья.

АО «Турбоатом» поставил 13 % турбин для АЭС от суммарных объемов поставок турбин для АЭС на мировом рынке и занимает по этому показателю 4-е место среди турбостроительных фирм мира. В Украине 3 действующие АЭС (Запорожская, Южно-Украинская, Ровенская) укомплектованы 12 турбинами производства «Турбоатом» мощностью 220, 1000 и 1100 МВт.

В настоящее время на АЭС находятся в эксплуатации 24 турбины типа К-220-44, в т.ч. Ровенской АЭС (Украина), Армянской АЭС (Армения), Кольской и Нововоронежской АЭС (Россия), АЭС «Пакш» (Венгрия), АЭС «Ловииса» (Финляндия), АЭС Козлодуй (Болгария). В Индию поставлено 4 турбины типа К-240-4.0 для АЭС «Кайга» и «Раджастан». В России работают 22 турбины типа К-500-65/3000 на Ленинградской, Курской и Смоленской АЭС, в Литве паровые турбины типа К-750-65/3000 на Ингалинской АЭС. Также находятся в эксплуатации 20 турбин миллионников типа К-1000-60/1500 и К-1100-60/1500, турбины К-500-60/1500 в России и Болгарии, 2 тихоходные турбины пятисотки на Нововоронежской АЭС (Россия) [3, 4, 5].

Предприятием изготовлены конденсационные паровые турбины для стран, где частота в электрической сети составляет 60 Гц. На Кубу и в КНДР поставлено более 30 турбин типа К-50-130/3600 и К-100-130/3600. Для ТЭС «Гавана» изготовлена турбина типа К-220-130/3600, единичной мощностью 222,5 МВт [6].

Для Экибастузской ГРЭС-1 (Казахстан) выполнена модернизация турбины К-500-240-2 мощностью 500 МВт с заменой ее на турбоагрегат нового поколения К-540-240-2 мощностью 540 МВт.

Сейчас на ТЭС Украины эксплуатируются 43 турбины единичной мощностью 200 МВт и 42 турбоустановки мощностью 300 МВт производства АО «Турбоатом». Еще 34 блока с турбинами К-300-240 и К-300-240-2 эксплуатируются на ТЭС России и Казахстана.

На сегодняшний день в АО «Турбоатом» создан новый высокоэкономичный и надежный турбоагрегат К-325-23,5 с ЦВД, ЦСД и первыми ступенями ЦНД активного типа, предназначенный для замены физически и морально устаревших турбин так и при сооружении новых блоков. Для Зуевской ТЭС, ТЭС «Аксу» (Казахстан), Новочеркасской ГРЭС предприятие выполнило поставку турбин нового поколения типа К-325-23,5 (рис. 1) [6].

Работа по созданию паровых турбин нового поколения мощностью 325 МВт была удостоена Государственной премии Украины в области науки и техники в 2009 году, в том числе и сотрудники АО «Турбоатом»: генеральный директор

Субботин В. Г., генеральный конструктор  
Левченко Е. В., главный конструктор Швецов В. Л.  
[7].



Рис. 1. Паровая турбина К-325-23,5 в машинном зале ТЭС «Аксу», Казахстан

В 2018 году работа по разработке и внедрению конденсаторов паровых турбин атомных электростанций удостоена Государственной премии Украины в области науки и техники, ее Лауреатами стали работники АО «Турбоатом»: Пацюк С. Т. – заместитель генерального директора; Усс А. Н. – заместитель главного конструктора паровых турбин – начальник отдела теплообменных аппаратов; Вавилов А. В. – начальник отдела сварки [8].

**2. Гидротурбостроение.** Разработка и проектирование гидроэнергетического оборудования проводится специальным конструкторским бюро «Турбогидромаш». Благодаря наличию квалифицированных специалистов и собственной экспериментальной базы, выполняется весь комплекс научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ.

Номенклатура выпускаемого заводом гидроэнергетического оборудования включает:

- гидротурбины поворотного типа с маслonaполненными рабочими колесами и экологически чистыми рабочими колесами (без масла в полости втулки рабочего колеса в зоне уплотнения лопастей) на напоры 6–70 м мощностью 10–230 МВт;
- гидротурбины радиально-осевого типа на напоры 30–405 м мощностью 10–645 МВт;
- горизонтальные капсульные гидротурбины мощностью 5–40 МВт;
- обратимые гидромашинны на напоры 50–170 м мощностью от 40–400 МВт;
- пропеллерные гидротурбины на напоры 10–40 м мощностью до 120 МВт;
- дисковые затворы диаметром от 1,0 до 7,6 м на напоры 10–230 м;
- шаровые затворы диаметром от 0,8 до 4,2 м на напоры до 950 м;
- встроенные цилиндрические затворы диаметром от 3,43 до 10,74 м на напоры до 310 м;
- турбины гидравлические для малых ГЭС мощностью до 25 МВт;
- мини ГЭС мощностью до 800 кВт;

- микро ГЭС мощностью 5–100 кВт [9].

На сегодняшний день АО «Турбоатом» осуществил поставку турбин для более чем 100 ГЭС: на четырех континентах успешно работают более 450 гидротурбин суммарной мощностью около 39,6 млн. кВт. Из 106 работающих в Украине гидроагрегатов 103 производства Харьковского турбинного завода [1, 10].

Наиболее мощными вертикальными поворотными лопастными турбинами на напоры до 70 м являются гидротурбины, которые изготовлены предприятием для ГЭС Сальто-Гранде (Аргентина/Уругвай) – 138 МВт, Миатлинской ГЭС (Россия) – 113 МВт, для Вилюйской ГЭС-3 (Россия) – 92,5 МВт, Днестровской ГЭС-1 (Украина) – 120 МВт. Гидротурбины для Шамхорской ГЭС – 2 агрегата по 195 МВт и Шульбинской ГЭС (Казахстан) – 6 агрегатов по 230 МВт являются одними из крупнейших по мощности в мире поворотных лопастных турбин [3, 11].

Горизонтально-капсульными гидротурбинами в Украине оснащены Киевская ГЭС – 20 агрегатов, Каневская ГЭС – 24 агрегата, Днестровская буферная ГЭС – 3 агрегата. Горизонтальные капсульные агрегаты экспортировались в Норвегию: ГЭС Кластерфосс – 2 гидротурбины; в Грецию: ГЭС Пурнари II – 2 гидротурбины; в Азербайджан: Еникендская ГЭС – 4 турбины [12].

АО «Турбоатом» выполнил значительные расчетно-экспериментальные исследования и конструкторские разработки по новому виду оборудования – диагональным поворотными лопастными гидротурбинами и насос-турбинами, наиболее эффективным при большом диапазоне изменения рабочих напоров на ГЭС или ГАЭС. Созданные на заводе 4 диагональные гидротурбины типа ДПЛ115-В-250 с рабочим колесом, имеющим девять лопастей, были установлены на Андижанской ГЭС (Узбекистан) и в течение длительного времени подтвердили свои высокие эксплуатационные качества, работая в чрезвычайно широком диапазоне напоров (45–99 м) и нагрузках (40–100%)  $N_{ном}$ .

Вертикальные гидротурбины радиально-осевого типа успешно работают в Армении, Аргентине, Болгарии, Греции, Грузии, Индии, Кыргызстане, Марокко, Мексике, Таджикистане, России и многих других странах.

Самые мощные радиально-осевые гидротурбины поставлены заводом на следующие гидроэлектростанции: Рогунская ГЭС (Таджикистан) – мощность турбины 615 МВт, расчетный напор 245 м, диаметр рабочего колеса 6 м; ГЭС Пьедра дель Агила (Аргентина) – мощность турбины 356 МВт, расчетный напор 108 м, диаметр рабочего колеса 6 м; ГЭС Агуамильпа (Мексика) – мощность турбины 325 МВт, расчетный напор 145 м, диаметр рабочего колеса 5,2 м; ГЭС Тери (Индия) – мощность турбины 255 МВт, расчетный напор 188 м, диаметр рабочего колеса 4,1 м; ГЭС Эль-Кахон (Мексика) – мощность турбины 380,33 МВт, расчетный напор 156,54 м, диаметр рабочего колеса 5,3 м, гидравлические турбины со встроенным

кольцевым затвором для ГЭС Ла Йеска (Мексика) – максимальная мощность турбины 426,13 МВт, максимальный напор 186,7 м, диаметр рабочего колеса 5,3 м [11].

Приоритет в создании и освоении обратимых радиально-осевых гидромашин принадлежит харьковским турбостроителям совместно с учеными ИПМаш НАН Украины. На Киевской ГАЭС установлены 3 насос-турбины типа ОРО75-В-465, выполняющих последовательно функции турбины или насоса, с мощностью электростанции в турбинном режиме 235,5 МВт. На Зеленчукской ГЭС-ГАЭС работают две насос-турбины производства АО «Турбоатом», установленная мощность электростанции в турбинном режиме – 300 МВт, в насосном режиме – 156,18 МВт.

На предприятии для Днестровской ГАЭС (Украина) разработана и изготовлена вертикальная обратимая радиально-осевая гидротурбина ОРО170-В-170. Это первая в Европе обратимая гидромашин, способная максимально выдавать в турбинном режиме 390 МВт, в насосном потреблять 420 МВт. Пуск первого гидроагрегата состоялся в 2009 году, второго – в 2013-м, третьего – в 2016-м. Таким образом, была завершена первая очередь строительства Днестровской ГАЭС. Каждая гидромашин имеет массу более 3000 тонн. Турбина вращается со скоростью 150 оборотов в минуту. А ее диаметр – 7,5 метров (рис. 2). Когда на ГАЭС будут установлены все 7 агрегатов, масса оборудования превысит 20000 тонн, а общая мощность достигнет 2268 МВт в генераторном режиме и 2947 МВт в насосном. Учитывая это, Днестровская ГАЭС станет самой мощной гидроаккумулирующей электростанцией в Европе. Все оборудование было изготовлено украинскими предприятиями. Харьковские гидроагрегаты – гордость гидроэнергетики страны, которые, по оценкам ведущих специалистов отрасли, соответствуют мировому уровню, а по некоторым показателям даже его превышают. В ноябре 2018 года АО «Турбоатом» отгрузил четвертый гидроагрегат Днестровской ГАЭС и поставит гидротурбины и оборудование для 5-го, 6-го и 7-го гидроагрегатов, поскольку имеет для этого все возможности [13].

Работа АО «Турбоатом» по созданию обратимых гидроагрегатов Днестровской ГАЭС удостоена Государственной премии Украины в области науки и техники в 2017 г., ее Лауреатами стали следующие сотрудники АО «Турбоатом»: первый заместитель генерального директора Черкасский А. Ю.; главный конструктор гидротурбин Линник А. В.; главный инженер Ищенко Г. И. [14, 15].

АО «Турбоатом» хорошо известен в мире также как крупнейший поставщик предтурбинных затворов всех размеров и типов. Заводом поставлено в различные регионы 480 гидрозатворов, в том числе 71 – в Украину: шаровые затворы диаметром до 4,2 м и напоры до 950 м; дисковые диаметром до 7,6 м и напоры до 230 м; «биплан», встроенные кольцевые затворы диаметром до 10,74 м и напоры до 310 м.



Рис. 2. Монтаж рабочего колеса Днестровской ГАЭС

Уникальные по размерам шаровые затворы установлены на ГЭС Тери – Индия (4 затвора диаметром 4 м), Нурекской ГЭС – Таджикистан (9 затворов диаметром 4,2 м), дисковый затвор типа «биплан» диаметром 7,6 м для Байпазинской ГЭС (Таджикистан) и др. [3, 11].

Схема компоновки оборудования с встроенным цилиндрическим затвором внедрена в разработках гидротурбин для Зеленчукской ГЭС – Россия (1 затвор диаметром 3,43 м), Ирганайской ГЭС – Россия (4 затвора диаметром 7,05 м), Рогунской ГЭС Таджикистан (1 затвор диаметром 9,5 м), Днестровской ГАЭС – Украина (2 затвора диаметром 10,74 м).

Затворы успешно эксплуатируются на станциях Азербайджана, Аргентины, Армении, Афганистана, Болгарии, Грузии, Германии, Индии, Колумбии, Китая, Марокко, Мексики, России, Таджикистана, Узбекистана и др.

### 3. Реконструкция Днепровского каскада.

Одним из важнейших вкладов АО «Турбоатом» в развитие гидроэнергетики Украины являются работы по реконструкции ГЭС Днепровского каскада, который составляет основу гидроэнергетики Украины и является одной из крупнейших гидросистем в мире. В состав Днепровского каскада (рис. 3) входят восемь гидроэлектростанций: Киевская ГАЭС, Киевская, Каневская, Кременчугская, Среднеднепровская ГЭС, Днепровская ГЭС-1, Днепровская ГЭС-2 и Каховская ГЭС. Общая установленная мощность ГЭС составляет 5981,6 МВт, а среднегодовая выработка – 8,955 млрд. кВт·ч.

На каскаде установлено 93 агрегата, из которых 90 турбин производства АО «Турбоатом», среди них 78 поворотно-лопастных гидротурбин, 12 радиально-осевых, 3 обратимые гидромашин. В табл. 1. представлены характеристики ГЭС Днепровского каскада. Турбинное оборудование этих ГЭС отработало 30–50 лет, обеспечивая покрытие пиковых графиков нагрузок для сбалансированной работы Единой энергетической системы Украины, физически износилось и нуждалось в техническом перевооружении [9, 11, 12].

С целью объективной оценки состояния оборудования и определения эффективности модернизации было проведено тщательное



Рис. 3. Гидроэлектростанции Днепровского каскада

обследование силового и другого оборудования на всех гидроэлектростанциях каскада и подтверждена необходимость работ по реконструкции с учетом международных норм. Расчетный срок окупаемости реконструкции по Днепровскому каскаду, оцененный в 4,5 года (при нормативном сроке 8–9 лет) достигается за счет предложенных Турбоатомом новых более высоких параметров модернизируемого турбинного оборудования, таких как КПД, мощность, продление межремонтного периода и срока службы оборудования, при этом учитывались более жесткие современные требования к оборудованию по экологии.

В соответствии с принятой Программой реконструкции ГЭС Днепровского каскада, согласованной с МБРР, работы по реабилитации гидроэлектростанций были разделены на два этапа. В 2002 г. закончился первый этап проекта (1997–2002 гг.), в результате которого было реконструировано 18 агрегатов:

- для Киевской ГЭС из 20 агрегатов модернизировано 10 (ст. №№ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 13, 14, 15, 16), значение номинальной мощности турбины

увеличилось до  $P_p = 21$  МВт, а максимальной до  $P_{max} = 23$  МВт;

- для ДнепроГЭС-1 – 6 агрегатов из 9 (ст. №№ 4, 5, 6, 7, 8, 9), значение номинальной мощности турбины увеличилось до  $P_p = 73,6$  МВт, а максимальной до  $P_{max} = 80$  МВт;

- для Каховской ГЭС – 2 агрегата из 6 (ст. №№ 2, 3), значение номинальной мощности турбины увеличилось до  $P_p = 54$  МВт, а максимальной до  $P_{max} = 60,5$  МВт [11].

За счет реконструкции гидроэлектростанций удалось увеличить суммарную установленную мощность ГЭС при расчетных напорах на 88,1 МВт, среднесреднегодную годовую выработку электроэнергии на 95 млн. кВт·ч [16].

В 2003 году начался второй этап модернизации ГЭС Днепровского каскада. За период 2003–2019 гг. реконструировано и введено в эксплуатацию 46 агрегатов для следующих ГЭС:

- Киевской ГЭС – 10 турбин (ст. №№ 7, 8, 9, 10, 11, 12, 17, 18, 19, 20), значение номинальной мощности турбины возросло до  $P_p = 23$  МВт, а максимальной до  $P_{max} = 24,2$  МВт.

- Каховской ГЭС – 4 агрегата (ст. №№ 1, 4, 5, 6), значение номинальной мощности турбины составило  $P_p = 54$  МВт, а максимальной –  $P_{max} = 60,5$  МВт.

- Среднеднепровской ГЭС – 6 агрегатов (ст. №№ 3, 4, 5, 6, 7, 8), значение номинальной мощности турбины увеличилось до  $P_p = 49$  МВт, а максимальной до  $P_{max} = 52,8$  МВт.

- Каневской ГЭС – 16 турбин (ст. №№ 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 17, 21, 22, 23, 24), значение номинальной мощности турбины увеличилось до  $P_p = 23,5$  МВт, а максимальной до  $P_{max} = 25$  МВт.

- Кременчугской ГЭС – 5 агрегатов (ст. №№ 2, 3, 7, 8, 9). При модернизации двух агрегатов ст. №№ 2, 3 значение номинальной мощности турбины при расчетном напоре возросло до  $P_p = 62$  МВт; а максимальной мощности при максимальном напоре до  $P_{max} = 63,8$  МВт. При модернизации трех агрегатов ст. №№ 7, 8, 9 значение номинальной  $P_p$  и максимальной  $P_{max}$  мощности турбины составило 64 МВт.

Таблица 1

Название ГЭС	Ввод в эксплуатацию, год	Тип турбины	Количество агрегатов		Параметры				
					До модернизации				Мощность ГЭС, МВт
					Диаметр РК, м	Напор расч.	Мощность турбины, МВт		
уст.	мод.	расч.	макс.						
Киевская ГАЭС	1970–1972	PO75 OPO75	3	0	3	65	43	43	235,5
			3	3	4,65	69,5/65	45,2/38	-/70,5	
Киевская ГЭС	1964–1968	ПЛГ15	20	20	6	7,7	17,2	21,5	429,5
Каневская ГЭС	1972–1975	ПЛГ15	24	16	6	7,4	18,1	19,2	472
Кременчугская ГЭС	1959–1961	ПЛИ20	12	5	8	14,2	58	58	632,9
Среднеднепровская ГЭС	1963–1964	ПЛИ20	8	6	9,3	9,85	45,4	45,4	369,6
Днепропетровская ГЭС-1	1944–1950	PO45	9	6	5,45	34,3	73,6	73,6	2629
Днепропетровская ГЭС-2	1969–1980	ПР/ПЛ40	8	5	6,8	34,3	107	107	884,1
Каховская ГЭС	1950–1956	ПЛИ20	6	6	8	13,8	51,8	58,5	329
Всего			93	63					5981,6

- Днепровской ГЭС-2 – 5 агрегатов (ст. №№ 11, 13, 15, 17, 18), на агрегатах ст. №№ 13, 15 значение номинальной мощности турбины увеличилось до  $P_p = 120$  МВт, а максимальной до  $P_{max} = 125$  МВт. На агрегатах ст. №№ 11, 17, 18 значение номинальной мощности турбины составило  $P_p = 122$  МВт, а максимальной –  $P_{max} = 125$  МВт.

На сегодняшний день в стадии реконструкции находятся:

- 3 РО турбины (ст. №№ 2, 4, 6) Киевской ГАЭС, значение номинальной мощности турбины составит  $P_p = 48,3$  МВт, а максимальной –  $P_{max} = 48,3$  МВт.

- 2 агрегата (ст. №№ 14, 16) для Днепровской ГЭС-2, значение номинальной мощности турбины составит  $P_p = 122$  МВт, а максимальной –  $P_{max} = 125$  МВт.

- 2 турбины (ст. №№ 1, 2) для Среднеднепровской ГЭС, номинальная мощность турбины составит  $P_p = 51,8$  МВт, а максимальная –  $P_{max} = 52,8$  МВт.

- 7 турбин (ст. №№ 13, 14, 15, 16, 18, 19, 20) Каневской ГЭС, значение номинальной мощности турбины составит  $P_p = 23,14$  МВт, а максимальной –  $P_{max} = 25$  МВт.

В настоящее время подписан тендер на реконструкцию 2 турбин (ст. №№ 4, 5) для Кременчугской ГЭС, значения номинальной  $P_p$  и максимальной  $P_{max}$  мощности турбины составит 62 МВт [17].

На сегодняшний день модернизации подлежат агрегаты следующих ГЭС:

- 1 агрегат (ст. № 12) Днепровской ГЭС-2;

- 5 агрегатов (ст. № 1, 6, 10, 11, 12) Кременчугской ГЭС;

- 1 турбина (ст. № 3) Каневской ГЭС.

По проектам реабилитации Каневской ГЭС, Среднеднепровской ГЭС, Днепровской ГЭС-2, Киевской ГАЭС и Кременчугской ГЭС АО «Турбоатом» выступает генеральным подрядчиком проекта «под ключ», в объем обязательств предприятия вошли проектирование, изготовление, поставка оборудования, а также монтаж, пусконаладочные работы и ввод турбин в эксплуатацию [18].

Для всех модернизируемых станций проведен комплекс расчетно-теоретических и научно-исследовательских работ по созданию лопастных систем с улучшенными энерго-кавитационными качествами с минимальным изменением существующих проточных трактов гидротурбин, выполнены прочностные расчеты по новым рабочим колесам и другим элементам проточных частей.

В рамках научно-технического сотрудничества между АО «Турбоатом» и ИПМаш НАН Украины для детального изучения рабочего процесса в модернизированной гидротурбине ПЛ20/3271у Кременчугской ГЭС было проведено численное исследование пространственного течения вязкой несжимаемой жидкости во всех элементах проточной части в широком диапазоне режимов работы. Работы выполнены с помощью программного комплекса *IPMFlow*, разработанного в ИПМаше и хорошо себя

зарекондовавшего при исследованиях течений в энергетических машинах разного типа [19].

Моделирование течения жидкости выполнено на основе численного интегрирования уравнений Рейнольдса с учетом дополнительного члена, содержащим искусственную сжимаемость. Турбулентные эффекты учитывались применением двухпараметрической модели турбулентности Ментера *SST (Menter's Shear Stress Transport)*. Численное интегрирование уравнений проведено с помощью неявной квазимонотонной схемы Годунова второго порядка точности по пространству и времени [20, 21, 22, 23].

Численные исследования выполнены для модели с диаметром рабочего колеса  $D = 1$  м для двух углов установки лопасти рабочего колеса оптимальном и максимальном, при десяти значениях открытия направляющего аппарата и соответствующих им значениях приведенного расхода и частоты вращения, определенных по универсальной характеристике ПЛ 20-В-46.

В результате проведения численного эксперимента получены и проанализированы следующие данные:

- визуализация потока (поля скоростей и давления) в характерных сечениях всех элементов проточной части (рис. 4);

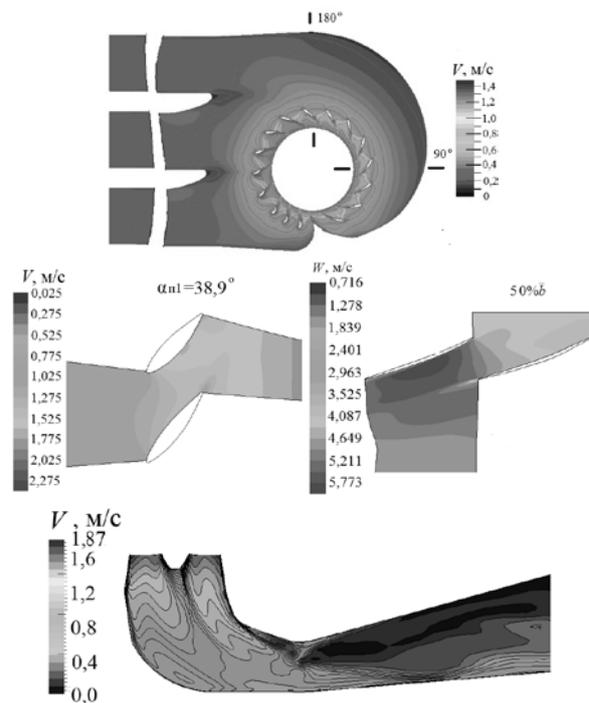


Рис. 4. Визуализация течения в элементах проточной части Кременчугской ГЭС

- выявлены особенности течения во всех элементах проточной части;

- эпюры распределения скоростей и давления вдоль сечений лопаток направляющего аппарата и лопастей рабочего колеса;

- распределение осредненных значений компонент скорости и углов потока в характерных

сечениях проточной части (за направляющим аппаратом, перед и за рабочим колесом);

- интегральные энергетические и кавитационные характеристики проточной части, в том числе значения гидравлических потерь во всех ее элементах.

Анализ полученных результатов демонстрирует благоприятную картину течения во всех элементах проточной части в широком диапазоне режимов. Сравнение расчетных энергетических и кавитационных данных с результатами экспериментальных исследований на гидродинамическом стенде АО «Турбоатом» показывает их хорошее количественное и качественное согласование и подтверждает высокий уровень модернизированной гидротурбины Кременчугской ГЭС (ст. №№ 2, 3) [19].

На универсальных стендах ЭКС-100 и ЭКС-150 в гидротурбинной лаборатории АО «Турбоатом» (рис. 5) для всех модернизируемых станций проведен комплекс селективных и прямо-сдаточных модельных испытаний проточных частей, результаты испытаний подтвердили выполнение контрактных условий по обеспечению значений мощности турбины, достижению средневзвешенного КПД, кавитационных показателей и др. согласно функциональным гарантиям [24].



Рис. 5. Внешний вид универсальных стендов ЭКС-100 и ЭКС-150

Для реконструируемых гидротурбин применены новые конструкторские и технологические решения по рабочим колесам, направляющим аппаратам, другим узлам. В поворотно-лопастных реконструированных гидротурбинах применяется либо конструкция рабочего колеса с разгруженной от высокого давления внутренней полостью корпуса с 4,0 до 0,05–0,1 МПа (Киевская, Каневская, Среднеднепровская ГЭС и др.), либо конструкция экологически чистого рабочего колеса, в которой отсутствует масло в указанной полости (Каховская ГЭС и др.). В механизмах поворота лопаток направляющего аппарата применены втулки подшипников из самосмазывающихся композиционных и полимерных материалов. Особое внимание при модернизации турбин было уделено обеспечению герметичности закрытого

направляющего аппарата по торцам лопаток в зонах их контактов [9, 12].

**Выводы.** В результате модернизации, при минимальных капитальных затратах (20–30 % от полной стоимости нового оборудования) установленная мощность ГЭС Днепровского каскада увеличится примерно на 350,0 МВт, увеличится срок службы гидротурбин до 30–40 лет, межремонтный период – до 5–7 лет, улучшатся энергетические показатели (мощность до 30 %, КПД – до 4 %), а также показатели надёжности, безопасности оборудования и конструкций, безопасности окружающей среды, повысится качество производимой энергии.

#### Список литературы

1. АО «Турбоатом». URL: <http://www.turboatom.com.ua> (дата обращения: 03.05.2019).
2. АО «Турбоатом». URL: <http://www.turboatom.com.ua/ru/clients/products/steam-turbines> (дата обращения: 03.05.2019).
3. Міністерство закордонних справ України. URL: [http://mfa.gov.ua/mediafiles/sites/rei/files/FcPJSCT\\_2017-09-04.pdf](http://mfa.gov.ua/mediafiles/sites/rei/files/FcPJSCT_2017-09-04.pdf) (дата звернення: 03.05.2019).
4. Левченко Е. В., Швецов В. Л., Кожешкурт И. И., Лобко А. Н. Опыт ОАО «Турбоатом» в разработке и модернизации турбин для АЭС. *Вісник Нац. техн. ун-та «ХПІ»*. Сер.: *Енергетичні і теплотехнічні процеси і устаткування*. Харків: НТУ «ХПІ». 2010. № 3. С. 5–11.
5. Швецов В. Л., Галацан В. Н. Работы ОАО «Турбоатом» по модернизации и совершенствованию турбин АЭС. *Вісник Нац. техн. ун-та «ХПІ»*. Сер.: *Енергетичні і теплотехнічні процеси і устаткування*. Харків: НТУ «ХПІ». 2007. № 2. С. 6–10.
6. Субботин В. Г., Левченко Е. В., Швецов В. Л. Паровые турбины ОАО «Турбоатом» для тепловых электростанций. *Вісник Нац. техн. ун-та «ХПІ»*. Сер.: *Енергетичні і теплотехнічні процеси і устаткування*. Харків: НТУ «ХПІ». 2009. № 3. С. 6–17.
7. АО «Турбоатом». URL: <http://www.turboatom.com.ua/ru/press/news/224/186/673> (дата обращения: 03.05.2019).
8. АО «Турбоатом». URL: <http://www.turboatom.com.ua/ru/press/news/6622> (дата обращения: 03.05.2019).
9. АО «Турбоатом». URL: <http://www.turboatom.com.ua/ru/clients/products/hidro-turbines> (дата обращения: 03.05.2019).
10. Субботин В. Г., Левченко Е. В., Ефименко В. Н. Оборудование ОАО «Турбоатом» для гидроэлектростанций Украины: модернизация, реабилитация и перспективы создания новых типов. *Гидроенергетика Украины*. 2009. № 2. С. 33–43.
11. Веремеенко И. С. Полвека поиска и создания – итоги и перспективы развития отечественного гидротурбостроения. *Проблемы машиностроения*. 2003. Т. 6, № 2. С. 4–25.
12. Линник А. В., Хаитов В. Д. Современный уровень и основные направления развития гидротурбостроения в Украине. *Проблемы машиностроения*. 2010. Т. 13, № 1. С. 11–18.
13. Сокол Е. И., Ищенко Г. И., Черкасский А. Ю., Ищенко М. Г., Линник А. В. Технологическое обеспечение изготовления гидравлической турбины для Днестровской ГАЭС. *Вісник Нац. техн. ун-та «ХПІ»*. Сер.: *Технології в машинобудуванні*. Харків: НТУ «ХПІ». 2017. № 26 (1248). С. 5–13.
14. АО «Турбоатом». URL: <http://www.turboatom.com.ua/ru/press/news/224/222/5204> (дата обращения: 03.05.2019).
15. АО «Турбоатом». URL: <http://www.turboatom.com.ua/ru/press/news/224/301/6318> (дата обращения: 03.05.2019).
16. ЧАО «Укргидропроект». URL: [http://uhp.kharkov.ua/sites/default/files/UHP\\_Ref\\_Rus\\_2015.pdf](http://uhp.kharkov.ua/sites/default/files/UHP_Ref_Rus_2015.pdf) (дата обращения: 03.05.2019).
17. АО «Турбоатом». URL: <http://www.turboatom.com.ua/ru/press/news/6548> (дата обращения: 03.05.2019).
18. АО «Турбоатом». URL: <http://www.turboatom.com.ua/content/documents/65/6449/files/2019-01-21.pdf> (дата обращения: 03.05.2019).
19. Русанов А. В., Хорев О. Н., Рябова С. А., Косьянов Д. Ю., Сухоребрий П. Н., Курская Н. М. Математическое моделирование течения жидкости и анализ структуры потока в

- проточной части низконапорной осевой гидротурбины. *Журнал инженерных наук*. 2016. Т. 3, № 2. С. 8–17.
20. Русанов А. В., Косьянов Д. Ю. Численное моделирование течений вязкой несжимаемой жидкости с использованием неявной квазилинейной схемы Годунова повышенной точности. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2009. № 5. С. 4–7.
  21. Русанов А. В., Ершов С. В. *Математическое моделирование нестационарных газодинамических процессов в проточных частях турбомашин: монография*. Харьков: ИПМаш НАН Украины, 2008. 275 с.
  22. Menter F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*. 1994. No. 8. P. 1598–1605.
  23. Menter F. R., Esch T. Advanced Turbulence Modelling in CFX. *CFX Update*. 2001. No. 20. P. 4–5.
  24. Линник А. В., Рябов А. В. Экспериментальный стенд ПАО «Турбоатом» для физического моделирования гидродинамических процессов в проточных частях моделей поворотно-лопастных гидротурбин. *Проблемы машиностроения*. 2014. Т. 14, № 3. С. 11–18.
- References (transliterated)**
1. *JSC "Turboatom"*. Available at: <http://www.turboatom.com.ua> (accessed 03.05.2019).
  2. *JSC "Turboatom"*. Available at: <http://www.turboatom.com.ua/clients/products/steam-turbines> (accessed 03.05.2019).
  3. *Ministerstvo zakordomnykh sprav Ukrainy*. Available at: [http://mfa.gov.ua/mediafiles/sites/rei/files/FcPJSCST\\_2017-09-04.pdf](http://mfa.gov.ua/mediafiles/sites/rei/files/FcPJSCST_2017-09-04.pdf) (accessed 03.05.2019).
  4. Levchenko E. V., Shvetsov V. L., Kozheshkurt Y. Y., Lobko A. N. Опыт ОАО "Turboatom" v razrabotke y modernizatsyyi turbin dlia AES [Experience of OJSC "Turboatom" in the development and modernization of turbines for nuclear power plants]. *Visnyk Nats. tekhn. un-ta "KhPI". Seriya: Enerhetychni i teplotekhnichni protsesy i ustatkuvannya* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy and heat engineering processes and equipment]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2010, no. 3, pp. 5–11.
  5. Shvetsov V. L., Halatsan V. N. Raboty ОАО "Turboatom" po modernizatsyyi y sovershenstvovanyu turbyn AÉS [Works of OJSC "Turboatom" on modernization and improvement of NPP turbines]. *Visnyk Nats. tekhn. un-ta "KhPI". Seriya: Enerhetychni i teplotekhnichni protsesy i ustatkuvannya* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy and heat engineering processes and equipment]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2007, no. 2, pp. 6–10.
  6. Subbotyn V. H., Levchenko E. V., Shvetsov V. L. Parovye turbiny ОАО "Turboatom" dlia teplovykh élektrostantsiy [Steam turbines of Turboatom for thermal power plants]. *Visnyk Nats. tekhn. un-ta "KhPI". Seriya: Enerhetychni i teplotekhnichni protsesy i ustatkuvannya* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy and heat engineering processes and equipment]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2009, no. 3, pp. 6–17.
  7. *JSC "Turboatom"*. Available at: <http://www.turboatom.com.ua/ru/press/news/224/186/673> (accessed 03.05.2019).
  8. *JSC "Turboatom"*. Available at: <http://www.turboatom.com.ua/ru/press/news/6622> (accessed 03.05.2019).
  9. *JSC "Turboatom"*. Available at: <http://www.turboatom.com.ua/clients/products/hidro-turbines> (accessed 03.05.2019).
  10. Subbotin V. G., Levchenko Ye. V., Yefimenko V. N. Oborudovaniye ОАО "Turboatom" dlia gidroelektrostantsiy Ukrainy: modernizatsiya, reabilitatsiya i perspektivy sozdaniya novykh tipov [Equipment of OJSC "Turboatom" for hydroelectric power plants of Ukraine: modernization, rehabilitation and prospects for the creation of new types]. *Gidroenergetika Ukrainy* [Hydropower of Ukraine]. 2009, no. 2, pp. 33–43.
  11. Veremeenko I. S. Polveka poiska i sozdaniya – itogi i perspektivy razvitiya otechestvennogo gidroturbostroyeniya [Half a century of search and creation – the results and prospects of development of the domestic hydro-turbine]. *Problemy Mashinostroyeniya*. 2003, vol. 6, no. 2, pp. 4–25.
  12. Linnik A. V., Khaitov V. D. Sovremennyy uroven' i osnovnyye napravleniya razvitiya gidroturbostroyeniya v Ukraine [The current level and main directions of development of hydroturbation in Ukraine]. *Problemy mashinostroyeniya*. 2010, vol. 13, no. 1, pp. 11–18.
  13. Sokol E. I., Ishchenko G. I., Cherkasskiy A. Yu., Ishchenko M. G., Linnik A. V. Tekhnologicheskoye obespecheniye izgotovleniya gidravicheskoy turbiny dlia Dnestrovskoy GAES [Technological support for the manufacture of a hydraulic turbine for the Dniester PSP]. *Visnyk Nats. tekhn. un-ta "KhPI". Seriya: Tekhnologii v mashinobuduvanni* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Technology in mechanical engineering]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2017, no. 26 (1248), pp. 5–13.
  14. *JSC "Turboatom"*. Available at: <http://www.turboatom.com.ua/ru/press/news/224/222/5204> (accessed 03.05.2019).
  15. *JSC "Turboatom"*. Available at: <http://www.turboatom.com.ua/ru/press/news/224/301/6318> (accessed 03.05.2019).
  16. *PRJSC "Ukrhydroproject"*. Available at: [http://uhp.kharkov.ua/sites/default/files/UHP\\_Ref\\_Rus\\_2015.pdf](http://uhp.kharkov.ua/sites/default/files/UHP_Ref_Rus_2015.pdf) (accessed 03.05.2019).
  17. *JSC "Turboatom"*. Available at: <http://www.turboatom.com.ua/ru/press/news/224/301/6318> (accessed 03.05.2019).
  18. *JSC "Turboatom"*. Available at: <http://www.turboatom.com.ua/content/documents/65/6449/files/2019-01-21.pdf> (accessed 03.05.2019).
  19. Rusanov A. V., Khorev O. N., Ryabova S. A., Kos'yanov D. Yu., Sukhorebryy P. N., Kurskaya N. M. Matematicheskoye modelirovaniye techeniya zhidkosti i analiz struktury potoka v protochnoy chasti nizkonapornoy osevoy gidroturbiny [Mathematical modeling of fluid flow and analysis of the flow structure in the flow part of a low-pressure axial hydraulic turbine]. *Zhurnal inzhenernikh nauk*. 2016, vol. 3, no. 2, pp. 8–17.
  20. Rusanov A. V., Kos'yanov D. Ju. Chislennoe modelirovaniye techeniy vyzkoy neshzimaemoy zhidkosti s ispol'zovaniem neyavnoy kvazimonotonnoy skhemy Godunova povyshennoy tochnosti [Mathematical modeling of fluid flow and analysis of the flow structure in the flow part of a low-pressure axial hydraulic turbine]. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*. 2009, no. 5, pp. 4–7.
  21. Rusanov A. V., Yershov S. V. *Matematicheskoye modelirovaniye nestatsionarnykh gazodinamicheskikh protsessov v protochnykh chastyakh turbomashin* [Mathematical modeling of non-stationary gas-dynamic processes in the flow parts of turbomachines]. Kharkov, IPMash NAN Ukrainy Publ., 2008. 275 p.
  22. Menter F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*. 1994, no. 8, pp. 1598–1605.
  23. Menter F. R., Esch T. Advanced Turbulence Modelling in CFX. *CFX Update*. 2001, no. 20, pp. 4–5.
  24. Linnik A. V., Ryabov A. V. Eksperimental'nyy stand PАО "Turboatom" dlia fizicheskogo modelirovaniya gidrodinamicheskikh protsessov v protochnykh chastyakh modeley povorotno-lopastykh gidroturbin [Experimental stand of PJSC "Turboatom" for the physical modeling of hydrodynamic processes in the flow parts of the Kaplan turbine models]. *Problemy Mashinostroyeniya*. 2014, vol. 14, no. 3, pp. 11–18.

*Поступила (received) 25.04.2019*

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Линник Александр Васильевич (Линник Александр Васильевич, Lypnyk Aleksandr Vasil'evich)** – головний конструктор гідротурбін АТ «Турбоатом»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6779-5528>; e-mail: [office@turboatom.com.ua](mailto:office@turboatom.com.ua)

**Рябова Світлана Олександрівна (Рябова Светлана Александровна, Riabova Svetlana Aleksandrovna)** – кандидат технічних наук, АТ «Турбоатом», інженер-конструктор гідротурбін; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3045-7661>; e-mail: [office@turboatom.com.ua](mailto:office@turboatom.com.ua)