

УДК 621.224-253.5-001

А. В. ЛИННИК, А. В. ДУШИН**ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ ЛОПАСТЕЙ РАБОЧИХ КОЛЕС ПЛ-60 В ВОЗДУХЕ И ВОДЕ**

Определены собственные частоты лопастей семилопастных рабочих колес ПЛ-60, выявлено влияние различных факторов на величины их собственных частот. Выполнен пересчет собственных частот лопастей модельного рабочего колеса на параметры натурального рабочего колеса. Проведен сравнительный анализ экспериментальных собственных частот с собственными частотами, определенными для математической модели лопастей. Получены коэффициенты снижения собственных частот в воде для лопастей рабочих колес ПЛ-60/1075 и ПЛ-60/3160.

Ключевые слова: лопасть рабочего колеса, гидротурбины, модельные испытания, эксперимент, собственные частоты, метод конечных элементов, математическая модель.

Визначено власні частоти лопатей семілопастевих робочих коліс ПЛ-60, виявлено вплив різних чинників на величини їх власних частот. Виконано перерахунок власних частот лопатей модельного робочого колеса на параметри натурального робочого колеса. Проведено порівняльний аналіз експериментальних власних частот з власними частотами, визначеними для математичної моделі лопатей. Отримано коефіцієнти зниження власних частот у воді для лопатей робочих коліс ПЛ-60/1075 і ПЛ-60/3160.

Ключові слова: лопасть робочого колеса, гідротурбіни, модельні випробування, експеримент, власні частоти, метод кінцевих елементів, математична модель.

Blade natural frequencies are determined for seven-blade Kaplan runners ПЛ-60, the influence of various factors on the blade natural frequency values is explored. The model runner blade natural frequencies are scaled up to the prototype runner conditions. A mathematical model is designed to determine natural frequencies by the FEM method for flat shells as well as for elastic solids. A comparative analysis is conducted for experimental natural frequencies and natural frequencies as determined for the mathematical model of the blades. Coefficients of natural frequency reduction in the water are obtained for runners ПЛ-60/1075 and ПЛ-60/3160. The experiment results obtained are of high value in the resolution of the issue of numerical analysis reliability.

Key words: runner blade, hydraulic turbines, model tests, experiment, natural frequencies, finite element method, mathematical model

Введение. Опыт создания мощных гидротурбин свидетельствует о необходимости прогнозных исследований динамического состояния деталей натуральных гидротурбин, так как при этом удается учесть не только влияние присоединенных деталей, но и определить характер форм колебаний в сложных условиях эксплуатации: при нормальной работе, при сбросе нагрузки в процессе регулирования, а также при сбросе нагрузки вплоть до выхода турбины в разгон.

В гидротурбиностроении при проектировании новых машин их проточную часть рассчитывают теоретически, а затем, выполнив ее в виде модели,

испытывают в лаборатории. Результаты испытаний модели учитывают при создании турбины.

На ПАО «Турбоатом» были проведены модельные испытания рабочих колес разных напорных диапазонов, целью которых являлось определение динамических характеристик их лопастных систем.

Эксперимент. Основываясь на методиках, изложенных в [1–5], для моделей семилопастных рабочих колес ПЛ-60 (рис. 1), применяемых для напоров 40–60 м, определены частоты колебаний в воздухе и в воде. Также выявлено влияние на них ряда факторов.

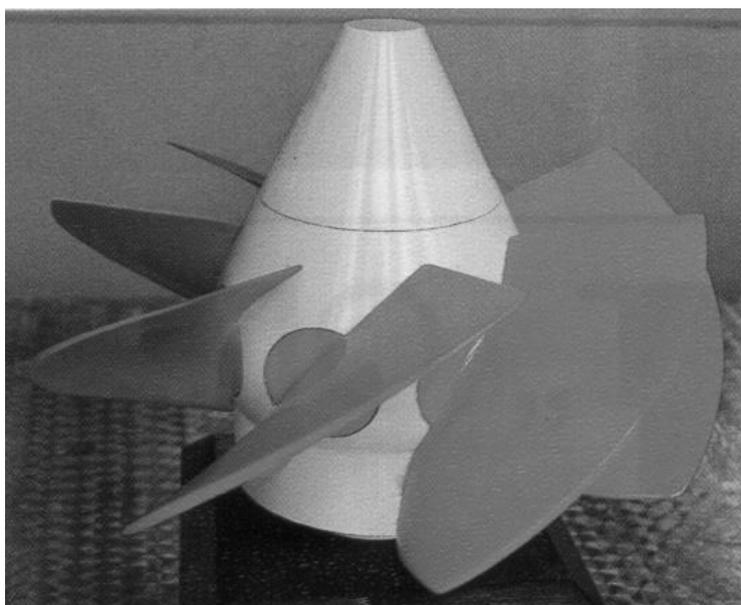


Рис. 1 – Модельное рабочее колесо ПЛ-60/3160

© А. В. Линник, А. В. Душин, 2017

Задача является актуальной, так как из-за достаточно широкого напорного диапазона, рабочие колеса этого типа подвержены широкому спектру динамического возбуждения. Поэтому, во избежание резонансных явлений и возникновения высоких динамических напряжений, требуется анализ динамического состояния лопастной системы рабочего колеса.

Испытательный стенд (рис. 2.) состоит из: траверсы 7, установленной на двух опорах 1; вибростенда 2 типа 4813, который через специальное устройство 3 соединен с втулкой рабочего колеса 5; камеры 4.

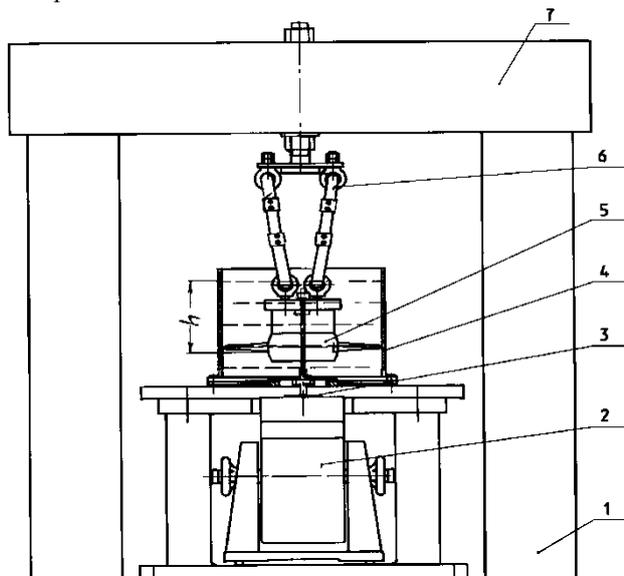


Рис. 2 – Схема испытательного стенда.

Исследуемая модель представляет собой втулку рабочего колеса с закрепленными на ней семью лопастями. Лопасти и втулка соединяются болтовым соединением. Для того, чтобы свести к минимуму влияние собственных частот втулки на собственные частоты лопасти рабочего колеса, между ними прокладываются кольца из бронзовой фольги. Датчик устанавливается на геометрический центр лопасти. Приложив ударную нагрузку, возбуждают колебания лопасти. Полученная форма колебаний соответствует нескольким собственным частотам, которые фиксирует датчик. Затем, последовательно пропустив полученный сигнал через усилитель на анализатор, получают электронную развертку амплитудно-частотной характеристики.

Определение собственных колебаний лопастей рабочих колес в воздухе и в воде проводилось на модельных колесах, диаметром $D_1 = 0,46$ м. Лопасти модели рабочего ПЛ-60/1075 из бронзы марки Бр03Ц7С5Н1 ($E = 9000$ кг/мм², $\rho = 8,7$ г/см³), а ПЛ-60/3160 колеса изготовлены из латуни ЛЦ58Мц2С2 ($E = 10000$ кг/мм², $\rho = 8,5$ г/см³)

Экспериментальное значение частоты определялось как среднее из замеренных величин

при испытании семи лопастей. Каждая частота проверялась четырех-, шестикратным измерением.

Исследовано влияние на собственные частоты фиксированной лопасти числа лопастей, закрепленных во втулке рабочего колеса (одна лопасть, две лопасти, три лопасти, четыре лопасти, пять лопастей, шесть лопастей, семь лопастей).

Обработка результатов эксперимента и сравнение с результатом исследования математической модели.

Пересчет результатов модельных испытаний на условия натурной турбины производится согласно [6]. Частота собственных колебаний натурной лопасти в воздухе:

$$f_n = f_m \cdot \frac{D_m}{D_n} \sqrt{\frac{E_n \cdot \rho_m}{E_m \cdot \rho_n}} \quad (1)$$

где f – частота собственных колебаний;
 D – диаметр рабочего колеса;
 ρ – удельный вес.

Частота собственных колебаний натурной лопасти в воде:

$$f_{\text{вод}} = f_{\text{возд}} \cdot k_n \quad (2)$$

где k_n – коэффициент снижения частоты определяется:

$$\frac{1}{k_n} = \sqrt{1 + \frac{\rho_{\text{ж.н.}} \cdot \rho_{\text{н.}}}{\rho_{\text{ж.м.}} \cdot \rho_{\text{м.}}} \left[\frac{1}{k_m^2} - 1 \right]} \quad (3)$$

Наблюдается хорошее соответствие экспериментальных и расчетных данных для 1-й и 4-й гармоник для лопастей ПЛ-60/1075 и 3-й и 5-й гармоник для лопастей ПЛ-60/3160. Однако, при этом, расчет не выявляет некоторые другие гармоники, которые определены в эксперименте. Для объяснения этого эффекта были поставлены специальные опыты по определению собственных частот:

- отдельной лопасти в зависимости от числа закрепленных во втулке лопастей;
- отдельной лопасти, жестко закрепленной в массивной балке;
- втулки с комплектом из семи лопастей.

В качестве примера на рис. 3 показаны спектрограммы дополнительных испытаний в воздухе для модели рабочего колеса ПЛ-60/1075.

Обращает на себя внимание тот факт, что для исследуемых моделей рабочих колес соответствующие коэффициенты снижения частоты в воде k существенно отличаются друг от друга и от эмпирического ряда коэффициентов снижения частот лопастей ПЛ гидротурбин, рекомендуемых в [2]. Таким образом, влияние воды для каждого типа колес, даже в пределах одного напорного диапазона, следует учитывать индивидуально.

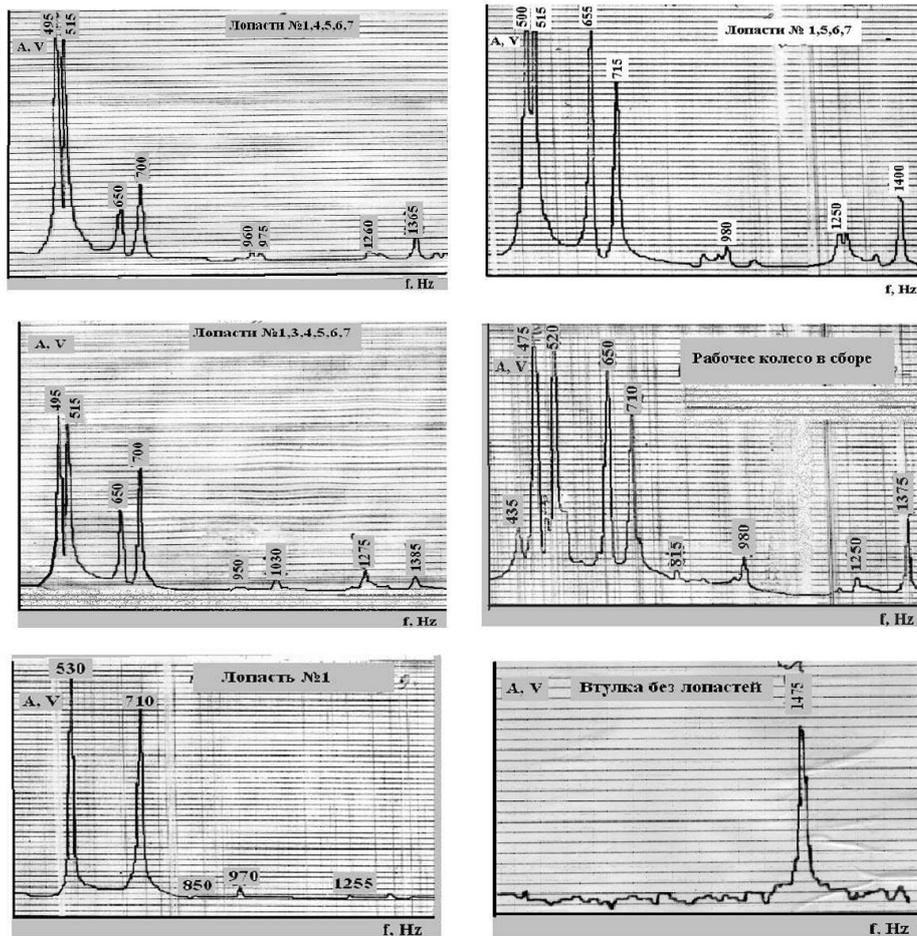


Рис. 3 – Спектрограммы, полученные в ходе проведения опытов для рабочего колеса ПЛ-60/1075.

Дальнейшая обработка результатов эксперимента позволила путем наложения спектрограмм, выделить собственные частоты, присущие именно одной лопасти, и провести сравнительный анализ полученного спектра частот с результатами исследования математических моделей натуральных лопастей рабочих колес. Наложение спектрограмм для

лопастей ПЛ-60/1075 в воздухе приведено на рис. 4, в воде – на рис. 5. Аналогичным образом обработаны результаты эксперимента для лопастей рабочего колеса ПЛ-60/3160. В таблицах 1-4 приведены обработанные результаты эксперимента и результаты математического моделирования.

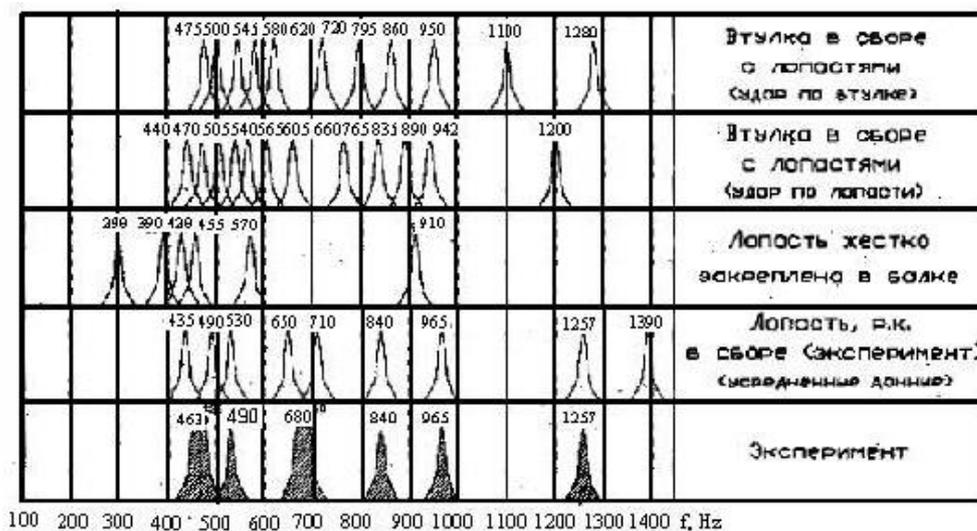


Рис. 4 – Схема спектрограмм собственных частот элементов рабочего колеса ПЛ-60/1075 в воздухе.



Рис. 5 – Схема спектрограмм собственных частот элементов рабочего колеса ПЛ-60/1075 в воде.

Таблица 1 – Собственные частоты в воздухе модельного и натурного рабочего колеса ПЛ-60/1075.

Источник данных	Собственные частоты, Гц									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Эксперимент	435	490	530	650	710	735	840	965	1030	1257
Пересчет по формуле (1)	53,63	60,41	65,34	80,14	87,53	90,62	103,56	118,97	126,99	154,97
МКЭ по теории пологих оболочек [7]	55,83	–	–	79,43	–	–	104,84	–	139,45	152,06
МКЭ Solidworks Simulation [8]	53,22	–	66,58	74,41	–	–	99,42	–	130,48	147,38

Таблица 2 – Собственные частоты в воде модельного и натурного рабочего колеса ПЛ-60/1075.

Источник данных	Собственные частоты, Гц									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Эксперимент	281	351	390	438	486	553	673	712	740	1080
Пересчет по формулам (2, 3)	33,60	42,18	46,93	52,47	58,26	66,63	81,41	85,69	88,93	131,30
МКЭ по теории пологих оболочек [7]	34,98	–	–	52,01	–	–	82,41	–	97,66	128,83
МКЭ Solidworks Simulation [8]	33,34	–	47,82	48,72	–	–	78,15	–	91,38	124,87

Таблица 3 – Собственные частоты в воздухе модельного и натурного рабочего колеса ПЛ-60/3160.

Источник данных	Собственные частоты, Гц									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Эксперимент	387	435	495	553	610	810	878	1080	1132	1284
Пересчет по формуле (1)	44,74	50,29	57,23	63,93	70,52	93,64	101,50	124,86	130,87	148,44
МКЭ по теории пологих оболочек [7]	–	–	56,63	–	73,62	–	101,79	127,18	–	142,51
МКЭ Solidworks Simulation [8]	–	–	54,78	65,24	72,36	–	–	125,55	–	141,58

Таблица 4 – Собственные частоты в воде модельного и натурного рабочего колеса ПЛ-60/3160.

Источник данных	Собственные частоты, Гц									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Эксперимент	225	263	317	345	446	590	665	720	795	890
Пересчет по формулам (2, 3)	25,33	29,64	35,78	38,91	50,60	66,92	75,56	81,39	90,04	100,75
МКЭ по теории пологих оболочек [7]	–	–	35,41	–	52,82	–	75,77	82,90	–	96,72
МКЭ Solidworks Simulation [8]	–	–	34,25	39,71	51,91	–	–	81,84	–	96,09

Выводы. Несовпадение спектра собственных частот колебаний, полученных экспериментально и путем расчета, объясняется тем, что величины первых пяти частот определяются суперпозицией собственных частот втулки в сборе с лопастями и частот, присущих жестко закрепленной лопасти [5].

Для получения коэффициентов снижения собственных частот в воде необходимо выполнить большой объем практических исследований, а также произвести обработку результатов эксперимента. В то же время, при проведении этих экспериментов лопастная система недоступна для проведения других этапов модельных испытаний гидротурбины, а изготовление

дополнительного комплекта лопастей теряет смысл, так как лопасти подвергаются подгонке на каждом из этапов испытаний по определению КПД.

Очевидно, что для определения собственных частот и форм колебаний в воздухе и воде экономически и методически целесообразно проведение исследований с применением расчетных моделей. В настоящее время стандартным методом анализа сложных конструкций является метод конечных элементов. Именно этот метод реализован в большинстве современных программных продуктов. Метод конечных элементов является приближенным численным методом, и, тем самым, имеет некоторую степень погрешности. Однако в нем заложено большое количество параметров, с помощью которых можно управлять степенью точности получаемых результатов: тип конечного элемента, дискретизация сетки и методы решения. Отдельным вопросом является степень адекватности решаемой математической модели ее физическому прототипу с точки зрения моделирования. Поэтому полученные результаты эксперимента являются ценным материалом для решения вопроса о достоверности численного анализа.

Список литературы.

1. Кантор Б. Я. Расчет лопастей высоконапорных поворотных лопастных гидротурбин на машине «Стрела» / Б. Я. Кантор // Энергомашиностроение. – 1963. – № 2. – С. 10–13.
2. Явиц С. Н. Исследование частотных характеристик лопастей рабочих колес ПЛ гидротурбин / С. Н. Явиц // Энергомашиностроение. – 1970. – № 8. – С. 25–28.
3. Широких А. Я. Исследование собственных частот и форм колебаний пластин и лопастей поворотных лопастных гидротурбин в воздухе и воде / А. Я. Широких. // Труды ЦКТИ. – 1986. – № 223.

4. Эдель Ю. У. О влиянии воды на частоту колебаний лопастей и пластин / Ю. У. Эдель, А. П. Степанов // Труды ЛМЗ, Гидротурбиностроение. – Mashgiz. – 1957. – № 4. – С. 138–144.
5. Веремеенко И. С. Исследование собственных частот лопастей рабочего колеса ПЛ-40 в воздухе и в воде. / И. С. Веремеенко Б. Я. Кантор, И. С. Иосевич // Сборник научных трудов ХГПУ. – 1999. – вып. 7.
6. Аносов Ф. В. Модельные исследования гидротурбин / Ф. В. Аносов, А. В. Белобородов, М. В. Гуцин [и др.] // Машиностроение. – 1971. – 285 с.
7. Пупков Л. И. Смешанные конечные элементы в анализе напряженно-деформированного состояния пологих оболочек: диссертация ... кандидата технических наук. Харьков, 1985. – 220 с.
8. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 445 с.

References (transliterated)

1. Kantor, B. Ya. "Raschet lopastei vysokonapornykh povorotno-lopastnykh gidroturbin na mashine «Strela»." *Energomashinostroyeniye*. No. 2. 1963. 10–13. Print.
2. Yavits, S. N. "Issledovaniye chastotnykh kharakteristik lopastei rabochikh kole PL gidroturbin." *Energomashinostroyeniye*. No. 8. 1970. 25–28. Print.
3. Shirokikh, A. Ya. "Issledovaniye sobstvennykh chastot i form kolebaniy plastin i lopastei povorotno-lopastnykh gidroturbin v vozdukh i vode." *Trudy TsKTI*. No. 223. 1986. Print.
4. Edel', Yu. U. and A. P. Stepanov "O vliyaniy vody na chastotu kolebnyy lopastei i plastin" *Trudy LMZ, Gidroturbinostroyeniye*. No. 4. Mashgiz, 1957. 138–144. Print.
5. Veremeenko, I. S., B. Ya. Kantor and I. S. Iosevich "Issledovaniye sobstvennykh chastot lopastei rabocheho kole PL-40 v vozdukh i v vode." *Sbornik nauchnykh trudov KhGPU*. No. 7. Kharkov. 1999. Print.
6. Anosov, F. V., et al. *Model'nyye issledovaniya gidroturbin*. Mashinostroyeniye, 1971. Print.
7. Pupkov, L. I. *Smeshannyye konechnyye elementy v analize napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya pologikh obolochek. Dis...kand. teh. nauk*. Kharkov, 1985. Print.
8. Alyamovskiy, A. A. *SolidWorks Simulation. Kak reshat' prakticheskiye zadachi*. SPb.: BKhV-Peterburg, 2012. Print.

Поступила (received) 08.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження власних частот лопатей робочих коліс ПЛ-60 у повітрі та воді / О. В. Линник, О. В. Душин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – № 42(1264). – С. 38-42. – Бібліогр. 8 назв. - ISSN 2411-3441.

Исследование собственных частот лопастей рабочих колес ПЛ-60 в воздухе и воде / А. В. Линник, А. В. Душин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – № 42(1264). – С. 38-42. – Бібліогр. 8 назв. – ISSN 2411-3441.

Study of natural blade frequencies of runners PL-60 in the air and in the water / O. V. Lynnyk, O. V. Dushin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydrounits. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 42 (1264). – P. 38-42 – Bibliogr.: 8. – ISSN 2411-3441.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Линник Александр Васильевич – ПАТ Турбоатом, головний конструктор гідротурбін СКБ ТГМ, м. Харків; тел.: (057) 349-20-61; e-mail lynnyk@turboatom.com.ua.

Линник Александр Васильевич – ПАО Турбоатом, главный конструктор гидротурбин СКБ ТГМ, г. Харьков; тел.: (057) 349-20-61; e-mail lynnyk@turboatom.com.ua.

Lynnyk Oleksandr Vasylyovych – PJSC Turboatom Chief Designer of Hydravlic Turbines, Special Design Engineering Departament THM, Kharkov; tel.: (057) 349-20-61; e-mail lynnyk@turboatom.com.ua.

Душин Олексій Вікторович – ПАТ Турбоатом, провідний інженер-конструктор відділу розрахунків на міцність СКБ ТГМ; м. Харків.

Душин Алексей Викторович – ПАО Турбоатом, ведущий инженер-конструктор отдела прочностных расчетов СКБ ТГМ; г. Харьков.

Dushin Oliksiy Victorovich – PJSC Turboatom, Lead Design Engineer at strengths Analysis Design Office, Kharkov.